



EFEITOS DA ESTABILIZAÇÃO DA EMBOCADURA DO CANAL DE  
SERNAMBETIBA E REPLENIMENTO DO ESTOQUE DE AREIA NA  
MORFODINÂMICA DA PRAIA DA MACUMBA – RJ

Gabriele dos Santos Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro  
Outubro de 2019

EFEITOS DA ESTABILIZAÇÃO DA EMBOCADURA DO CANAL DE  
SERNAMBETIBA E REPLENIMENTO DO ESTOQUE DE AREIA NA  
MORFODINÂMICA DA PRAIA DA MACUMBA – RJ

Gabriele dos Santos Silva

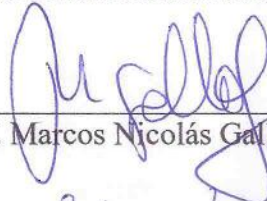
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:



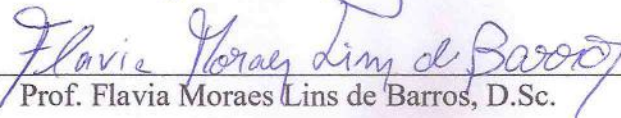
---

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.



---

Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc.



---

Prof. Flavia Moraes Lins de Barros, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
OUTUBRO DE 2019

Silva, Gabriele dos Santos

Efeitos da estabilização da embocadura do canal de Sernambetiba e replenimento do estoque de areia na morfodinâmica da praia da Macumba - RJ / Gabriele dos Santos Silva – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIX, 118 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 116-118.

1. Morfodinâmica. 2. Erosão costeira. 3. Modelagem Computacional. I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

"Seja quem você for, seja qualquer posição social que você tenha na vida, nível altíssimo ou mais baixo, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá."

(Ayrton Senna)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que estiveram comigo presentes nesses últimos anos de caminhada me apoiando e me incentivando todos os dias.

Agradeço, em especial, à minha mãe, Ana Coutinho, por todo o seu apoio incondicional e por me ensinar a importância dos estudos e da independência na vida de uma mulher. E, às minhas irmãs, Gleiciane e Galdiana, por sempre me apoiarem e acreditarem no meu potencial.

Ao meu orientador, Paulo Colonna Rosman, por toda paciência, dedicação e por todos os ensinamentos como professor e como pessoa. Sempre serei grata por todo acolhimento.

A Larissa Maia, minha amiga e companheira sempre presente em todos os momentos nessa caminhada.

Aos meus colegas de trabalho da área da Engenharia Costeira por todas as inúmeras contribuições e por compartilhar momentos tão felizes durante todo meu mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

EFEITOS DA ESTABILIZAÇÃO DA EMBOCADURA DO CANAL DE  
SERNAMBETIBA E REPLENIMENTO DO ESTOQUE DE AREIA NA  
MORFODINÂMICA DA PRAIA DA MACUMBA – RJ

Gabriele dos Santos Silva

Outubro/2019

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Oceânica

A compreensão da morfodinâmica praial é essencial para o gerenciamento costeiro, tendo em vista que as alterações no meio físico interferem diretamente no transporte de sedimentos. Este trabalho tem como objetivo analisar as respostas morfodinâmicas da praia da Macumba à implantação de guia-correntes na embocadura do canal de Sernambetiba e replenimento do estoque de areia da praia da Macumba, considerando um ano de condições típicas e um ano posterior a ocorrência de El Niño muito forte. Para isso foi utilizado o modelo morfodinâmico do SisBaHiA<sup>®</sup>. Os resultados indicaram que o padrão de circulação das correntes é determinado pela maré astronômica na região dos rios e canal, pela incidência de ondas na linha de costa e pela maré meteorológica no resto do domínio de modelagem. No cenário sem intervenções e com um clima de ondas de um ano pós El Niño, a região mais vulnerável a incidência de ondas é aquela localizada à oeste da pedra de Itapuã, apresentando as maiores taxas de erosão, enquanto que a região da embocadura do canal de Sernambetiba permanece assoreada durante todo o período de simulação. Com as intervenções propostas houve uma diminuição de um terço nas taxas de erosão e uma diminuição de 0,5 m para 0,2 m do assoreamento no cenário com o clima de ondas de um ano posterior ao El Niño. No cenário com intervenções e um clima de ondas típico, as taxas de erosão também diminuíram significativamente, atingindo 0,8 m, e não houve acumulação de sedimentos na embocadura do canal de Sernambetiba.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EFFECTS OF THE SERNAMBETIBA CHANNEL MOUTH STABILIZATION  
AND SAND NOURISHMENT IN THE MORPHODYNAMICS OF  
THE MACUMBA BEACH – RJ

Gabriele dos Santos Silva

October/2019

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Ocean Engineering

Understanding beach morphodynamics is essential for coastal management, given that changes in the physical environment directly affect sediment transport. This study aims to analyze the morphodynamic responses of Macumba beach to the implementation of jetties in the mouth of the Sernambetiba channel and beach nourishment of Macumba beach, considering a year of typical conditions and a year after the occurrence of very strong El Niño. For this, the morphodynamic model of the SisBaHiA<sup>®</sup> was used. The results indicated that the current circulation pattern is determined by the astronomical tide in the river and channel region, the incidence of waves in the shoreline and the meteorological tide in the rest of the modeling domain. In the scenario without intervention and wave climate of one year after El Niño, the most vulnerable region to wave incidence is that located west of the Itapuã rock, with the highest erosion rates, while the region of Sernambetiba canal mouth remains silted throughout the simulation period. With the proposed interventions there was a one-third reduction in erosion and a reduction of 0,5 m to 0,2 m in siltation rates in the scenario with wave climate of one year after El Niño. In the scenario with intervention and typical wave climate, erosion rates also decreased significantly, reaching 0,8 m, and there was no sediment accumulated at the mouth of the Sernambetiba channel.

## SUMÁRIO

|  |     |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS .....   | XI  |
| LISTA DE TABELAS.....  | XIX |
| 1 INTRODUÇÃO .....   | 1   |
| 1.1 MOTIVAÇÃO.....   | 2   |
| 1.2 OBJETIVOS .....  | 2   |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 4   |
| 2.1 ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE .....                              | 4   |
| 2.2 RELAÇÃO ENTRE O CLIMA DE ONDAS E A MORFOLOGIA DE PRAIAS .....      | 7   |
| 2.3 ALTERNATIVAS PARA PROTEÇÃO COSTEIRA.....                           | 11  |
| 2.3.1 Replenimento do estoque de areia de praias .....                 | 13  |
| 2.3.1.1 Métodos de replenimento de praias.....                         | 14  |
| 2.3.1.2 Volume de preenchimento da praia .....                         | 15  |
| 2.3.2 Muros ( <i>seawalls</i> ).....                                   | 17  |
| 2.3.3 Paredes verticais ( <i>bulkheads</i> ).....                      | 19  |
| 2.3.4 Revestimentos.....   | 20  |
| 2.3.5 Sacos geotêxteis.....  | 21  |
| 2.3.6 Quebra-mares.....  | 21  |
| 2.3.7 Espigões .....   | 23  |
| 2.3.8 Guia-correntes.....  | 25  |
| 2.4 EROÇÃO COSTEIRA: O CASO DA PRAIA DA MACUMBA.....                   | 27  |
| 2.5 A MODELAGEM COMO FERRAMENTA NO ESTUDO AMBIENTAL .....              | 30  |
| 2.5.1 Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA® .....        | 31  |
| 2.5.1.1 Modelo Hidrodinâmico.....                                      | 32  |
| 2.5.1.2 Modelo de Propagação de Ondas.....                             | 35  |
| 2.5.1.3 Modelo de Transporte de Sedimentos com Ondas e Correntes ..... | 36  |



|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3     | METODOLOGIA .....  | 39 |
| 3.1   | ÁREA DE ESTUDO .....                                       | 39 |
| 3.2   | SISTEMA DE MODELAGEM COMPUTACIONAL - SisBaHiA® .....       | 41 |
| 3.3   | MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO .....                         | 41 |
| 3.3.1 | Domínio de Interesse .....                                 | 41 |
| 3.3.2 | Malha de Discretização.....                                | 44 |
| 3.3.3 | Batimetria.....  | 46 |
| 3.3.4 | Rugosidade ( $\epsilon$ ) .....                            | 48 |
| 3.4   | MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....                              | 48 |
| 3.4.1 | Cenários de modelagem.....                                 | 49 |
| 3.4.2 | Dados Ambientais.....                                      | 49 |
| 3.5   | MODELAGEM DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS .....                     | 54 |
| 3.5.1 | Dado Ambiental.....  | 54 |
| 3.5.2 | Modelos de propagação de onda.....                         | 55 |
| 3.6   | MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....                 | 58 |
| 3.6.1 | Dado Ambiental.....  | 58 |
| 3.6.2 | Modelo de transporte de sedimentos .....                   | 58 |
| 3.7   | REPLENAMENTO DO ESTOQUE DE AREIA DA PRAIA DA MACUMBA ..... | 60 |
| 3.8   | DIMENSIONAMENTO DE GUIA-CORRENTES.....                     | 60 |
| 3.9   | CALIBRAÇÃO DOS MODELOS .....                               | 62 |
| 4     | RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                              | 63 |
| 4.1   | MODELAGEM DA PRAIA DA MACUMBA NA SITUAÇÃO ATUAL .....      | 63 |
| 4.1.1 | Padrões de circulação hidrodinâmica .....                  | 64 |
| 4.1.2 | Evolução morfológica.....                                  | 71 |
| 4.1.3 | Variação de perfis de praia após a ressaca.....            | 80 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.2   | MODELAGEM DA PRAIA DA MACUMBA NA SITUAÇÃO PROJETADA EM UM ANO COM O CLIMA DE ONDAS PÓS EL NIÑO MUITO FORTE ..... | 84  |
| 4.2.1 | Padrões de circulação hidrodinâmica .....  | 84  |
| 4.2.2 | Evolução morfológica.....  | 89  |
| 4.2.3 | Variação de perfis de praia após a ressaca.....  | 93  |
| 4.3   | MODELAGEM DA PRAIA DA MACUMBA NA SITUAÇÃO PROJETADA EM UM ANO COM O CLIMA DE ONDAS TÍPICO DE INVERNO .....       | 97  |
| 4.3.1 | Padrões de circulação hidrodinâmica .....  | 97  |
| 4.3.2 | Evolução morfológica.....  | 102 |
| 4.3.3 | Variação de perfis de praia no instante com maior velocidade da corrente .....                                   | 110 |
| 5     | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....  | 114 |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 116 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Principais parâmetros que compõem um trem de ondas em propagação em águas profundas. ....  | 4  |
| Figura 2. Representação esquemática do fenômeno de refração de ondas (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2002). ....  | 6  |
| Figura 3. Representação esquemática do fenômeno de difração de ondas (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2002). ....  | 6  |
| Figura 4. Terminologia da praia e seus limites (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2008). ....  | 7  |
| Figura 5. Perfil de praia característico de ondas de tempo bom e ondas de tempestade. Percebe-se que, em estado de equilíbrio, a praia experiente todas as condições no período de um ano, sendo um processo cíclico (Adaptado de USACE, 2012). Entende-se MHW como nível médio das preamares e MLW como nível médio das baixa-mares. .... | 9  |
| Figura 6. Características morfológicas dos seis estágios da praia (Adaptado de SHORT & JACKSON, 2013). ....  | 10 |
| Figura 7. Alternativas para proteção costeira (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2008). ....   | 12 |
| Figura 8. Representação da linha de costa antes e depois da alimentação artificial de praia em condições de tempo bom (à esquerda) e tempestade (à direita) (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019). ....   | 13 |
| Figura 9. Três tipos de perfil de praias alimentadas artificialmente (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2008). ....  | 17 |
| Figura 10. Representação da linha de costa antes e depois do muro de contenção em condições de tempo bom (à esquerda) e tempestade (à direita) (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019). ....  | 18 |
| Figura 11. Representação da linha de costa antes e depois da parede vertical em condições de tempo bom, à esquerda, e tempestade, à direita (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019). ....   | 19 |
| Figura 12. Representação da linha de costa antes e depois do enrocamento em condições de tempo bom (à esquerda) e tempestade (à direita) (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019). ....  | 20 |
| Figura 13. Representação de projeto de construção de sacos geotêxteis para proteção costeira (SIGMAGEOSYTHETICS, 2019). ....   | 21 |
| Figura 14. Representação da linha de costa antes e depois dos quebra-mares emerso e submerso em condições de tempo bom (à esquerda) e tempestade (à direita) (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019). ....  | 23 |
| Figura 15. Adaptação da linha de costa para direção do transporte litorâneo (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2008). ....   | 24 |
| Figura 16. Representação da linha de costa antes e depois da construção de espigões (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019). ....   | 25 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 17. Exemplo do uso de guia-correntes na estabilização de canais de maré em Cape Cod Bay, Massachusetts (Fonte: NEW ENGLAND BOATING, 2019). .....   | 26 |
| Figura 18. Comparação entre os anos de El Niño e La Niña (Adaptado de GGWEATHER, 2019). Destaca-se que o El Niño muito forte observado no ano de 2016. ....   | 29 |
| Figura 19. Foto de satélite da praia da Macumba (GOOGLE EARTH, 13/09/2017). Nota-se a incidência de ondas de sudeste (SE) na praia da Macumba em um ano pós El Niño muito forte durante o inverno no Rio de Janeiro e a destruição da linha de costa a oeste da pedra. ....   | 29 |
| Figura 20. Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Tela Inicial. ....  | 31 |
| Figura 21. Diagrama de Shields modificado utilizado pelo SisBaHiA <sup>®</sup> , conforme mostrado em ROSMAN (2019). ....   | 37 |
| Figura 22. Área de estudo (GOOGLE EARTH, 2019). ....  | 39 |
| Figura 23. Contornos utilizados para delimitação do domínio de modelagem para o cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes.....   | 42 |
| Figura 24. Contornos utilizados para delimitação do domínio de modelagem para os cenários pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes.....   | 43 |
| Figura 25. Malha de discretização do domínio de modelagem para a praia da Macumba com as informações resumidas dos dados da malha de discretização em elementos finitos para cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes. ....   | 44 |
| Figura 26. Malha de discretização do domínio de modelagem para a praia da Macumba, com as informações resumidas dos dados da malha de discretização em elementos finitos para os cenários pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes. Visualização em maiores detalhes da malha de elementos finitos da região de interesse. .... | 45 |
| Figura 27. Batimetria utilizada pelo modelo no domínio de modelagem no cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes, referenciada à Carta Náutica 1620.....   | 46 |
| Figura 28. Batimetria utilizada pelo modelo no domínio de modelagem para os cenários pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes, referenciada à Carta Náutica 1620. ....  | 47 |
| Figura 29. Séries temporais de elevação da maré astronômica combinada à maré meteorológica para o ano de 2014.....  | 50 |
| Figura 30. Séries temporais de elevação da maré astronômica combinada à maré meteorológica para o ano de 2017.....  | 51 |
| Figura 31. Rosa dos ventos de inverno para o ano de 2014 e 2017, respectivamente. O eixo radial indica a frequência de ocorrência de velocidades e direções: o eixo polar indica a direção do vento e a escala de cor e a intensidade da velocidade.....  | 52 |
| Figura 32. Destaque para pontos onde se tem entrada de vazão no modelo. ....  | 53 |
| Figura 33. Clima de ondas considerado para a modelagem de propagação de ondas baseado nos dados gerados para o inverno de 2014. O eixo circular indica a direção da onda em graus azimutais e os eixos radiais indicam o percentual de ocorrência de ondas na faixa de alturas ou períodos indicados.....   | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 34. Clima de ondas considerado para a modelagem de propagação de ondas baseado nos dados gerados para o inverno de 2017. O eixo circular indica a direção da onda em graus azimutais e os eixos radiais indicam o percentual de ocorrência de ondas na faixa de alturas ou períodos indicados.....   | 55 |
| Figura 35. Grade numérica do modelo de propagação de ondas M-ESSE.....  | 56 |
| Figura 36. Grade numérica do modelo de propagação de ondas M-SE e M-SSE, respectivamente.....   | 57 |
| Figura 37. Grade numérica do modelo de propagação de ondas M-S e M-SSW, respectivamente.....  | 57 |
| Figura 38. Setores de distribuição de sedimentos no domínio de modelagem. Setor dos rios e canal de Sernambetiba (linha vermelha), setores na linha costeira (linha azul) e setor da porção oeste e mar aberto (linha marrom).....  | 59 |
| Figura 39. Mapa gerado a partir do modelo de propagação de ondas com ondas propagando na direção su-sudeste, azimute 158°, período de pico de 15s, altura significativa de ondas em águas profundas de 3,8m ( $H_e$ equivalente a 0,14% do tempo) no nível mínimo do mar.....   | 61 |
| Figura 40. Mapa de estações de controle para gravação e exibição de resultados temporais dos modelos, com informações gravadas a cada trinta minutos.....   | 63 |
| Figura 41. Circulação hidrodinâmica dependente da maré astronômica no canal de Sernambetiba e rios. Nota-se que durante a enchente temos níveis maiores e durante a vazante os valores de níveis são menores, mostrando a correlação entre a velocidade da corrente e a maré astronômica.....   | 65 |
| Figura 42. Circulação hidrodinâmica dependente da ação das ondas na linha de costa da praia da Macumba.....   | 65 |
| Figura 43. Circulação hidrodinâmica dependente da maré meteorológica na região próxima da fronteira aberta. Pode-se observar que quando temos os maiores valores da velocidade da corrente, temos também os maiores valores da maré meteorológica, confirmando a predominância da maré meteorológica no padrão de circulação das correntes.....   | 66 |
| Figura 44. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de sizígia para o cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 2 m. Observa-se baixa magnitude das correntes na região da praia da Macumba, com velocidades em torno de 0,1 m/s. Em alguns pontos específicos a intensidade das correntes aumenta, não ultrapassando 0,4 m/s..... | 67 |
| Figura 45. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de sizígia para o cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 2 m. Nesse instante, pode-se observar que as maiores velocidades são na região oeste do domínio de modelagem em locais que a corrente encontra obstáculos. Comparando com a BM da quadratura                     |    |

|   |    |
|---|----|
| (Figura 44) nota-se que na sizígia as intensidades das correntes são muito maiores.<br>.....  | 68 |
| Figura 46. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de quadratura para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 1,4 m. ....   | 69 |
| Figura 47. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de quadratura para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 2 m. ....   | 70 |
| Figura 48. Variação da batimetria no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2017 para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento. ....  | 72 |
| Figura 49. Distribuição das correntes na praia da Macumba no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2017 para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Destaca-se a formação de longshore currents nos 62 dias de simulação. ....   | 73 |
| Figura 50. Variação da batimetria no dia 92 de simulação para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento. ....  | 74 |
| Figura 51. Evolução morfológica nas estações denominadas Leste da Pedra de Itapuã, Oeste da Pedra de Itapuã, Praia próxima a Pedra do Pontal e Embocadura do Canal de Sernambetiba para o período de 92 dias de simulação, iniciando em 01/07/2017, para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Valores negativos indicam assoreamento, enquanto valores positivos indicam erosão. .... | 75 |
| Figura 52. Altura, direção e período das ondas nos 31 dias de simulação, num período representativo do mês de julho de 2017. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade. ....   | 77 |
| Figura 53. Altura, direção e período das ondas entre 32 dias e 62 dias de simulação, num período representativo do mês de agosto de 2017. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade. ....  | 78 |
| Figura 54. Altura, direção e período das ondas entre 63 dias e 92 dias de simulação, num período representativo do mês de setembro de 2017. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade. ....  | 79 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 55. Série temporal de elevação e módulo da velocidade no período de simulação para o ano de 2017. Nota-se o pico no módulo de velocidade representando o evento da maior ressaca no período simulado.....  | 80 |
| Figura 56. Variação do perfil da seção transversal correspondente a estação denominada Embocadura do Canal de Sernambetiba para o cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca. ....      | 81 |
| Figura 57. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Oeste da Pedra de Itapuã para o cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.....                         | 81 |
| Figura 58. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Leste da Pedra de Itapuã para o cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.....                         | 82 |
| Figura 59. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Praia próxima a Pedra do Pontal para o cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.....                       | 82 |
| Figura 60. Isolinhas de cota de fundo (m) para o período simulado referente ao ano de 2017 para o cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. As linhas de cor azul representam o instante de 1 dia antes do fenômeno de ressaca e as linhas vermelhas representam o instante de 5 dias após a ressaca. .... | 83 |
| Figura 61. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de sizígia para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 2 m.....                     | 85 |
| Figura 62. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de sizígia para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 10 s, e altura significativa 2 m.....                  | 86 |
| Figura 63. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de quadratura para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 1,4 m.....                | 87 |
| Figura 64. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de quadratura para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda  |    |

|  |    |
|--|----|
| característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 113.78 graus, período de pico 8 s, e altura significativa 1,6 m.....  | 88 |
| Figura 65 Variação da batimetria no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2017 para o cenário com intervenções com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento. ....   | 90 |
| Figura 66. Distribuição das correntes na praia da Macumba no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2017 para o cenário com intervenções com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. ....   | 91 |
| Figura 67. Variação da batimetria no dia 92 de simulação para o cenário com intervenções com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia e com um clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento. ....   | 92 |
| Figura 68. Evolução morfológica nas estações denominadas Leste da Pedra de Itapuã, Oeste da Pedra de Itapuã, Praia próxima a Pedra do Pontal e Embocadura do Canal de Sernambetiba para o período de 92 dias de simulação para o cenário com intervenções com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Valores negativos indicam assoreamento, enquanto valores positivos indicam erosão. .... | 93 |
| Figura 69. Variação do perfil da seção transversal correspondente a estação denominada Embocadura do Canal de Sernambetiba para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca. ....   | 94 |
| Figura 70. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Oeste da Praia de Itapuã para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.....  | 94 |
| Figura 71. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Leste da Praia de Itapuã para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.....  | 95 |
| Figura 72. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Praia próxima a Pedra do Pontal para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.....  | 95 |
| Figura 73. Isolinhas de cota de fundo (m) para o período simulado referente ao ano de 2017 para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. As linhas de cor azul   |    |



|  |     |
|--|-----|
| representam o instante de 1 dia antes do fenômeno de ressaca e as linhas vermelhas representam o instante de 5 dias após a ressaca. ....   | 96  |
| Figura 74. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de sizígia para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 1,4 m. ....                                   | 98  |
| Figura 75. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de sizígia para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 1,4 m. ....                                 | 99  |
| Figura 76. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de quadratura para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 10 s, e altura significativa 1,2 m. ....                               | 100 |
| Figura 77. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de quadratura para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Onda característica de S, modelo de propagação M-S: azimute 180 graus, período de pico 10 s, e altura significativa 1,4 m. ....                                    | 101 |
| Figura 78. Variação da batimetria no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2014 para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento. ....                   | 103 |
| Figura 79. Distribuição das correntes na praia da Macumba no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2014 para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. ....  | 104 |
| Figura 80. Variação da batimetria no dia 92 de simulação para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento. ....   | 105 |
| Figura 81. Evolução morfológica nas estações denominadas Leste da Pedra de Itapuã, Oeste da Pedra de Itapuã, Praia próxima a Pedra do Pontal e Embocadura do Canal de Sernambetiba para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Valores negativos indicam assoreamento, enquanto valores positivos indicam erosão. .... | 106 |
| Figura 82. Altura, direção e período das ondas nos 31 dias de simulação, num período representativo do mês de julho de 2014. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade. ....  | 107 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 83. Altura, direção e período das ondas entre 32 dias e 62 dias de simulação, num período representativo do mês de agosto de 2014. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade. ....   | 108 |
| Figura 84. Altura, direção e período das ondas entre 63 dias e 92 dias de simulação, num período representativo do mês de setembro de 2014. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade. ....   | 109 |
| Figura 85. Série temporal de elevação e módulo da velocidade no período de simulação para o ano de 2014. Nota-se o pico no módulo de velocidade representando o dia com a maior onda no período simulado. ....   | 110 |
| Figura 86. Variação do perfil da seção transversal correspondente a estação denominada Embocadura do Canal de Sernambetiba para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias após o dia com as maiores ondas. .... | 111 |
| Figura 87. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Oeste da Pedra de Itapuã para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias após o dia com as maiores ondas. ....                   | 111 |
| Figura 88. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Leste da Pedra de Itapuã para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias após o dia com as maiores ondas. ....                   | 112 |
| Figura 89. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Praia próxima a Pedra do Pontal para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias após o dia com as maiores ondas. ....                 | 112 |
| Figura 90. Isolinhas de cota de fundo (m) para o período simulado referente ao ano de 2014 para o cenário pós-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. As linhas de cor azul representam o instante de 1 dia antes e as linhas vermelhas representam o instante de 5 dias após o dia com as maiores ondas. ....                | 113 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1. Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, $\varepsilon$ (Adaptado de ABBOT & BASCO, 1989). .....                      | 48 |
| Tabela 2. Constantes harmônicas da FEMAR com seus respectivos valores de período (s), amplitudes (m) e fases (rad) para a estação Recreio dos Bandeirantes – RJ..... | 50 |
| Tabela 3. Vazões permanentes e áreas de drenagem das sub-bacias hidrográficas.....   | 53 |
| Tabela 4. Classes de sedimentos.....   | 58 |

# 1 INTRODUÇÃO

A morfodinâmica da praia refere-se às interações dinâmicas entre a incidência e arrebentação das ondas e a resposta da linha de costa em uma variedade de escalas temporal e espacial. Essa interação se torna mais complexa com a adição de forçantes como maré, vento, morfologia preliminar da praia, geologia e as características de sedimentos.

As praias arenosas são um dos ambientes mais dinâmicos da zona costeira. Uma praia arenosa é definida como depósito de material sedimentar desagregado e em contato direto com o mar. Além dos aspectos turísticos e recreativos, as praias têm como principal função a dissipação de energia das ondas.

As praias sofrem processos de erosão, sedimentação ou permanecem estáveis dependendo do balanço sedimentar do sistema, ou seja, o balanço entre o volume de sedimentos suprido e disponível e o volume de sedimentos retirados do sistema pelo transporte longitudinal e transversal à costa, resultantes principalmente da ação de ondas e correntes costeiras.

Diversos estudos voltados à dinâmica de praias demonstram que o problema de erosão costeira se tornou um fenômeno mundial. O estudo realizado pela União Geográfica Mundial (UGM) analisou a evolução da linha de costa mundial entre 1972 e 1984 e concluiu que 70% das costas sedimentares apresentam erosão costeira, 10% das praias possuem assoreamento e entre 20% a 30% das praias revelam costas estáveis (BIRD, 1993).

No Brasil o cenário não é diferente. Estudos relatam que grande parte das praias arenosas no país apresentam um comportamento erosivo. No estado do Rio de Janeiro, a praia de Sernambetiba, popularmente conhecida como praia da Macumba, é frequentemente mencionada na mídia quando o assunto é destruição na linha de costa causada por eventos extremos do mar.

O estudo realizado na praia da Macumba por Rosman (2000) relaciona o problema de erosão ao déficit de sedimentos na praia, decorrentes de atividades de dragagens, com as ressacas características do período de inverno. Diante dos relatos de destruição de infraestruturas urbanas e perda da linha de costa, a discussão gira em torno de soluções utilizando obras de proteção costeira.

Obras de proteção costeira destinam-se a criar uma área protegida contra a ação das ondas geradas pelo vento e correntes, preservando as praias e protegendo as propriedades costeiras. Outra função é estabilizar canais de navegação situados em embocaduras costeiras e criar uma bacia portuária contra a agitação ondulatória (ALFREDINI & ARASAKI, 2005). A definição

do tipo de obra mais adequado deve ser baseada em estudos detalhados dos processos costeiros, considerando as condições oceanográficas, meteorológicas e morfológicas da região de interesse, configurando um estudo morfodinâmico.

Nesse contexto, o presente estudo apresenta uma avaliação do comportamento morfodinâmico da praia da Macumba, por meio de modelagem computacional, com o intuito de aumentar o conhecimento dos processos hidro-sedimentológicos. Ademais, o trabalho também traz uma análise e discussão de uma possível solução para erosão costeira a partir da construção de guia-correntes no canal de Sernambetiba e replenimento do estoque de areia da praia da Macumba.

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

O presente trabalho justifica-se pela importância socioeconômica da praia da Macumba. A região oeste do estado do Rio de Janeiro apresenta um crescimento populacional desde a década de 70, ainda sendo considerada uma área de expansão imobiliária. A região é utilizada como área de lazer e prática de esportes por moradores de toda a cidade, além da presença de turistas atraídos pelas belezas naturais da região.

A ampliação do conhecimento do processo morfodinâmico da praia da Macumba e do canal de Sernambetiba é fundamental para tomada de decisões relativas à gestão e planejamento costeiro. A partir do estudo destes processos costeiros, torna-se possível analisar e até propor obras de engenharia costeira que tem como objetivo estabilizar a embocadura do canal de Sernambetiba e recuperar a praia da Macumba. Assim, o estudo representa uma contribuição técnica-científica, servindo como subsídio para importantes decisões relacionadas aos problemas verificados na área de estudo.

## **1.2 OBJETIVOS**

O trabalho tem como objetivo principal analisar a evolução morfológica da praia da Macumba em resposta à construção de guia-correntes no canal de Sernambetiba e replenimento do estoque de areia da praia da Macumba, considerando um ano de condições típicas e um ano posterior a ocorrência de El Niño muito forte.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Realizar análise de diagnóstico dos processos hidro-sedimentológicos da praia da Macumba em cenário atual, i.e., pré-replenimento da praia e construção de guia-correntes.

- Realizar análise de prognóstico da solução proposta nesse trabalho em condição de cenário futuro, i.e., pós-replenimento do estoque de areia da praia e construção de guia-correntes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção abordam-se os conceitos importantes para o estudo como as ondas superficiais de gravidade, a relação entre o clima de ondas e a morfologia de praia, alternativas de intervenções para proteção costeira, o fenômeno de erosão costeira na praia da Macumba e por fim, a utilização de modelagem computacional como ferramenta para compreensão de fenômenos ambientais.

### 2.1 ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE

As ondas de gravidade constituem os principais condicionantes da morfologia e dos processos costeiros. A transferência de energia (*momentum*) do vento para a superfície do oceano constitui o principal mecanismo de geração das ondas de gravidade, sendo influenciadas pela intensidade e duração da ação do vento e pela extensão da área de atuação do vento sobre a superfície da água (pista). O vento ao incidir sobre a água gera uma deformação na superfície, cuja intensidade caracteriza a forma e o comportamento das ondas, sendo função do balanço entre a força geradora (vento) e a força restauradora (gravidade).

As ondas recém-formadas dentro da área de geração de ondas são denominadas vagas, e quando essas se propagam em águas profundas (dispersão) tendem a se tornar mais simétricas e regulares, sendo denominadas ondulação. Isso se deve as interferências construtivas ou destrutivas entre os trens de ondas com diferentes velocidades. A Figura 1 apresenta os principais parâmetros das ondas.

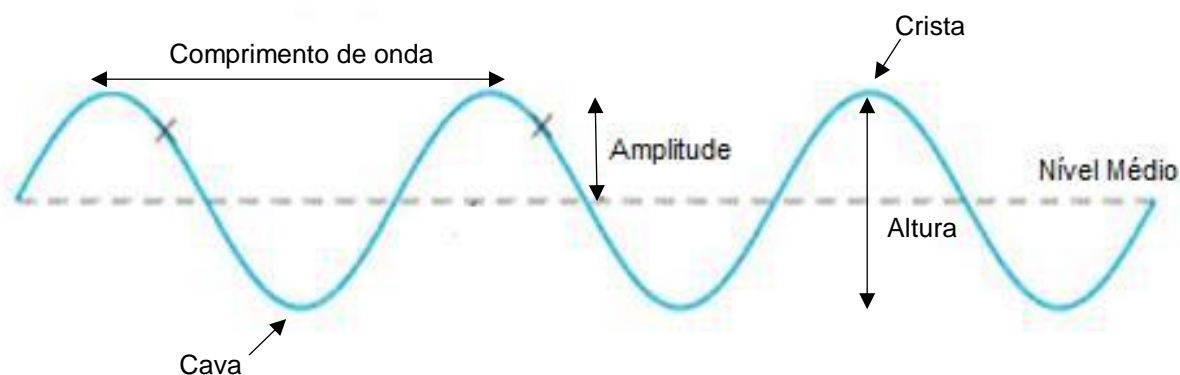


Figura 1. Principais parâmetros que compõem um trem de ondas em propagação em águas profundas.

A propagação de ondas em água profundas até águas rasas envolve a interferência da topografia do fundo na geometria das ondas. Por definição, entende-se que a condição de águas profundas é aquela em que a profundidade local é maior que a metade do comprimento de onda e a de

águas rasas quando a profundidade é menor que 4% do comprimento de onda (VALENTINI & ROSMAN, 2010).

Em águas rasas, as ondas progressivamente perdem a velocidade, diminuem seu comprimento e aumentam sua altura. O atrito com o fundo induz a maior inclinação da crista em relação a sua base, resultando na quebra da onda. A quebra da onda ocorre devido à velocidade das partículas na crista exceder a velocidade de fase, com a crista se projetando para frente. Pode-se assumir que a quebra da onda ocorre quando a altura da onda na arrebentação ( $H_b$ ) é igual a aproximadamente 78% da profundidade no ponto da quebra da onda ( $d_b$ ) (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2008), como demonstrado na Equação (1).

$$H_b = 0.78d_b \quad (1)$$

O processo de arrebentação e quebra da onda representa a principal forma de dissipação de energia na zona costeira, gerando correntes e mobilizando sedimentos. Grande parte dessa energia dissipada durante a quebra das ondas é distribuída ao longo da costa através do fluxo longitudinal e transversal de água e sedimentos.

Durante a quebra da onda, a onda gera um intenso movimento rotacional da água, levando a formação de vórtices que atuam sobre o fundo que podem suspender e transportar sedimentos. Esse movimento rotacional da partícula da água é medido através da velocidade orbital do fundo, sendo paralela à crista das ondas e está diretamente relacionada à movimentação e transporte de sedimentos.

Dentre os principais fenômenos que interferem na propagação das ondas estão a refração, difração e reflexão. A refração das ondas ocorre em águas rasas devido a velocidade de propagação da onda diminuir à medida que a profundidade também diminui, havendo uma interação da onda com o fundo. Dessa forma, a parte da onda que está em águas mais profundas se propaga com velocidades maiores que a parte que está em águas mais rasas, modificando a direção da onda à medida em que a profundidade diminui, gerando um alinhamento das cristas paralelo às isóbatas (Figura 2).



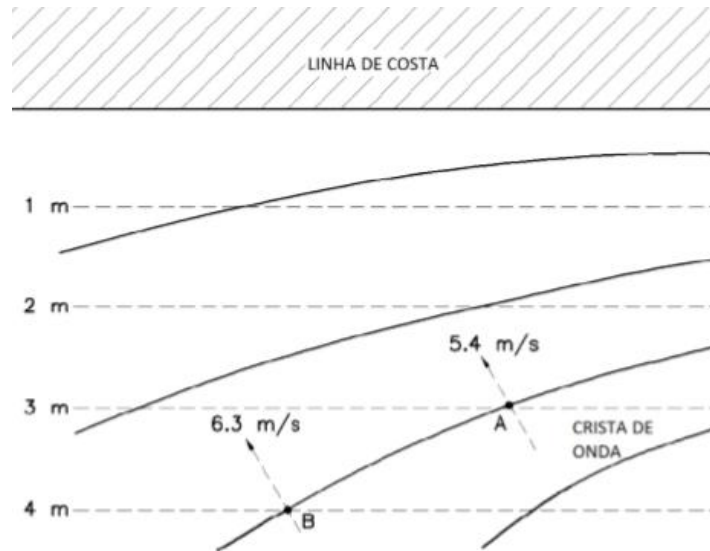


Figura 2. Representação esquemática do fenômeno de refração de ondas (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2002).

A difração é a transferência lateral de energia ao longo da crista da onda, dos pontos de maior energia para os pontos de menor energia, gerando uma mudança da trajetória da onda devido ao seu encontro com uma barreira física, como guia-correntes ou quebra-mares. Nesse fenômeno a onda se deforma devido à transferência lateral de energia ao longo da crista da onda, variando a orientação e altura da onda e gerando uma região de sombra atrás da estrutura (Figura 3).

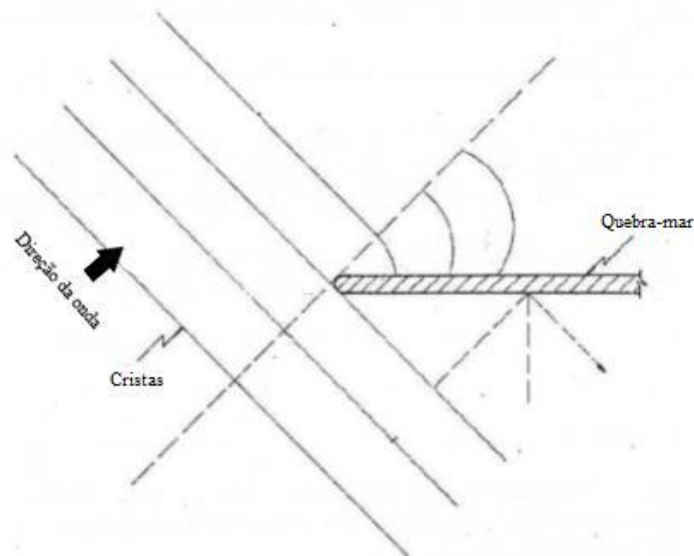


Figura 3. Representação esquemática do fenômeno de difração de ondas (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2002).

O fenômeno de reflexão ocorre quando a onda ao encontrar uma barreira sofre reflexão da sua energia e, dependendo do ângulo de incidência da onda, as ondas refletidas podem se sobrepor as ondas incidentes, aumentando assim a altura da onda.

Outro fator que exerce influência na hidrodinâmica costeira é o excesso de fluxo de quantidade de movimento gerado pelas ondas de gravidade sobre águas rasas, denominado tensão de radiação. Isso ocorre devido a passagem das ondas que gera um transporte de massa no mesmo sentido da propagação da onda e quando a massa é transportada existe uma quantidade de movimento associada a essa.

O excesso de momento representa uma grandeza vetorial, onde a componente x representa o sentido do fluxo das ondas e a componente y representa o sentido paralelo à crista das ondas. O cálculo desses componentes permite inferir o fluxo potencial do fluido no litoral e assim estimar o transporte de sedimentos nos eixos transversal (x) e longitudinal (y) à costa.

## 2.2 RELAÇÃO ENTRE O CLIMA DE ONDAS E A MORFOLOGIA DE PRAIAS

A zona costeira é caracterizada pela grande complexidade e o dinamismo pertinentes aos elementos que a compõem e suas interações. As constantes modificações na linha de costa dependem de fatores como a energia da onda, amplitude e oscilação do nível do mar, características topo-batimétricas e sedimentares da plataforma continental e orientação da linha de costa. Assim, a alteração em quaisquer destes fatores poderá gerar progradação ou recuo da linha de costa. A Figura 4 apresenta a terminologia da praia e seus limites.

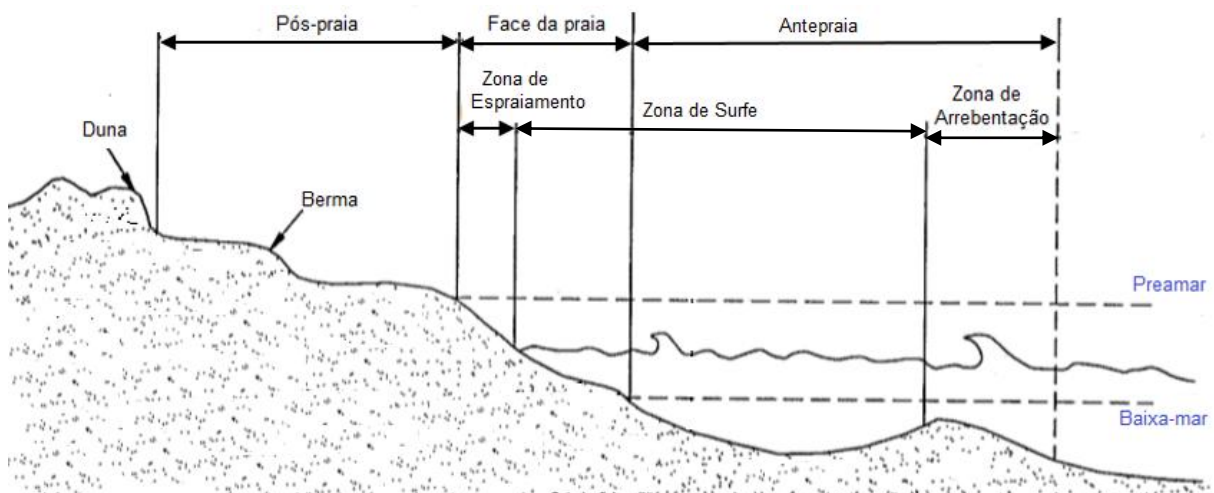


Figura 4. Terminologia da praia e seus limites (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2008).

As ondas que incidem obliquamente à linha de costa geram correntes longitudinais que se movem entre a zona de arrebentação e a costa, transportando o sedimento em suspensão ou arrastam o sedimento junto ao fundo. O transporte de sedimentos que ocorre paralelamente a linha de costa é denominado transporte longitudinal ou litorâneo e sua magnitude depende da hidrodinâmica da zona de arrebentação, da disponibilidade e granulometria de sedimentos.

Além desse, outro transporte fundamental na variação da morfologia de praias é o transporte transversal. O transporte transversal é responsável pelo transporte de sedimentos entre a praia e o mar. Esse é função da razão entre a altura das ondas ( $H$ ) e o seu comprimento ( $L$ ), em uma relação chamada de esbeltez da onda ( $H/L$ ). Assim, quanto maior a esbeltez da onda, maior a sua capacidade de transportar sedimentos para águas profundas. Dito isto, fica evidente que as ondas de tempestade possuem maior esbeltez, uma vez que possuem maiores alturas e menores comprimentos de onda.

Durante as condições de tempo bom, período em que as ondas apresentam um caráter construtivo, o perfil de praia apresenta um maior volume e largura devido a migração de sedimentos em direção ao continente e deposição no ambiente emerso (*onshore*). Em contrapartida, durante os períodos de tempestade, o perfil de praia perde o volume de sedimentos para a antepraia devido a formação de barras submersas que tendem a migrar em direção ao oceano (*offshore*). A variação do perfil de praia em relação às condições do tempo está ilustrada na Figura 5.

Em locais que possuem o arco praial em equilíbrio dinâmico, a oscilação da incidência de ondas de tempestades e ondas de tempo bom com diferentes direções geram apenas um desequilíbrio sazonal, provocando a perda de sedimentos em uma das extremidades da praia e o acúmulo na outra extremidade. Entretanto, uma mudança significativa no clima de ondas com alteração na direção das ondas ou um aumento de frequência e intensidade de tempestades ocasionará um rompimento do equilíbrio dinâmico do fluxo de sedimentos da praia, podendo gerar um processo erosivo.

Eventos de erosão ou progradação da linha de costa são decorrentes de gradientes de transporte longitudinal, isto é, a variação da taxa de transporte litorâneo ao longo da costa. O gradiente de transporte longitudinal positivo exprime o aumento da magnitude do transporte ao longo da costa, o que significa que a quantidade de sedimentos que sai de cada trecho da linha de costa é maior que quantidade que adentra, como consequência, ocorrem erosão e recuo da linha de

costa. Em contrapartida, o gradiente de transporte longitudinal negativo exprime que a quantidade de sedimentos que entra é superior ao que sai da célula, fazendo com que haja deposição de sedimentos e assim, avanço da linha de costa.

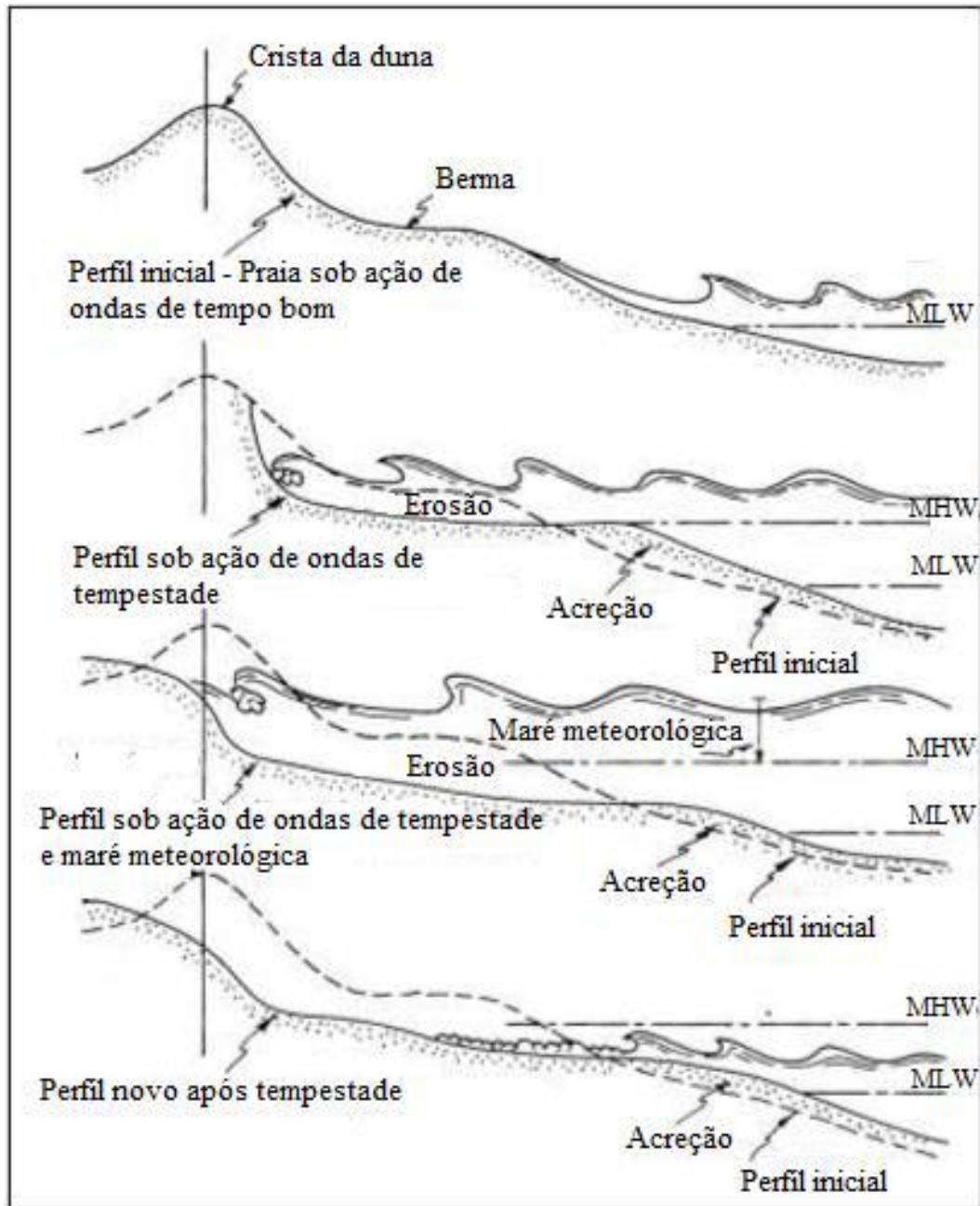


Figura 5. Perfil de praia característico de ondas de tempo bom e ondas de tempestade. Percebe-se que, em estado de equilíbrio, a praia experiente todas as condições no período de um ano, sendo um processo cíclico (Adaptado de USACE, 2012). Entende-se MHW como nível médio das preamares e MLW como nível médio das baixas-mares.

Em estudos morfológicos, Wright & Short (1984) classificaram seis estágios morfodinâmicos das praias de acordo com a forma de deposição de sedimentos e os processos hidrodinâmicos. Esses estágios variam entre os dois extremos, refletivo e dissipativo, e possui quatro estágios

intermediários. Vale ressaltar que uma mesma praia pode oscilar entre um estágio e outro, conforme condições oceanográficas distintas (Figura 6).

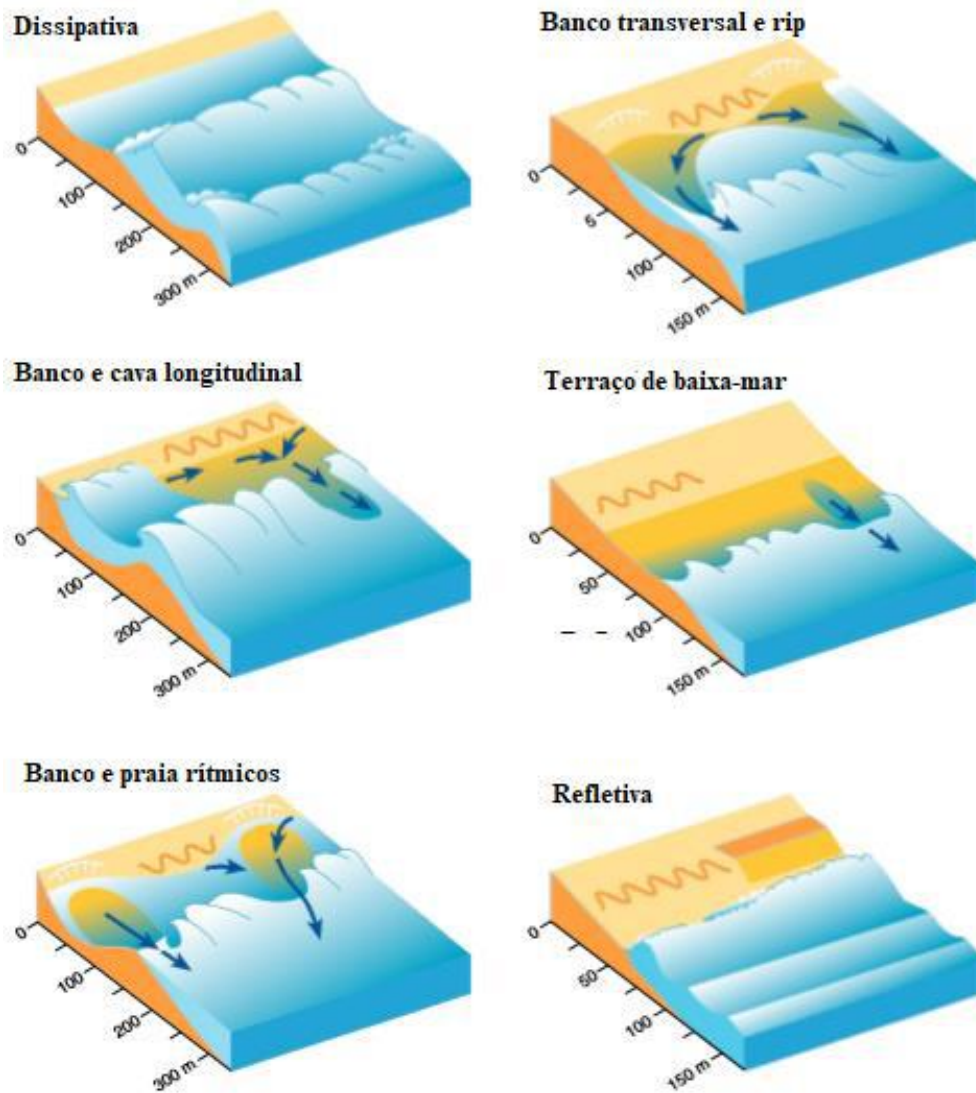


Figura 6. Características morfológicas dos seis estágios da praia (Adaptado de SHORT & JACKSON, 2013).

Locais que apresentam plataformas mais inclinadas, com gradiente batimétrico mais acentuado e sedimentos mais finos, apresentam uma menor tendência de dissipação de energia de eventos extremos, enquanto que regiões com plataformas com batimetria mais plana e sedimentos com granulometria mais grossa apresentam uma capacidade de dissipação de energia mais elevada devido aos processos de quebra e refração de ondas em águas rasas.

Praias que apresentam sua linha de costa orientada em ângulos retos à incidência de ondas tendem a serem mais impactadas negativamente pela energia das ondas do que praias abrigadas ou orientadas transversalmente à ortogonal da onda. Dessa maneira, as ondas incidem nas praias com diferentes características, diferindo principalmente na altura, direção e período.

Sendo assim, o conhecimento do clima de ondas é fundamental para o dimensionamento das obras costeiras, por serem o fator predominante na determinação da geometria e composição das praias, além de atuar significativamente no planejamento e design de portos, canais e estruturas costeiras.

### **2.3 ALTERNATIVAS PARA PROTEÇÃO COSTEIRA**

Os eventos extremos, ou ressacas, que atingem a zona costeira normalmente causam danos mediante dois mecanismos: alagamentos costeiros ou danos pela incidência de ondas. Esses mecanismos são, geralmente, decorrentes da combinação de maré meteorológica, que gera um aumento do nível médio do mar, maré astronômica de sizígia e ondas de tempestade.

As intervenções utilizadas para defesa e estabilização costeira objetivam reter ou reconstruir sistemas naturais como as falésias, dunas, áreas alagadas e praias, ou proteger estruturas urbanas na zona costeira. De acordo com o *Coastal Engineering Manual* (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2008), as cinco estratégias utilizadas para proteção costeira de eventos extremos são denominadas acomodação, proteção, alimentação de praia e retração da linha de costa (Figura 7).

As alternativas de acomodação e recuo tem como objetivo restabelecer a faixa dinâmica de praia que foi tomada pela urbanização por meio da elevação da cota da linha urbana ou retração da linha urbana, respectivamente. Essa estratégia é sempre recomendável, quando possível, devido aos benefícios relacionados ao potencial de lazer e turismo, além da segurança das benfeitorias e moradias urbanas.

A estratégia de proteção visa proteger a linha costeira dos eventos extremos, normalmente, por meio de obras de estruturas fixas que tem como função refletir, direcionar ou dissipar a energia das ondas. Essas estruturas podem ser aderidas à linha de costa (paralelamente ou perpendicularmente) ou serem dispostas ao largo (de forma emersa ou submersa).

As obras com estruturas fixas podem ser classificadas em obras destinadas à blindagem costeira contra eventos extremos, ou seja, reforço da linha de costa por meio de muros, revestimentos e paredes verticais, e obras voltadas à moderação da ação das ondas e transporte de sedimentos, como quebra-mares, espigões, soleiras submersas e guia-correntes.

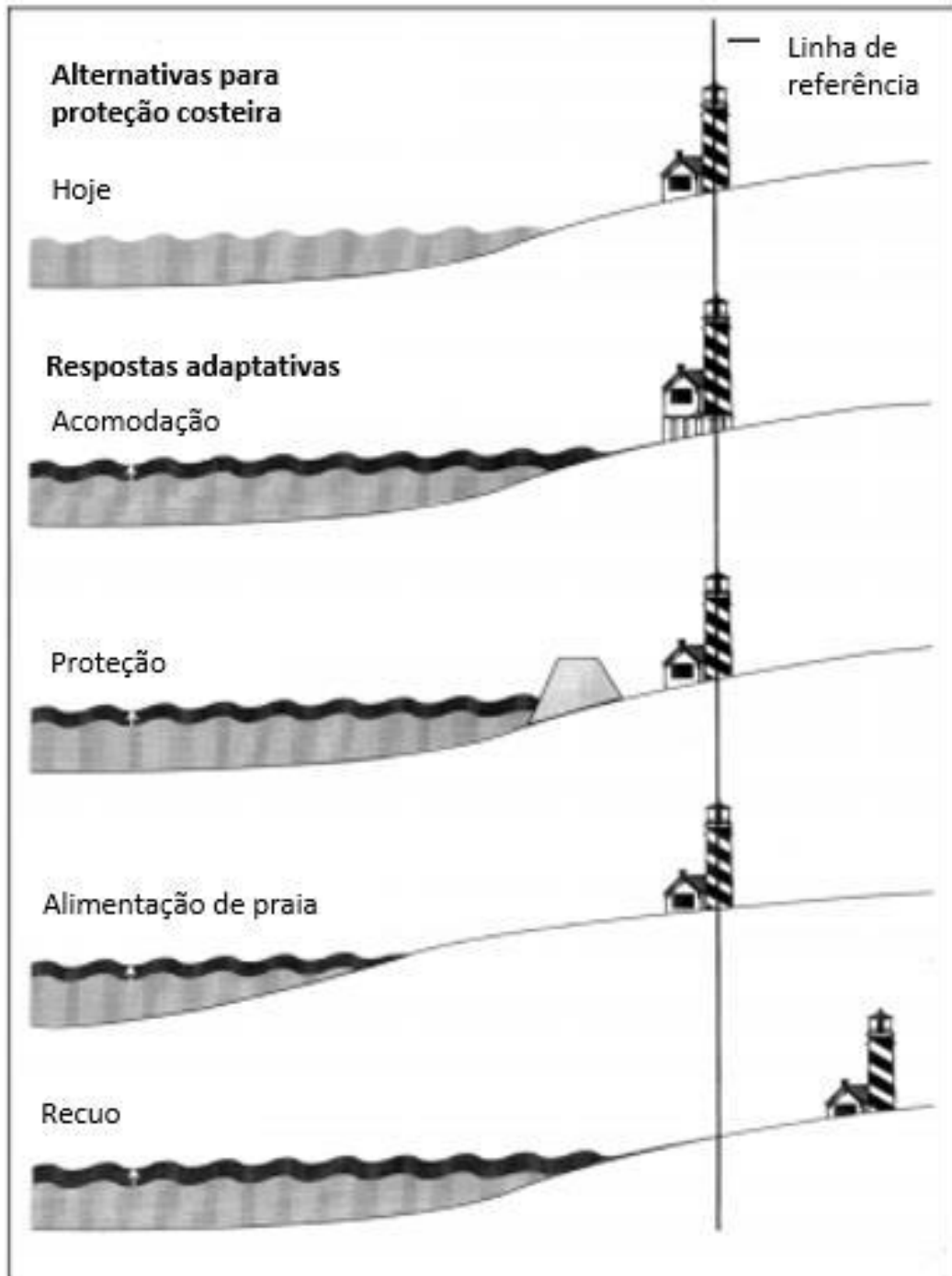


Figura 7. Alternativas para proteção costeira (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2008).

A alimentação artificial de praia é utilizada em casos voltados à restauração da praia através do replenimento da praia por meio de material sedimentar. Essa estratégia será bem definida e explicada ainda nessa seção.

Outra opção que pode ser escolhida é a abstenção. Essa estratégia pode ser escolhida quando a análise de custos de reparos de danos mostrar-se com melhor custo-benefício frente as demais alternativas. Além dessas, também é válido citar que a combinação dessas alternativas com

novas tecnologias já vem sendo estudado, como por exemplo, a utilização de saco geotêxtil, arrecifes artificiais e dunas alimentadoras.

### 2.3.1 Replenimento do estoque de areia de praias

O replenimento do estoque de areia de praias pode ser definido como uma colocação, por meios artificiais, de materiais arenosos em locais imersos ou emersos adequados à obtenção de um determinado perfil de praia (ou mesmo de duna) favorável à dissipação de energia das ondas e a uso recreacional, simulando situações naturais.

As principais funções do replenimento do estoque de areia da praia incluem proporcionar uma melhor proteção às estruturas em terra contra eventos extremos, aumentar o potencial de ocupação da praia e, conseqüentemente, aumentar o potencial de exploração turística e rentabilização econômica. A Figura 8 ilustra a variação da linha de costa a partir da alimentação artificial em condições de tempo bom e de tempestade.

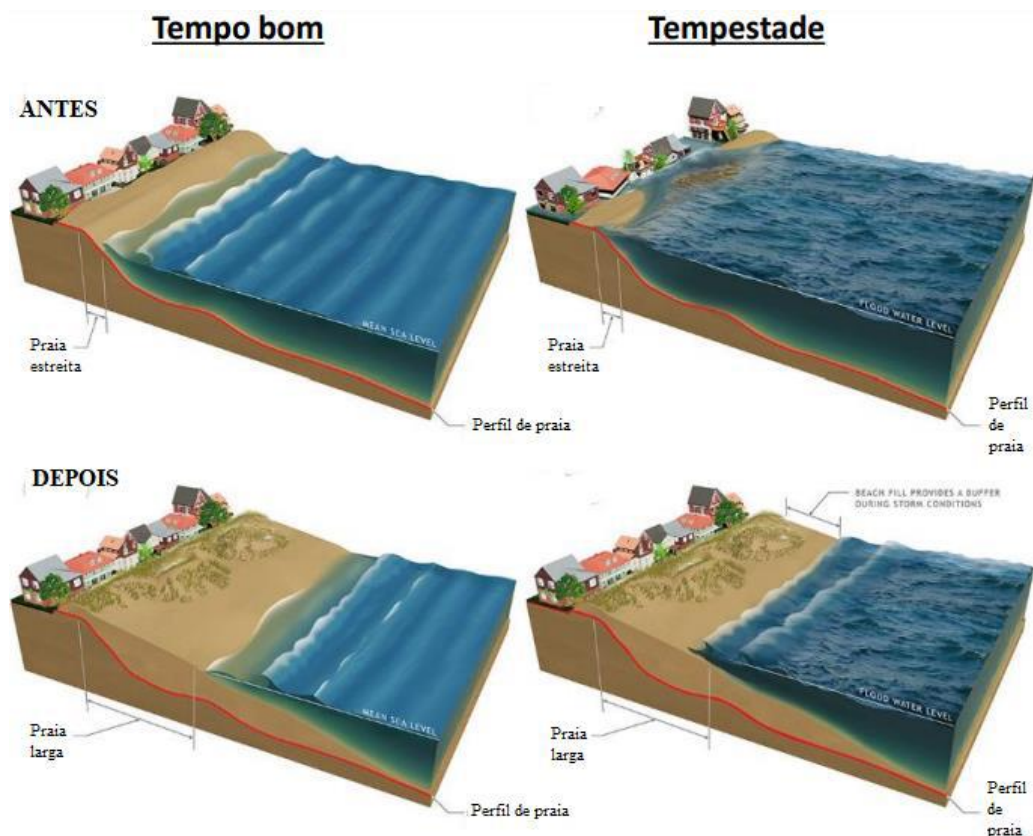


Figura 8. Representação da linha de costa antes e depois da alimentação artificial de praia em condições de tempo bom (à esquerda) e tempestade (à direita) (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019).



Dentre as técnicas de alimentação artificial de praias, destacam-se a construção do perfil na zona emersa da praia (berma e dunas) e o despejo de sedimentos na parte submersa da praia (barras submersas). Na construção do perfil na zona emersa da praia espera-se que o espraio das ondas reconstrua o perfil da praia. Essa técnica é a mais utilizada devido à disponibilidade e limitações dos equipamentos usados para realizar a alimentação, além de ser uma forma mais econômica. O despejo de sedimentos na parte submersa da praia, zona mais ativa, não potencializa o valor turístico das praias pois os resultados não são tão visíveis como os da técnica citada anteriormente.

Em relação as fontes para aquisição de sedimentos, essas podem ser divididas em quatro categorias gerais: terrestres, de lagunas com praias barreira (restingas), costa fora e canais de navegação. Cada categoria tem aspectos favoráveis e desfavoráveis, no entanto, a escolha da fonte ideal para o replenimento depende mais das características individuais da praia a ser engordada do que do tipo da fonte.

Vale ressaltar que a alimentação artificial é uma forma de diminuir o desequilíbrio de um sistema, entretanto essa técnica não é a solução final para o problema de erosão costeira, sendo muitas vezes fundamental que se construa estruturas em conjunto, aumentando a vida útil do projeto. Além do mais, o replenimento de areia de praia deve ser acompanhado por monitoramento e se necessário deve-se fornecer periodicamente mais material sedimentar devido às incertezas na previsão de eventos extremos e ao caráter altamente dinâmico do equilíbrio praiar.

Os aspectos negativos relacionados à essa estratégia são: possíveis problemas como a introdução de areia em canais próximos ao local alimentado, destruição e modificação do habitat natural de algumas espécies durante e após as atividades de dragagem utilizadas para realizar a alimentação e manutenção recorrente em um curto período.

### **2.3.1.1 Métodos de replenimento de praias**

Os sistemas de dragagem são os mais utilizados para o replenimento de praias, classificando-se em dois grupos principais: meio de transporte terrestre e meio de transporte hidráulico.

A alimentação por transporte terrestre ocorre por lançamento direto do sedimento sobre a praia, onde esse é transportado da fonte até a praia através de caminhões. Sendo assim, a jazida deve estar localizada no continente e próxima da praia a ser alimentada. Esse método é limitado à alimentação de pequenas áreas devido à baixa capacidade de carga de um caminhão.

A operação de dragagem pode ser mecânica ou hidráulica (sucção). Na dragagem mecânica é comum utilizar dragas com batelões, onde o material dragado é recolhido em batelões, alcançando a zona a ser alimentada, descarregando o sedimento. Na dragagem hidráulica, os meios de transporte são variados, dependendo de alguns fatores como: a distância entre a fonte de material e a área de deposição final, tipo de draga hidráulica e as condições oceanográficas.

Outra técnica que pode ser utilizada é a transposição de areias (*sand-bypass*). Nesse método, os sedimentos são transportados contornando obstáculos à corrente de deriva litorânea, ou seja, o objetivo primordial é manter ou reinstalar o fluxo de sedimentos nessa corrente, reequilibrando o sistema.

### 2.3.1.2 Volume de preenchimento da praia

O cálculo do volume de sedimentos necessários para a alimentação artificial depende de alguns parâmetros, como o clima de ondas e a relação granulométrica entre o sedimento nativo e o sedimento utilizado na alimentação. O clima de ondas influencia diretamente no local da profundidade de fechamento e, portanto, influencia o volume necessário para alimentação. A relação granulométrica é responsável pela diferença entre a inclinação do perfil de praia nativo e do perfil de praia alimentado.

A utilização de sedimentos mais grossos que o natural gera um perfil de praia mais inclinado, sendo necessário um volume de areia menor para se realizar o replenimento. Para formação de um perfil mais suave que o original é necessário um volume de sedimento maior, utilizando sedimentos com granulometria similar ou menor que o natural.

Nos casos em que o sedimento utilizado na alimentação apresenta o mesmo tamanho de grão que o sedimento da praia natural, o cálculo do volume pode ser realizado pela Equação (2):

$$V = \Delta y_0 (h_* + B) \quad (2)$$

Onde:

$V =$  Volume de sedimento por m de praia ( $m^3/m$ )

$\Delta y_0 =$  Avanço da linha de costa (m)

$h_* =$  Profundidade de fechamento (m)

$B =$  Altura da berma (m)

De acordo com o *Coastal Engineering Manual*, o cálculo do volume sedimentar para replenimento de praia pode ser baseado na relação entre o perfil de praia natural e o perfil de praia após o replenimento, apresentando três tipos: perfil com interseção, perfil sem interseção e perfil submerso.

A interseção entre o novo perfil de praia, criado com o replenimento da praia, e o perfil de praia original antes da profundidade de fechamento promove uma maior faixa de areia emersa. Para criação desse perfil de interseção um requerimento necessário, mas não suficiente, é que a alimentação seja feita com sedimentos mais grossos que os naturais ( $A_F > A_N$ ). O volume necessário por metro linear da praia, em uma forma adimensional, pode ser calculado pela Equação (3):

$$V' = \frac{V}{BW_*} = \frac{\Delta y_0}{W_*} + \frac{3h_*}{5B} \left( \frac{\Delta y_0}{W_*} \right)^{5/3} \left[ 1 - \left( \frac{A_N}{A_F} \right)^{3/2} \right]^{-2/3} ; W_* = \left( \frac{h_*}{A_N} \right)^{3/2} \quad (3)$$

Onde:

$W_*$  = Distância entre a profundidade de fechamento do perfil original e a linha de costa (m).

$A_N$  = Parâmetro de escala do perfil natural

$A_F$  = Parâmetro de escala do perfil preenchido

O perfil sem interseção ocorre quando o tamanho do grão do replenimento é menor ou igual ao grão natural, mas também pode ocorrer com sedimentos mais grossos. Esse perfil se estende após a profundidade de fechamento e o volume é calculado conforme a Equação (4):

$$\frac{V}{BW_*} = \frac{\Delta y_0}{W_*} + \frac{3h_*}{5B} \left\{ \left[ \frac{\Delta y_0}{W_*} + \left( \frac{A_N}{A_F} \right)^{3/2} \right]^{5/3} - \left( \frac{A_N}{A_F} \right)^{3/2} \right\} \quad (4)$$

Outro perfil que pode ocorrer é o perfil submerso, onde o novo perfil fica abaixo do nível do mar, não adicionando sedimentos na área emersa da praia. Esse perfil é resultado de uma alimentação com sedimentos mais finos que os naturais da praia, sendo também um perfil sem interseção.

A Figura 9 demonstra os três diferentes perfis de praias alimentadas artificialmente citados acima.

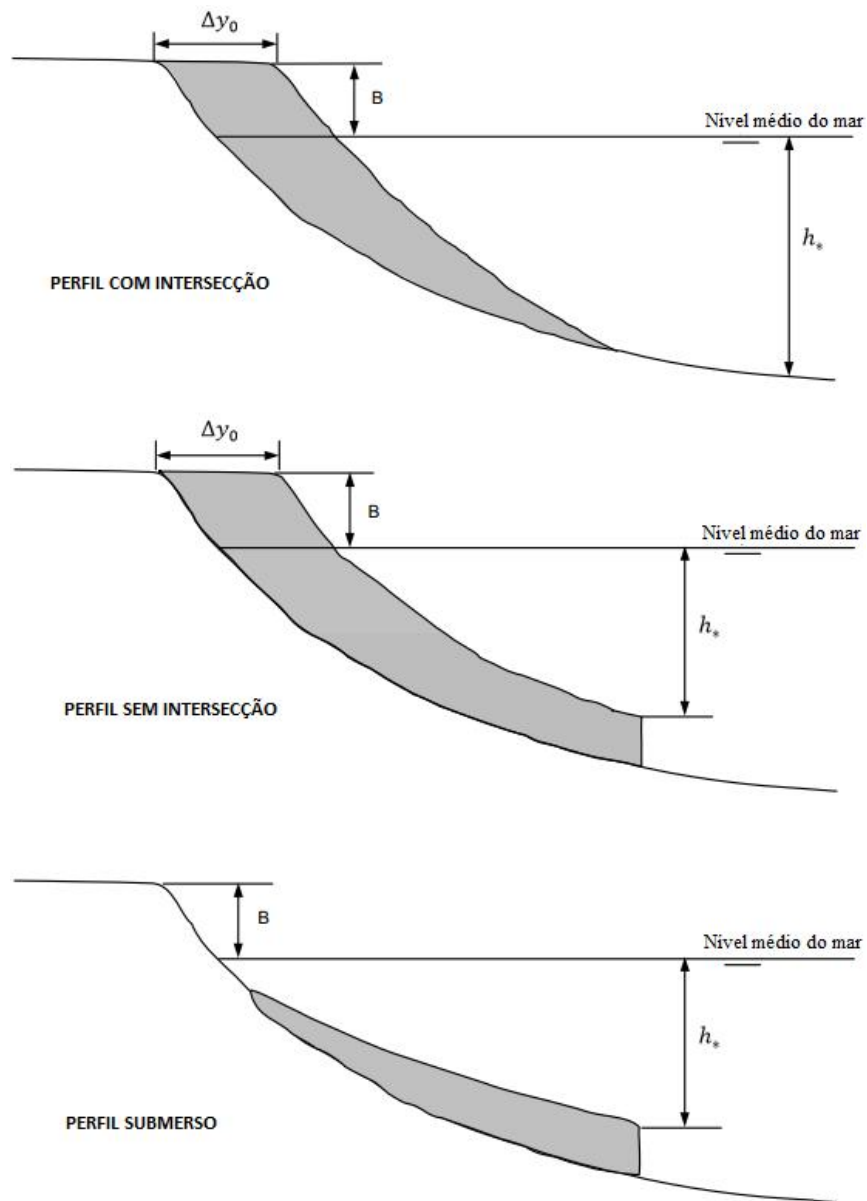


Figura 9. Três tipos de perfil de praias alimentadas artificialmente (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2008).

### 2.3.2 Muros (*seawalls*)

Os muros (*seawalls*) são estruturas construídas conectadas e paralelas à linha de costa que possuem como principal função impedir o galgamento das ondas em decorrência da ação de grandes ondas e marés de tempestade, protegendo as infraestruturas situadas junto à costa. O elemento principal para funcionalidade do projeto é que a cota do muro fique acima dos níveis de

água em condições de tempestade, já considerando o espraiamento e eventual galgamento da estrutura.

Esses muros de contenção podem ser verticais ou inclinados, onde a maior diferença é a capacidade de dissipação de energia da onda pela estrutura côncava do muro inclinado. Dessa maneira, os muros verticais podem apresentar erosão na sua base devido a reflexão da energia da onda, levando a um desgaste ou até queda do muro.

A vantagem principal dessa obra é a facilidade em se projetar e construir, além da baixa manutenção. As desvantagens dos muros mais evidentes são a perda de valor paisagístico e recreacional da praia, reflexão de ondas e aplainamento do perfil de praia no caso da construção do muro vertical. Além disso, os muros não protegem as áreas adjacentes ao longo da linha de costa e nem a praia em frente a estrutura, ou seja, essa estrutura preserva apenas para orla urbana.

A Figura 10 ilustra a variação da linha de costa a partir construção do muro de contenção em condições de tempo bom e de tempestade.

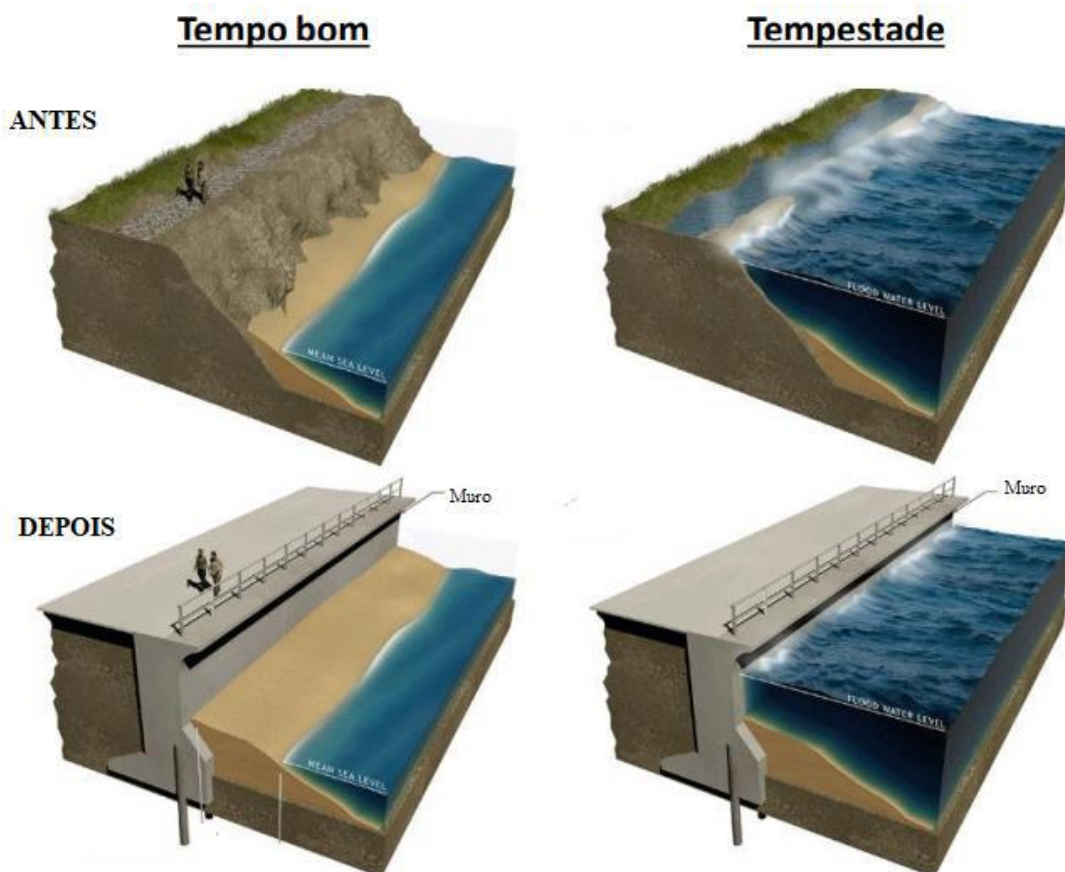


Figura 10. Representação da linha de costa antes e depois do muro de contenção em condições de tempo bom (à esquerda) e tempestade (à direita) (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019).

### 2.3.3 Paredes verticais (*bulkheads*)

As paredes verticais (*bulkheads*) são muros de contenção convencionalmente construídos com o intuito de reter ou impedir os deslizamentos de terras decorrentes do ataque das ondas. Quando adequadamente projetados e construídos, as paredes verticais podem reduzir ou eliminar temporariamente o recuo da linha de costa.

A eficiência dessa estrutura contra o ataque das ondas é dada quase que exclusivamente pela presença de um estoque de areia à retaguarda da parede e caso ocorra a perda desse material, as paredes verticais perdem o mecanismo de defesa. Sendo assim, os dois fatores críticos durante a construção são: recuo da estrutura em direção a costa para que durante a maré alta não haja perda do estoque de areia atrás da estrutura e o uso combinado com geotêxteis permeáveis para dissipação de energia das ondas. As vantagens e desvantagens de se utilizar essa estrutura são semelhantes aos muros citados anteriormente.

A Figura 11 exibe o projeto de construção de parede vertical e os resultados em condições de tempo bom e de tempestade.

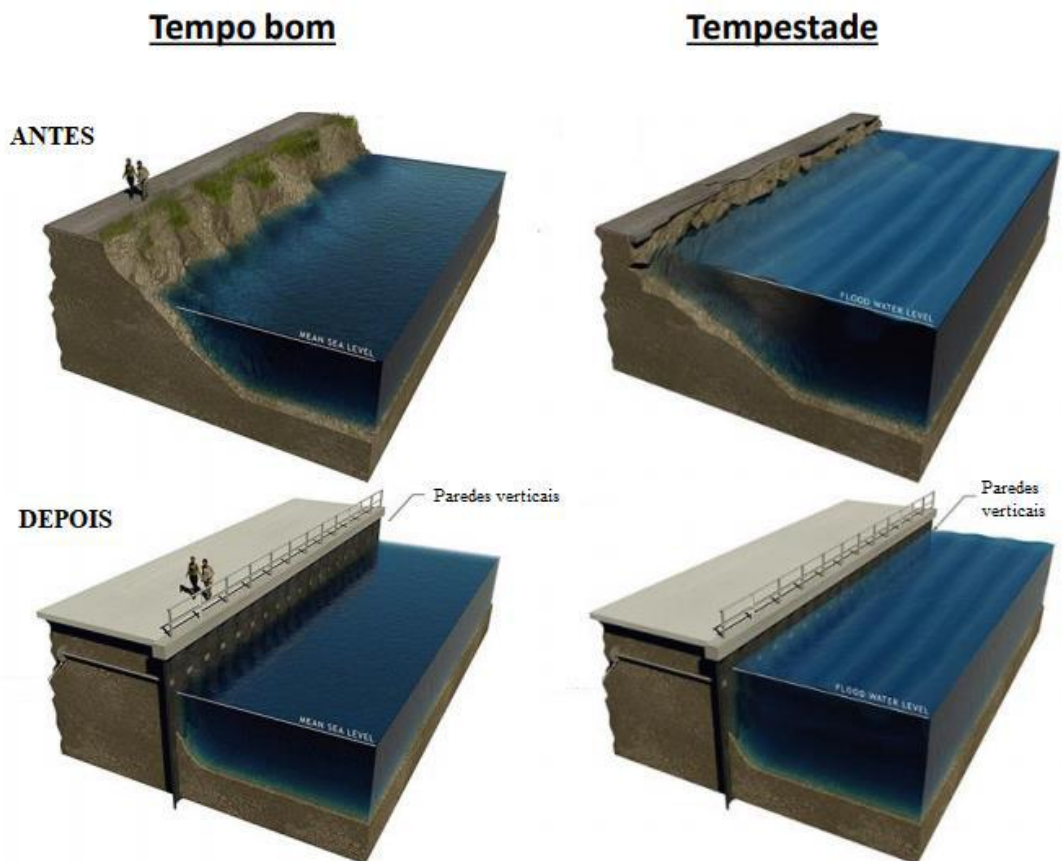


Figura 11. Representação da linha de costa antes e depois da parede vertical em condições de tempo bom, à esquerda, e tempestade, à direita (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019).

### 2.3.4 Revestimentos

Os revestimentos, também conhecidos como enrocamentos, são uma cobertura ou revestimento de material resistente à erosão, posicionado paralelo à linha de costa, seguindo o alinhamento que se pretende fixar. A função principal é proteger a linha da costa da erosão costeira, como exemplificado na Figura 12, que compara períodos de tempo bom e de tempestade.

Os três principais componentes dos revestimentos são uma camada de armadura, uma camada de filtro ou camada interna e uma proteção para a base. A camada de blindagem fornece proteção contra a ação das ondas, a camada com filtro suporta a estrutura protetora, mas permitem a passagem de água pela estrutura, e a proteção da base impede que ocorra a escavação pelo fundo, fornecendo o apoio para todas as camadas mencionadas previamente. Se a base falhar, todo o revestimento pode desmoronar.

As vantagens dessa estrutura são: baixa manutenção e dissipação de energia das ondas. Entretanto, a estrutura de revestimento, algumas vezes, não é eficaz o bastante devido a um dimensionamento incorreto da estrutura que deve considerar o clima de ondas local. Além disso, perde-se o valor paisagístico e recreacional da praia.

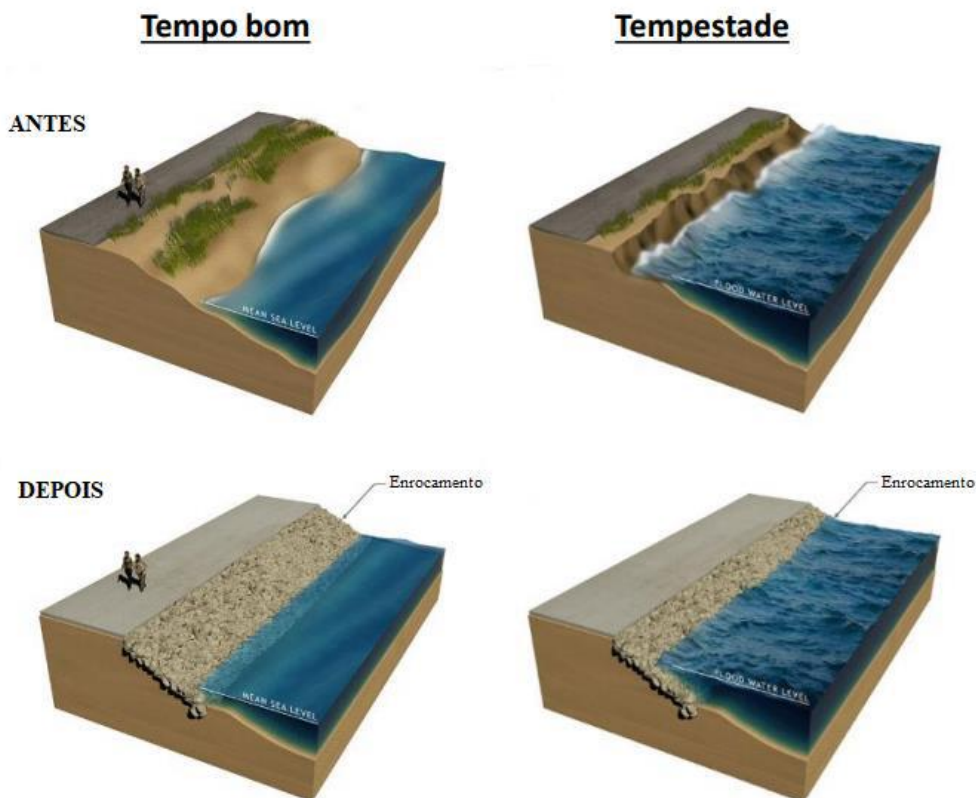


Figura 12. Representação da linha de costa antes e depois do enrocamento em condições de tempo bom (à esquerda) e tempestade (à direita) (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019).

### 2.3.5 Sacos geotêxteis

Os sacos geotêxteis são estruturas, geralmente de caráter provisório, usadas para proteger o avanço do mar sobre a orla. Os sacos geotêxteis são preenchidos com areia e enterrados na base da duna ou berma de inverno para servir como última linha de defesa embaixo da areia da praia. Normalmente, outra camada de areia é colocada por cima dos sacos geotêxteis e pode-se também ser adicionado vegetação para segurar a areia em cima da estrutura, protegendo-a da exposição aos ventos, como exemplificado na Figura 13.

As desvantagens dessa estrutura são: exposição dos sacos após tempestade tendo impacto visual negativo e dificultando o acesso do banhista a praia e exposição ao sol que enfraquece a trama dos sacos geotêxteis, tornando-os mais suscetíveis a ação das ondas.



Figura 13. Representação de projeto de construção de sacos geotêxteis para proteção costeira (SIG-MAGEOSYTHETICS, 2019).

### 2.3.6 Quebra-mares

Os quebra-mares e quebra-mares recife (*reef breakwaters*) são elementos singulares ou múltiplos, emersos ou submersos, posicionados paralelamente e a certa distância da costa, que tem



como funções principais proteger a linha de costa contra às tempestades, aumentar a longevidade do projeto de replenimento da praia e promover uma praia mais extensa e calma para recreação.

A eficiência dessas estruturas se justifica pela dissipação da energia da onda, reduzindo a energia das ondas e diminuindo a magnitude da corrente de deriva litorânea. Essa corrente que age no transporte de sedimentos acaba depositando-os atrás da estrutura, podendo criar uma zona de acréscimo de faixa de areia denominada tómbolo. Caso não haja formação de tómbolo conectado com o quebra-mar, o transporte litorâneo continua ocorrendo sem interrupção.

Os quebra-mares emersos, geralmente, são construídos mais próximos à costa em relação aos quebra-mares submersos, em regiões com alturas de ondas baixas a moderadas (usualmente menores que 2 metros) e estão associados com alimentação artificial de praia para compensar a erosão que se ocorrerá à sotamar da estrutura dependendo da direção da incidência de ondas.

As principais vantagens dessa estrutura são: proteção da infraestrutura local, proteção contra erosão de dunas, diminuição da taxa de erosão da faixa de praia, aumento da retenção de sedimentos na praia e quando associado à alimentação artificial de praia, promove uma maior longevidade da alimentação.

As desvantagens associadas aos quebra-mares emersos são: impacto visual e impacto na navegabilidade, possível erosão nas praias adjacentes, interrupção do transporte litorâneo, aumento das correntes de retorno e diminuição da troca de água atrás do quebra-mar que pode gerar problemas relacionados à balneabilidade.

A construção de quebra-mares parcialmente ou totalmente submersos, quando a crista fica abaixo do nível do mar ou abaixo do nível de baixa-mar, vem se tornando mais comum nos últimos anos. Isso se deve ao fato de serem estruturas mais agradáveis esteticamente, influenciando no turismo das áreas. Além disso, os quebra-mares submersos mantêm a troca de água, sendo importante para questões de qualidade de água, e esta estrutura pode também otimizar as condições locais de surf.

Dentre as desvantagens dessa estrutura pode-se citar: impacto na navegabilidade, não retenção de sedimentos na praia, necessidade de estudo que avalie o possível aumento de correntes entre o quebra-mar e a linha de costa, erosão em praia adjacentes e erosão na base da estrutura.

A Figura 14 exhibe as respostas da linha de costa com a implantação de quebra-mares emersos associados a alimentação artificial de praia e quebra-mar recife submerso.

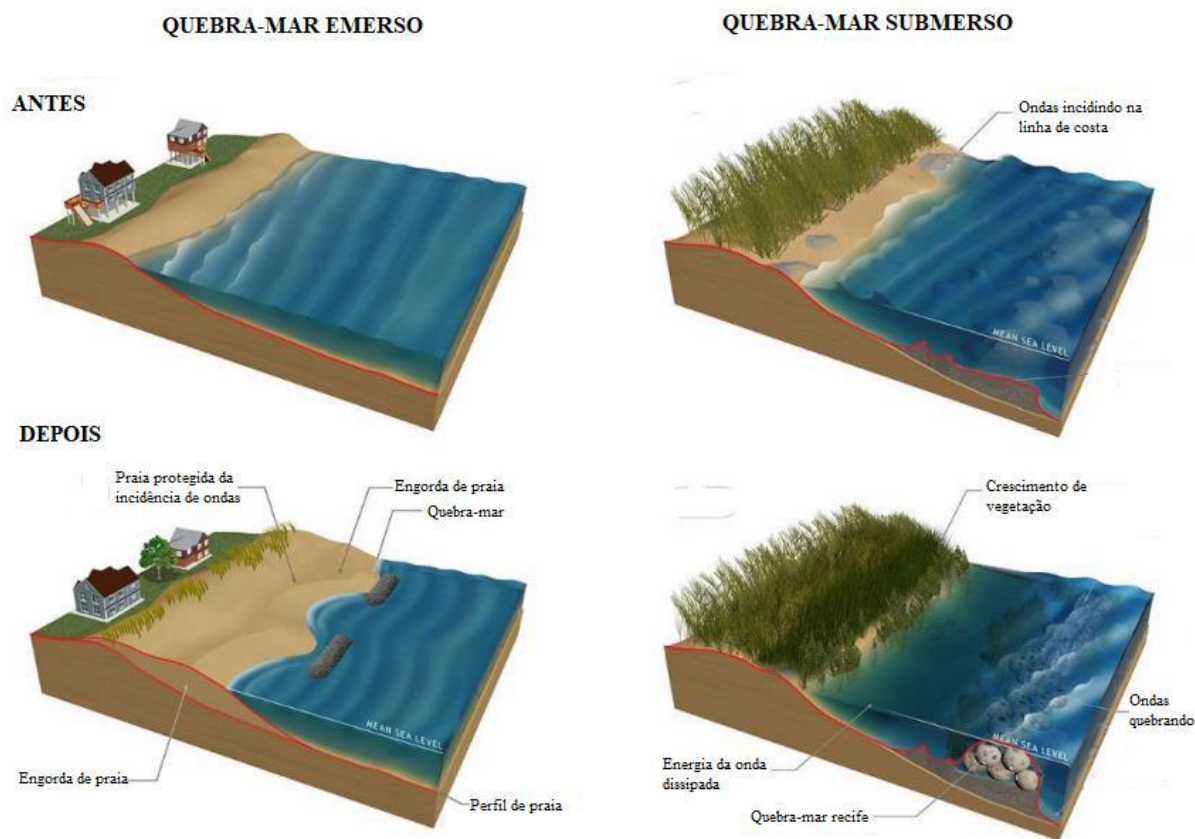


Figura 14. Representação da linha de costa antes e depois dos quebra-mares emerso e submerso em condições de tempo bom (à esquerda) e tempestade (à direita) (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019).

### 2.3.7 Espigões

Os espigões (*groynes*) ou esporões são a mais antiga e mais comum estrutura de estabilização de praia conectada a terra. Eles são provavelmente os mais mal utilizados e os construídos de forma mais inadequada dentre todas as estruturas costeiras. São geralmente perpendiculares ou quase perpendiculares à linha de costa e relativamente curtos quando comparados aos molhes construídos nas entradas dos canais de maré para fins de navegação.

A construção de espigões tem por finalidade a manutenção e/ou aumento da faixa de praia devido a obstrução no transporte de sedimentos, aprisionando-os junto a estrutura. Ao longo do tempo, uma pequena acumulação de areia provoca um aumento positivo na largura da praia na parte à barlar da estrutura. Entretanto, no outro lado da estrutura (à sotamar) observa-se uma diminuição na largura da praia como ilustrado na Figura 15.

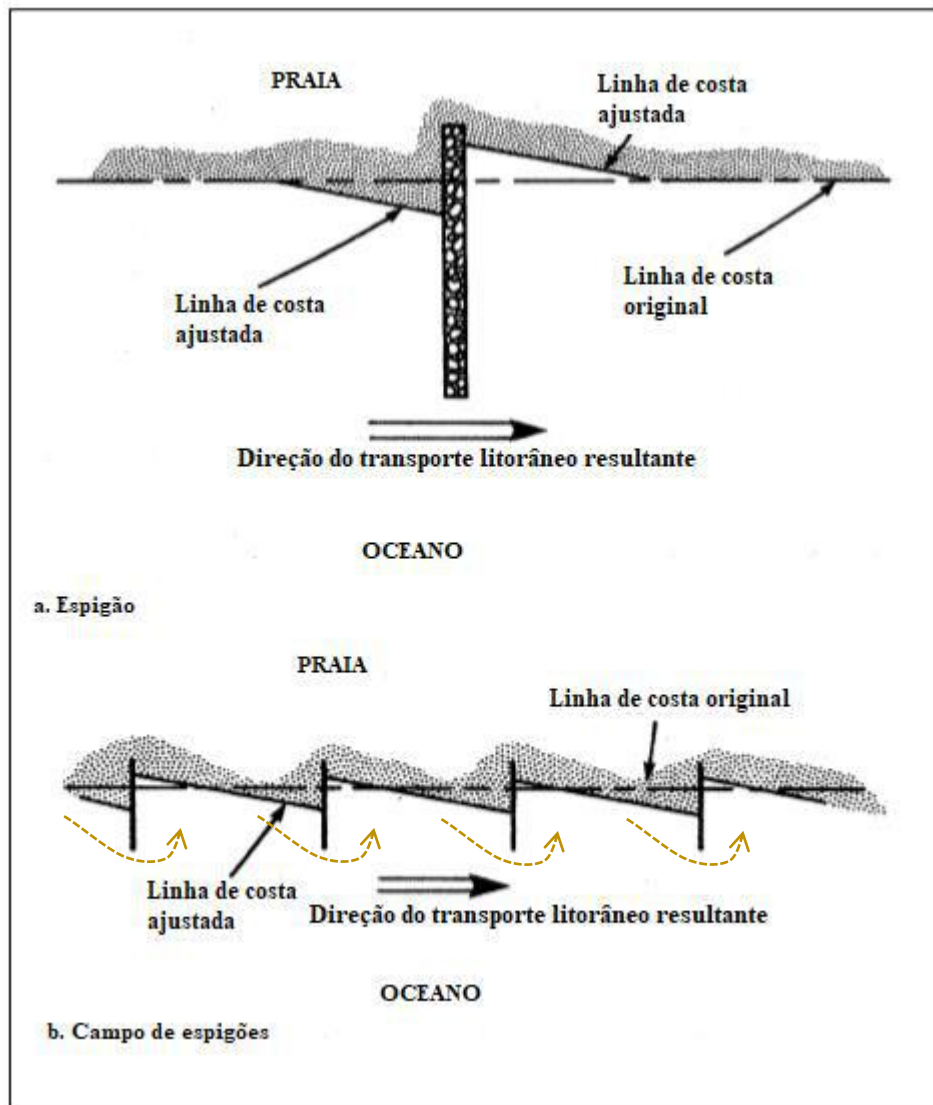


Figura 15. Adaptação da linha de costa para direção do transporte litorâneo (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, 2008).

Van Rijn (2011) relata que esse tipo de estrutura rígida pode levar a um aumento da variabilidade a linha de costa, com taxas de erosão muito maiores do que a situação anterior a construção dessa estrutura. Isso ocorre porque esse tipo de estrutura acarreta, na maioria dos casos, a saturação da deriva litorânea (em maior ou menor grau), condicionando uma nova situação de dinâmica costeira caracterizada pela erosão das praias adjacentes.

A política de gerenciamento da zona costeira em muitos países desestimula o uso dos espigões voltados à proteção da costa. Isso se deve ao fato dos exemplos de espigões mal projetados e mal posicionados causados pela falta de entendimento de seu design funcional ou falha na implantação da obra. No entanto, quando adequadamente projetados, construídos e combinados com a alimentação de praias, os espigões podem funcionar efetivamente sob certas condições,

para aumentar a vida útil (longevidade) de praias alimentadas (Figura 16). Outros benefícios são a criação de áreas de recreação e baixa manutenção.

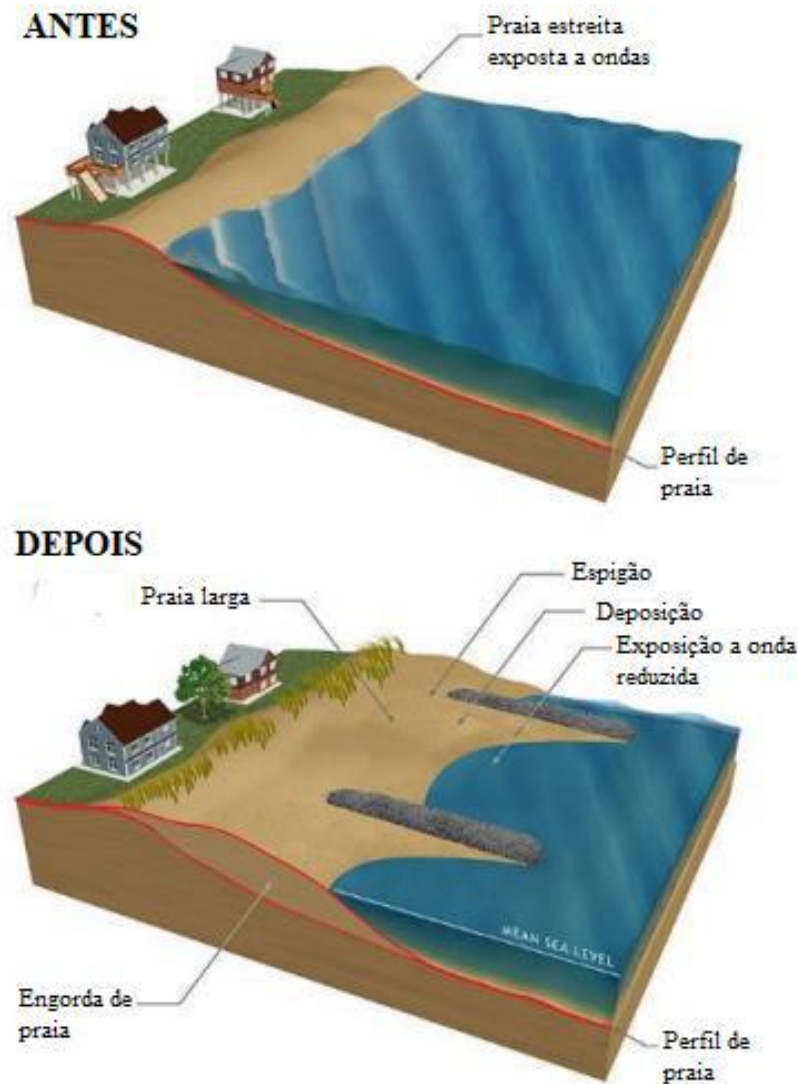


Figura 16. Representação da linha de costa antes e depois da construção de espigões (Adaptado de NAD.USACE.ARMY.MIL, 2019).

### 2.3.8 Guia-correntes

Guia-correntes (*jetties*) são estruturas longilíneas ligadas diretamente à costa e mais ou menos perpendiculares à linha de praia, similares a espigões, porém com função específica de guiar correntes, geralmente para regularização ou estabilização de embocaduras de canais. Os guia-correntes fixam a posição da embocadura e mantem a conexão entre a bacia interior e o mar através do canal de maré.

Da mesma forma que os espigões, os guia-correntes construídos cruzando a zona de arrebatamento bloqueiam parcial ou totalmente o transporte longitudinal de sedimentos, propiciando acumulação de sedimentos na sua região à barlamar e erosão a porção à sotamar (Figura 17).



Figura 17. Exemplo do uso de guia-correntes na estabilização de canais de maré em Cape Cod Bay, Massachusetts (Fonte: NEW ENGLAND BOATING, 2019).

Se possível, os guia-correntes devem apresentar um comprimento que alcance a profundidade de fechamento ( $h_*$ ) para minimizar a intrusão de sedimentos provenientes do transporte longitudinal. Partindo da linha de costa, a profundidade de fechamento é caracterizada como a profundidade a partir da qual não existe transporte significativo de sedimentos pela ação das ondas. Tal profundidade é estimada em função da chamada altura efetiva ou  $H_e$ , que é aquela correspondente à percentagem de excedência de 12h por ano, o que equivale a cerca de 0.14% do tempo. Dentre as fórmulas utilizadas para calcular a profundidade de fechamento presentes no Coastal Engineering Manual, a fórmula de Birkemeier (1985) é representada na Equação (5):

$$h_* = 1,57H_e \quad (5)$$

Onde:

$$h_* = \text{Profundidade de fechamento (m)}$$

$$H_e = \text{Altura efetiva de onda (m)}$$

## 2.4 EROSÃO COSTEIRA: O CASO DA PRAIA DA MACUMBA

Os problemas relacionados à erosão costeira podem ser observados em várias partes do litoral brasileiro, como na praia da Macumba, local usualmente é citado pelos eventos de destruição das benfeitorias públicas. A praia da Macumba é limitada, a oeste, pelo canal de Sernambetiba e, a leste, pela pedra do Pontal.

O canal de Sernambetiba é um canal artificial criado para drenagem urbana de toda a região situada ao norte da foz do canal. A embocadura do canal encontra-se, na maior parte do tempo, obstruída por alguns fatores naturais como a incapacidade dos escoamentos usuais expelirem os sedimentos que se acumulam e pela ação conjunta das ondas e marés. Isso caracteriza um funcionamento instável em termos hidráulicos e sedimentológicos (ROSMAN, 2000).

Para desobstrução da embocadura é necessário que constantes dragagens sejam realizadas para garantir que não haja transbordamento das águas e alagamentos nas regiões adjacentes ao canal. Sabe-se que, durante pelo menos cinquenta anos, o material sedimentar foi sistematicamente retirado do ambiente e destinado para outras atividades (ROSMAN, 2000).

As atividades de dragagens somadas ao fato de que os sedimentos da praia são transportados pela deriva litorânea e dificilmente retornam ao ambiente geraram um déficit de areia no sistema, resultando na perda significativa da capacidade de dissipação de energia de ondas da praia da Macumba.

No litoral da praia da Macumba, no período de primavera e verão, as ondas de sudeste são predominantes, gerando um transporte de sedimentos resultante para o sentido oeste, acumulando os sedimentos na região próxima a embocadura do canal de Sernambetiba. Opostamente, no período de outono e inverno, as ondas provenientes do quadrante sudoeste predominam, promovendo um deslocamento residual em direção ao pontal de Sernambetiba.

Em anos de El Niño, o período de outono e inverno é caracterizado pela incidência de ondas de sudeste ao invés da regular incidência de ondas de sudoeste. Assim, o transporte longitudinal resultante durante todo o ano é na direção oeste, ocasionando um desequilíbrio no balanço sedimentar do sistema.

Como consequência, nos anos posteriores ao El Niño, observa-se que o estoque de areia disponível na faixa dinâmica do litoral da praia da Macumba está reduzido. Isso faz com que durante eventos de ressaca mais fortes ou quando há uma sequência de ressacas, há um esgotamento do estoque de areia em alguns setores da praia, ameaçando as benfeitorias públicas.

Nas últimas décadas foram observados vários episódios destrutivos na orla da praia da Macumba. O estudo realizado por Sousa e Castro (2011) quantificou a taxa de recuo da linha de costa na ordem de -5 metros entre o ano de 1976 e 2004 para o litoral da praia da Macumba. Diante desse problema, o Projeto Eco-Orla foi desenvolvido com o intuito de melhorar os aspectos paisagísticos e a proteger a infraestrutura urbana. Dentre as intervenções, destacam-se a construção de áreas de alimentação, estacionamento, calçadão com ciclovia e muros de contenção para proteção das estruturas.

As obras foram finalizadas em dezembro de 2004 e a em alguns meses depois já foram observados a destruição parcial do muro de contenção, escadas e rampas de acesso. Alguns reparos foram realizados no ano de 2005, porém no ano seguinte ocorreram mais dois episódios de destruição.

O primeiro evento danificou partes da via e calçamento e o segundo evento ocorreu no ano de 2006, onde ondas com alturas entre 2,5 a 3,5 metros invadiram a orla e o solapamento das ondas na base do muro de contenção erodiu parte do aterramento que sustentava os pavimentos, gerando crateras e danos na ciclovia e pista (O GLOBO, 2006).

Em 2008 o avanço do mar provocou novamente a destruição de um trecho de cerca de 70 metros, onde as obras de infraestruturas foram danificadas (JORNAL DO BRASIL, 2008). Evento similar ocorreu em 2010 quando uma parte da ciclovia da praia da Macumba caiu novamente. Isso voltou a ocorrer em 2011, onde uma frente fria provocou a deposição de sedimentos sobre o calçadão e ciclovia, danificando-os (CORREIO DO BRASIL, 2011).

Outro evento ocorreu em setembro de 2017, ano posterior a ocorrência de um El Niño muito forte (Figura 18). Esse ocasionou a queda de parte do muro de contenção e ciclovia na orla,

totalizando quase 600 metros de perda de calçadão (Figura 19). Desde então, a obra de reconstrução do calçadão foi realizada, sendo a sétima vez que essa obra é refeita desde o ano de 2005 (G1, 2017).

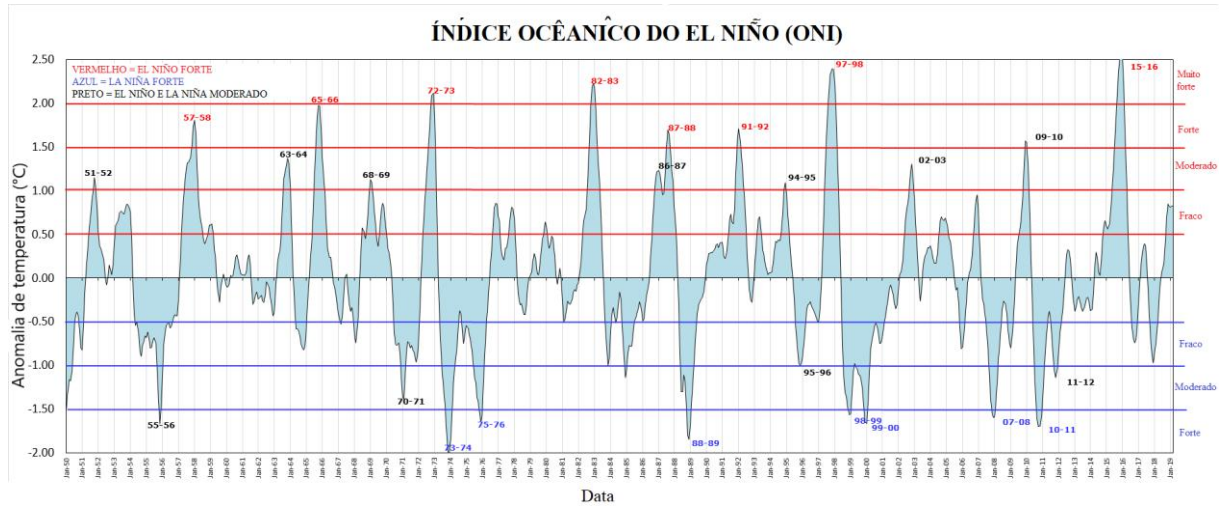


Figura 18. Comparação entre os anos de El Niño e La Niña (Adaptado de GGWEATHER, 2019). Destaca-se que o El Niño muito forte observado no ano de 2016.



Figura 19. Foto de satélite da praia da Macumba (GOOGLE EARTH, 13/09/2017). Nota-se a incidência de ondas de sudeste (SE) na praia da Macumba em um ano pós El Niño muito forte durante o inverno no Rio de Janeiro e a destruição da linha de costa a oeste da pedra.

Por fim, o último episódio de ressaca foi em junho de 2018, onde os sacos de areia colocados na praia romperam, parte do muro cedeu, gerando deslizamento de areia (G1, 2018). A última notícia relatada sobre o local, em setembro de 2018, é que a ciclovia da praia já apresentava rachaduras (O GLOBO, 2018).

Nesse contexto, um estudo realizado por Rosman et al. (2000) indicou que uma possível solução para o local seria a restauração da praia da Macumba por meio de um replenimento do estoque



de areia e a estabilização da embocadura do canal de Sernambetiba através da construção de dois guia-correntes.

A construção de guia-correntes é fundamental para que se reestabeleça as condições de funcionamento regular do canal de Sernambetiba, garantindo uma drenagem natural sem a necessidade de dragagem. Além disso, os guia-correntes funcionariam como uma barreira física contra a deriva litorânea, impedindo a fuga dos sedimentos para fora do arco praial, criando um efeito de enseada.

## **2.5 A MODELAGEM COMO FERRAMENTA NO ESTUDO AMBIENTAL**

A utilização de modelos em estudos envolvendo corpos d'água naturais vem se tornando cada vez mais comum na engenharia costeira. Dentre o processo de modelagem de um fenômeno de interesse, destacam-se a modelagem conceptual, modelagem matemática, modelagem numérica e a modelagem computacional.

A modelagem conceptual é o modelo mais importante dentre todos, correspondendo à concepção do fenômeno a ser estudado, incluindo suas causas e efeitos, assim como suas interações com agentes relacionados à sua ocorrência. O fenômeno de interesse é transformado em linguagem matemática através da modelagem matemática.

A modelagem numérica traduz a modelagem matemática, adaptando-a para diferentes métodos de cálculo. A modelagem numérica é uma ferramenta largamente utilizada para analisar o comportamento do oceano mediante medições e teorias para que seja possível simular e prever os processos que nele ocorrem como, por exemplo, a circulação marítima e o transporte de sedimentos.

Os resultados quantitativos dos modelos numéricos são obtidos via um modelo computacional, representando a tradução do modelo numérico para uma linguagem computacional que possa ser compilada e executada em um computador por um modelador.

O uso de modelagem computacional como ferramenta na gestão e gerenciamento ambiental permite análises de diagnósticos e prognósticos, onde as análises de diagnósticos ampliam os conhecimentos sobre regiões pouco estudadas, auxiliam na compreensão dos processos dinâmicos e otimizam os custos de monitoramento e medição.

Em análises de prognósticos a modelagem permite prever situações a partir da simulação de cenários para estudos e projetos, assim como prever a evolução de eventos em tempo real. Além

do mais, é um instrumento fundamental para o Licenciamento Ambiental, Planos de Emergência e Planos de Mitigação.

Vale ressaltar que a modelos computacionais são ferramentas, e que seu uso inadequado produz resultados incorretos e que o conhecimento e experiência do modelador são fundamentais para a produção de um resultado de qualidade.

### 2.5.1 Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA®

O SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação COPPETEC, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ – Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O SisBaHiA®, ilustrado na Figura 20, é um sistema desenvolvido para realização de estudos e projetos relacionados a gestão ambiental de recursos hídricos. Esse é comumente adotado em simulações de corpos de águas naturais, como águas costeiras, estuários, baías, rios, canais, reservatórios, lagos ou lagoas, com o intuito de compreender a dinâmica desses sistemas ambientais (ROSMAN, 2019).

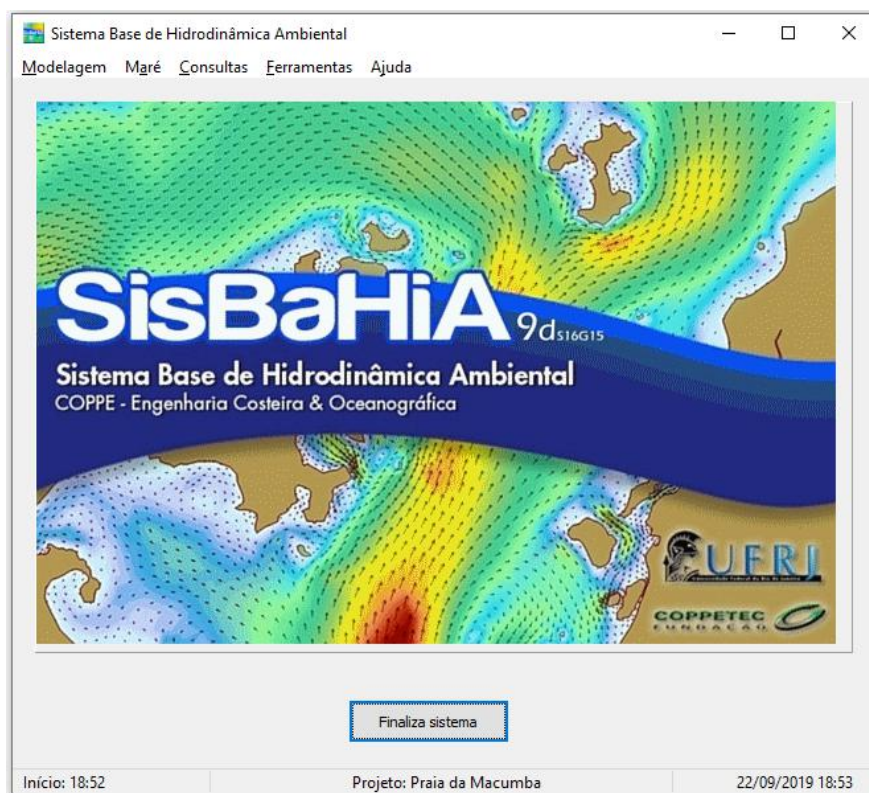


Figura 20. Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Tela Inicial.

### 2.5.1.1 Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico (MH) do SisBaHiA<sup>®</sup> é denominado FIST3D (*filtered in space and time 3D*), sendo um modelo numérico hidrodinâmico, tridimensional, para escoamento homogêneos e de grande escala. A representação dos corpos de água naturais é feita pela utilização de elementos finitos quadrangulares biquadráticos e/ou triangulares quadráticos.

O modelo hidrodinâmico é composto pelo módulo 3D que calcula os campos de velocidade tridimensional e o módulo 2DH, o qual determina as velocidades das correntes promediadas na vertical.

O MH tem como intuito simular o comportamento dos componentes hidrodinâmicas dos corpos d'águas naturais através da resolução das equações diferenciais do movimento, também conhecidas como equações de Navier-Stokes, considerando aproximações de águas rasas e a aproximação de Boussinesq. As equações de Navier-Stokes expressam os princípios de conservação de massa e do balanço de quantidade de movimento via segunda Lei de Newton.

No modelo 2DH os componentes das velocidades médias na vertical,  $U(x, y, t)$  na direção x, e  $V(x, y, t)$  na direção y são determinadas a cada intervalo de tempo. A altura instantânea da coluna de água, H, é representada pela diferença entre a cota da superfície livre,  $z = \zeta(x, y, t)$  e a cota da superfície de fundo. Assim, tem-se a Equação (6).

$$H(x, y, t) = \zeta(x, y, t) + h(x, y, t) \quad (6)$$

Diante dessas incógnitas, são necessárias três equações para determina-las: equação da continuidade na vertical, Equação (7), e as equações de quantidade de movimento integradas na vertical, nas direções x e y, representadas pela Equação (7) e Equação (8), respectivamente.

- Equação da continuidade do volume no modelo 2DH:

$$\frac{\partial(\zeta + h)}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \sum q \quad (7)$$

Onde:

$$\frac{\partial(\zeta + h)}{\partial t} = \text{Variação da coluna d'água no tempo.}$$

$\frac{\partial UH}{\partial x} =$  Variação da vazão através da coluna d'água na direção x.

$\frac{\partial VH}{\partial y} =$  Variação da vazão através da coluna d'água na direção y.

- Equação da quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_o)}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + \\ & \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E) - \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + 2\Phi \text{sen}(\theta)V - \frac{U}{H} \sum q \end{aligned} \quad (8)$$

- Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_o)}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + \\ & \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B - \tau_y^E) - \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + 2\Phi \text{sen}(\theta)U - \frac{V}{H} \sum q \end{aligned} \quad (9)$$

Os termos para a direção x estão explicados a seguir, sendo esses na direção y semelhantes.

$\frac{\partial U}{\partial t} =$  Aceleração local do escoamento 2DH, em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.

$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} =$  Aceleração advectiva do escoamento 2DH, em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.

$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x} =$  Variação da pressão hidrostática na direção x, devido à declividade da superfície livre na direção x. Este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo.

$-g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_o)}{\partial x} =$  Variação da pressão hidrostática na direção x, devido às diferenças de densidade  $(\rho/\rho_o)$  da água na direção x. Este termo força

o escoamento de lugares com maior densidade para locais com menor densidade.

$$\frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) =$$

Resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento, i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de áreas, e de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa.

$$\frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S) =$$

Tensão do vento na superfície livre por unidade de massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento, se estiver oposto, irá retardar o escoamento.

$$\frac{1}{\rho_o H} (-\tau_x^B) =$$

Tensão de atrito no fundo atuando no escoamento 2DH por unidade de massa. Este termo tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

$$\frac{1}{\rho_o H} (-\tau_x^E) =$$

Tensão de atrito devido a efeito de estruturas inseridas no campo de escoamento 2DH por unidade de massa. Este termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

$$-\frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) =$$

Efeito das tensões de radiação devido a ondas de curto período capazes de gerar correntes litorâneas. Tais termos só tem efeito relevante quando as ondas estão em águas relativamente rasas, e.g., quando a profundidade local é inferior a 10% do comprimento da onda.

$$2\Phi \sin(\theta)V =$$

Aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Este termo é irrisório próximo ao equador, i.e., em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos.

$$-\frac{U}{H} \sum q =$$

Efeitos na quantidade de movimento devido a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação, evaporação e infiltração.

## Condições de Contorno

As condições de contorno dividem-se em condições verticais e horizontais. As condições verticais são estabelecidas pela velocidade zero no fundo e a tensão de atrito do vento em superfície, calculada a partir da velocidade dos ventos. As condições horizontais são determinadas pelos contornos terrestres e contornos abertos do domínio de modelagem.

Os contornos terrestres são definidos pelas margens dos corpos de água e possíveis pontos de afluxos e efluxos, como rios e canais. Os contornos abertos representam o limite do domínio de modelagem, sendo a interface entre o domínio de o mar.

## Condição Inicial

Como condição inicial de simulação deve-se estabelecer os valores de elevação da superfície livre,  $\zeta$ , e as componentes de velocidade 2DH, U e V, para todos os nós do domínio. Vale salientar que os valores adotados como condição inicial devem ser semelhantes aos valores utilizados nas condições de contorno adotados no primeiro passo de tempo.

### 2.5.1.2 Modelo de Propagação de Ondas

O modelo de propagação de onda (MPO) do SisBaHiA<sup>®</sup> é similar ao Ref/Dif, que é um modelo numérico de diferenças finitas que calcula a propagação de ondas considerando os fenômenos de refração, difração e dissipação (KIRBY et al., 2002).

Esse modelo calcula o campo de alturas e direções das ondas, velocidades orbitais no fundo e tensões de radiação a partir de dados de amplitude, direção e período da onda que se propaga até a costa, considerando que a onda se propaga com período constante. A quebra da onda ocorre em função do índice de arrebentação ( $\kappa$ ), como exibido na Equação (10).

$$\kappa = H_b / h_b \quad (10)$$

Onde:

$H_b =$  Altura da quebra da onda na zona de arrebentação (m)

$h_b =$  Profundidade na qual ocorre a quebra da onda

### 2.5.1.3 Modelo de Transporte de Sedimentos com Ondas e Correntes

O modelo de transporte de sedimentos (MS) do SisBaHiA<sup>®</sup> utiliza o critério de transporte de sedimentos baseado no parâmetro de Shields ( $\psi$ ), onde para determinada granulometria de sedimentos do leito, o transporte de sedimentos que promove erosão ou assoreamento depende da tensão crítica de mobilidade,  $\tau_c$ , e da tensão de arrasto no leito,  $\tau_0$ . Quando os valores de tensão de arrasto no leito são maiores que o valor crítico, os sedimentos são mobilizados e transportados pelas correntes. Em contrapartida, valores de tensão de arrasto inferiores à tensão crítica não produzem mobilização de sedimentos ou quando em movimento, os sedimentos tendem a depositar.

Para sedimentos predominantemente arenosos, o parâmetro de Shields,  $\psi$ , pode ser calculado pela Equação (11):

$$\psi = \frac{u_*^2}{g(S_s - 1)d} = \frac{\tau_0}{\gamma_a(S_s - 1)d} = R_e; S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} \quad (11)$$

Onde:

$\tau_0$  = Tensão de arrasto no leito

$\gamma_a$  = Peso específico da água

$\gamma_s$  = Peso específico do grão

$g$  = Aceleração

$d$  = Diâmetro do grão

$u_*$  = Velocidade de atrito no leito

$\nu$  = Viscosidade cinemática da água.

$R_*$  = Número de Reynolds do grão.  $R_* = \frac{du_*}{\nu}$

A Figura 21 apresenta o diagrama de Shields modificado, onde a tensão crítica pode ser obtida a partir da caracterização do sedimento e da água. A curva do diagrama modificado pode ser gerada pela Equação (12), apresentando uma parametrização do diagrama de Shields baseada na de Van Rijn (1993) em função do diâmetro adimensional do grão do sedimento,  $d_*$ .

$$d_* = d \left( \frac{g(S_s - 1)}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (12)$$

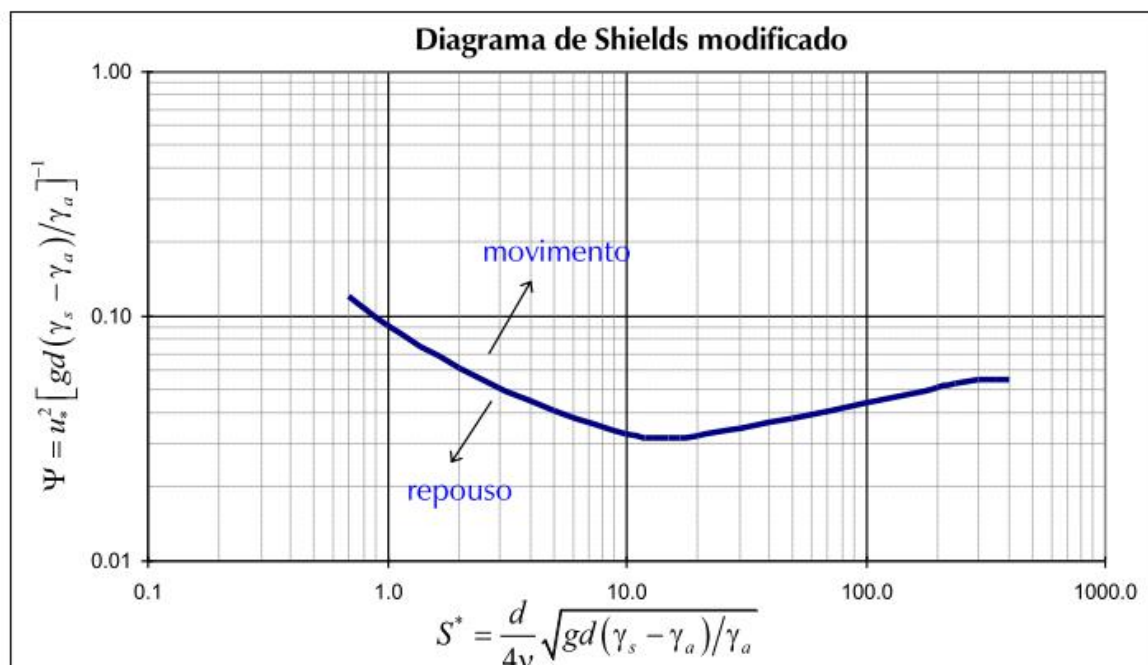


Figura 21. Diagrama de Shields modificado utilizado pelo SisBaHiA<sup>®</sup>, conforme mostrado em ROSMAN (2019).

O MS do SisBaHiA<sup>®</sup> considera que por conta da variabilidade da forma e tamanho dos sedimentos, o valor da tensão crítica de mobilidade para um dado grão deve ser interpretado como o valor para o qual há probabilidade de 50% de ocorrer movimento ou não, havendo uma faixa de incerteza. A formulação detalhada deste efeito probabilístico pode ser encontrada em Rosman (2019).

O SisBaHiA<sup>®</sup> estima o transporte de sedimentos sob a ação das ondas e correntes através da fórmula de Van Rijn (2007), dentre outras, devidamente calibrada para isto. Assim, o cálculo de transporte total de sedimentos é a soma do transporte de fundo de arrasto com o transporte de sedimentos em suspensão. A fórmula também pode ser encontrada na referência técnica do SisBaHiA<sup>®</sup> (ROSMAN, 2019).

### Atualização da Batimetria

Em um dado local existe uma camada erodível de sedimentos no fundo que possui uma altura variável no tempo. Em cada instante da simulação, a altura dessa camada é resultado da diferença entre a cota do fundo e a cota da camada não erodível mais abaixo. Um valor inicial para essa altura deve ser prescrito para todos os nós do domínio de modelagem.

No modelo de transporte de sedimentos deve-se inserir a curva granulométrica ou a fração de diferentes classes granulométricas para cada região do domínio. O estoque de sedimentos inicial



de cada classe granulométrica é calculado de forma que a altura erodível total prescrita pelo usuário seja igual à altura erodível de cada classe granulométrica, considerando as porcentagens prescritas para cada classe em cada região do domínio. O SisBaHiA<sup>®</sup> estima o balanço de massa para cada classe de sedimento, a cada passo de tempo, possibilitando calcular a variação temporal da camada erodível em todos os nós do modelo.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a área de estudo do trabalho, o sistema de modelagem utilizado, as modelagens realizadas, os cenários de modelagem e a origem dos dados ambientais. Também é explicado como foi feito o cálculo do volume do replenimento da praia, o dimensionamento de guia-correntes e a calibração do modelo.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

Localizada na região oeste do município do Rio de Janeiro, a praia da Macumba possui uma extensão de pouco mais de 2 km no sentido leste oeste, situando-se entre o canal de Sernambetiba e o pontal de Sernambetiba, popularmente conhecido como pedra do Pontal (Figura 22).



Figura 22. Área de estudo (GOOGLE EARTH, 2019).

A circulação geral dos ventos no estado do Rio de Janeiro é caracterizada pela presença dos ventos de nordeste (NE) e leste (E) que ao sofrerem refração em função do atrito causado pela existência da Serra do Mar, mudam sua direção para leste e sudeste (SE), formando ondas provenientes do quadrante SE (Su-Sudeste, Sudeste e Leste-Sudeste) com ondulações mais comuns entre 1,0 e 1,5 m. Esse cenário é representativo das condições usuais de bom tempo.

Em contrapartida, os ventos responsáveis pela formação de ondas de tempestade ocorrem no período de outono e inverno, provenientes das direções sul (S), sudoeste (SW) e sul-sudoeste

(SSW), com alturas entre 1 metro e 4 metros e períodos entre 10 e 16 segundos, caracterizando condições de mau tempo.

A maré no litoral do Rio de Janeiro é classificada como maré com desigualdade diurna, havendo uma diferença na altura das duas preamares ou baixa-mares sucessivas, em um mesmo dia. A área de estudo apresenta um regime de micromaré, com amplitudes de maré de sizíguas que podem ultrapassar 1,3 metros e em quadratura a altura média da maré fica em torno de 0,4 m (COHIDRO, 2005). As elevações do nível de água do mar no Rio de Janeiro representam a soma da maré astronômica e maré meteorológica, sendo fundamental considerar essa última em estudos ambientais.

Em relação as correntes, medições realizadas pela Encal et al. (1985) com correntógrafos no período de julho a agosto de 1985, mostraram que quase metade do tempo as correntes provem da direção sudoeste (SW), seguidas da direção oeste (W) representando 16% do total, e nordeste (NE) com um percentual de 14%. As demais direções possuem percentuais menores: 7% de sul (S) e noroeste (NW); 6% de leste (E) e apenas 4% de sudeste (SE) e norte (N).

As velocidades das correntes ficam entre de 0,3 e 0,4 m/s em aproximadamente um terço do tempo, seguido de 33% das correntes com velocidade entre 0,2 e 0,3 m/s. As correntes com maiores magnitudes, em torno de 0,5m/s, representam 24% da amostragem e as demais faixas de velocidades correspondem a menos de 10% do total (ENCAL et al., 1985).

Quanto à natureza e granulometria dos sedimentos, a praia da Macumba é composta majoritariamente por areia grossa, de moderadamente a bem selecionada (ROSMAN et al. 2000). Na parte submersa dos perfis de praia, foram verificados a presença de areia ligeiramente mais grossa. Isso é justificado pelas amostras estarem localizada na zona de arrebentação das ondas, local com maior dissipação de energia das ondas, onde os sedimentos mais finos são carreados pela corrente e apenas os sedimentos mais grossos tem a possibilidade de permanência (COHIDRO, 2005)

Em análises de estabilidade morfológica da foz do canal de Sernambetiba, Rosman et al. (2000) verificaram através da aplicação do número de Per Bruun, que a embocadura do canal tem como grande formação de barra, funcionando mais como canais de extravasamento do que entradas permanentes de maré, podendo ser instável. Este resultado confirma o que é observado no local, grande tendência de assoreamento e rompimento da barra apenas durante grandes enchentes ou por meio de ações artificiais como dragagem.

## **3.2 SISTEMA DE MODELAGEM COMPUTACIONAL - SisBaHiA<sup>®</sup>**

A modelagem computacional foi desenvolvida utilizando o SisBaHiA<sup>®</sup>, explicado anteriormente. Os módulos presentes no SisBaHiA<sup>®</sup> que foram utilizados neste estudo são: Modelo Hidrodinâmico, Modelo de Propagação de Ondas e Modelo de Transporte de Sedimentos.

## **3.3 MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO**

A modelagem digital do terreno consiste na discriminação da área de estudo que será modelada, a construção da malha de discretização e a adição dos dados batimétricos e rugosidade em cada ponto da malha.

### **3.3.1 Domínio de Interesse**

O domínio de modelagem é definido pela digitalização dos contornos de terra e contornos abertos. O contorno terrestre inclui o litoral dos continentes e ilhas e o contorno aberto delimita a interface entre a massa de água modelada e a massa de água exterior, no caso o oceano.

A geometria da área de estudo foi digitalizada utilizando imagens de satélite do Google Earth datada de julho de 2016. O contorno de terra englobou o continente e a faixa de praia característica do local, assim como a Ilha das Peças.

A Figura 23 e a Figura 24 apresentam o mapa base da área de estudo, onde o domínio de modelagem é ilustrado em branco, o contorno de mar em azul e o contorno de terra em verde, considerando o cenário natural da praia e o cenário após a intervenção com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia, respectivamente.

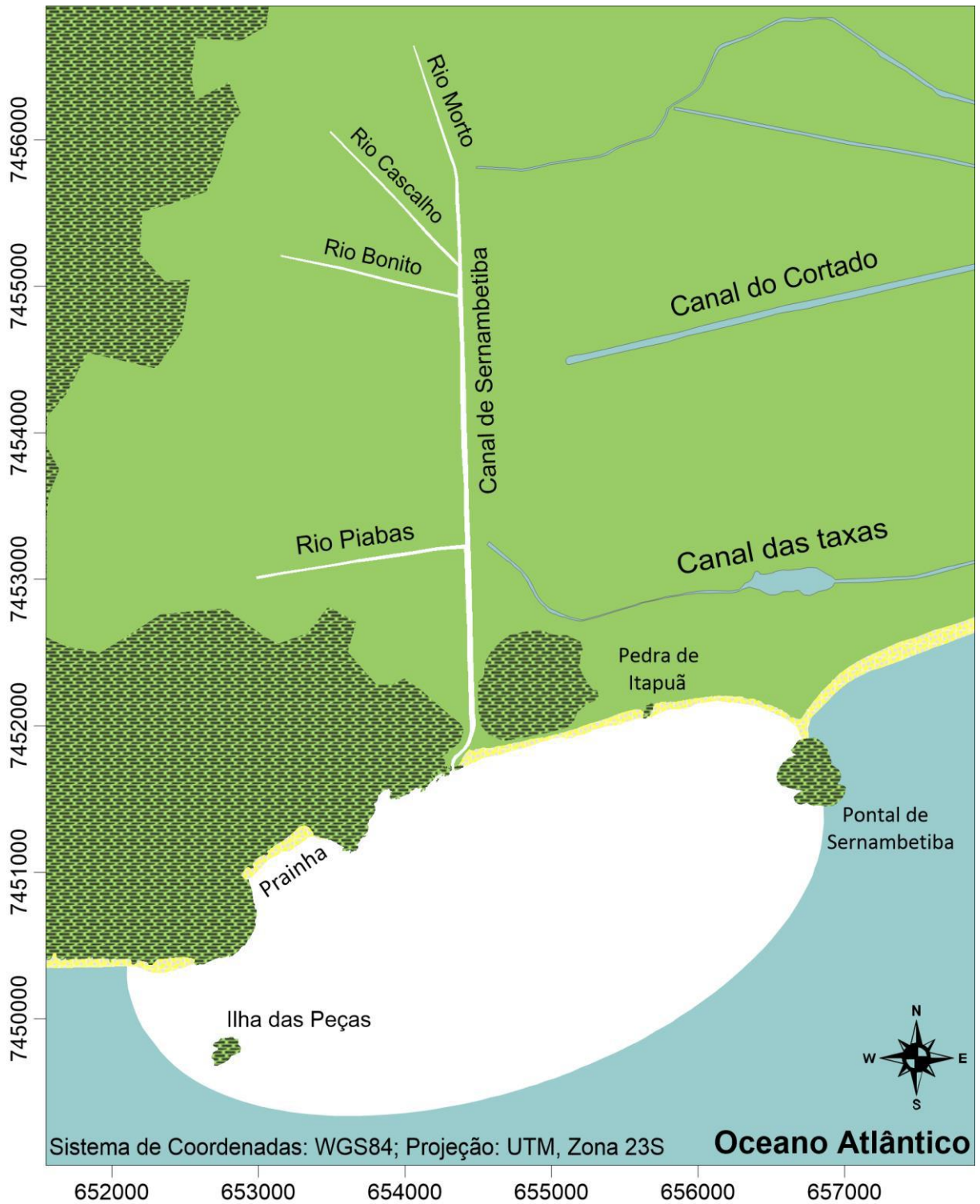


Figura 23. Contornos utilizados para delimitação do domínio de modelagem para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes.

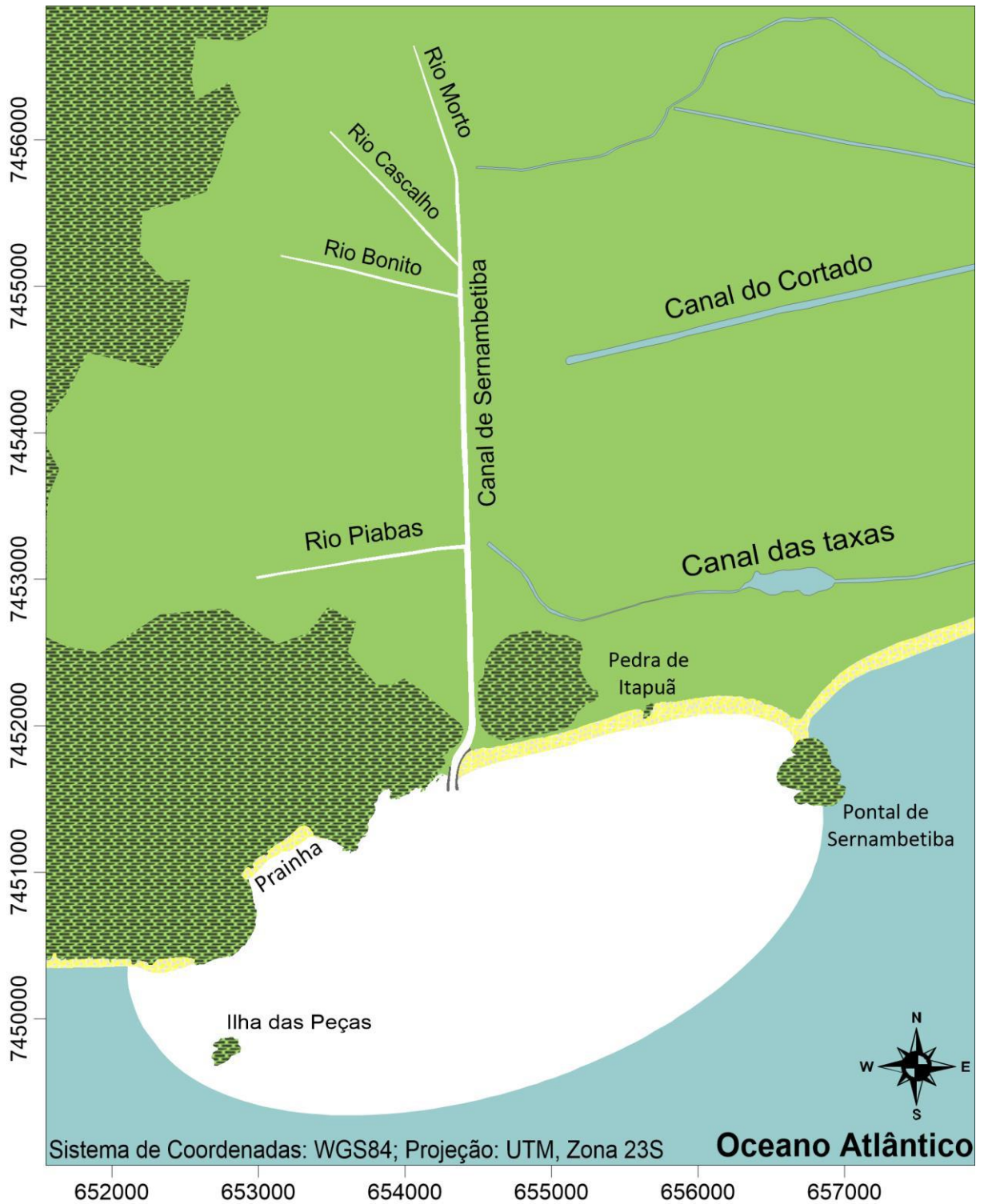


Figura 24. Contornos utilizados para delimitação do domínio de modelagem para os cenários pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes.

### 3.3.2 Malha de Discretização

A partir da construção do mapa base, as duas malhas de elementos finitos triangulares e quadrangulares foram confeccionadas utilizando as ferramentas do SisBaHiA<sup>®</sup>. A malha construída para as simulações utiliza 980 elementos finitos, sendo 924 quadrangulares e 53 triangulares, totalizando 4107 pontos de cálculo para o cenário atual da Praia da Macumba, sendo representada na Figura 25. A malha utilizada no cenário com as intervenções apresenta 1005 elementos finitos, sendo 951 quadrangulares e 54 triangulares, totalizando 4222 pontos de cálculo (Figura 25 e Figura 26).

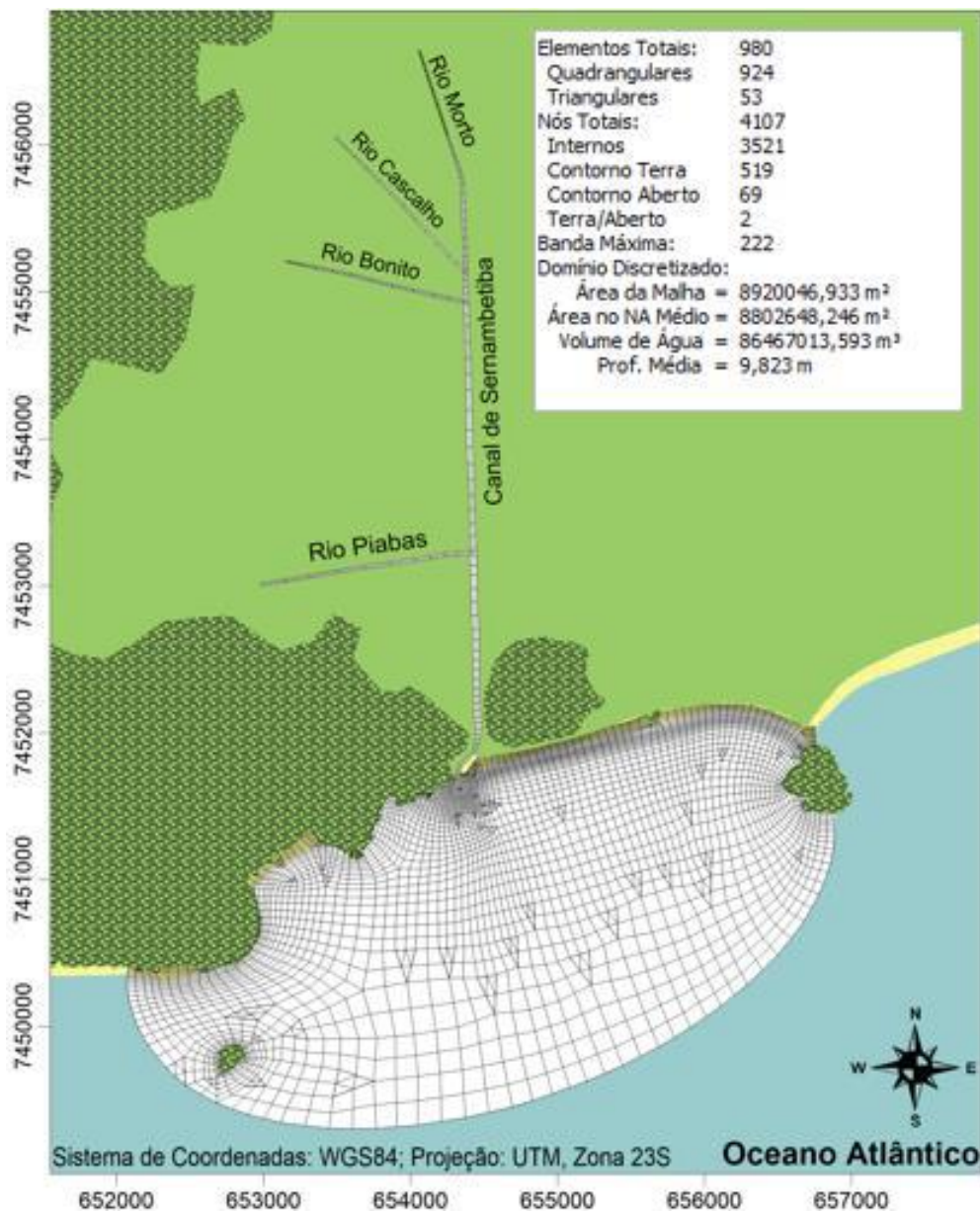


Figura 25. Malha de discretização do domínio de modelagem para a praia da Macumba com as informações resumidas dos dados da malha de discretização em elementos finitos para cenário pré-replenamento do estoque de areia da praia e guia-correntes.

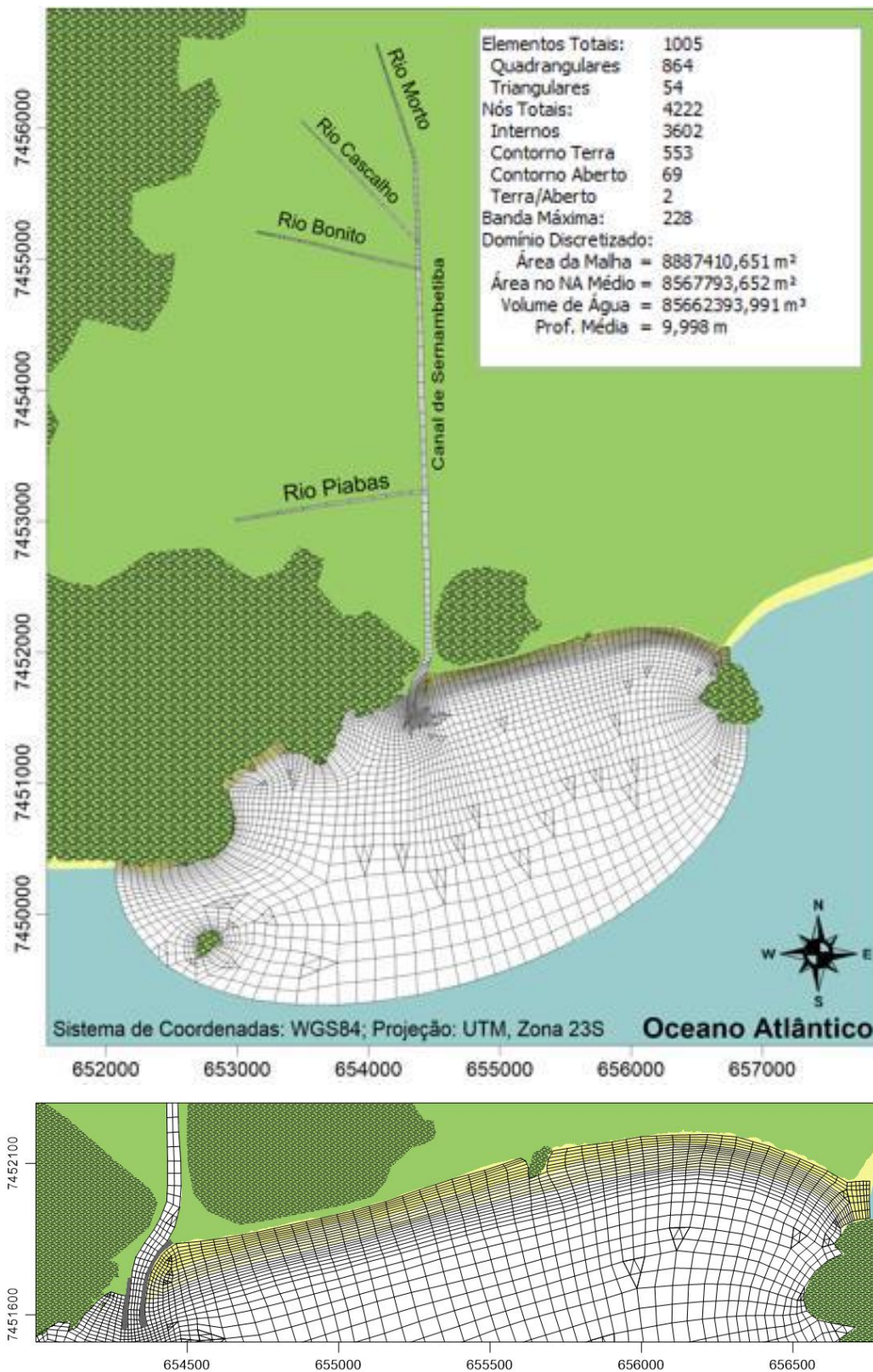


Figura 26. Malha de discretização do domínio de modelagem para a praia da Macumba, com as informações resumidas dos dados da malha de discretização em elementos finitos para os cenários pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes. Visualização em maiores detalhes da malha de elementos finitos da região de interesse.



### 3.3.3 Batimetria

Os contornos batimétricos do domínio de modelagem foram extraídos das cartas náuticas 1620, 23000 e 23100 disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e por meio dos dados batimétricos disponibilizados pela empresa CONAGE – Consultoria Técnica Ltda. Os contornos batimétricos são referidos ao Nível de Redução (NR) adotado pela DHN na CN 1620 e as isóbatas são interpoladas através da ferramenta presente no SisBaHiA<sup>®</sup>. Os dados de batimetria referentes aos rios e ao canal de Sernambetiba considerados no domínio de modelagem foram inferidos (Figura 27 e Figura 28. ).

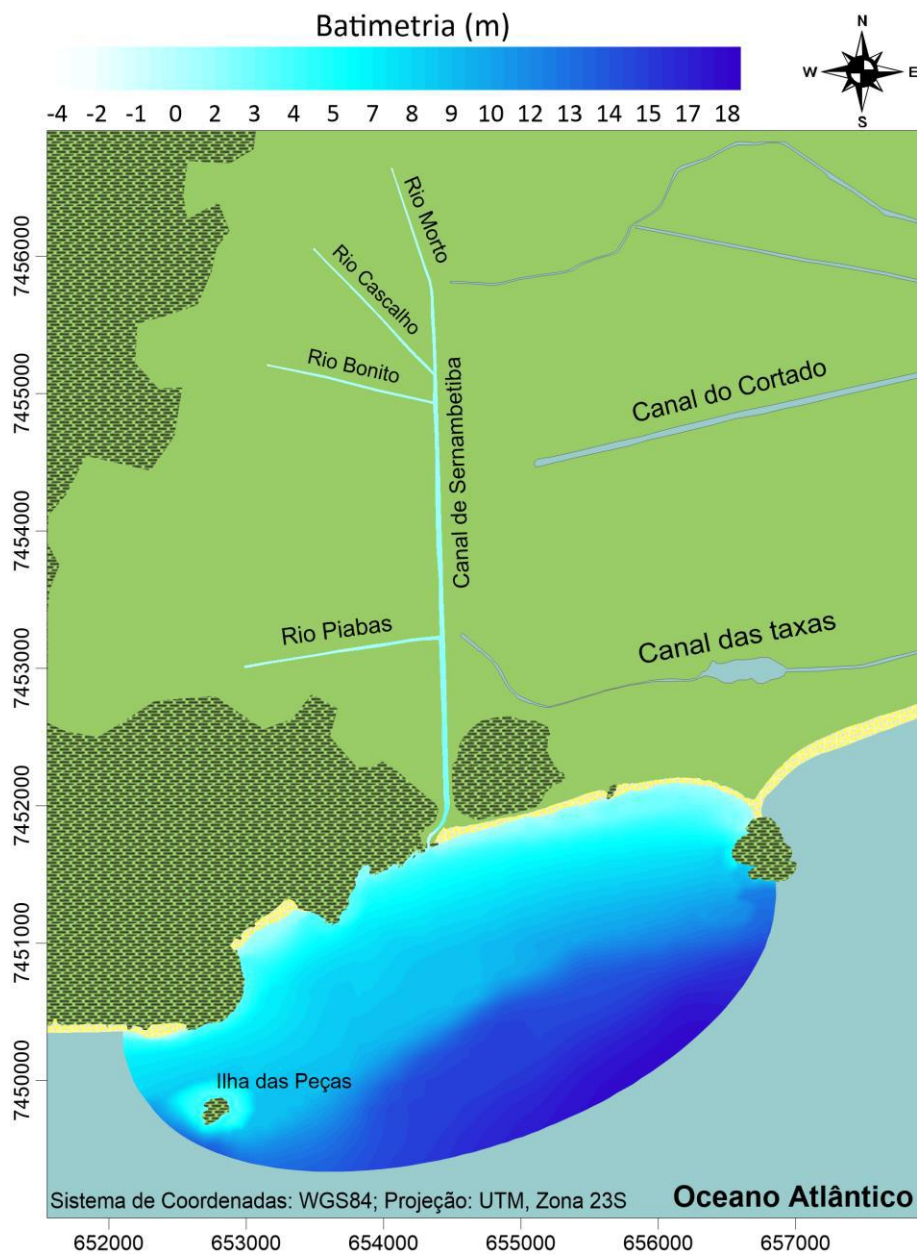


Figura 27. Batimetria utilizada pelo modelo no domínio de modelagem no cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes, referenciada à Carta Náutica 1620.

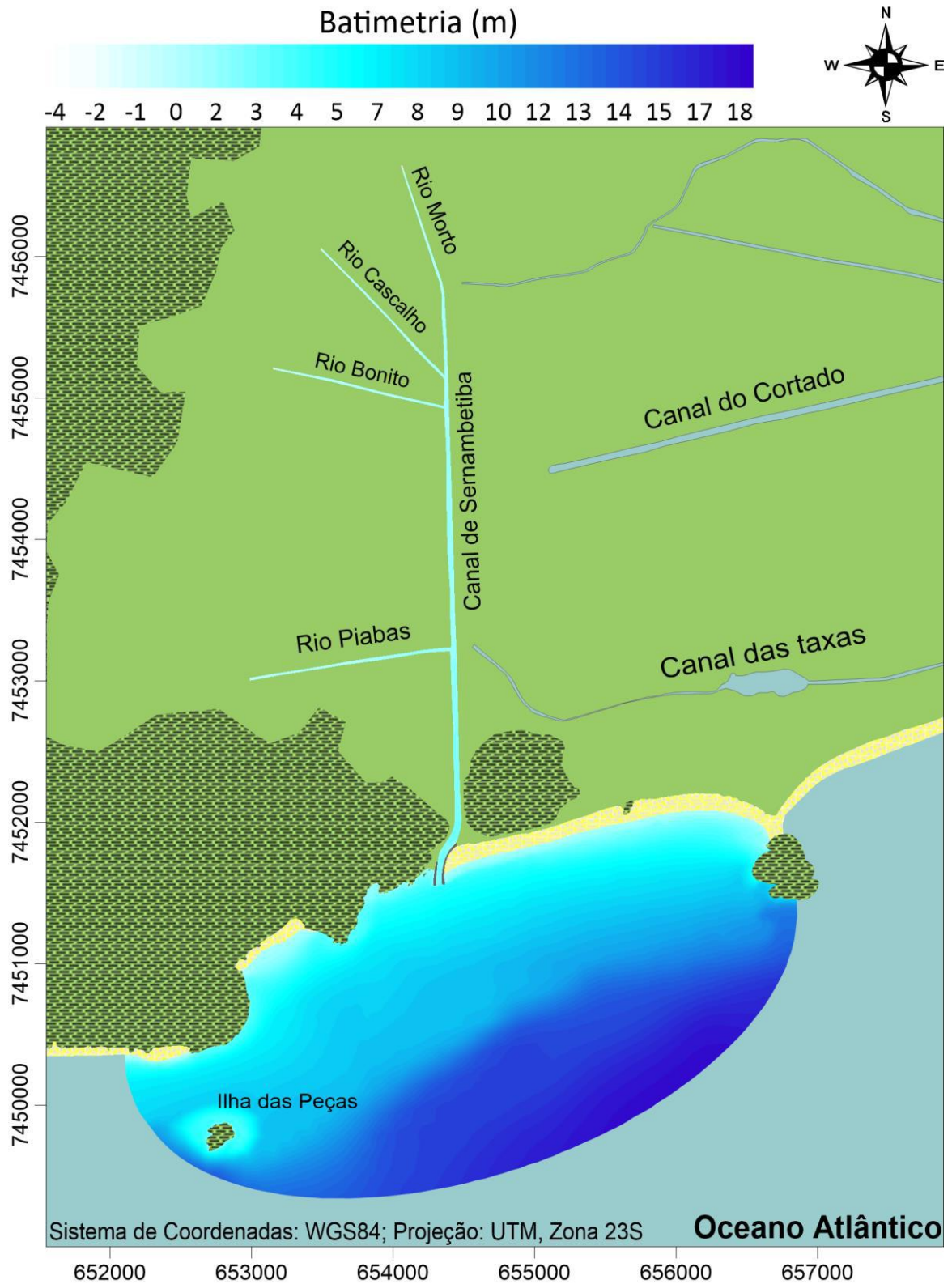


Figura 28. Batimetria utilizada pelo modelo no domínio de modelagem para os cenários pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes, referenciada à Carta Náutica 1620.

### 3.3.4 Rugosidade ( $\epsilon$ )

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA<sup>®</sup> calcula a tensão de atrito do fundo a partir do coeficiente de Chézy, sendo esse dependente da amplitude da rugosidade equivalente de fundo. Assim, o valor de rugosidade para a superfície de fundo ( $\epsilon$ ) deve ser discriminado em cada nó da malha no domínio de modelagem, sendo adotado através de uma aproximação seguindo os valores sugeridos por Rosman (2019), adaptados de Abbot e Basco (1989), expostos na Tabela 1.

Os valores utilizados são referentes a predominância de areia médias, predominância de areia grossas, predominância de areias muito grossas e nos locais que existiam rochas, utilizou-se os valores relativos à sedimentos com obstáculos.

Tabela 1. Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo,  $\epsilon$  (Adaptado de ABBOT & BASCO, 1989).

| Leito de sedimentos com rugas e similares        | Rugosidade ( $\epsilon$ )       |
|--|---------------------------------|
| Predominância de siltes e finos                  | 0.0001m < $\epsilon$ < 0.0100m  |
| Predominância de areias finas                    | 0.0070m < $\epsilon$ < 0.0150m  |
| Predominância de areias médias                   | 0.0100m < $\epsilon$ < 0.0300m  |
| Predominância de areias grossas                  | 0.0250m < $\epsilon$ < 0.0500m  |
| Predominância de areias muito grossas            | 0.0400m < $\epsilon$ < 0.0800m  |
| Predominância de areias com cascalho             | 0.0500m < $\epsilon$ < 0.1200m  |
| Sedimentos com vegetação                         | 0.0500m < $\epsilon$ < 0.1500m  |
| Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos) | 0.1500m < $\epsilon$ < 0.4000m  |
| <b>Fundo de pedra ou rochoso</b>                 |                                 |
| Fundo de alvenaria                               | 0.0003m < $\epsilon$ < 0.0010m  |
| Fundo de pedra lisa                              | 0.0010m < $\epsilon$ < 0.0030m  |
| Fundo de asfalto ou similar                      | 0.0030m < $\epsilon$ < 0.0070m  |
| Fundo com pedregulho ( $d_{50}$ < 3 cm)          | 0.0070m < $\epsilon$ < 0.00150m |
| Fundo com pedras médias ( $d_{50}$ < 8 cm)       | 0.00150m < $\epsilon$ < 0.0400m |
| Fundo com pedras ( $d_{50}$ < 20 cm)             | 0.0400m < $\epsilon$ < 0.1000m  |
| Fundo com rochas ( $d_{50}$ < 50 cm)             | 0.1000m < $\epsilon$ < 0.2500m  |
| <b>Fundo de concreto</b>                         |                                 |
| Fundo de concreto liso                           | 0.0001m < $\epsilon$ < 0.0005m  |
| Fundo de concreto inacabado                      | 0.0005m < $\epsilon$ < 0.0030m  |
| Fundo de concreto liso antigo                    | 0.0030m < $\epsilon$ < 0.0100m  |

## 3.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Nesta seção são apresentados os cenários de modelagem e as forçantes ambientais utilizados nas condições de contorno, destacando sua origem e a configuração do modelo.

### 3.4.1 Cenários de modelagem

Nesse trabalho foram simulados três cenários de modelagem hidrodinâmica com o intuito de simular padrões de circulação e a variação sazonal da praia da Macumba em condições distintas. Os dois períodos escolhidos para simulação, o inverno de 2017 e o inverno de 2014, se justificam pelo intuito de comparar as respostas morfológicas da área de estudo diante de condições oceanográficas e meteorológicas em um ano após a ocorrência de El Niño muito forte (2017) e um ano típico de inverno (2014).

Os cenários também consideram duas condições morfológicas distintas, a primeira apresenta a praia da Macumba no estado natural do ano de 2017 e a segunda considera a praia após a construção dos guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia para os anos de 2014 e 2017. Assim, os cenários simulados são:

- Cenário 1: 01/07/2017 a 01/10/2017 com a praia sem intervenção com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia, com clima de ondas de ano pós El Niño.
- Cenário 2: 01/07/2017 a 01/10/2017 com a praia após intervenções com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia, com clima de ondas de ano pós El Niño.
- Cenário 3: 01/07/2014 a 01/10/2014 com a praia após intervenções com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia, com clima de ondas usual.

### 3.4.2 Dados Ambientais

Os dados necessários para configuração do modelo hidrodinâmico são: maré astronômica e maré meteorológica, regime de ventos, correntes costeiras e vazões dos rios.

- **Níveis de Maré**

Como condição de contorno, uma série temporal de elevações da superfície livre foi inserida na fronteira aberta do domínio de modelagem. A série temporal é resultado da soma das séries de maré astronômica e de maré meteorológica.

A série de maré astronômica foi obtida a partir das constantes harmônicas obtidas da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR), referente à estação do Recreio dos Bandeirantes (FEMAR, 2019), como mostrado na Tabela 2. A maré meteorológica foi obtida através de dados médios diários de elevação do mar computado pelo modelo oceânico *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM) para a região de interesse.

Tabela 2. Constantes harmônicas da FEMAR com seus respectivos valores de período (s), amplitudes (m) e fases (rad) para a estação Recreio dos Bandeirantes – RJ.

| Constante | Período (s) | Amplitude (m) | Fase (rad) |
|-----------|-------------|---------------|------------|
| Q1        | 96726,084   | 0,027         | 0,925      |
| O1        | 92949,630   | 0,115         | 1,4312     |
| P1        | 86637,205   | 0,024         | 2,4609     |
| K1        | 86164,091   | 0,073         | 2,5482     |
| 2N2       | 46459,348   | 0,005         | 3,0369     |
| MU2       | 46338,327   | 0,04          | 1,1694     |
| N2        | 45570,054   | 0,039         | 2,2166     |
| NU2       | 45453,616   | 0,007         | 2,1118     |
| M2        | 44714,164   | 0,304         | 1,4137     |
| T2        | 43259,217   | 0,009         | 1,3614     |
| S2        | 43200,000   | 0,162         | 1,3614     |
| K2        | 43082,045   | 0,044         | 1,3439     |
| M3        | 29809,443   | 0,01          | 3,1416     |
| MN4       | 22569,026   | 0,013         | 5,8818     |
| M4        | 22357,082   | 0,036         | 0,384      |
| SN4       | 22176,694   | 0,009         | 0          |
| MS4       | 21972,021   | 0,02          | 1,8151     |

A Figura 29 e Figura 30 contém todos os condicionantes para todo o período de simulação do ano de 2014 e 2017, respectivamente.

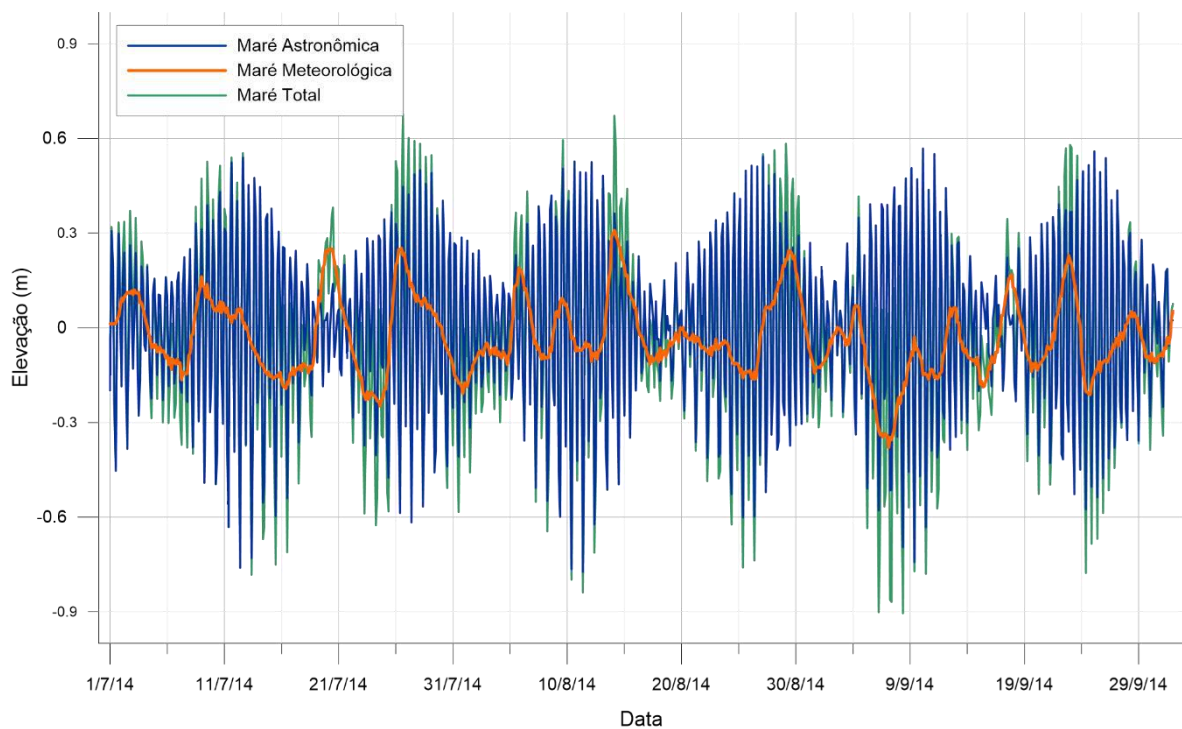


Figura 29. Séries temporais de elevação da maré astronômica combinada à maré meteorológica para o ano de 2014.

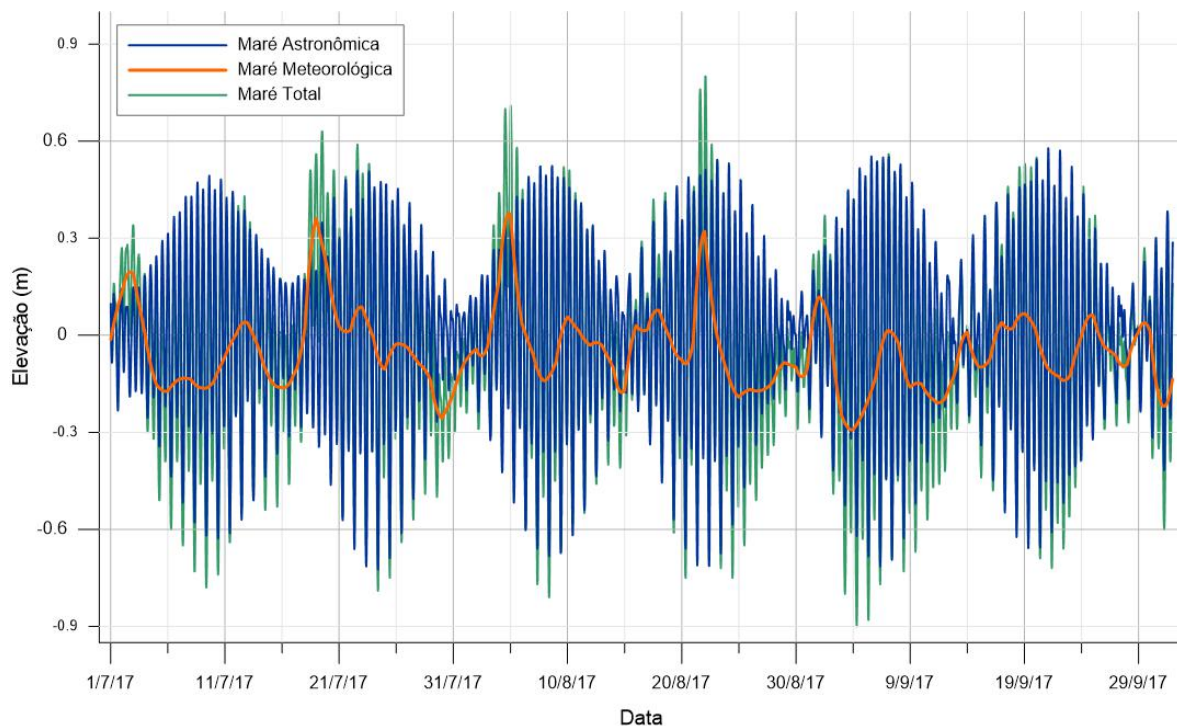


Figura 30. Séries temporais de elevação da maré astronômica combinada à maré meteorológica para o ano de 2017.

- **Regime de ventos**

Os dados de ventos foram coletados do modelo de reanálise do ERA-Interim do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) referentes ao inverno do ano de 2014 e 2017, característica dos pontos localizados nas coordenadas UTM (671002; 7397363) e UTM (653592; 7441852), respectivamente. Os dados utilizados no modelo possuem um intervalo de três horas que são interpolados quadraticamente para o passo de tempo determinado pelo modelador. A distribuição percentual de ocorrência dos ventos na região durante o período simulado está representada na Figura 31.

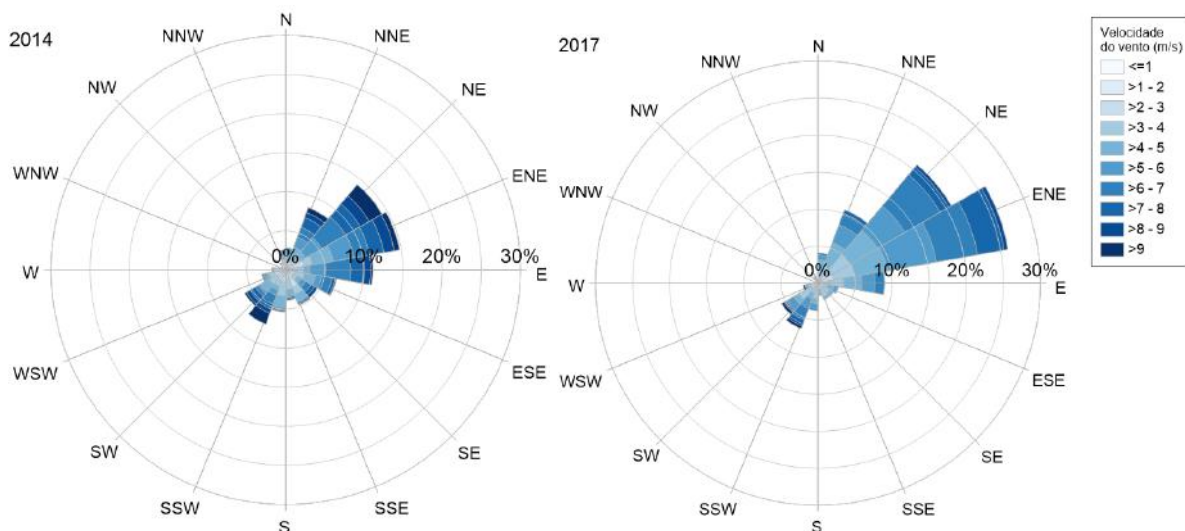


Figura 31. Rosa dos ventos de inverno para o ano de 2014 e 2017, respectivamente. O eixo radial indica a frequência de ocorrência de velocidades e direções: o eixo polar indica a direção do vento e a escala de cor e a intensidade da velocidade.

- **Correntes Costeiras**

A plataforma continental no litoral do Rio de Janeiro apresenta uma orientação no sentido Leste (E) – Oeste (O), caracterizando uma circulação de correntes litorâneas com direção ora para o leste e ora para oeste, paralelas à costa.

Para representar o padrão das correntes na região, estabeleceu-se uma série de Nível Médio Diferencial (NMD) como condição de contorno adicional em todos os nós da fronteira aberta. A série temporal que gerou o NMD foi a série de velocidades médias diárias na direção, extraídas de dados do HYCOM, em um ponto próximo do meio da fronteira aberta, a uma profundidade de 10m da superfície.

- **Vazões Fluviais**

Com o objetivo de determinar o comportamento hidráulico do canal de Sernambetiba foram realizadas simulações da hidrodinâmica do canal considerando os rios e os canais afluentes: rio Morto, rio Cascalho, rio Bonito e o canal das Piabas. O trecho considerado se estende desde o rio Morto até a embocadura do canal no mar.

Os dados de vazões fluviais utilizados na modelagem foram cedidos pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro. As vazões foram consideradas permanentes em todos os cenários simulados (

Tabela 3).

Tabela 3. Vazões permanentes e áreas de drenagem das sub-bacias hidrográficas

| Sub-bacias       | Vazões (m <sup>3</sup> /s) | Área de Drenagem (km <sup>2</sup> ) |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Rio Morto        | 0,25                       | 9,63                                |
| Rio Cascalho     | 0,06                       | 2,48                                |
| Rio Bonito       | 0,08                       | 3,10                                |
| Canal das Piabas | 0,18                       | 7,04                                |

A Figura 32 apresenta os pontos de inserção dos dados de vazão no modelo hidrodinâmico.



Figura 32. Destaque para pontos onde se tem entrada de vazão no modelo.



### **3.5 MODELAGEM DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS**

Esta seção descreve dos modelos de propagação de onda que rodam acoplados com o modelo hidrodinâmico, descrevendo os dados do campo de ondas e a elaboração dos modelos de propagação de ondas.

#### **3.5.1 Dado Ambiental**

Os dados ambientais necessários para a configuração do modelo de propagação de ondas são: altura, período e direção do clima de ondas presentes na área de estudo.

- **Clima de ondas**

Os dados de ondas em águas profundas utilizados na modelagem de propagação de ondas são dados de reanálise obtidos através do ECMWF, do ERA-Interim (ERA-INTERIM, 2019) referentes aos meses de julho, agosto e setembro do ano de 2014 e 2017. A série temporal de ondas é característica do ponto localizado nas coordenadas UTM (671002; 7397363) e UTM (678013; 7344667), respectivamente. As estações estão situadas com profundidade de aproximadamente 170 m, englobando porções do Oceano Atlântico Sul.

As alturas das ondas são representadas pelas alturas significativas ( $H_s$ ) definidas pela média das maiores ondas de 1/3 das ondas totais. No caso das ondas incidentes na praia da Macumba no ano de 2014 o valor máximo de  $H_s$  é 2,7 metros com variação de ondas de E a SSW e período de pico variando entre 8 e 17 s (Figura 33). Para as ondas referentes ao ano de 2017, o valor máximo de  $H_s$  é 3,8 m e predominância de ondas provenientes do quadrante sudeste e período de pico variando entre 6 e 16 s (Figura 34).

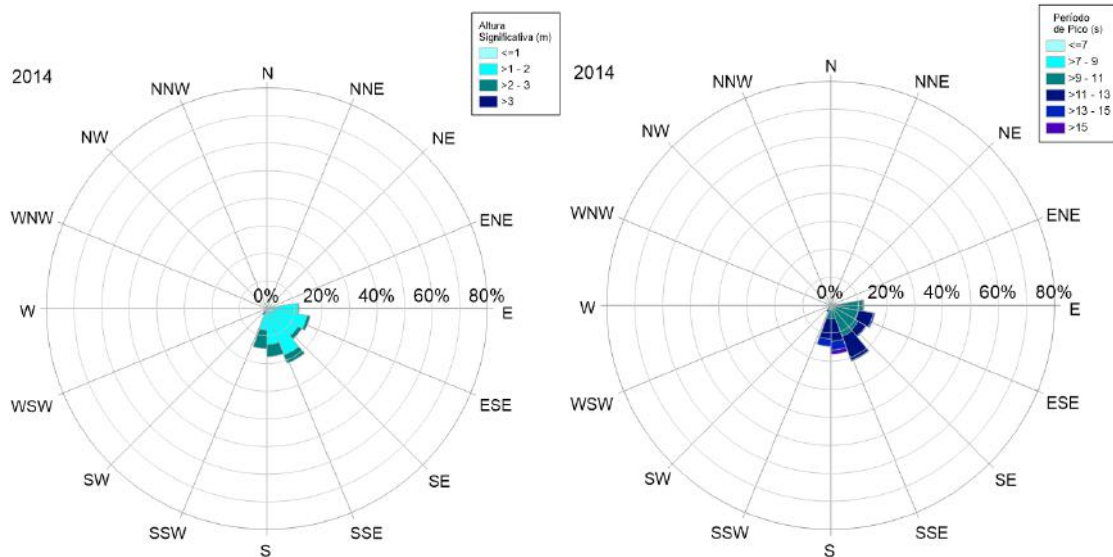


Figura 33. Clima de ondas considerado para a modelagem de propagação de ondas baseado nos dados gerados para o inverno de 2014. O eixo circular indica a direção da onda em graus azimutais e os eixos radiais indicam o percentual de ocorrência de ondas na faixa de alturas ou períodos indicados.

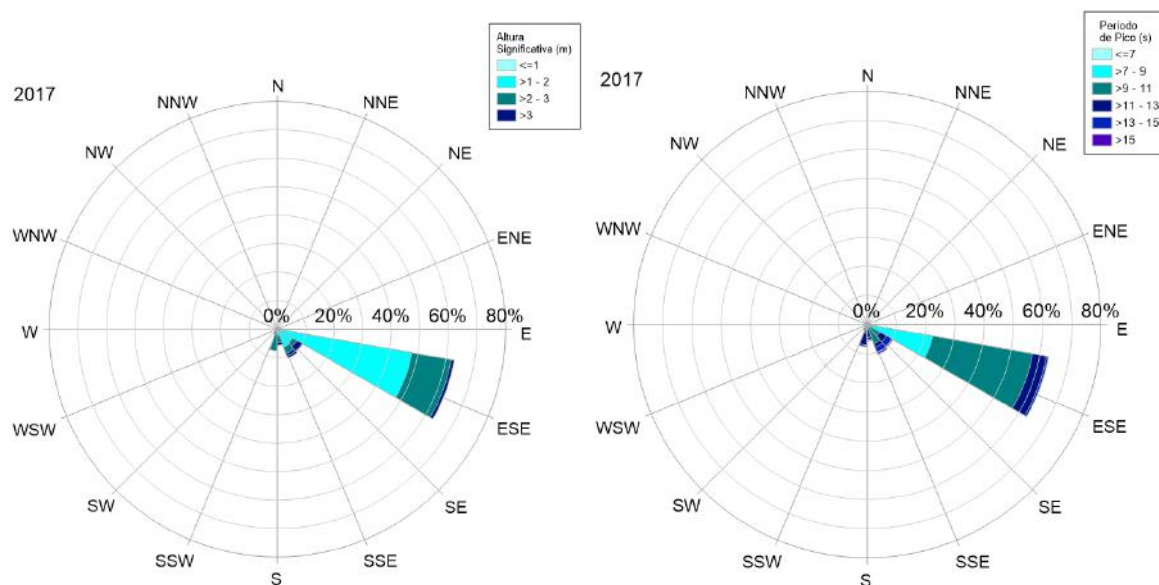


Figura 34. Clima de ondas considerado para a modelagem de propagação de ondas baseado nos dados gerados para o inverno de 2017. O eixo circular indica a direção da onda em graus azimutais e os eixos radiais indicam o percentual de ocorrência de ondas na faixa de alturas ou períodos indicados.

### 3.5.2 Modelos de propagação de onda

O clima de ondas característico do local apresenta um leque de direções entre  $92^\circ$  e  $214^\circ$ , onde ondas com azimute entre  $92^\circ$  e  $101,25^\circ$  foram consideradas com direção  $101,25^\circ$  e ondas com azimute superior a  $213,75^\circ$  foram consideradas com direção  $213,75^\circ$ . Dessa forma, foram desenvolvidos cinco modelos com o intuito de simular a propagação de ondas dentro desse leque, sendo esses:

- Modelo M-ESE: Modelo de propagação de ondas com azimutes entre  $101,25^\circ$  e  $123,75^\circ$ .
- Modelo M-SE: Modelo de propagação de ondas com azimutes entre  $123,75^\circ$  e  $146,25^\circ$ .
- Modelo M-SSE: Modelo de propagação de ondas com azimutes entre  $146,25^\circ$  e  $168,75^\circ$ .
- Modelo M-S: Modelo de propagação de ondas com azimutes entre  $168,75^\circ$  e  $191,25^\circ$ .
- Modelo M-SSW: Modelo de propagação de ondas com azimutes entre  $191,25^\circ$  e  $213,75^\circ$ .

A Figura 35, Figura 36 e Figura 37 a seguir mostram as grades numéricas dos modelos citados acima para simular a propagação de ondas. Foram utilizadas duas grades conjuntas, sendo a maior ao largo e a menor, mais refinada, próximo à costa para gravação de resultados.

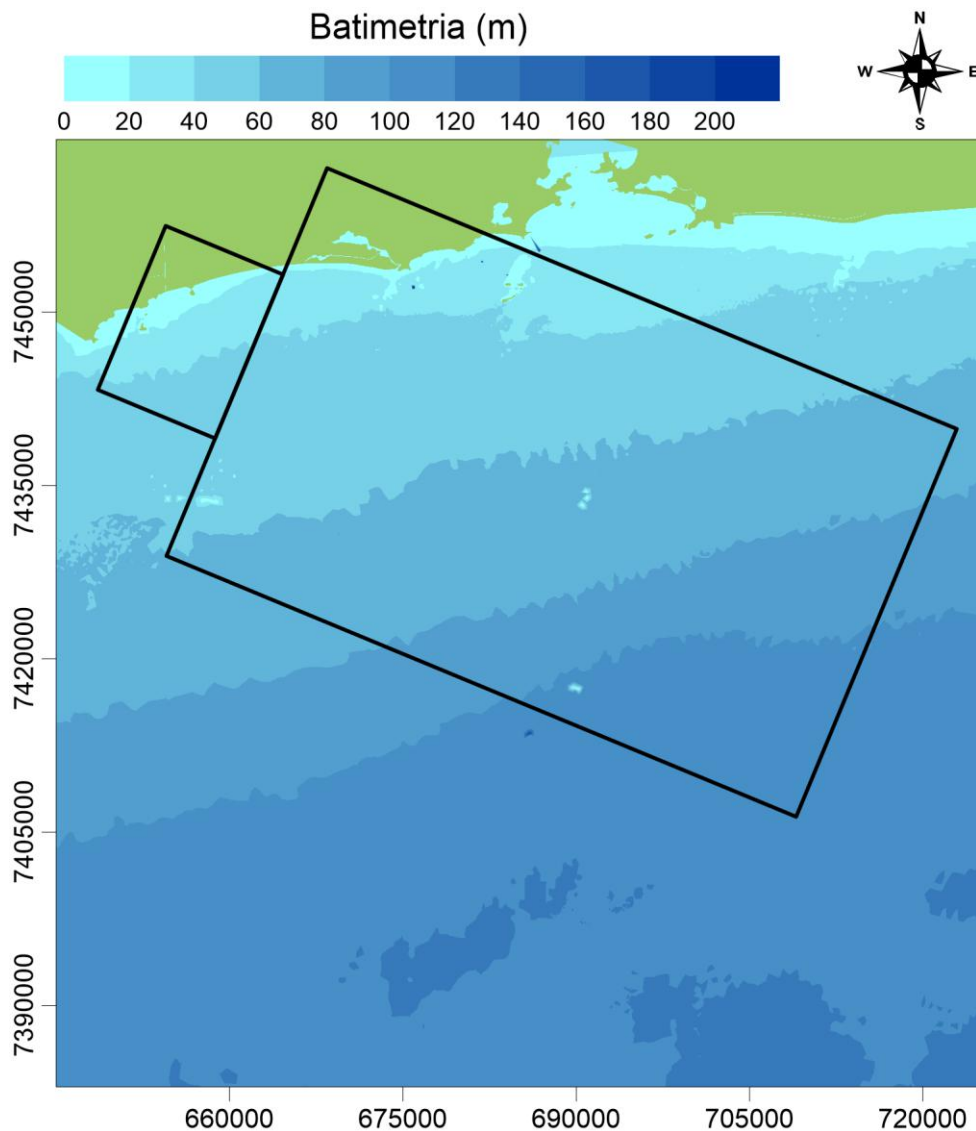


Figura 35. Grade numérica do modelo de propagação de ondas M-ESSE.

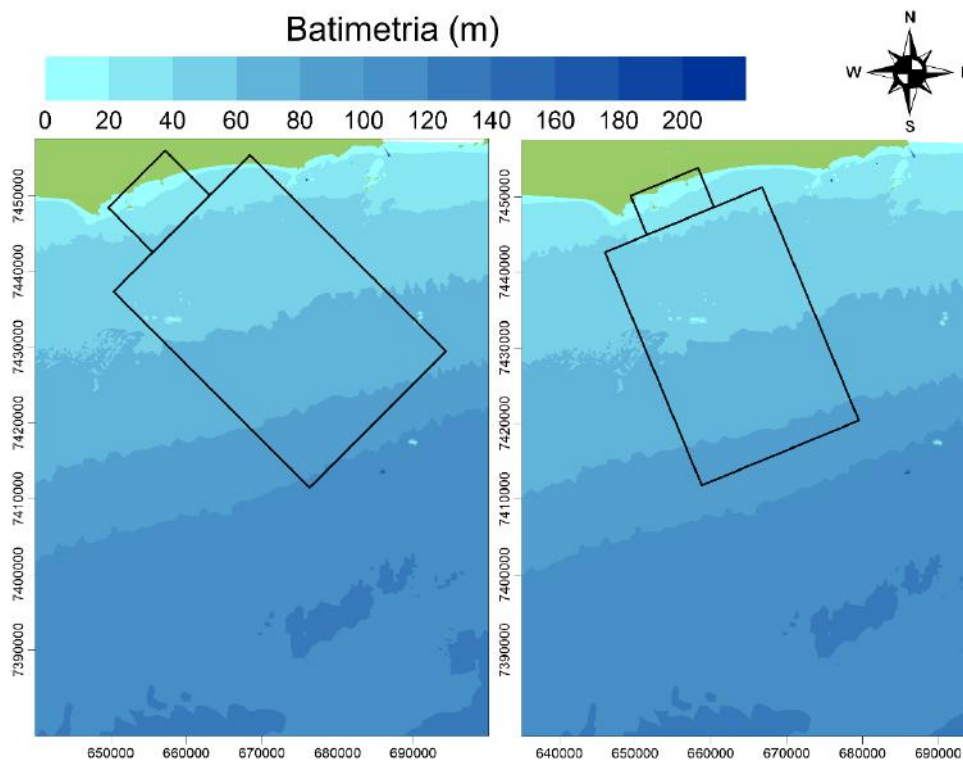


Figura 36. Grade numérica do modelo de propagação de ondas M-SE e M-SSE, respectivamente.

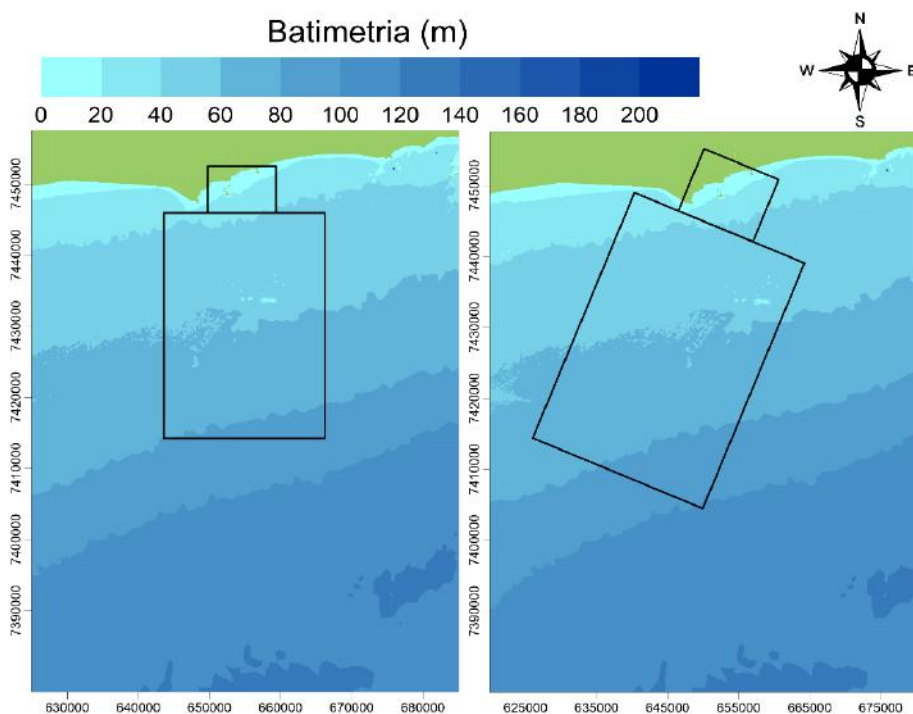


Figura 37. Grade numérica do modelo de propagação de ondas M-S e M-SSW, respectivamente.

O modelo de propagação de ondas (MPO) foi acoplado com o modelo hidrodinâmico (MH), alterando a circulação hidrodinâmica principalmente na zona costeira. Isso se deve ao fato da

modificação que ocorre na tensão de atrito no fundo nas regiões mais rasas e perto da linha de costa e pela inclusão da tensão de radiação gerada por ondas.

### **3.6 MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

Nesta seção serão descritos os dados de granulometria dos sedimentos da área de interesse e a configuração do modelo de transporte de sedimentos.

#### **3.6.1 Dado Ambiental**

O dado ambiental necessário para configuração do modelo de transporte de sedimentos é a granulometria dos sedimentos presente na área de estudo.

- **Granulometria de Sedimentos**

Os dados de granulometria de sedimentos foram obtidos a partir da análise granulométrica realizada por Pena (2017), caracterizando a região de estudo pela presença de areia muito fina a areia muito grossa com predominância de areia grossa na faixa litorânea.

#### **3.6.2 Modelo de transporte de sedimentos**

O modelo de transporte de sedimentos foi configurado utilizando cinco classes de sedimentos com os valores de seus respectivos diâmetros mediano (Tabela 4). Os sedimentos foram distribuídos no domínio de modelagem em setores, sendo criado sete setores ao longo da costa, um setor para os rios e canal de Sernambetiba e um setor abrangendo a região oeste do domínio de modelagem e mar aberto. Nos setores na linha de costa há predominância de areia grossa, enquanto que os outros setores são caracterizados pela predominância de areia média (Figura 38).

Tabela 4. Classes de sedimentos

| <b>Sedimento</b>   | <b>Diâmetro mediano (mm)</b> |
|--------------------|------------------------------|
| Areia muito fina   | 0,09                         |
| Areia fina         | 0,17                         |
| Areia média        | 0,35                         |
| Areia grossa       | 0,75                         |
| Areia muito grossa | 1,5                          |

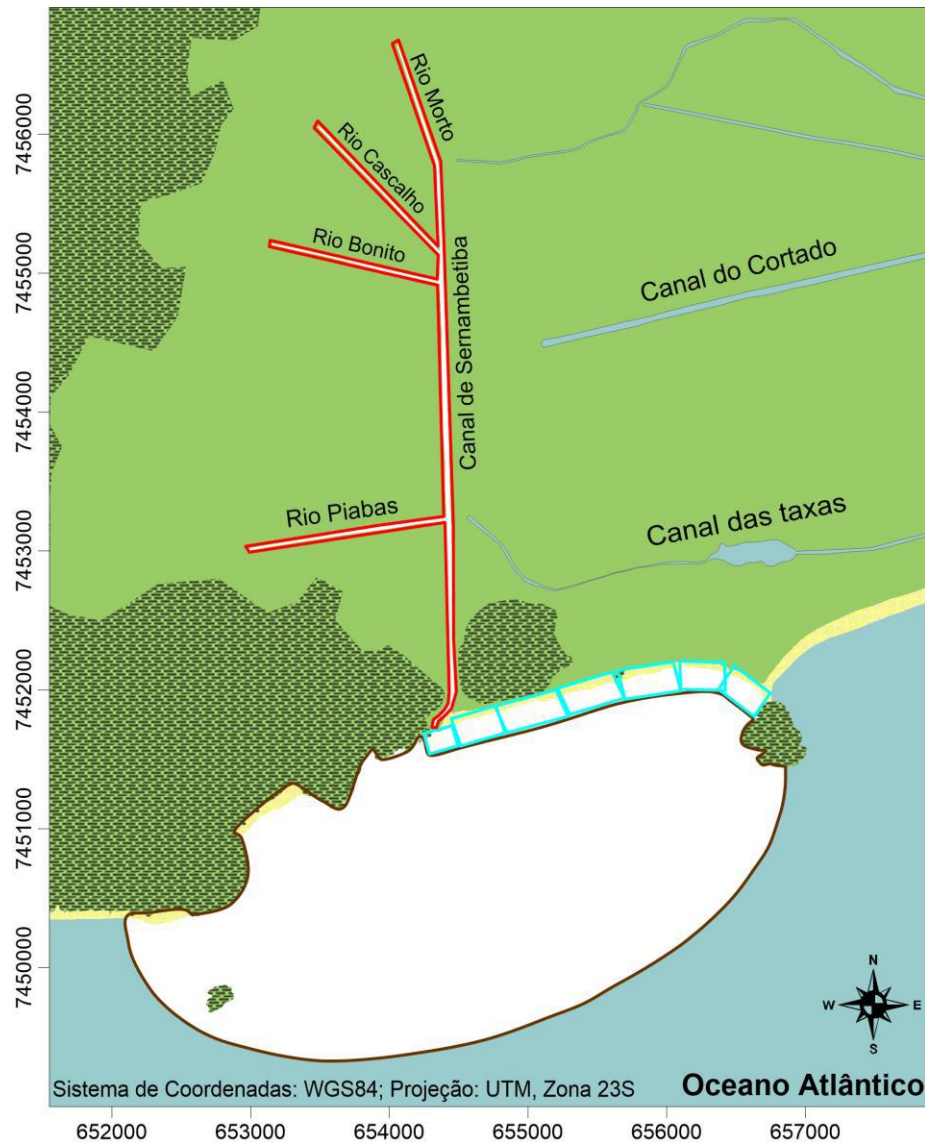


Figura 38. Setores de distribuição de sedimentos no domínio de modelagem. Setor dos rios e canal de Sernambetiba (linha vermelha), setores na linha costeira (linha azul) e setor da porção oeste e mar aberto (linha marrom).

No modelo de transporte de sedimentos foi utilizada a fórmula de Van Rijn (2007) para o cálculo do transporte de sedimentos que combina a tensão crítica de Shields para correntes com a tensão crítica para ondas. Essa escolha é devido a essa ser a única fórmula calibrada para simular ondas e correntes no transporte longitudinal de sedimentos. Nesse modelo foi desconsiderado o transporte transversal de sedimentos.

O modelo hidrodinâmico, modelo de propagação de ondas e o modelo de transporte de sedimentos foram acoplados de forma que o transporte total de sedimentos fosse calculado a partir da ação conjunta de ondas e correntes hidrodinâmicas, onde a evolução da superfície de fundo ocorre a cada interação entre esses modelos, variando a batimetria no tempo. Assim, pode-se

analisar a evolução morfológica da praia da Macumba no período modelado considerando os três cenários do estudo.

### **3.7 REPLENAMENTO DO ESTOQUE DE AREIA DA PRAIA DA MACUMBA**

Quanto à restauração da praia da Macumba, estimou-se que seria necessário realizar um reple-namento de 600.000 m<sup>3</sup> de areia. Esse volume é um valor intermediário, utilizando as fórmulas descritas na seção 2.3.1, considerando diferentes possibilidades, sendo também o mesmo utili-zado no estudo de Rosman et al. (2000).

O volume escolhido gera um aumento de 45 m de faixa de praia, comprimento baseado em análises de imagens de satélite obtidas no Google Earth de anos anteriores e uma comparação da linha de costa com as praias adjacentes.

### **3.8 DIMENSIONAMENTO DE GUIA-CORRENTES**

Para dimensionar o tamanho dos guia-correntes é necessário, primeiramente, determinar a altura efetiva ( $H_e$ ) da onda incidente na costa para que assim seja possível calcular a profundidade de fechamento.

A altura de onda efetiva para as ondas em águas profundas referente aos dados de 2017 foi calculada, obtendo uma onda com altura de 3,8 metros, período de 15 s e direção de 158°. Outras duas ondas com a mesma altura e período, porém com direção de 148° e 168° também foram propagadas com o intuito de analisar a altura efetiva máxima dentre as três ondas simu-ladas no nível mínimo de mar, ou seja, nível correspondente a baixa-mar de sizígia.

A Figura 39 mostra a maior altura de onda efetiva, dentre as três ondas simuladas, na região da praia próxima a embocadura do canal de Sernambetiba.

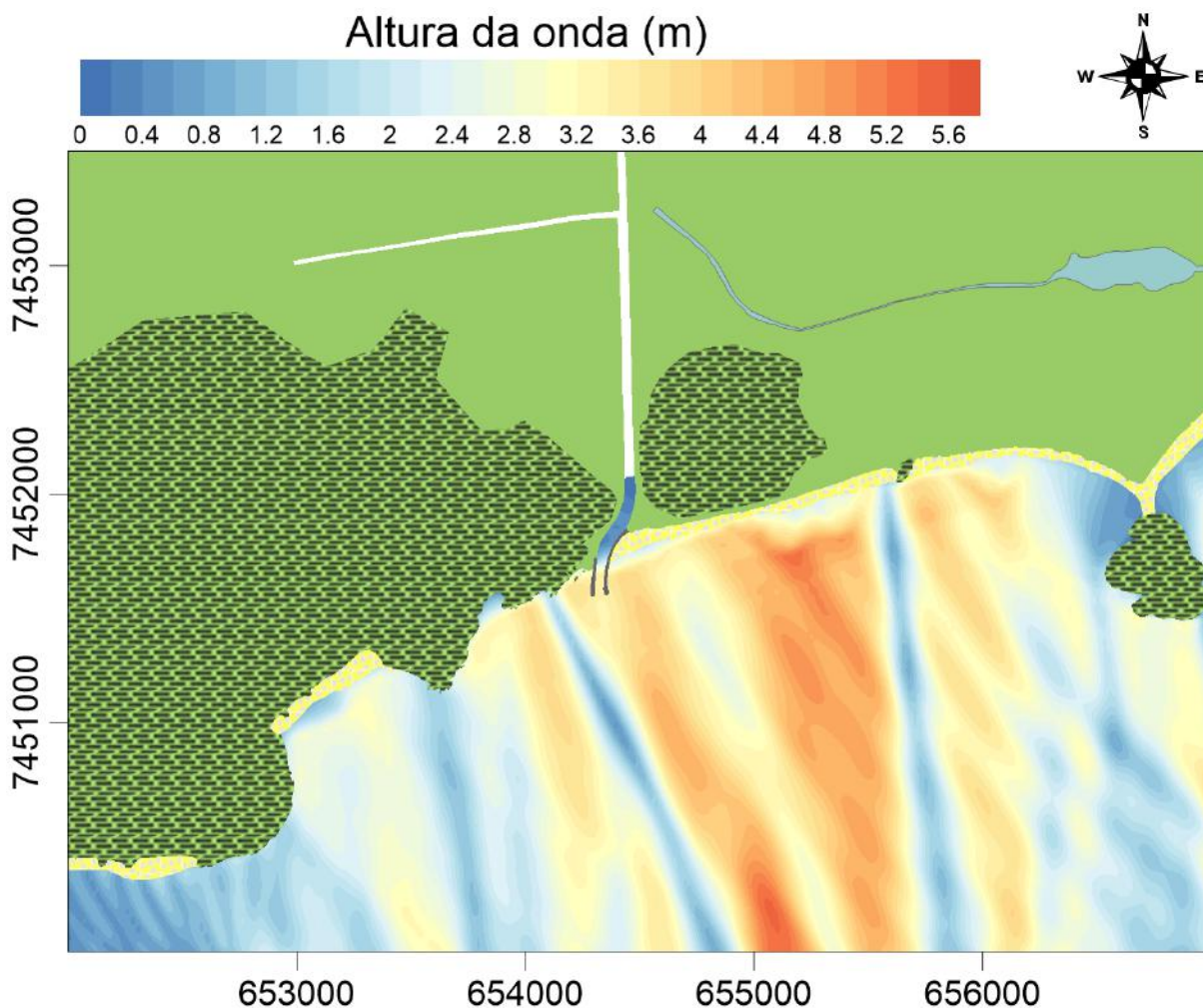


Figura 39. Mapa gerado a partir do modelo de propagação de ondas com ondas propagando na direção su-sudeste, azimute 158°, período de pico de 15s, altura significativa de ondas em águas profundas de 3,8m ( $H_s$  equivalente a 0,14% do tempo) no nível mínimo do mar.

A partir do resultado do modelo de propagação de onda acima, pode-se concluir que a altura efetiva da onda que incide na praia é de 4 metros com período de 15 segundos. Utilizando este valor na equação (5), a profundidade de fechamento é igual a 6,3 metros em relação ao nível mínimo do mar (Nível de Redução da Carta Náutica 1620). Isso acarreta a construção de um guia-corrente a oeste do canal de 171 metros de comprimento e a leste do canal a 281 metros de comprimento. É importante destacar que a configuração adotada para os guia-correntes é apenas de caráter preliminar, adequada para as análises a serem realizadas neste trabalho. O dimensionamento detalhado dos guia-correntes não está entre os objetivos deste estudo.



### 3.9 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

Os métodos de validação e calibração tem como objetivo confirmar que os resultados dos modelos representam os fenômenos que ocorrem no ambiente. Em tais métodos se compara, através de um processo iterativo seguido de ajustes, valores medidos e valores computados. A Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup> apresenta detalhes técnicos sobre procedimentos de calibração de modelos (ROSMAN, 2019).

Nesse trabalho foi realizado uma calibração qualitativa com base em imagens e resultados, já que não há dados medidos diretamente para esse caso. Os resultados do modelo condizem com os resultados observados na área de estudo.

Destaca-se que, mesmo quando não se dispõe de dados medidos na forma ideal para permitir a realização de um procedimento abrangente de calibração, os modelos do SisBaHiA<sup>®</sup> tem mecanismos de auto calibração que permitem obtenção de resultados confiáveis. Porém, deve-se enfatizar que a confiabilidade depende fortemente da validade dos dados de entrada.

Sendo assim, é necessário atender alguns requisitos afim de atingir coerências entre os valores medidos e computados, sendo alguns desses: garantir que a geometria do corpo de água esteja condizente com a as medições de níveis e correntes, assim como os forçantes dos escoamentos e a caracterização do fundo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos nas modelagens hidro-sedimentológicas, abordando as análises do padrão de circulação hidrodinâmica, a evolução morfológica, análises da variação do perfil de praia e isolinhas de cota de fundo após ressaca. Todas as análises têm o objetivo de dar um entendimento dos fenômenos causadores de erosão e assoreamento.

Para facilitar a compreensão e análise dos resultados foram designados 4 pontos de análise ao longo do domínio de modelagem, chamados de estações. As estações foram escolhidas em pontos distintos da faixa de praia e na embocadura do canal de Sernambetiba, como mostrado na Figura 40.

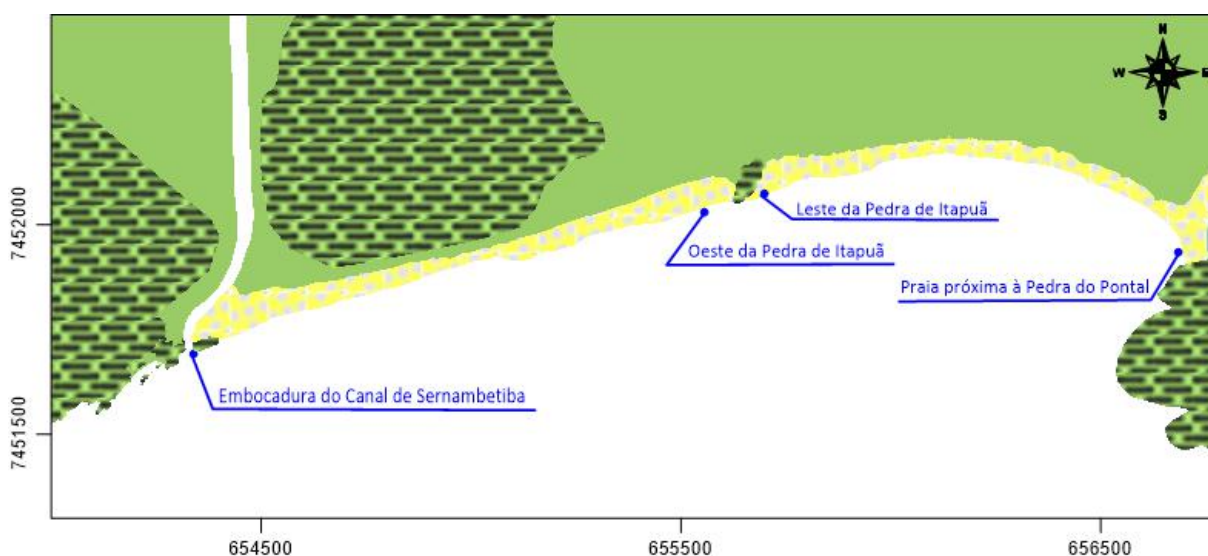


Figura 40. Mapa de estações de controle para gravação e exibição de resultados temporais dos modelos, com informações gravadas a cada trinta minutos.

### 4.1 MODELAGEM DA PRAIA DA MACUMBA NA SITUAÇÃO ATUAL

A situação atual é caracterizada pela praia da Macumba com déficit de sedimentos e sem o guia-correntes de regularização da embocadura do canal da Sernambetiba. Nesse cenário foi considerado um clima de ondas de um ano posterior ao fenômeno El Niño muito forte.

#### **4.1.1 Padrões de circulação hidrodinâmica**

A compreensão dos processos hidrodinâmicos da área de estudo é importante para o entendimento dos processos sedimentológicos. Tais processos são interligados, já que o transporte de sedimentos é diretamente associado à ação das correntes geradas por ondas, marés e ventos.

O padrão de correntes na área de estudo varia de acordo com a região do domínio de modelagem. No canal de Sernambetiba a circulação hidrodinâmica é decorrente da maré astronômica, enquanto que na linha de costa as correntes dependem, predominantemente, da incidência de ondas. Na porção mais afastada da costa, a maré meteorológica é o fator dominante na circulação das correntes. Esse padrão pode ser observado na Figura 41, Figura 42 e Figura 43 respectivamente.

A circulação na praia da Macumba é exemplificada nos instantes de maré de preamar (PM) e baixa-mar (BM) de sizígia e quadratura. Da Figura 44 a Figura 47 estão ilustrados padrões de circulação. As setas indicam a direção das correntes e a intensidade da velocidade é indicada através das cores do mapa de isolinhas.

Observamos que as correntes mais intensas ocorrem durante a maré de sizígia e estão localizadas em torno da Ilha das Peças e no costão rochoso próximo a Prainha, alcançando magnitudes de no máximo 0,7 m/s. Além disso, também pode ser observado células de recirculação próximas à praia, modificando a direção da corrente para leste, influenciando o transporte de volume em direção à praia próxima a pedra do Pontal.

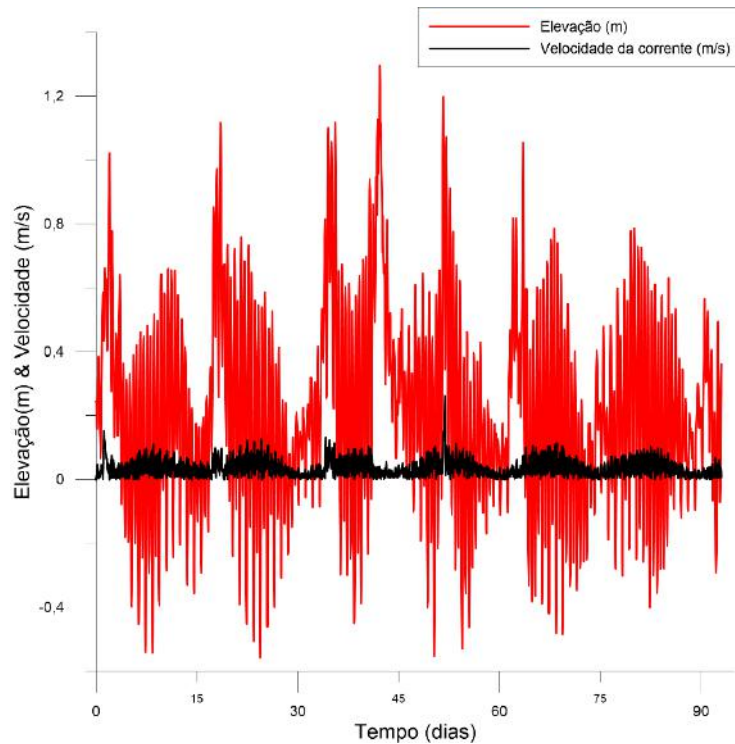


Figura 41. Circulação hidrodinâmica dependente da maré astronômica no canal de Sernambetiba e rios. Nota-se que durante a enchente temos níveis maiores e durante a vazante os valores de níveis são menores, mostrando a correlação entre a velocidade da corrente e a maré astronômica.

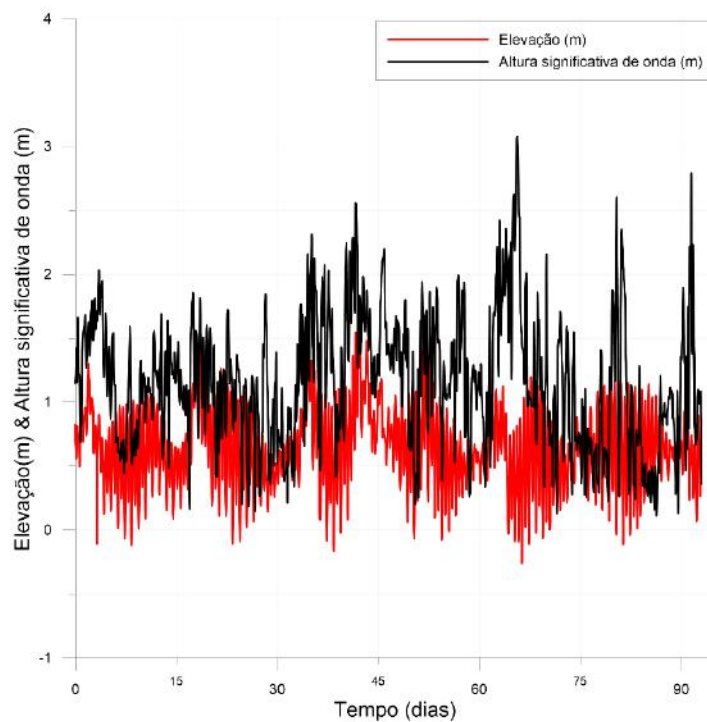


Figura 42. Circulação hidrodinâmica dependente da ação das ondas na linha de costa da praia da Macumba. No gráfico nota-se que as ondas com maiores alturas significativas elevam o nível, influenciando diretamente na velocidade das correntes.

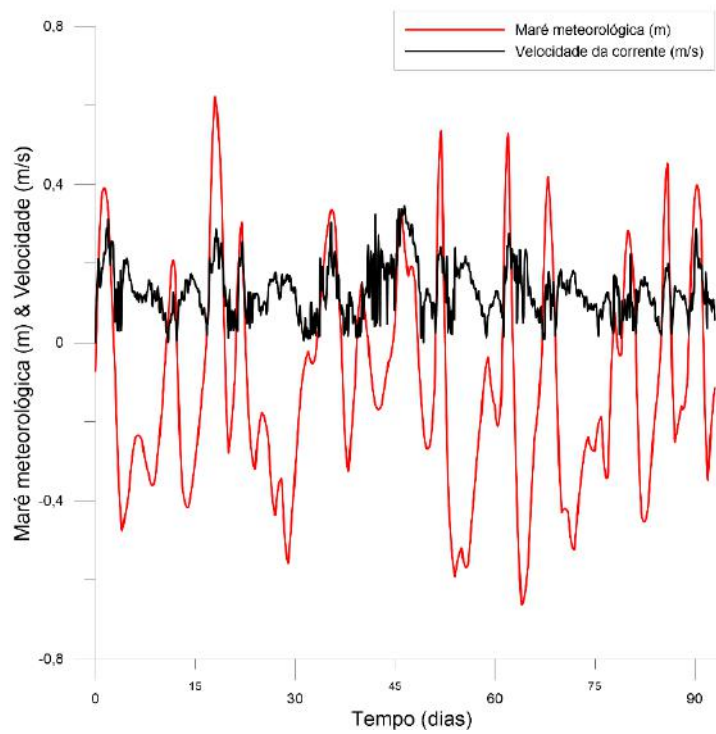


Figura 43. Circulação hidrodinâmica dependente da maré meteorológica na região próxima da fronteira aberta. Pode-se observar que quando temos os maiores valores da velocidade da corrente, temos também os maiores valores da maré meteorológica, confirmando a predominância da maré meteorológica no padrão de circulação das correntes.

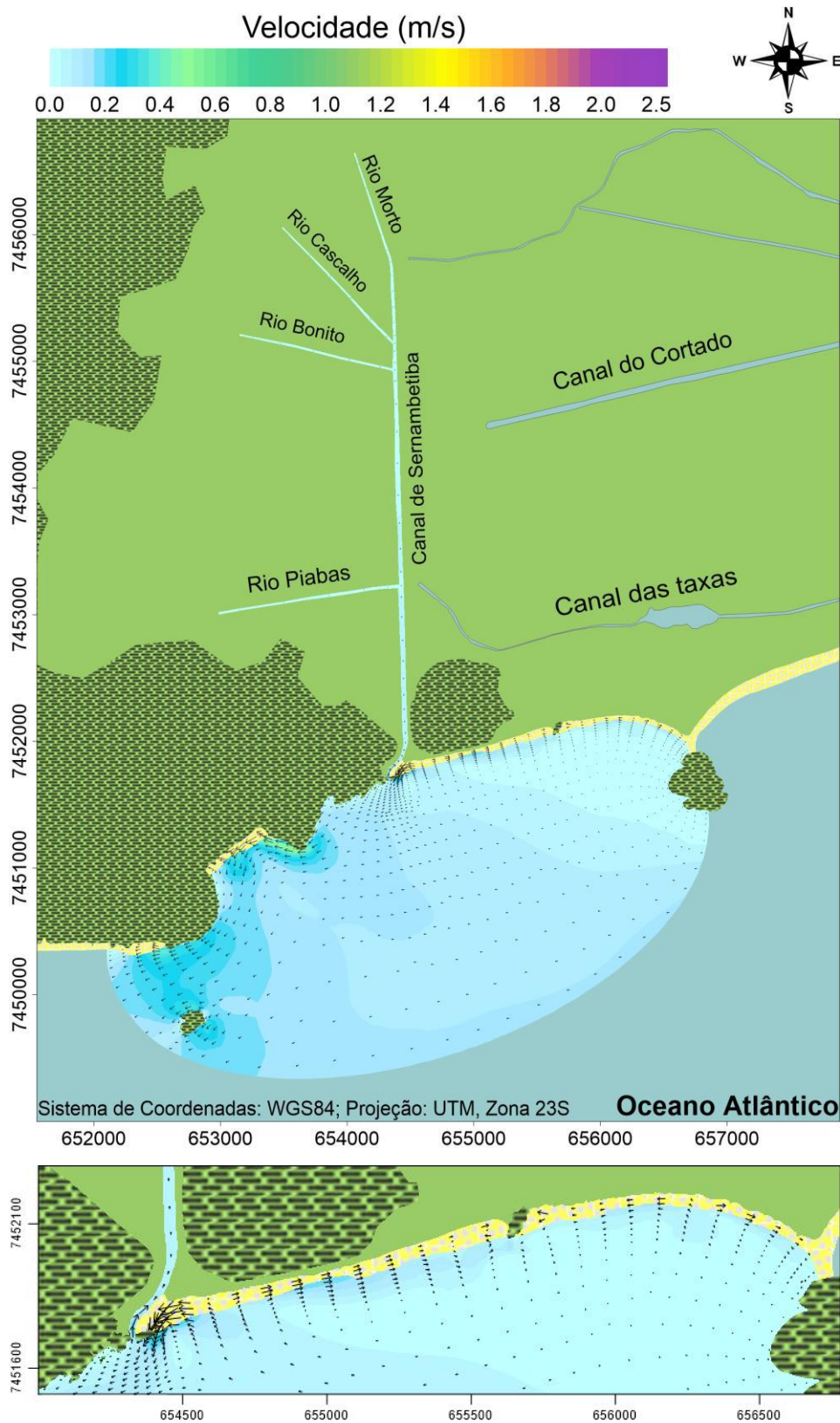


Figura 44. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de sizígia para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 2 m. Observa-se baixa magnitude das correntes na região da praia da Macumba, com velocidades em torno de 0,1 m/s. Em alguns pontos específicos a intensidade das correntes aumenta, não ultrapassando 0,4 m/s.

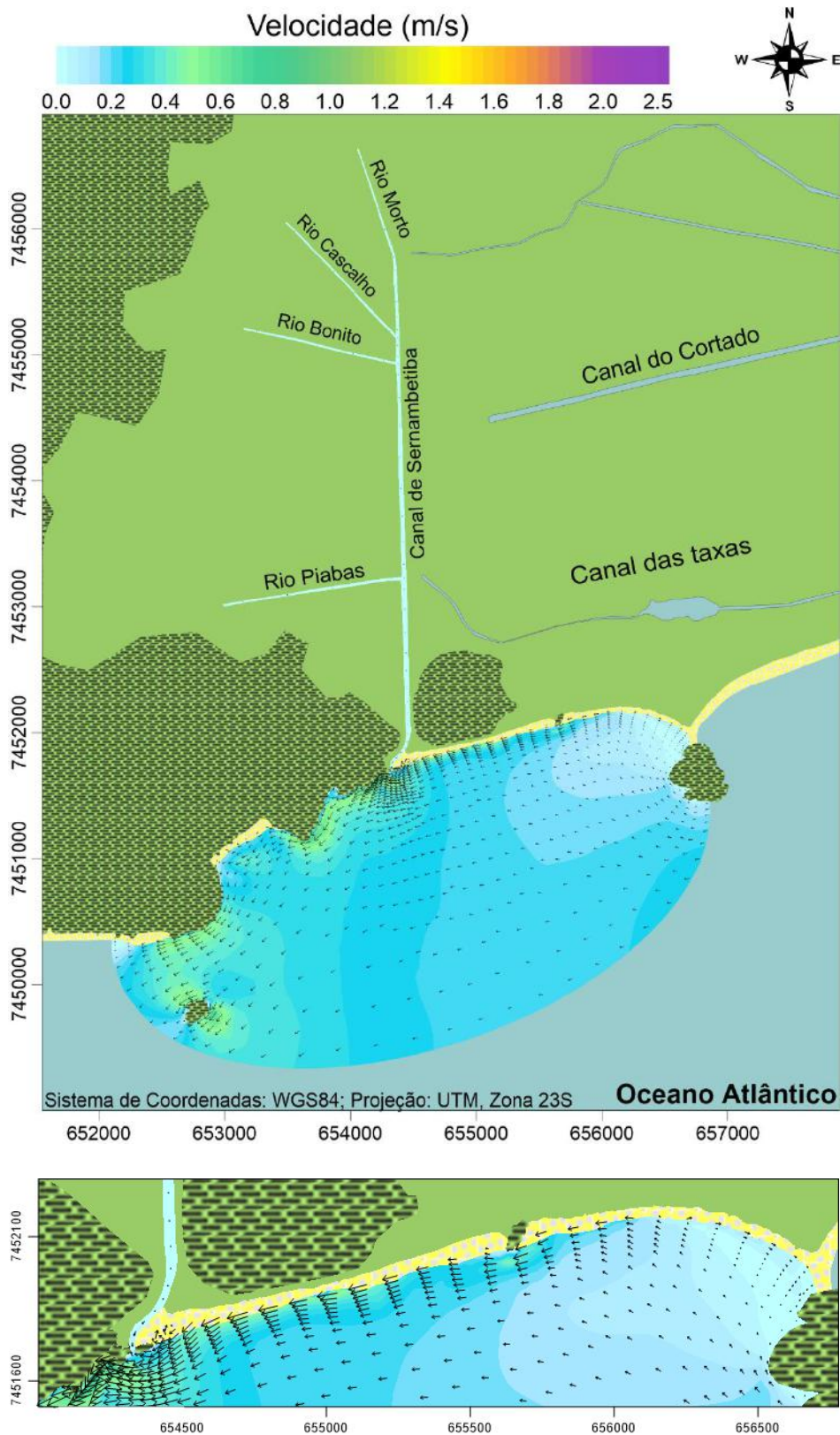


Figura 45. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de sizígia para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 2 m. Nesse instante, pode-se observar que as maiores velocidades são na região oeste do domínio de modelagem em locais que a corrente encontra obstáculos. Comparando com a BM da quadratura (Figura 47) nota-se que na sizígia as intensidades das correntes são muito maiores.

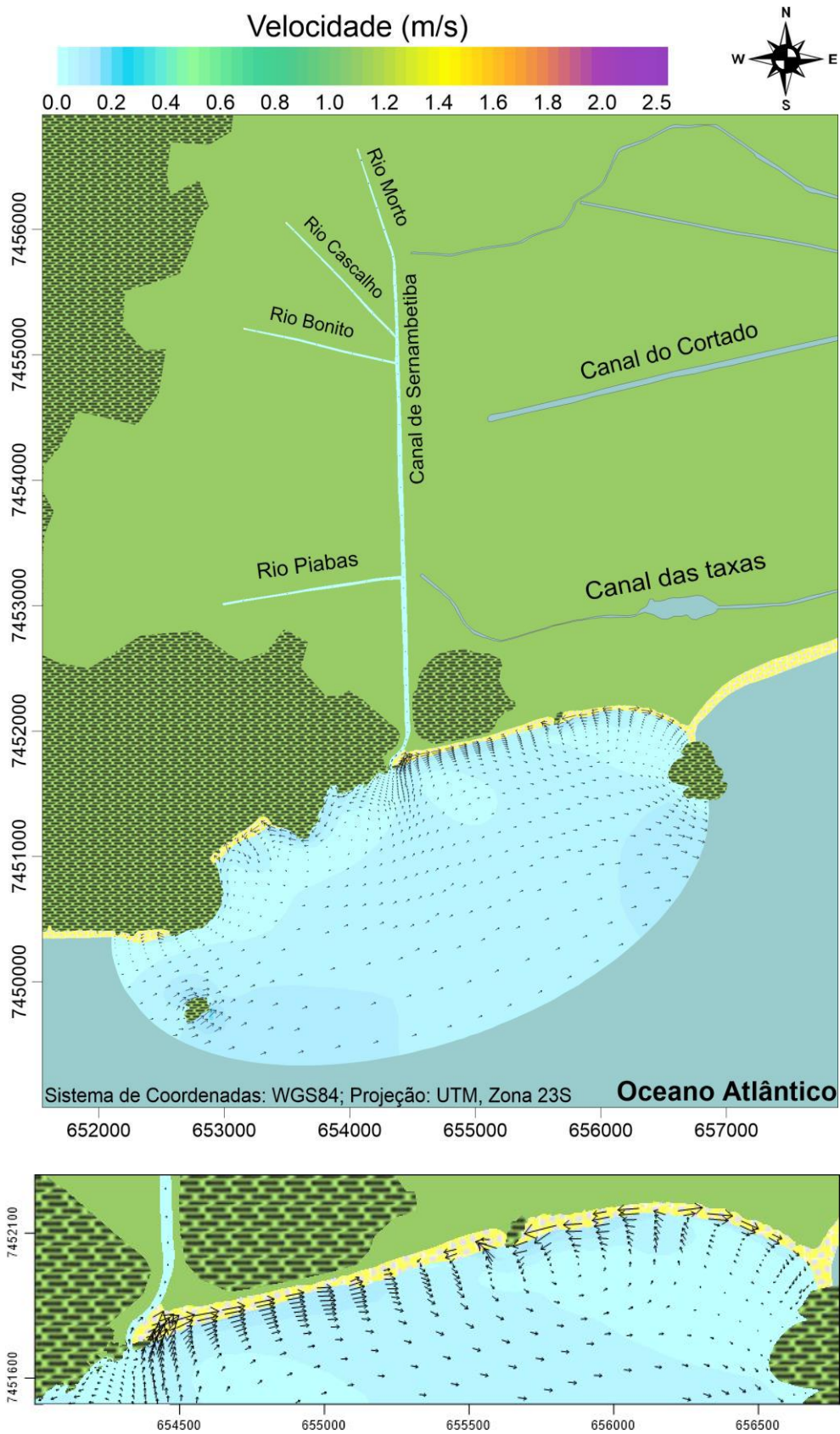


Figura 46. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de quadratura para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 1,4 m.



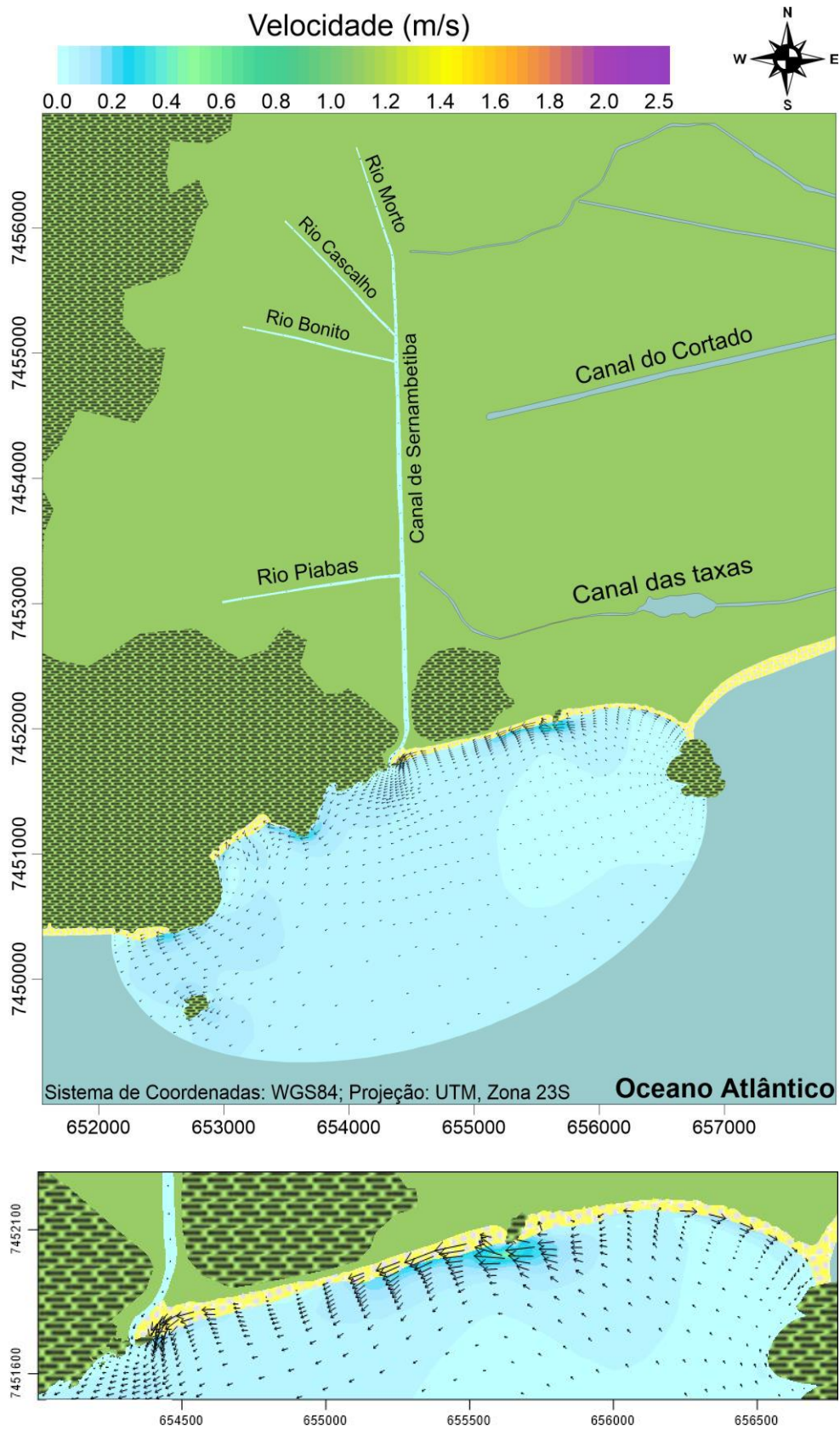


Figura 47. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de quadratura para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 2 m.

#### 4.1.2 Evolução morfológica

A Figura 48 mostra a variação de batimetria no dia 0, dia 31, dia 62 e no dia 92 de simulação. A Figura 50 apresenta a variação da batimetria no instante final de simulação para todo o domínio de modelagem. Por convenção, a cota batimétrica é o negativo da cota geométrica,  $h(x, y) = -z$ . Portanto, os valores negativos representam assoreamento e os valores positivos representam erosão.

A praia da Macumba apresentou erosão ao longo de quase toda sua extensão durante todo o período de simulação. A porção a oeste da pedra de Itapuã é a região mais vulnerável as ressacas, apresentando as maiores taxas de erosão, em torno de 3,3 metros. Outra região bastante afetada pelas ondas de sudeste é a porção a leste da pedra de Itapuã, sendo a segunda mais erodida durante toda a simulação.

A região abrigada próxima à pedra do Pontal apresentou assoreamento em torno de 1,2 metros. Essa região é protegida contra as ondas de sudeste pela pedra do Pontal e apresenta correntes com pequenas magnitudes, gerando condições de acumulação de sedimento.

A embocadura do canal de Sernambetiba assoreou em torno de 0,5 metros no final da simulação. As taxas de assoreamento chegam a valores acima de 1 metro ao longo da simulação, formando um banco de sedimentos nas regiões mais profundas (Figura 49). Isso se deve ao fato do transporte longitudinal resultante ser em direção ao canal e como as correntes nessa região possuem menores magnitudes, os sedimentos se depositam.

A Figura 49 apresenta a circulação das correntes em quatro instantes. O dia 0 apresenta uma onda com azimute 131.62 graus, período de pico 11 s e altura significativa 1,2 m; O dia 31 apresenta uma onda com azimute 101.25 graus, período de pico 9 s e altura significativa 1,4 m; O dia 62 apresenta uma onda com azimute 189.91 graus, período de pico 11 s e altura significativa 2,4 m; e o dia 92 apresenta uma onda com azimute 101.25 graus, período de pico 9 s e altura significativa 1,8 m.

A Figura 49 também observar-se as correntes litorâneas longitudinais (*longshore currents*) resultantes da incidência oblíqua das ondas, apresentando as maiores magnitudes e maior capacidade de transporte de sedimentos.

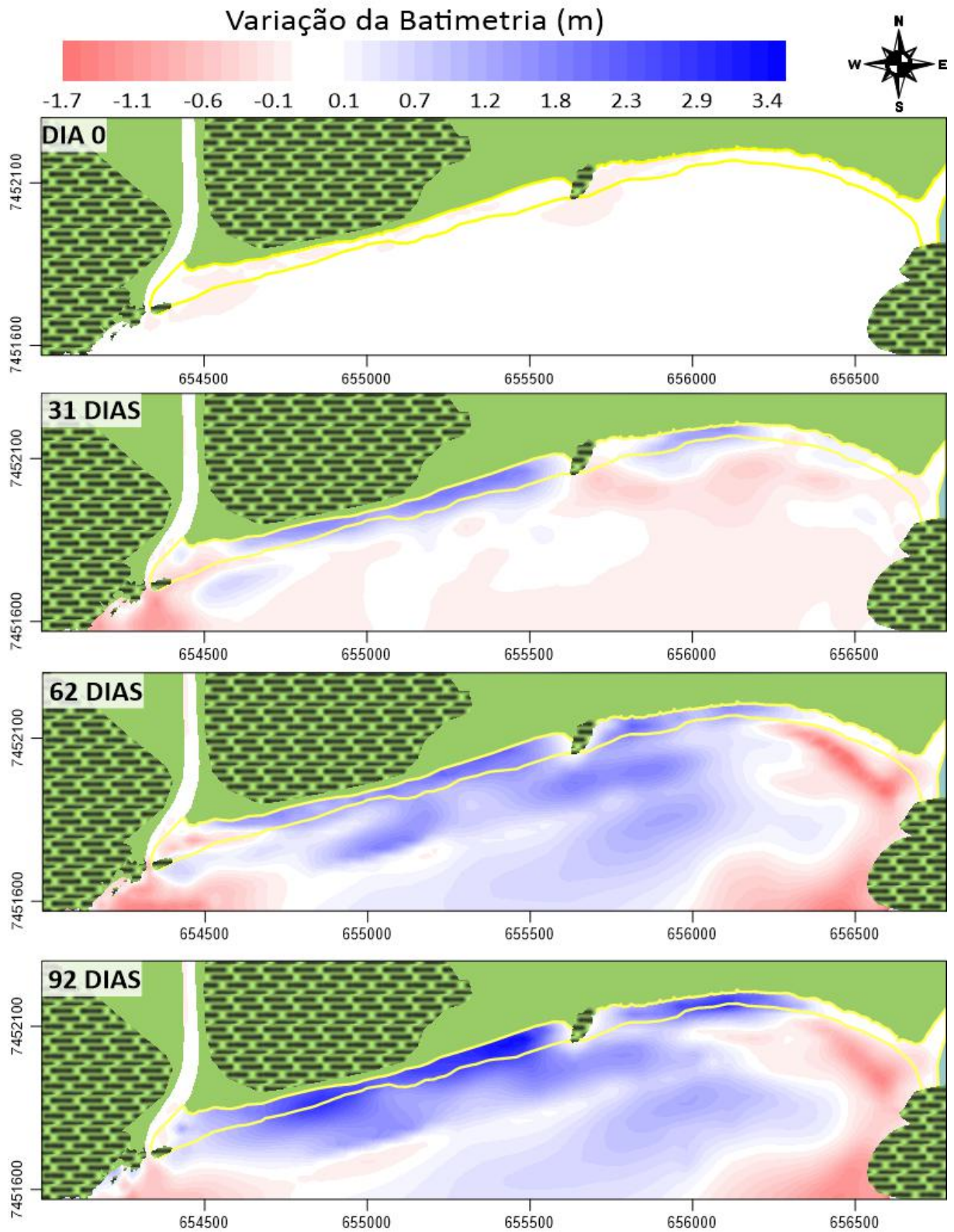


Figura 48. Variação da batimetria no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2017 para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guaiacorrentes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento.

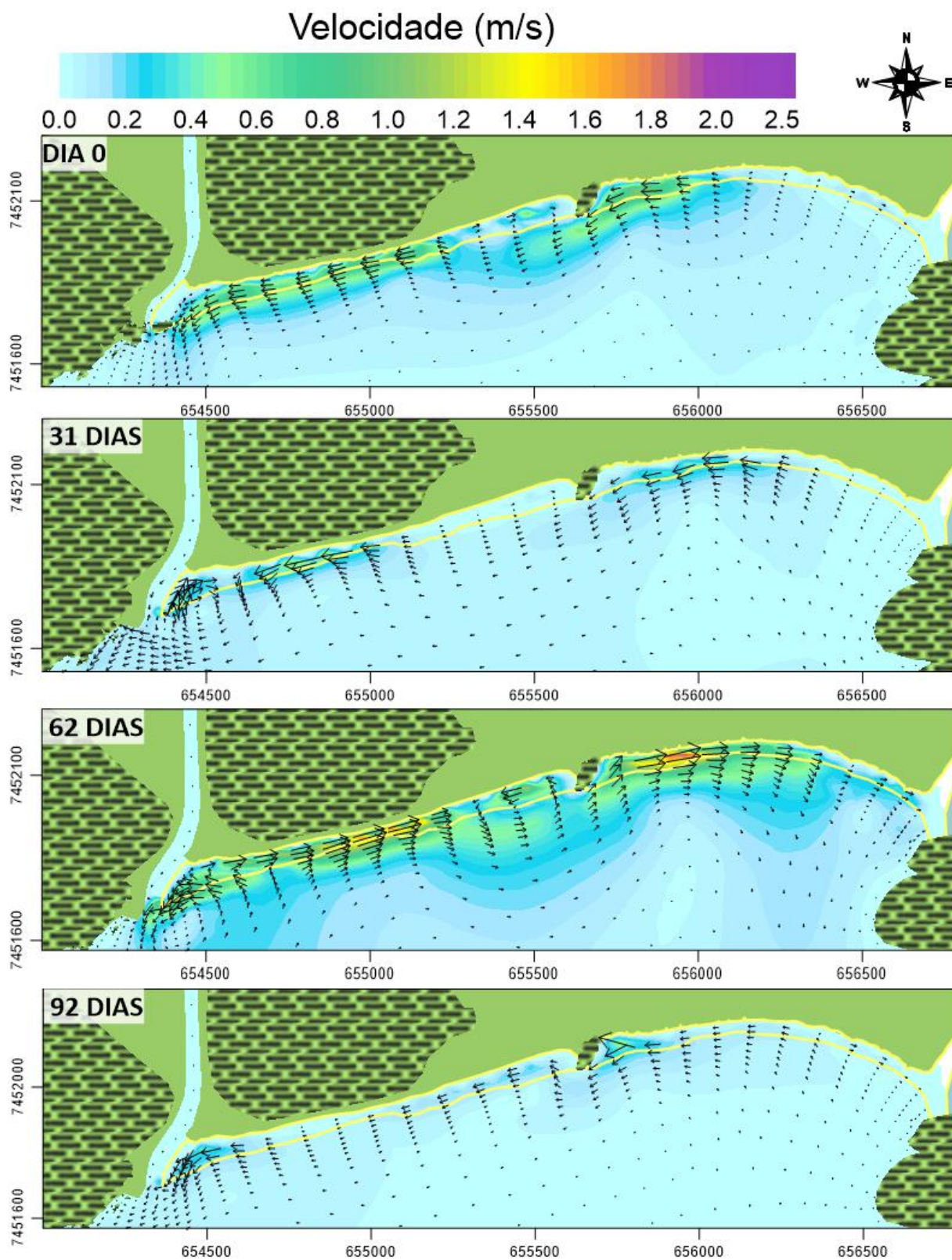


Figura 49. Distribuição das correntes na praia da Macumba no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2017 para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Destaca-se a formação de longshore currents nos 62 dias de simulação.

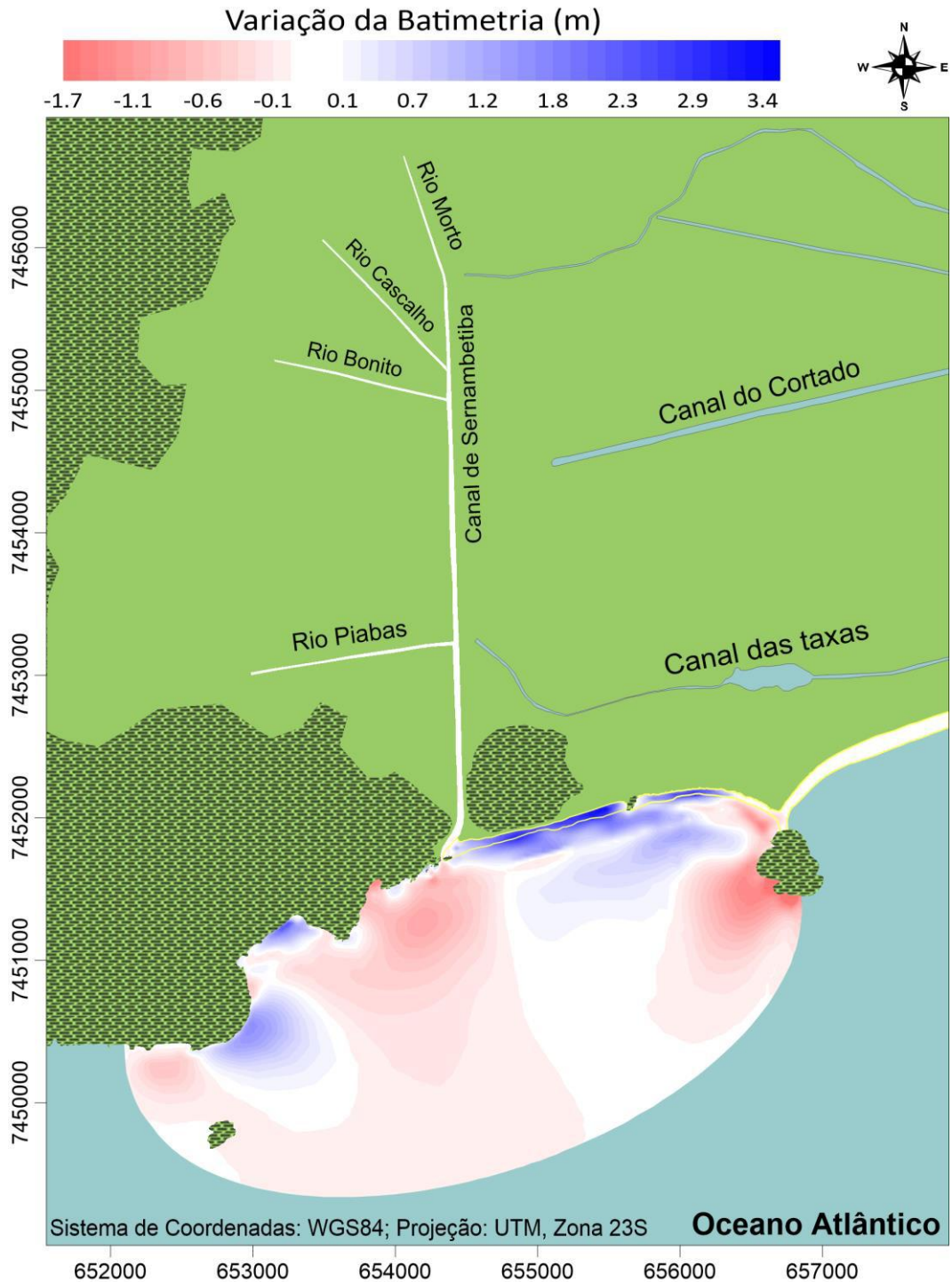


Figura 50. Variação da batimetria no dia 92 de simulação para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento.

A Figura 51 apresenta a evolução morfológica nas quatro estações escolhidas para análise. O eixo x representa o tempo de simulação em dias e o eixo y representa a variação de batimetria em metros. Houve uma variação mais significativa da batimetria a partir dos 42 dias de simulação, devido a incidência de ondas mais energéticas na linha de costa.

A estação Oeste da Pedra de Itapuã apresentou os maiores valores de erosão ao longo de todo o período de simulação, alcançando até 2,4 metros a partir da segunda metade da simulação. A estação Leste da Pedra de Itapuã apresentou um pequeno assoreamento nos primeiros 42 dias de simulação, mas depois permaneceu erodida durante o resto da simulação. Essa estação possui o maior pico de erosão no dia 42 de simulação. Isso se deve a entrada de um evento de ressaca com ondas de até 3,8 metros de altura, 15 segundos de período e com direção sudeste.

Percebe-se que a estação Embocadura do Canal de Sernambetiba permaneceu assoreada ao longo de praticamente todo o período de simulação, alcançando valores acima de 1 metro. Isso se deve a deposição de sedimentos no local e a incapacidade dos fluxos de expelir os sedimentos para fora do canal. A estação Praia próxima a Pedra do Pontal não apresenta mudanças mensuráveis de batimetria.

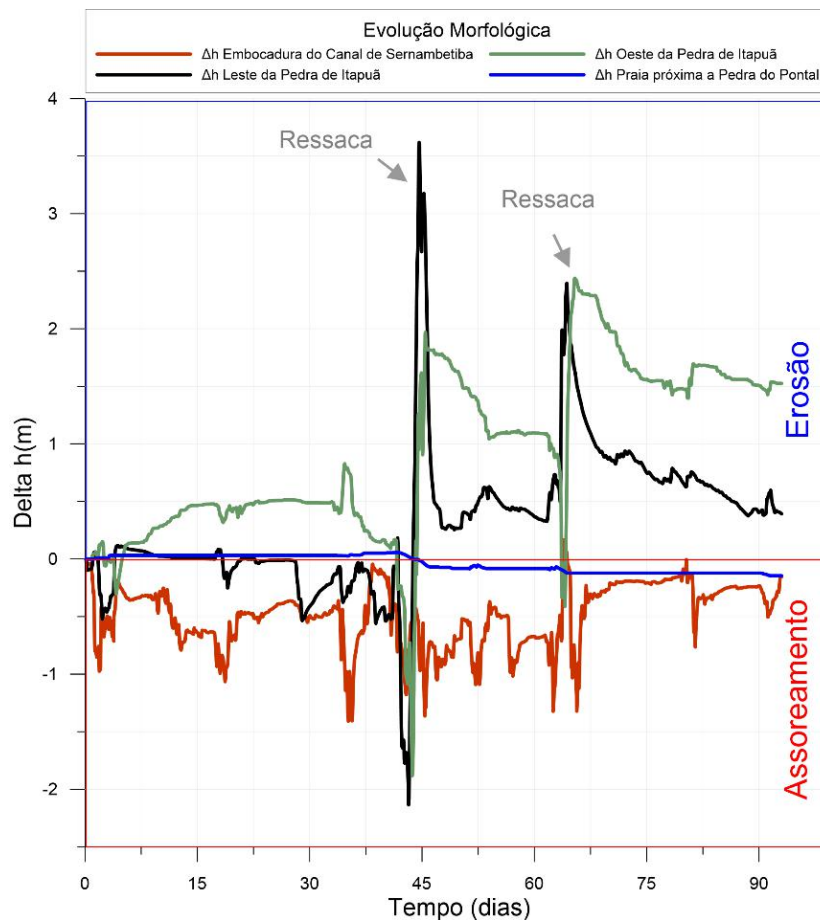


Figura 51. Evolução morfológica nas estações denominadas Leste da Pedra de Itapuã, Oeste da Pedra de Itapuã, Praia próxima a Pedra do Pontal e Embocadura do Canal de Sernambetiba para o período de 92 dias de simulação, iniciando em 01/07/2017, para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Valores negativos indicam assoreamento, enquanto valores positivos indicam erosão.

Analisando o último gráfico com as figuras a seguir (Figura 52, Figura 53 e Figura 54), nota-se que os picos de erosão ocorrem exatamente nos dias em que há ressaca do quadrante sudeste. A ocorrência dessas ressacas fortes ou a sequência de ressacas atingindo a praia da Macumba acarretam na erosão das estações a oeste e a leste da pedra de Itapuã devido as suas localizações. No canal de Sernambetiba há acumulação de sedimentos pelo transporte longitudinal resultante com direção oeste e pequena magnitude das correntes no local, levando à deposição de sedimentos.

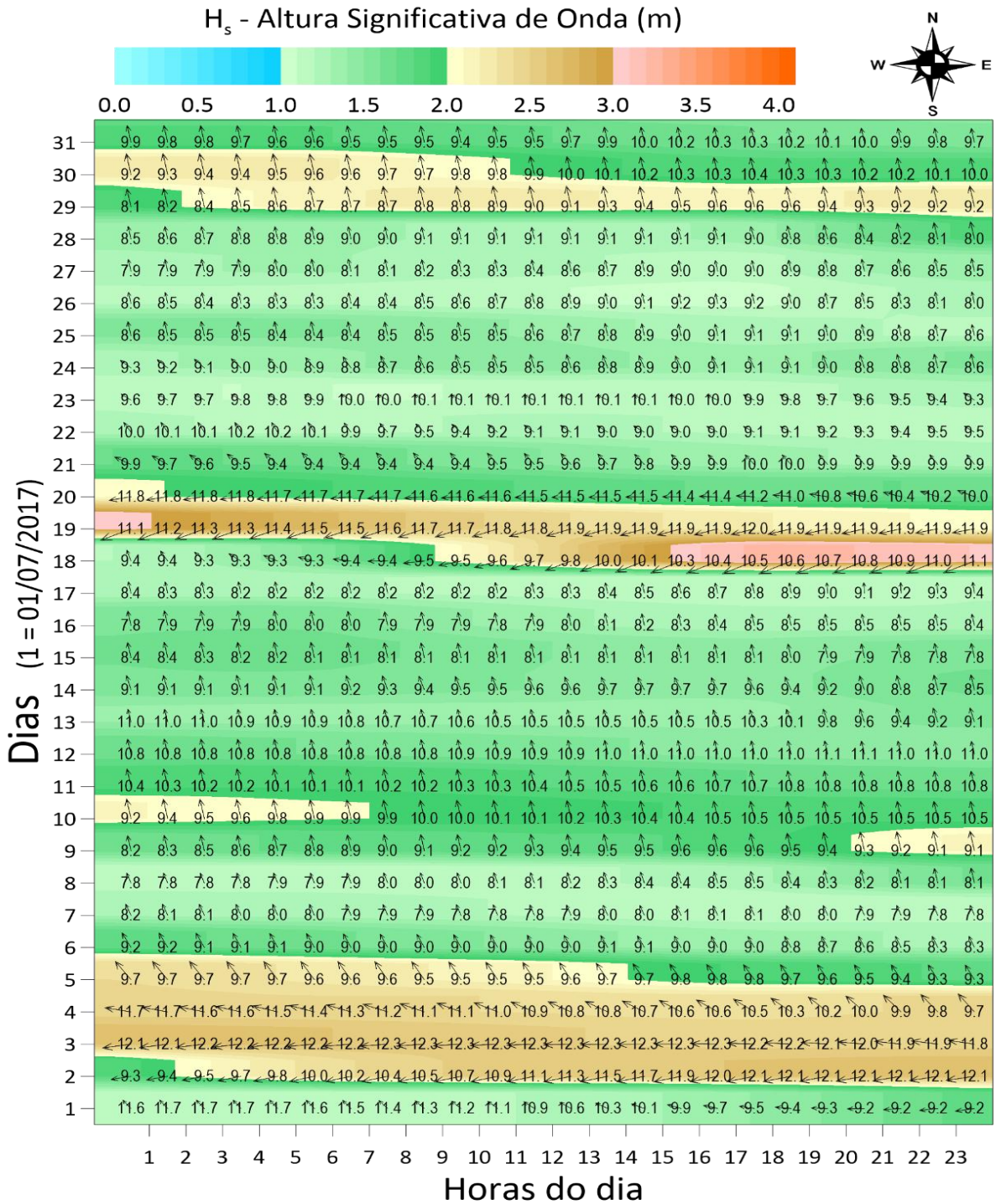


Figura 52. Altura, direção e período das ondas nos 31 dias de simulação, num período representativo do mês de julho de 2017. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade.



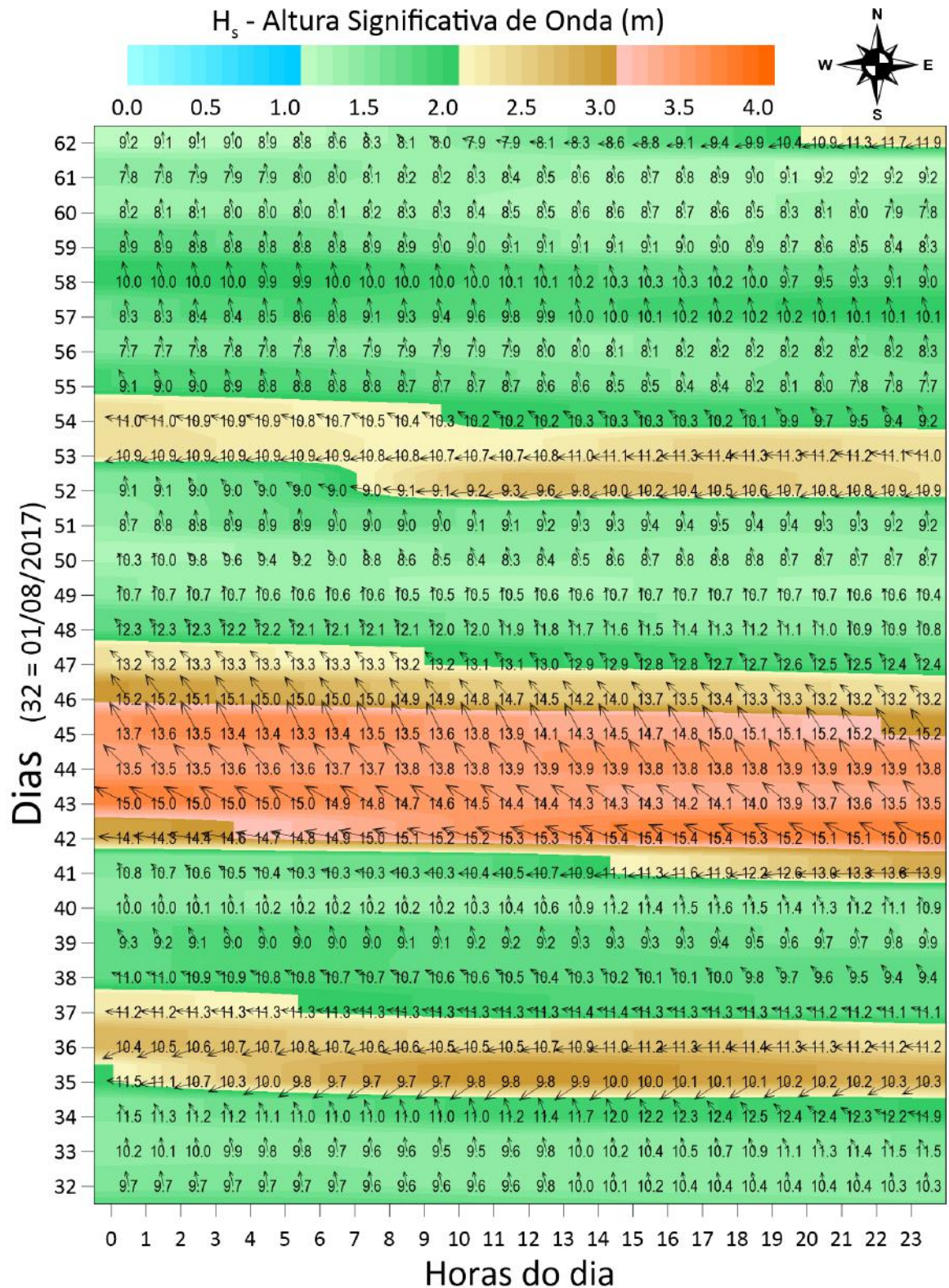


Figura 53. Altura, direção e período das ondas entre 32 dias e 62 dias de simulação, num período representativo do mês de agosto de 2017. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade.

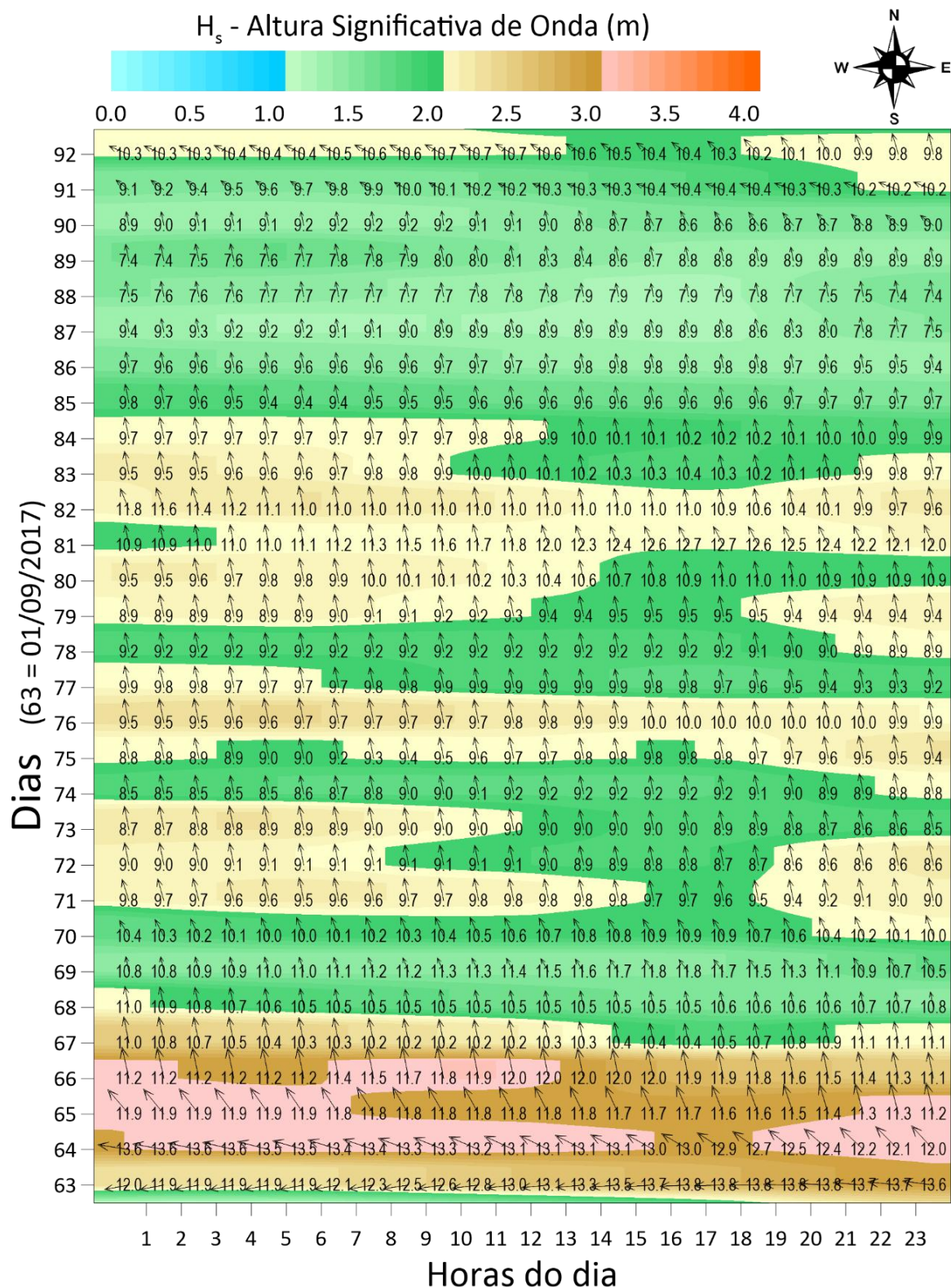


Figura 54. Altura, direção e período das ondas entre 63 dias e 92 dias de simulação, num período representativo do mês de setembro de 2017. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade.

### 4.1.3 Variação de perfis de praia após a ressaca

Para analisar as variações dos perfis de praia foi escolhido o evento de ressaca mais expressivo durante o período simulado, sendo ilustrado pelo pico no módulo da velocidade da corrente na Figura 55. Assim, foram comparados os perfis de praia nos instantes de um dia antes (pré-ressaca) e cinco dias após a ressaca (pós-ressaca).

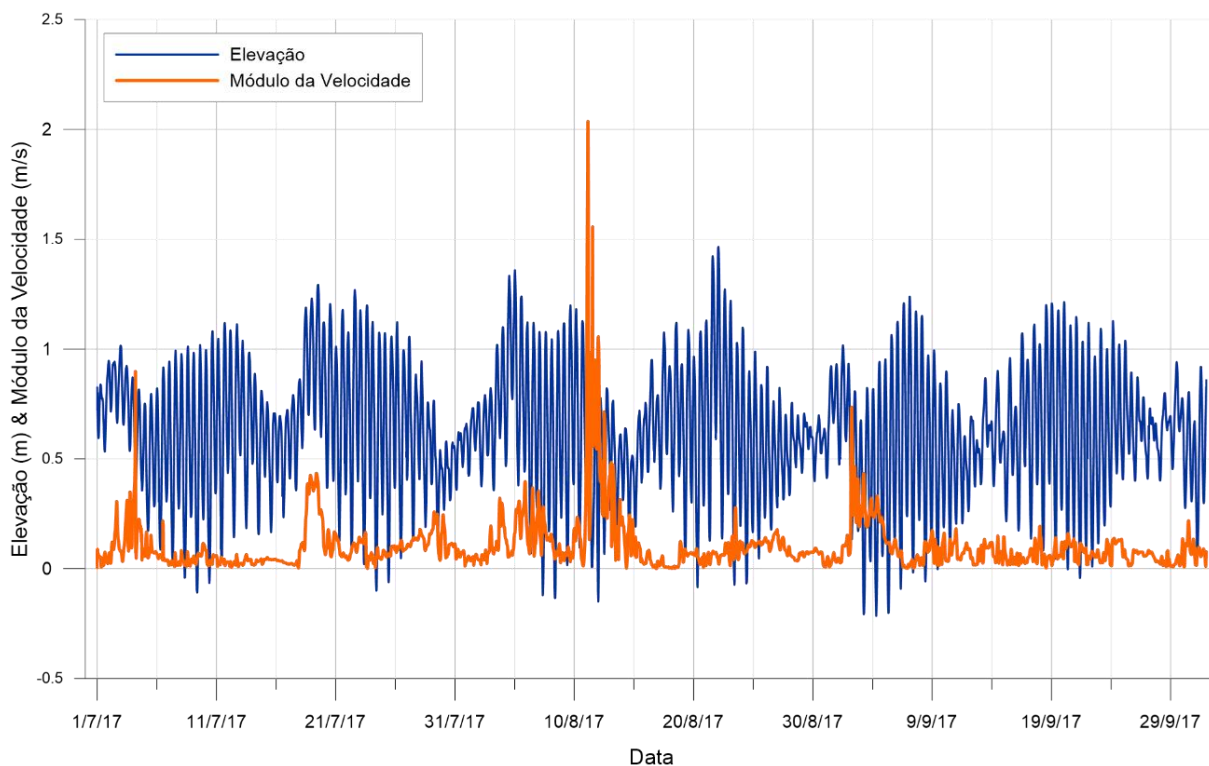


Figura 55. Série temporal de elevação e módulo da velocidade no período de simulação para o ano de 2017. Nota-se o pico no módulo de velocidade representando o evento da maior ressaca no período simulado.

O perfil da seção transversal da estação Embocadura do Canal de Sernambetiba apresentou um aumento de volume sedimentar após a ressaca. Na região da embocadura do canal de Sernambetiba, o volume de sedimento que adentra nesse setor é maior que o volume que sai, fazendo com que haja deposição e avanço da linha de costa (Figura 56).

Os perfis de praia das estações Oeste e Leste da Pedra de Itapuã (Figura 57 e Figura 58) foram erodidos com a ressaca. Nas duas estações fica claro a mudança de perfil de tempo bom, onde a arrebentação das ondas acontece na zona de espraiamento antes da berma, para o perfil de tempestade.

Em condições de tempestade, o nível do mar eleva-se acima do nível médio, e a face da berma fica mais exposta as ondas. Dessa forma as ondas arrebentem diretamente nessa região, com

mais energia e com maior capacidade de mobilizar e transportar os sedimentos da praia. Os sedimentos são transportados em direção ao mar, depositando em forma de banco de areia após a zona de arrebentação.

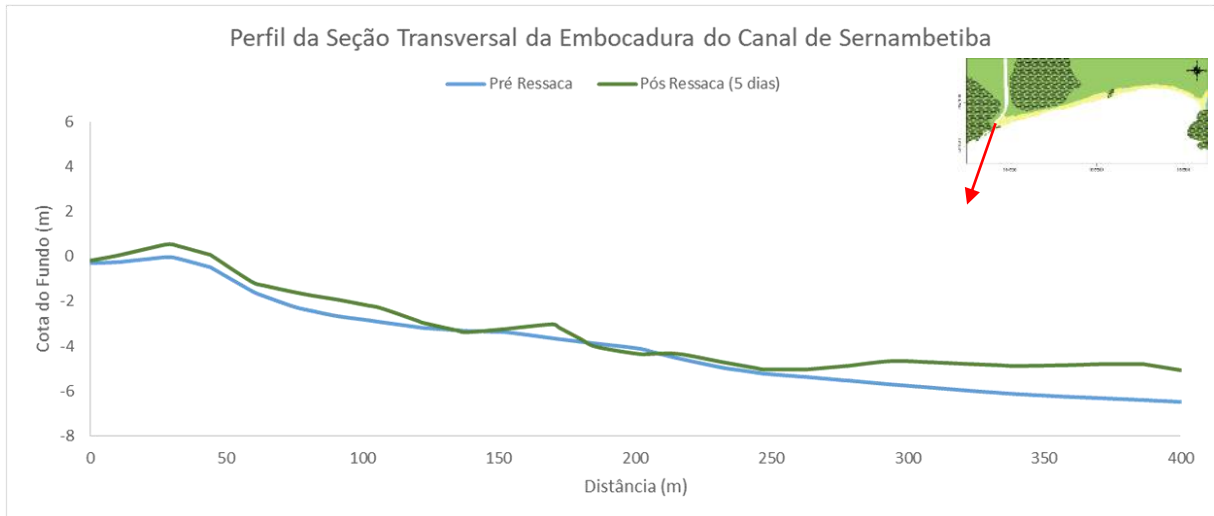


Figura 56. Variação do perfil da seção transversal correspondente a estação denominada Embocadura do Canal de Sernambetiba para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.

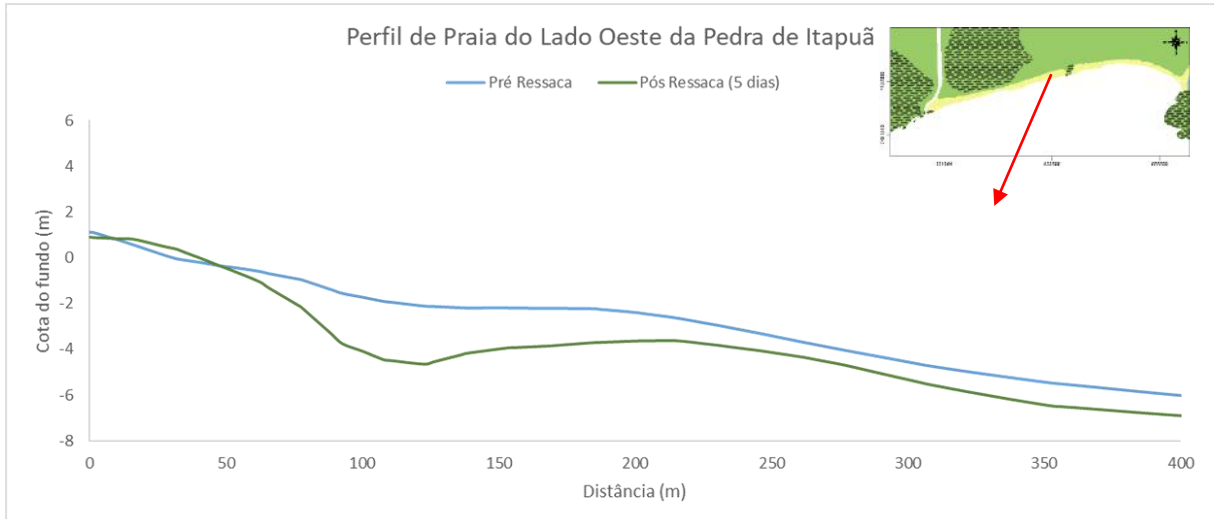


Figura 57. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Oeste da Pedra de Itapuã para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.

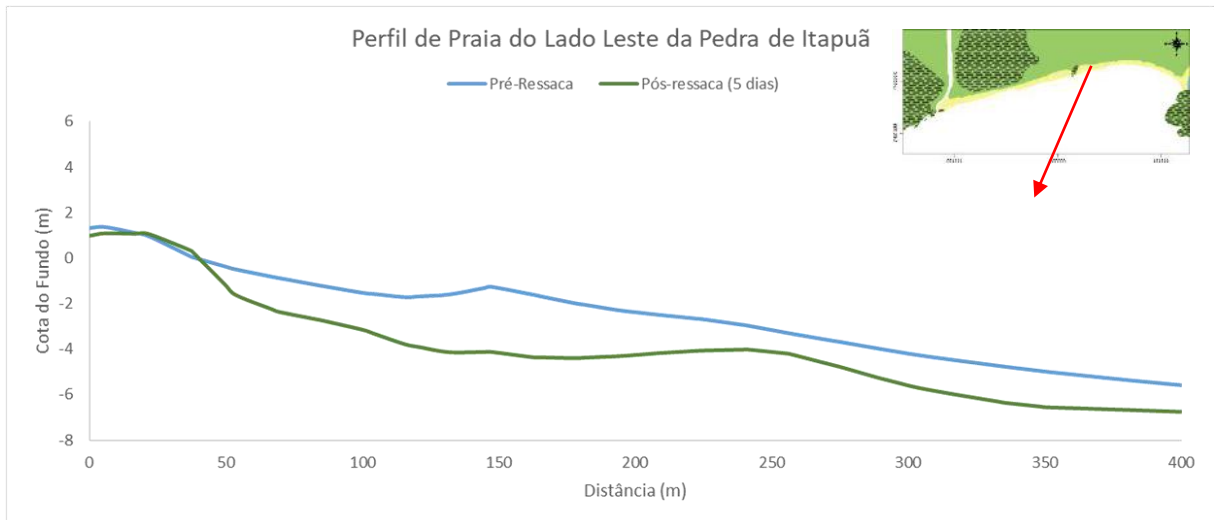


Figura 58. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Leste da Pedra de Itapuã para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.

O perfil de praia da estação Praia próxima a Pedra do Pontal não apresentam modificações significativas, havendo um pequeno assoreamento entre 100 e 300 metros. As correntes nesse local não possuem magnitude suficiente para transportar sedimentos e a pedra do Pontal atua como uma barreira física contra a incidência de ondas de sudeste. (Figura 59).

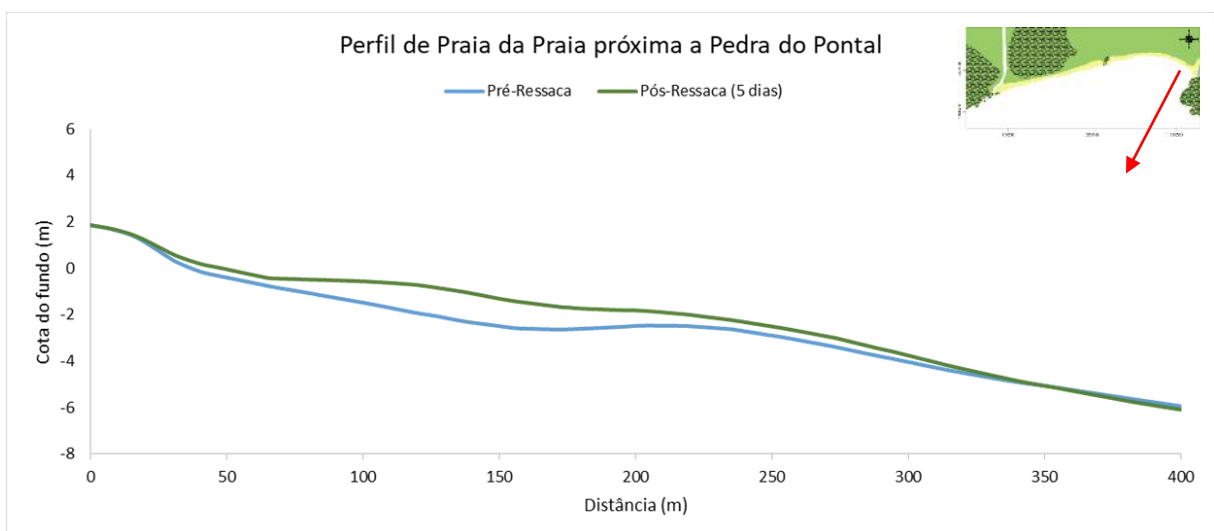


Figura 59. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Praia próxima a Pedra do Pontal para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.

Analisando o mapa de cota de fundo (z) nos mesmos períodos fica evidente os efeitos da incidência de ondas de sudeste na praia da Macumba com um estoque de areia reduzido (Figura 60).

Nota-se um recuo da linha de costa nos pontos leste e oeste da pedra de Itapuã, entrando no contorno de terra, além do aumento da declividade em frente à pedra. As isolinhas da cota de fundo se afastaram da linha de costa na porção oeste do domínio de modelagem e houve formação de bancos de areia na região da embocadura do canal de Sernambetiba e no costão próximo a Prainha, acarretando o avanço da linha de costa.

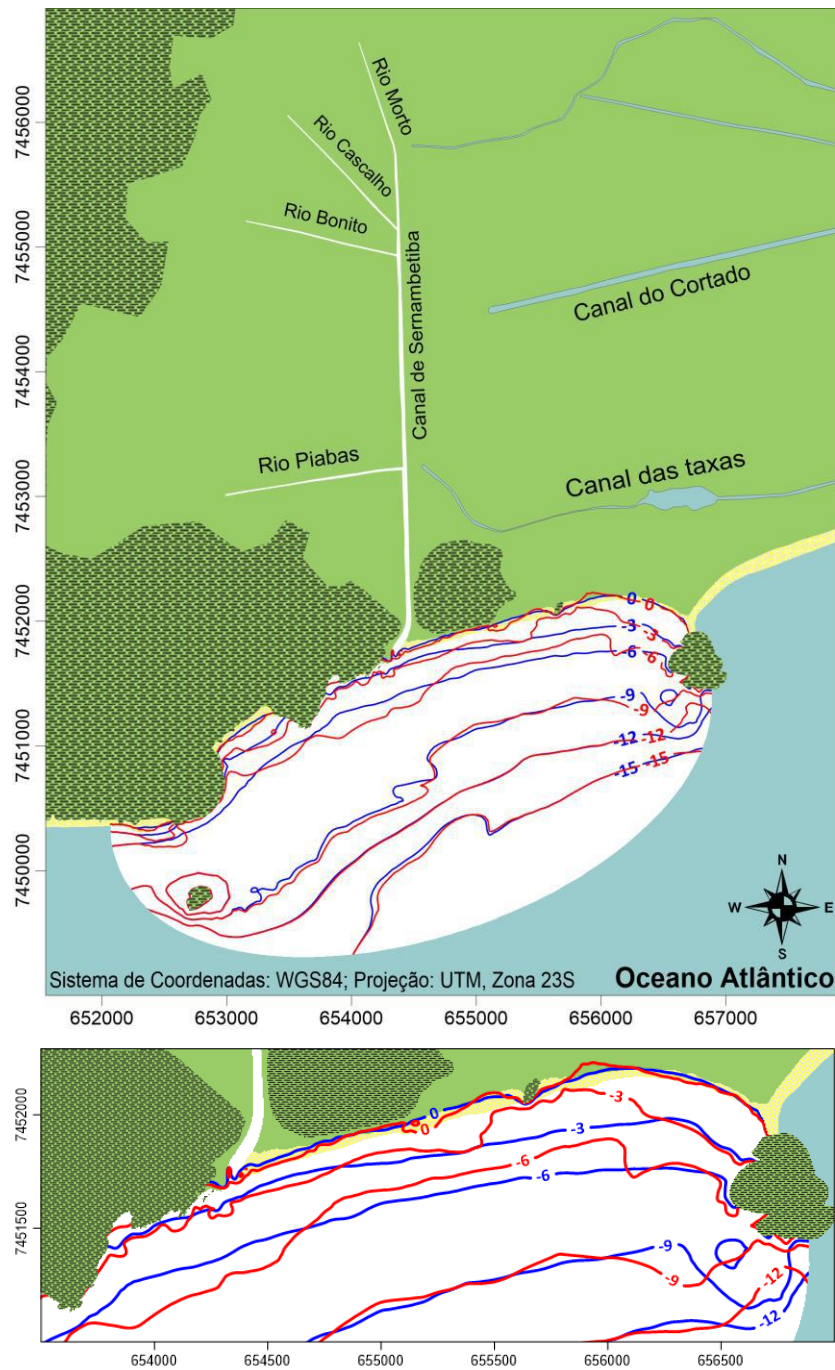


Figura 60. Isolinhas de cota de fundo (m) para o período simulado referente ao ano de 2017 para o cenário pré-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. As linhas de cor azul representam o instante de 1 dia antes do fenômeno de ressaca e as linhas vermelhas representam o instante de 5 dias após a ressaca.

Os resultados obtidos pelo modelo estão coerentes com o que é observado e relatado pelos jornais, como discutido na seção 2.4. Além do mais, esses resultados estão de acordo com as conclusões obtidas no estudo feito por Pena (2017). Esse último aborda a dinâmica geomorfológica e os impactos das ressacas do mar, tendo como parte da área de estudo a praia da Macumba. Dentre as conclusões, destaca-se que a porção oeste da pedra de Itapuã se mostrou a mais vulnerável aos eventos de ressaca, comparando-a com os outros pontos da praia.

## **4.2 MODELAGEM DA PRAIA DA MACUMBA NA SITUAÇÃO PROJETADA EM UM ANO COM O CLIMA DE ONDAS PÓS EL NIÑO MUITO FORTE**

A situação projetada é caracterizada pela praia da Macumba após o replenimento do estoque de areia da praia e com os guia-correntes para regularização da embocadura do canal da Ser-nambetiba. Nesse cenário foi considerado um clima de ondas de um ano posterior ao fenômeno El Niño muito forte, relativo ao ano de 2017.

### **4.2.1 Padrões de circulação hidrodinâmica**

As velocidades das correntes são superiores ao cenário anterior na praia a oeste da pedra de Itapuã com correntes de magnitude de até 1,5 m/s nos instantes de preamar de sizígia. Nas baixa-mares de sizígia e de quadratura, as velocidades das correntes também são mais intensas, destacando-se as regiões próximas aos guia-correntes, atingindo de 0,9 m/s.

É importante explicar que as magnitudes das correntes na linha de costa são maiores que no cenário anterior, entretanto, essas correntes atingem a nova linha de costa criada a partir da alimentação, e não a linha de costa natural antes das intervenções. Sendo assim, as magnitudes das correntes na linha de costa natural são insignificantes, em torno de 0,02 m/s.

Os padrões de circulações em instantes de preamar e baixa-mar de sizígia e quadratura estão apresentados entre a Figura 61 e Figura 64.

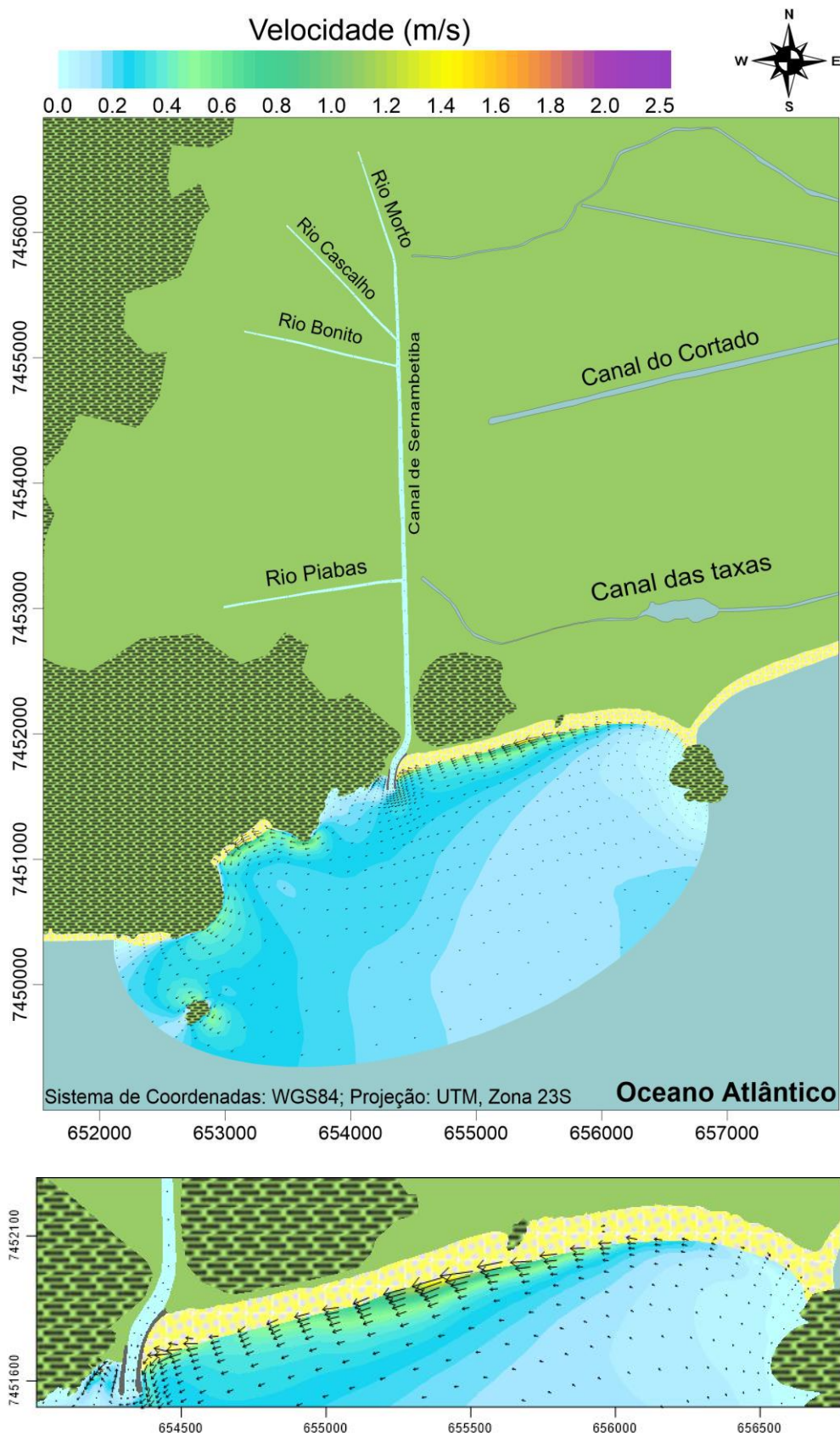


Figura 61. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de sizígia para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 2 m.



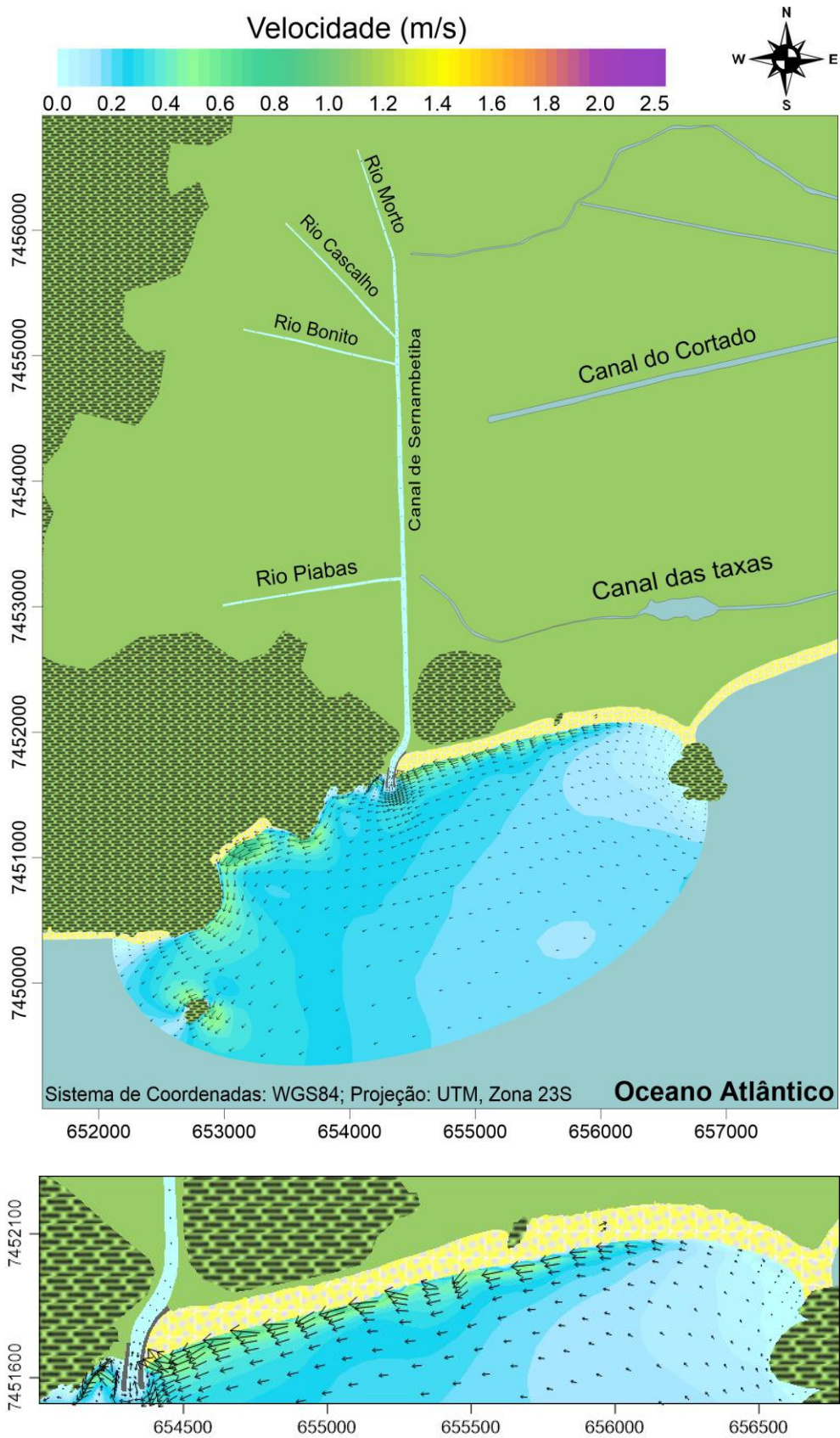


Figura 62. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de sizígia para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 10 s, e altura significativa 2 m.

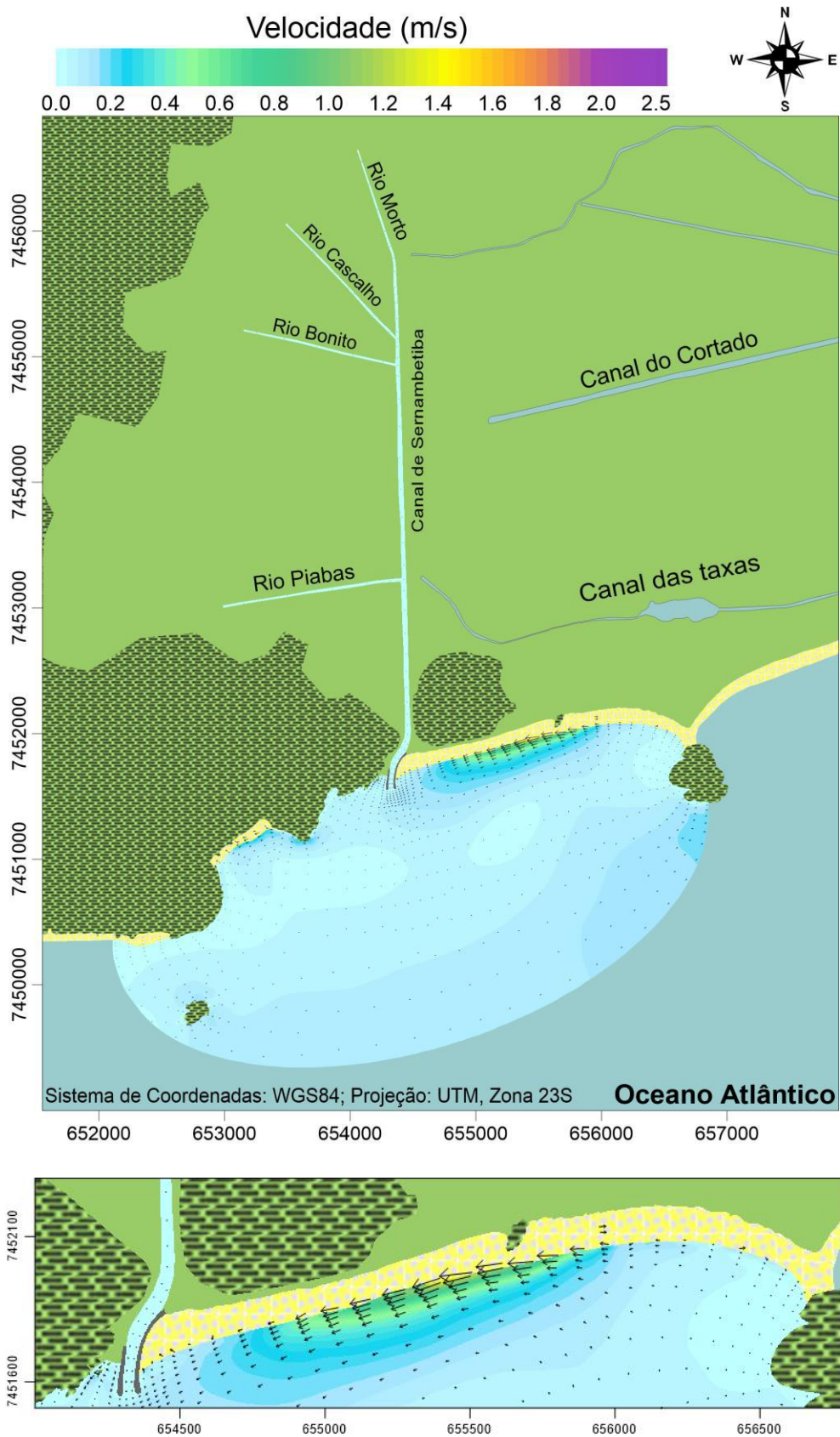


Figura 63. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de quadratura para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 1,4 m.

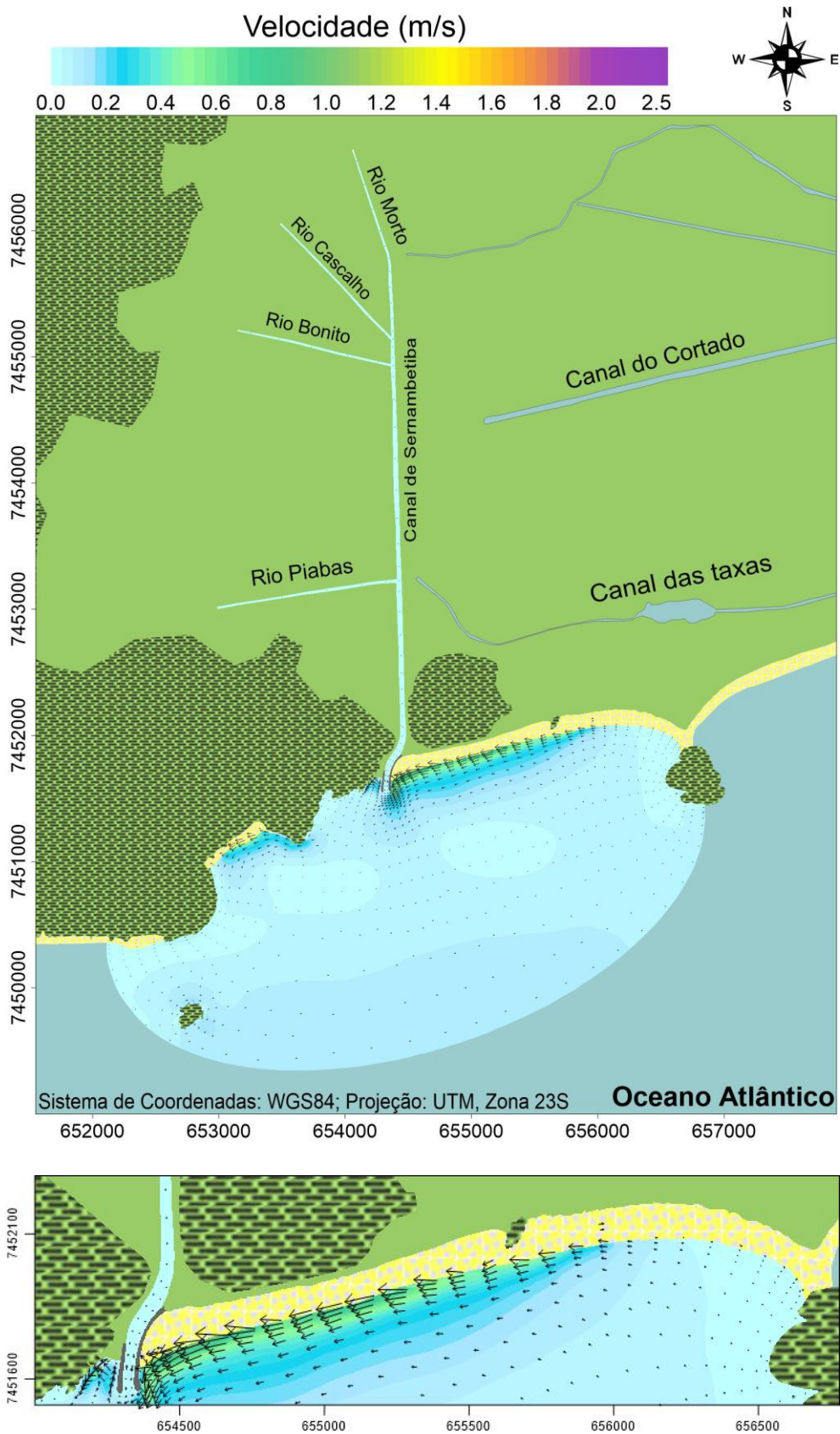


Figura 64. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de quadratura para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 113.78 graus, período de pico 8 s, e altura significativa 1,6 m.

#### 4.2.2 Evolução morfológica

A Figura 65 apresenta a evolução morfológica ao longo do período simulado. Comparando este cenário com o anterior sem as obras costeiras propostas, fica evidente os benefícios obtidos com as intervenções. A Figura 67 mostra a variação da batimetria no instante final de simulação.

No final da simulação, a extensão das áreas que apresentavam erosão diminuiu e houve uma diminuição considerável (3 m para 1 m) das taxas de erosão. Destaca-se ainda que, a faixa litorânea da praia da Macumba do cenário sem intervenções permanece inalterada, ou seja, as porções da linha de costa que ainda apresentam erosão são referentes a nova faixa de praia criada com o replenimento do estoque de areia da praia.

A embocadura do canal de Sernambetiba ainda acumula sedimentos no final da simulação, entretanto, houve uma diminuição de 0,5 metros para 0,2 metros com a construção de guia-correntes. Outro fato é que não notamos mais formação significativa de bancos na região defronte ao costão, os valores de assoreamento não ultrapassaram 0,02 metros. .

No resto do domínio de modelagem a praia próxima a pedra do Pontal se mantém inalterada onde antes podíamos perceber um assoreamento de até 1,2 metros. Na região do costão ao lado do canal ainda há acumulação de sedimentos, apesar das taxas diminuírem pela metade, mostrando que os guia-correntes não foram totalmente eficientes para retenção dos sedimentos no arco praial. Isso se deve ao fato, provavelmente, dos guia-correntes não terem atingido a profundidade de fechamento ideal.

A Figura 66 apresenta a distribuição e velocidade das correntes no período simulado. O dia 0 apresenta uma onda com azimute 131.62 graus, período de pico 11 s e altura significativa 1,2 m; O dia 31 apresenta uma onda com azimute 101.25 graus, período de pico 9 s e altura significativa 1,4 m; O dia 62 apresenta uma onda com azimute 189.91 graus, período de pico 11 s e altura significativa 2,4 m; e o dia 92 apresenta uma onda com azimute 101.25 graus, período de pico 9 s e altura significativa 1,8 m.

Nessa figura as correntes mais intensas estão localizadas na região da pedra de Itapuã, região de maior erosão, durante todo o período de simulação.

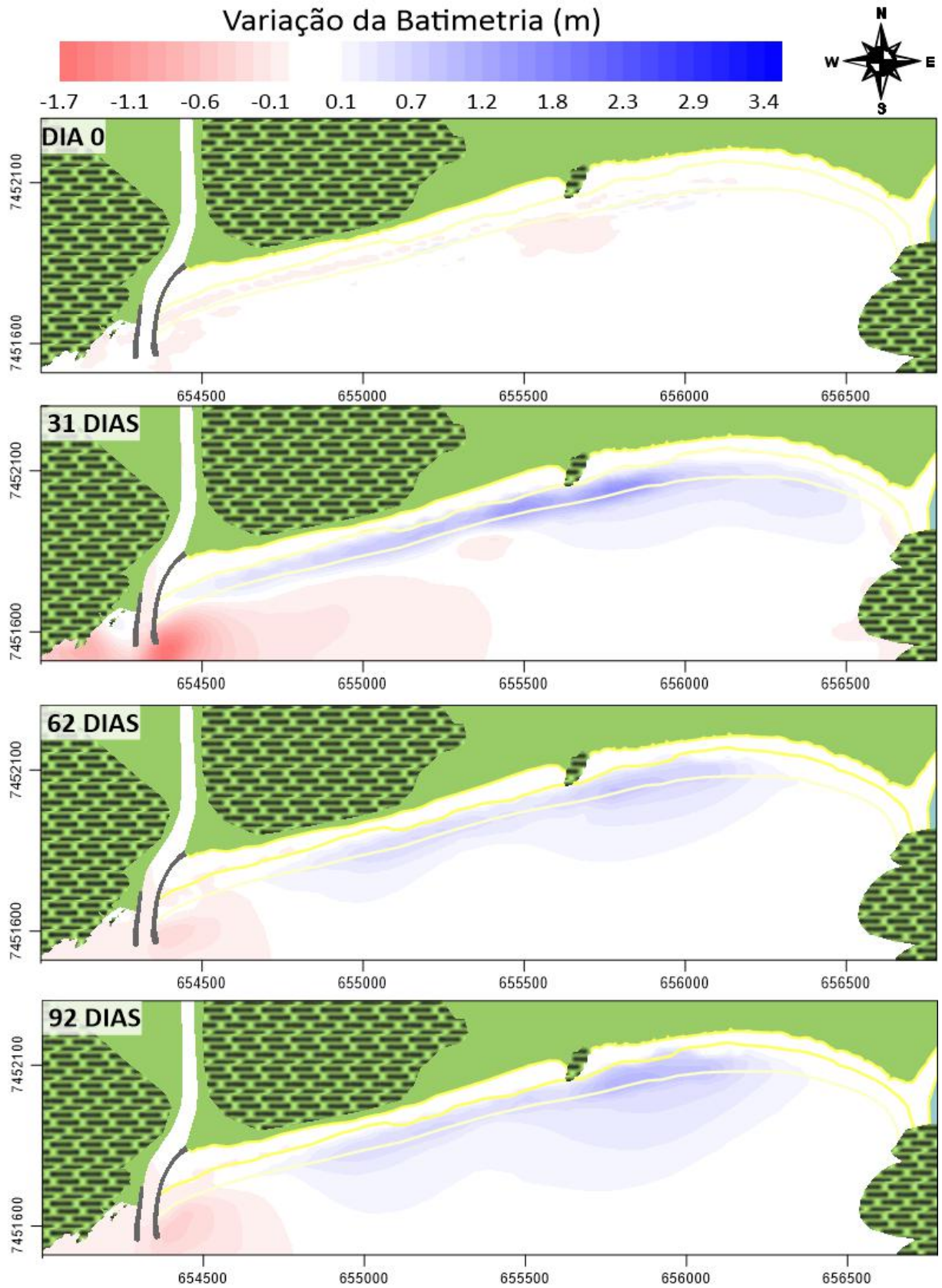


Figura 65 Variação da batimetria no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2017 para o cenário com intervenções com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento.

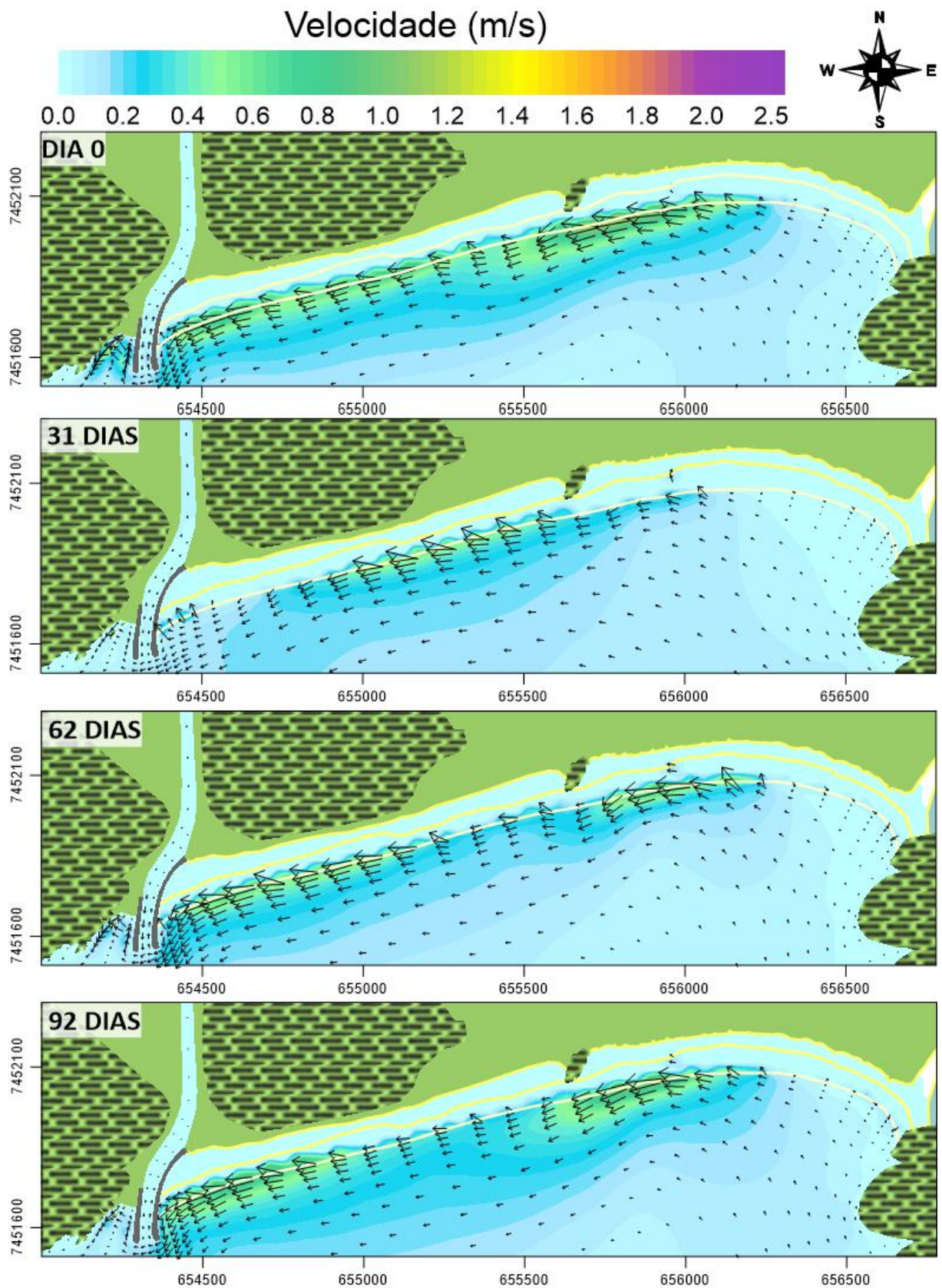


Figura 66. Distribuição das correntes na praia da Macumba no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2017 para o cenário com intervenções com guias-correntes e replenimento do estoque de areia da praia e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte.

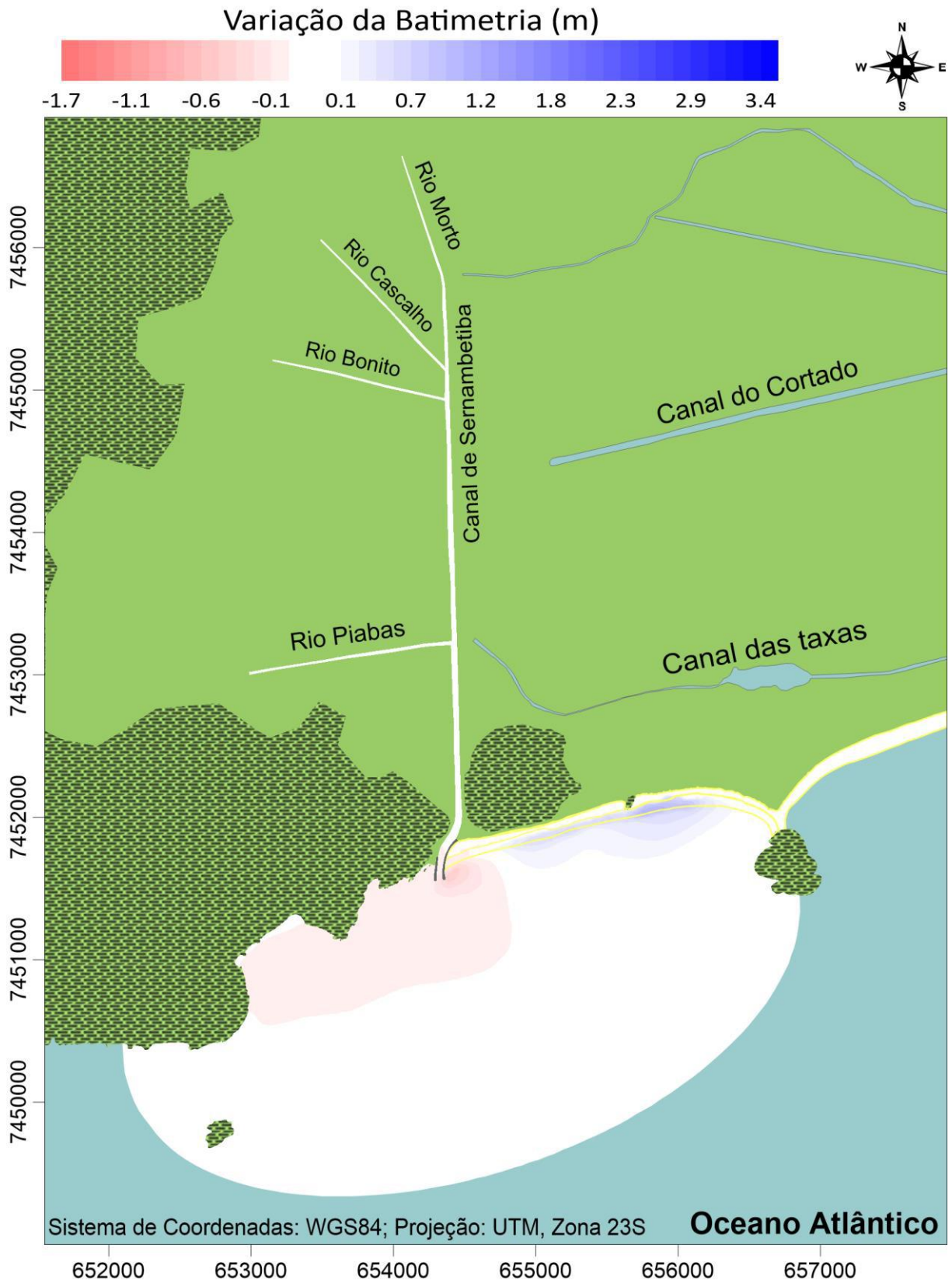


Figura 67. Variação da batimetria no dia 92 de simulação para o cenário com intervenções com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia e com um clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento.

Analisando as estações escolhidas para gravação de resultados, percebe-se que a estação Oeste da Pedra de Itapuã continua sendo a região mais afetada pelas ressacas de sudeste e não há mudanças significativas em nenhuma das outras estações durante todo o período simulado (Figura 68).

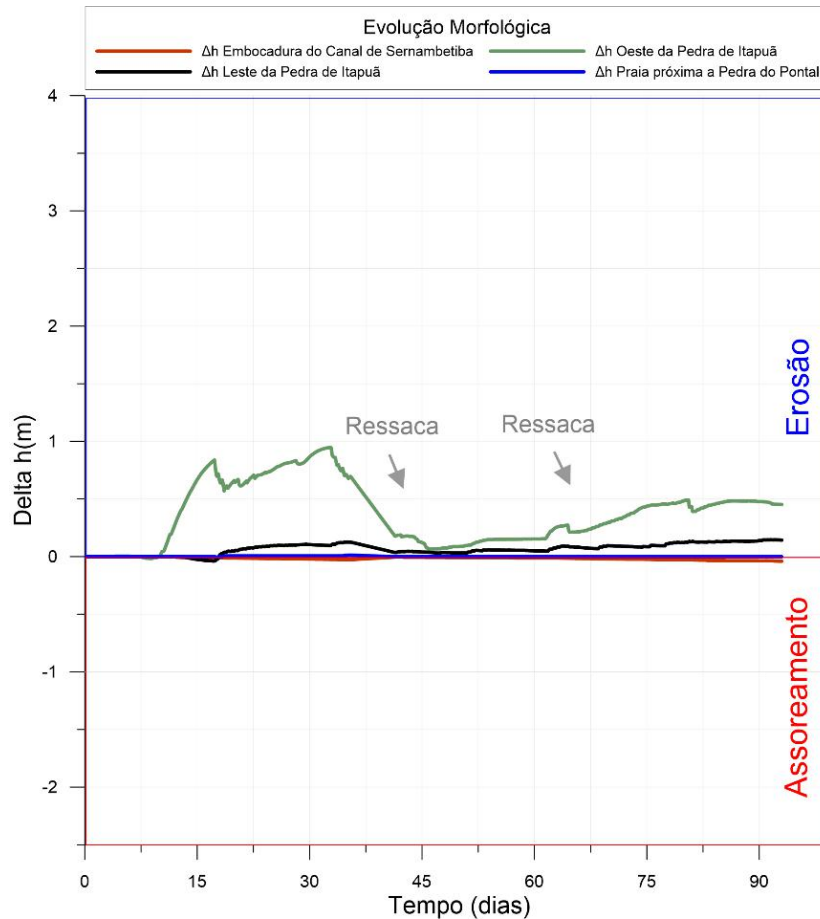


Figura 68. Evolução morfológica nas estações denominadas Leste da Pedra de Itapuã, Oeste da Pedra de Itapuã, Praia próxima a Pedra do Pontal e Embocadura do Canal de Sernambetiba para o período de 92 dias de simulação para o cenário com intervenções com guia-correntes e replenimento do estoque de areia da praia e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. Valores negativos indicam assoreamento, enquanto valores positivos indicam erosão.

### 4.2.3 Variação de perfis de praia após a ressaca

A Figura 69, Figura 70, Figura 71 e Figura 72 apresentam a variação do perfil da seção transversal do canal de Sernambetiba e dos perfis de praia nas três estações nos instantes analisados e a Figura 73 mostra a variação das isolinhas de cota de fundo considerando o mesmo evento de ressaca escolhido no cenário anterior.



Não há variações expressivas nos perfis de praia nas quatro estações após a ressaca, assim como não há mudanças nas isolinhas de cota de fundo. Isso deixa claro os resultados positivos do replelamento do estoque de areia da praia.

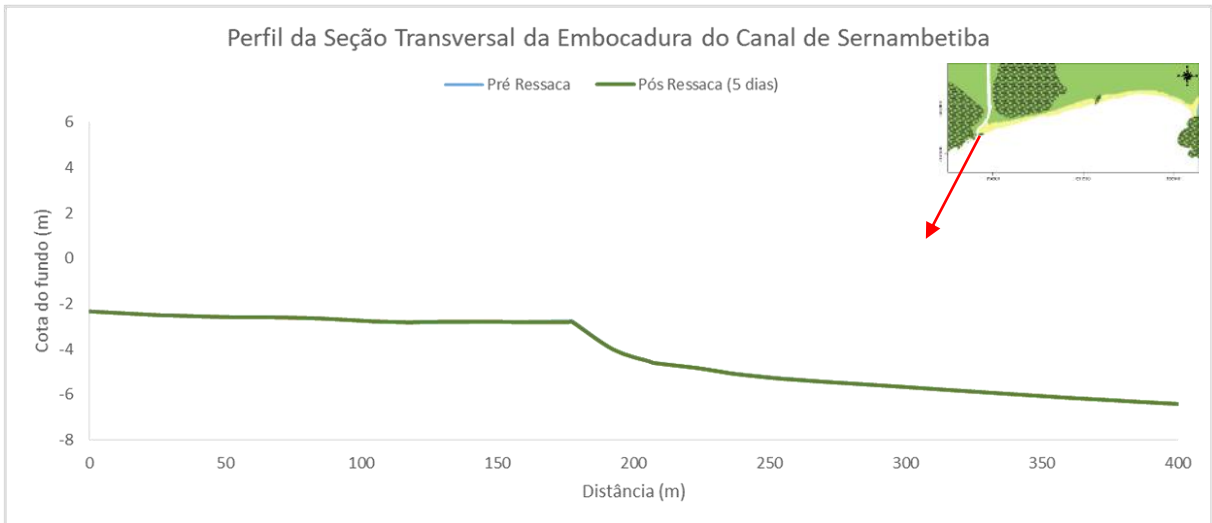


Figura 69. Variação do perfil da seção transversal correspondente a estação denominada Embocadura do Canal de Sernambetiba para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.

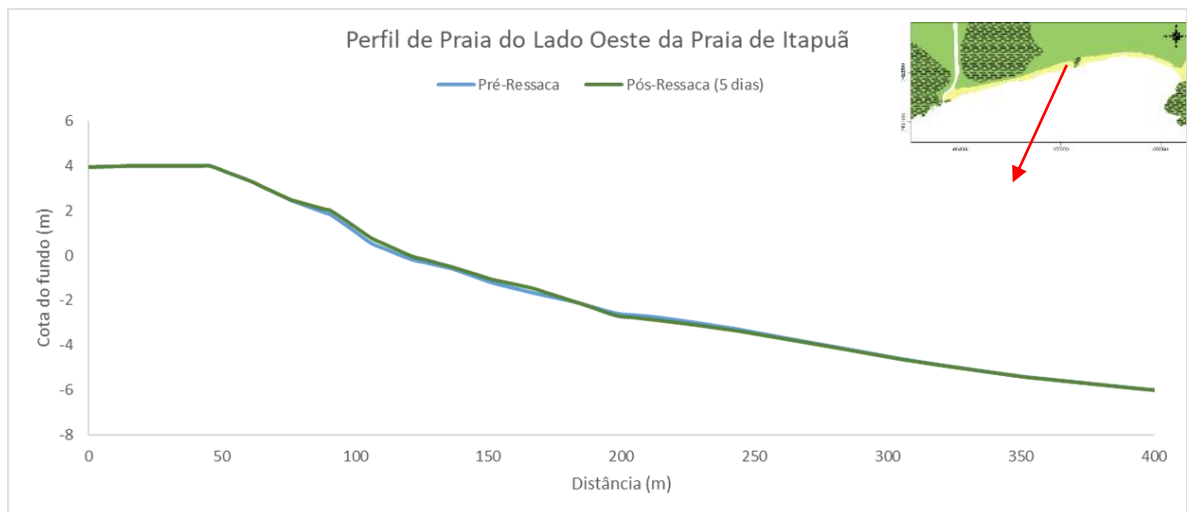


Figura 70. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Oeste da Praia de Itapuã para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.

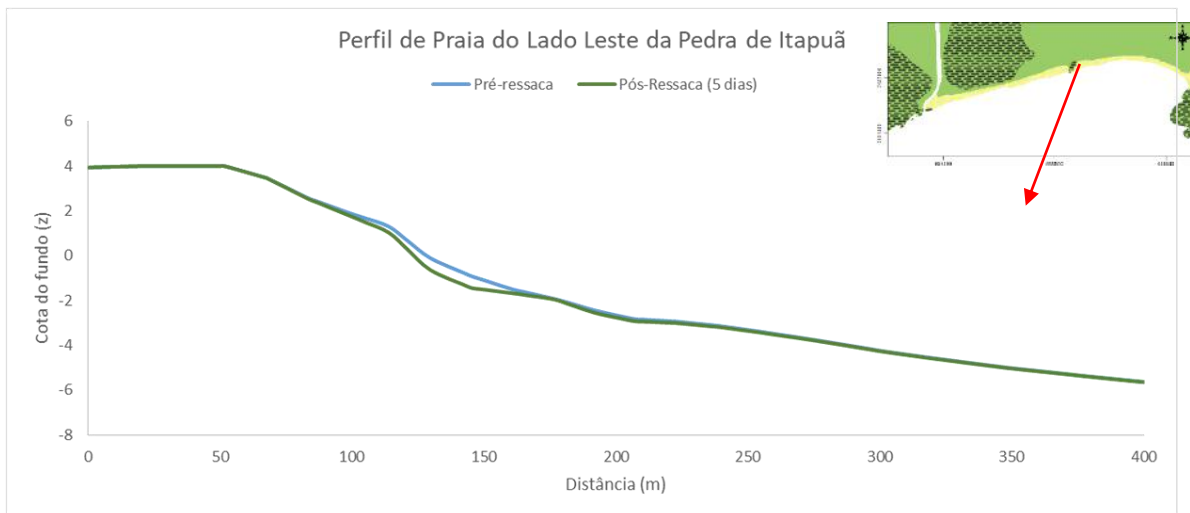


Figura 71. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Leste da Praia de Itapuã para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.

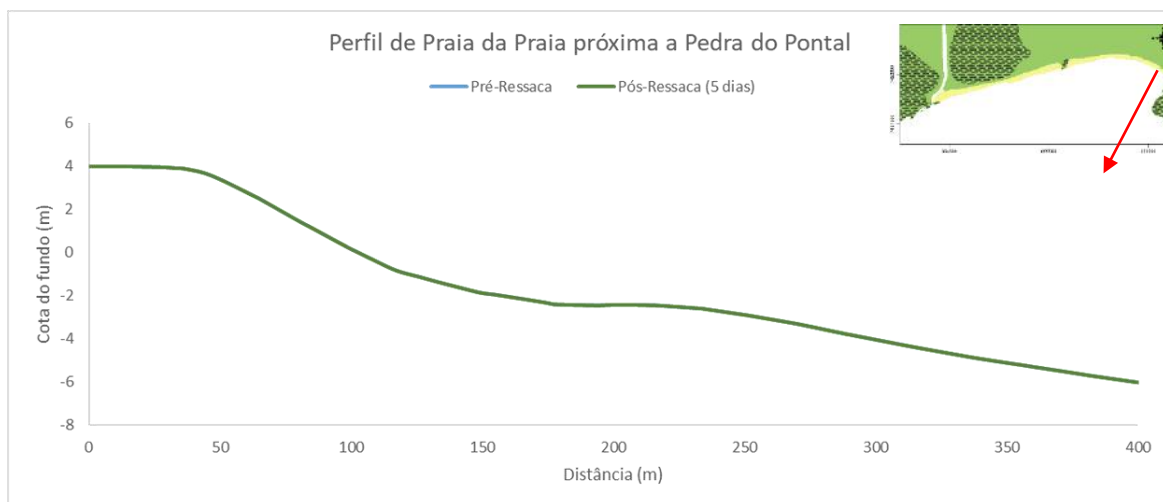


Figura 72. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Praia próxima a Pedra do Pontal para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias depois da ressaca.

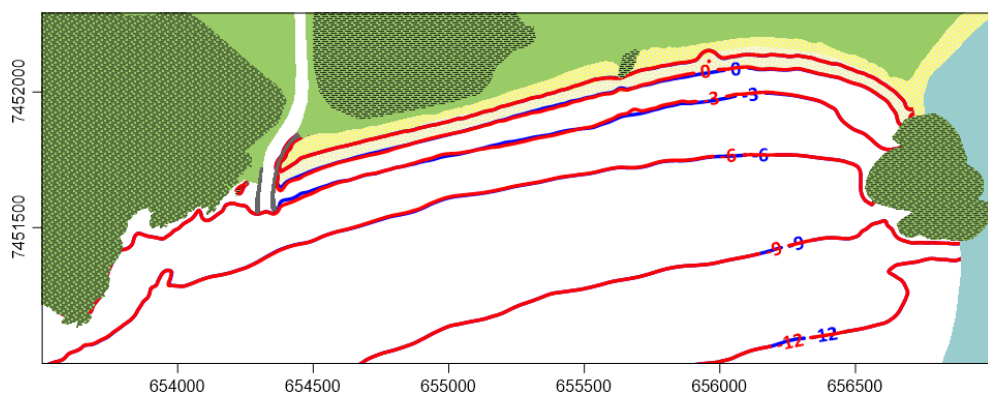
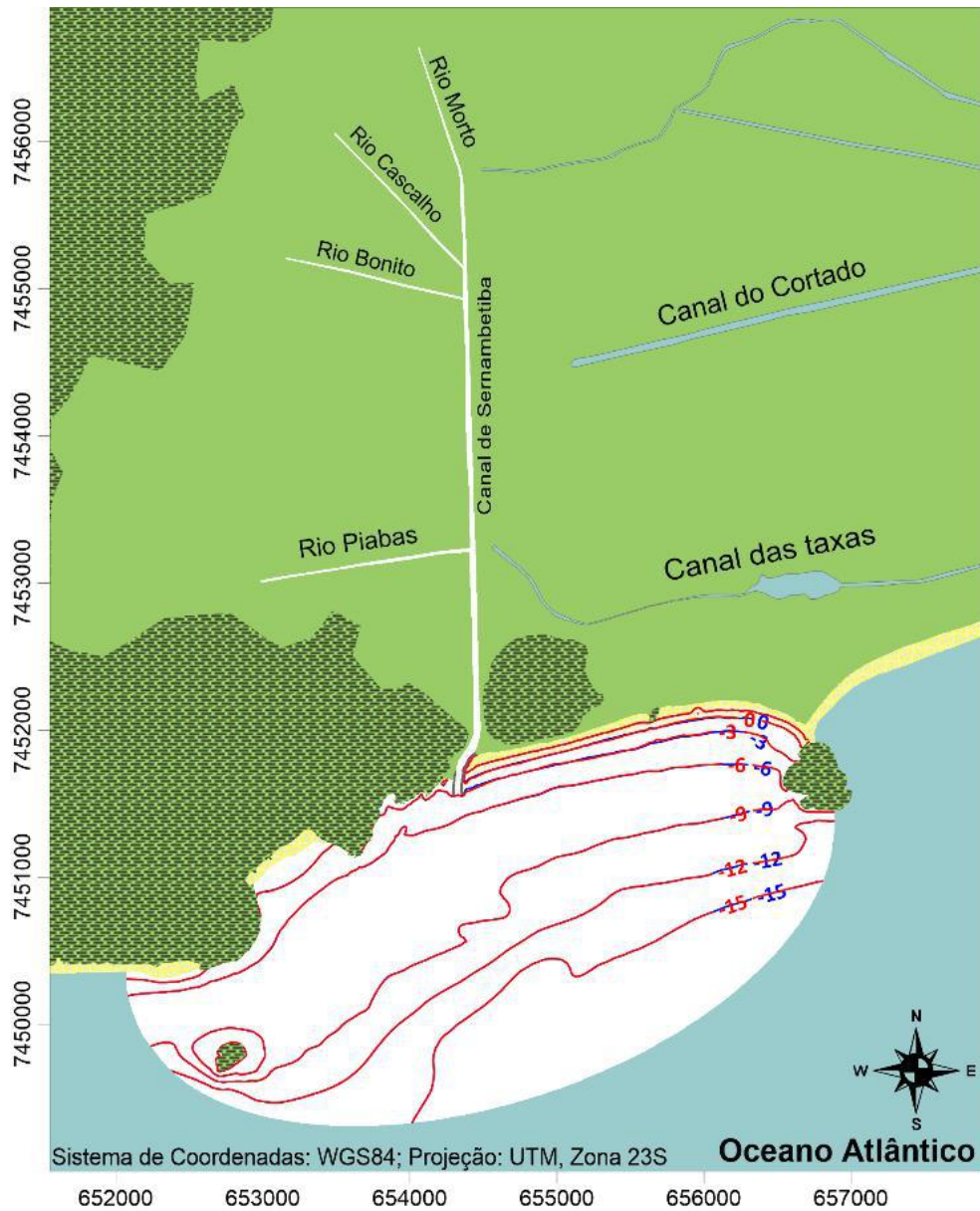


Figura 73. Isolinhas de cota de fundo (m) para o período simulado referente ao ano de 2017 para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte. As linhas de cor azul representam o instante de 1 dia antes do fenômeno de ressaca e as linhas vermelhas representam o instante de 5 dias após a ressaca.

### **4.3 MODELAGEM DA PRAIA DA MACUMBA NA SITUAÇÃO PROJETADA EM UM ANO COM O CLIMA DE ONDAS TÍPICO DE INVERNO**

Nesse cenário foi considerado o clima de ondas de inverno de ano típico na costa do Rio de Janeiro e a praia da Macumba após o replenimento do estoque de areia e com os guia-correntes para regularização da embocadura do canal da Sernambetiba.

#### **4.3.1 Padrões de circulação hidrodinâmica**

Analisando o padrão da circulação hidrodinâmica, percebe-se que em grande parte do domínio de modelagem a velocidade das correntes é muito pequena, em torno de 0,1 m/s. As correntes na linha de costa são mais intensas, atingindo 0,8 m/s na porção oeste da pedra de Itapuã durante a baixa-mar de quadratura.

A região da embocadura do canal possui correntes litorâneas bem definidas em direção ao guia-correntes tanto na preamar quanto na baixa-mar. A região a leste dos guia-correntes apresenta maior magnitude, alcançando 0,3 m/s.

Comparando esse terceiro cenário com os outros dois anteriores, observa-se que a magnitude das correntes na linha de costa é bem menor. Isso se deve ao clima de ondas caracterizado por ondas com alturas e períodos menores que nos outros cenários. O padrão da circulação hidrodinâmica está representado entre a Figura 74 e Figura 77.

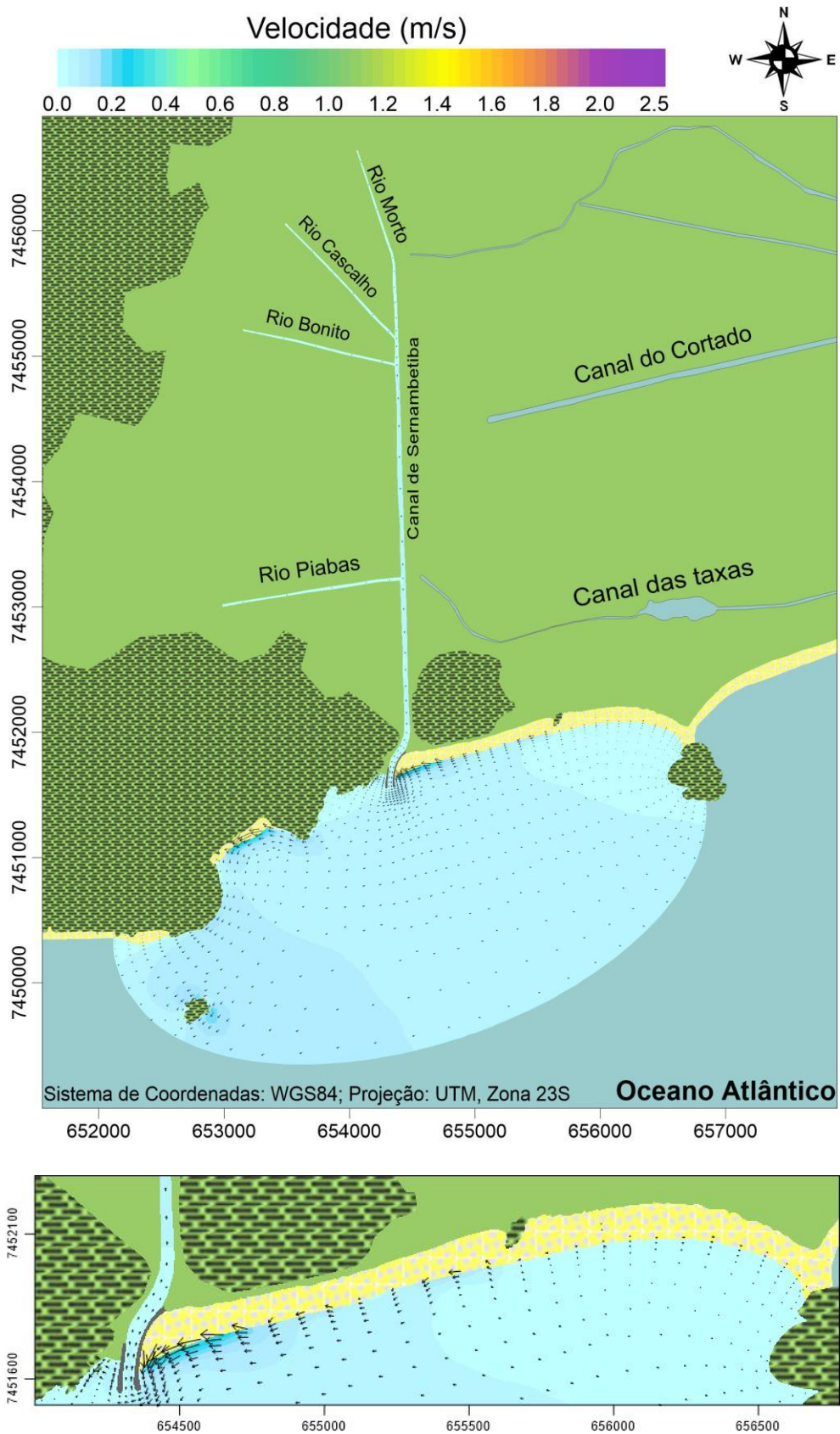


Figura 74. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de sizígia para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 1,4 m.

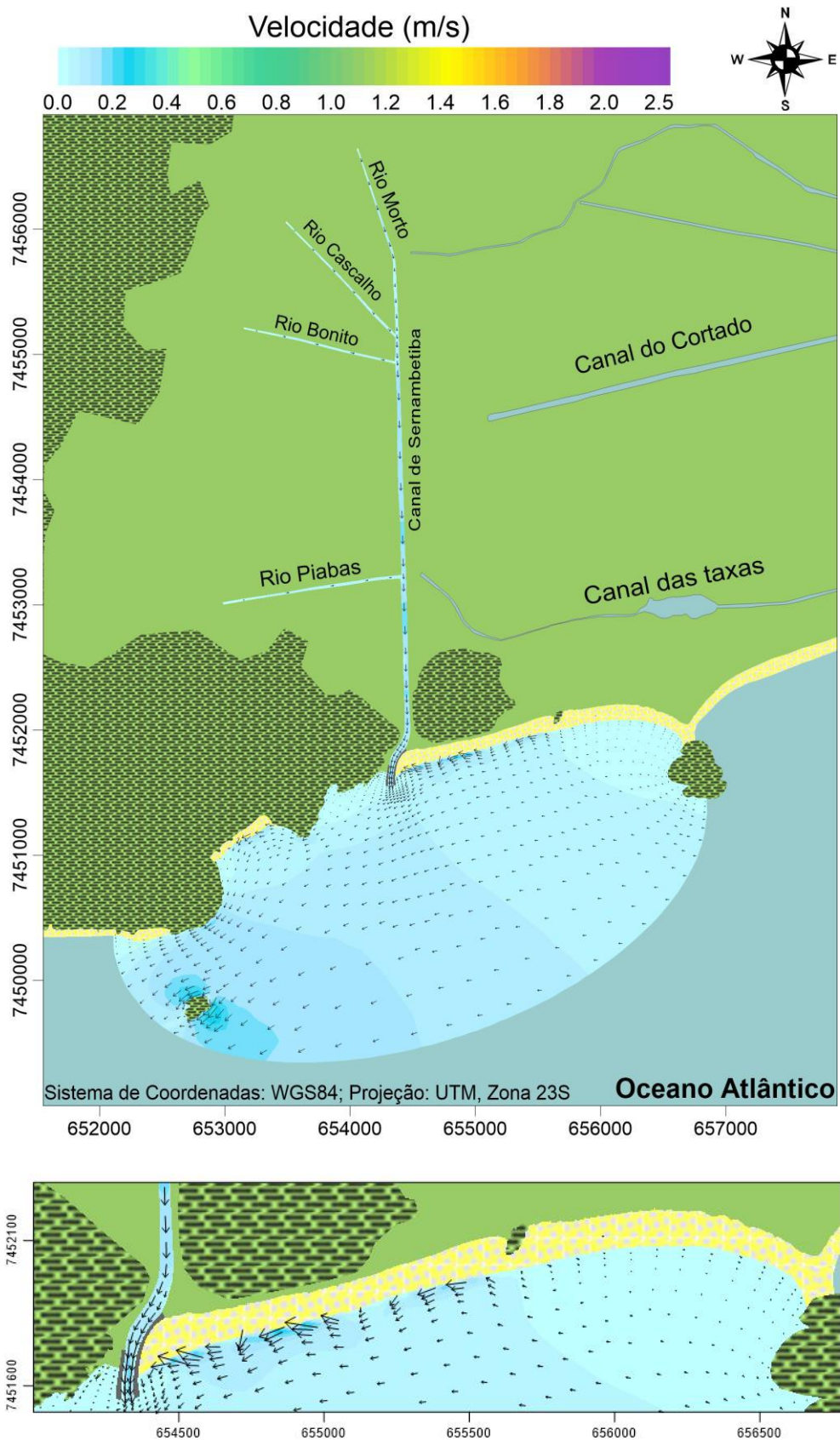


Figura 75. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de sizígia para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 9 s, e altura significativa 1,4 m.

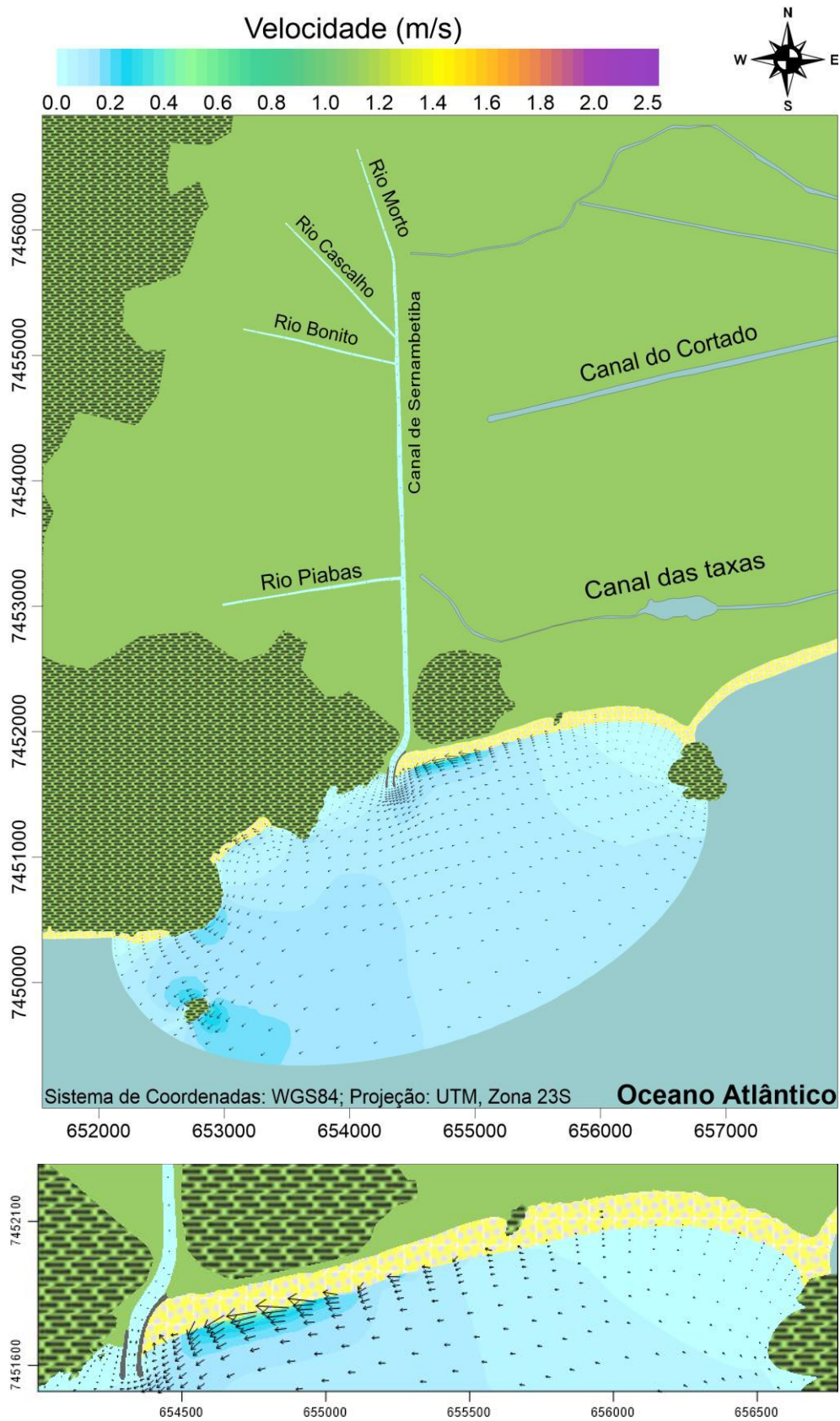


Figura 76. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de preamar (PM) de quadratura para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Onda característica de ESE, modelo de propagação M-ESE: azimute 101.25 graus, período de pico 10 s, e altura significativa 1,2 m.

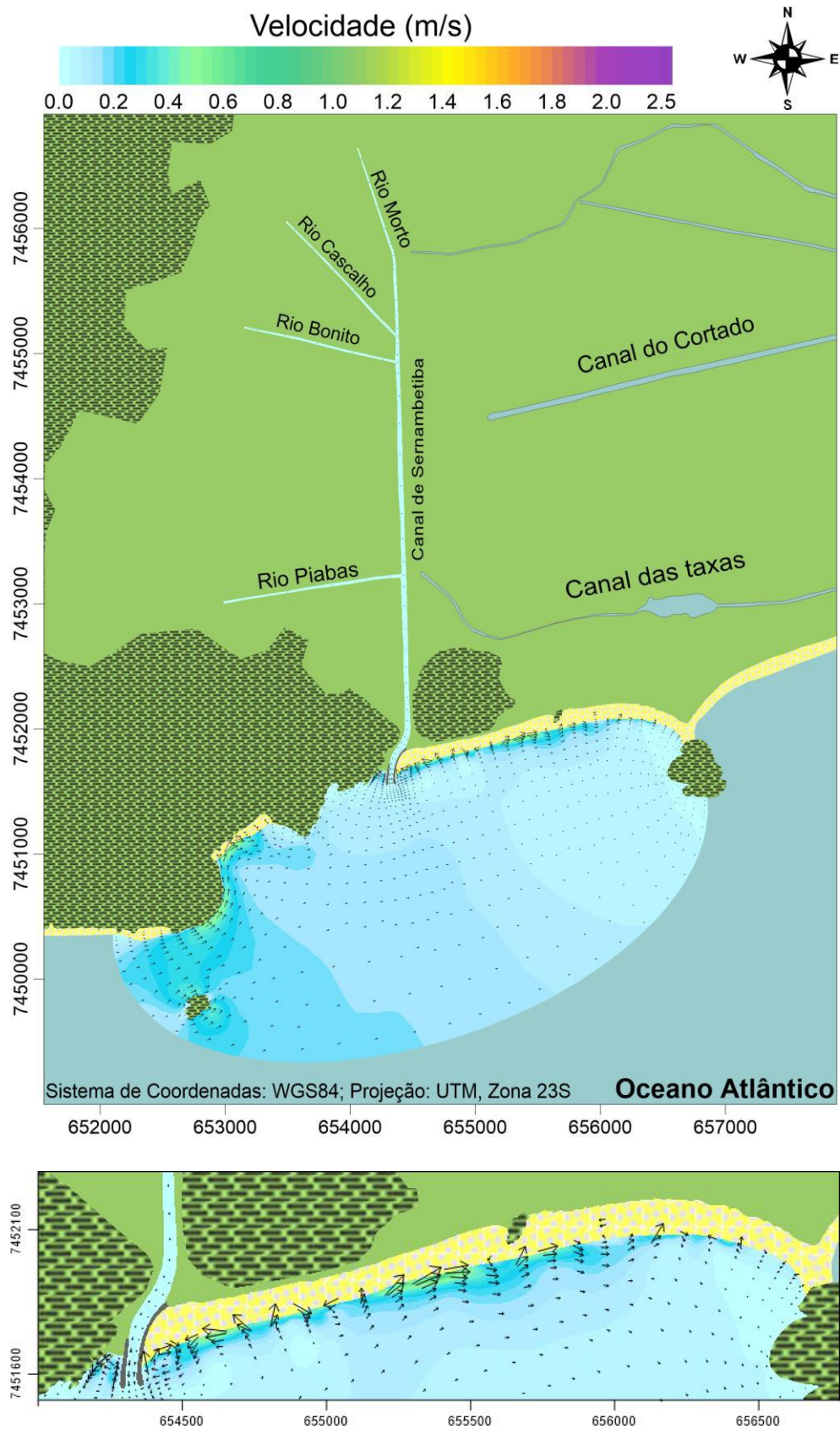


Figura 77. Distribuição de correntes na praia da Macumba em um instante de baixa-mar (BM) de quadratura para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Onda característica de S, modelo de propagação M-S: azimute 180 graus, período de pico 10 s, e altura significativa 1,4 m.



### 4.3.2 Evolução morfológica

Nesse cenário, observa-se uma similaridade com o cenário anterior nos pontos em que temos erosão e assoreamento, entretanto, os valores são menores. A erosão próxima a pedra de Itapuã alcançou um máximo de 0,8 metros e a embocadura do canal não assoreou no final de simulação nem houve formação de bancos defronte ao cost. Além disso, a linha de costa natural permanece inalterada durante todo o período de simulação e não há correntes na faixa de praia natural (Figura 78, Figura 79 e Figura 80).

A Figura 79 apresenta o padrão das correntes em quatro instantes diferentes. O dia 0 apresenta uma onda com azimute 104.6 graus, período de pico 9 s e altura significativa 1 m; O dia 31 apresenta uma onda com azimute 121.24 graus, período de pico 10 s e altura significativa 1,4 m; O dia 62 apresenta uma onda com azimute 145.26 graus, período de pico 10 s e altura significativa 1,4 m; e o dia 92 apresenta uma onda com azimute 135.35 graus, período de pico 10 s e altura significativa 1,2 m.

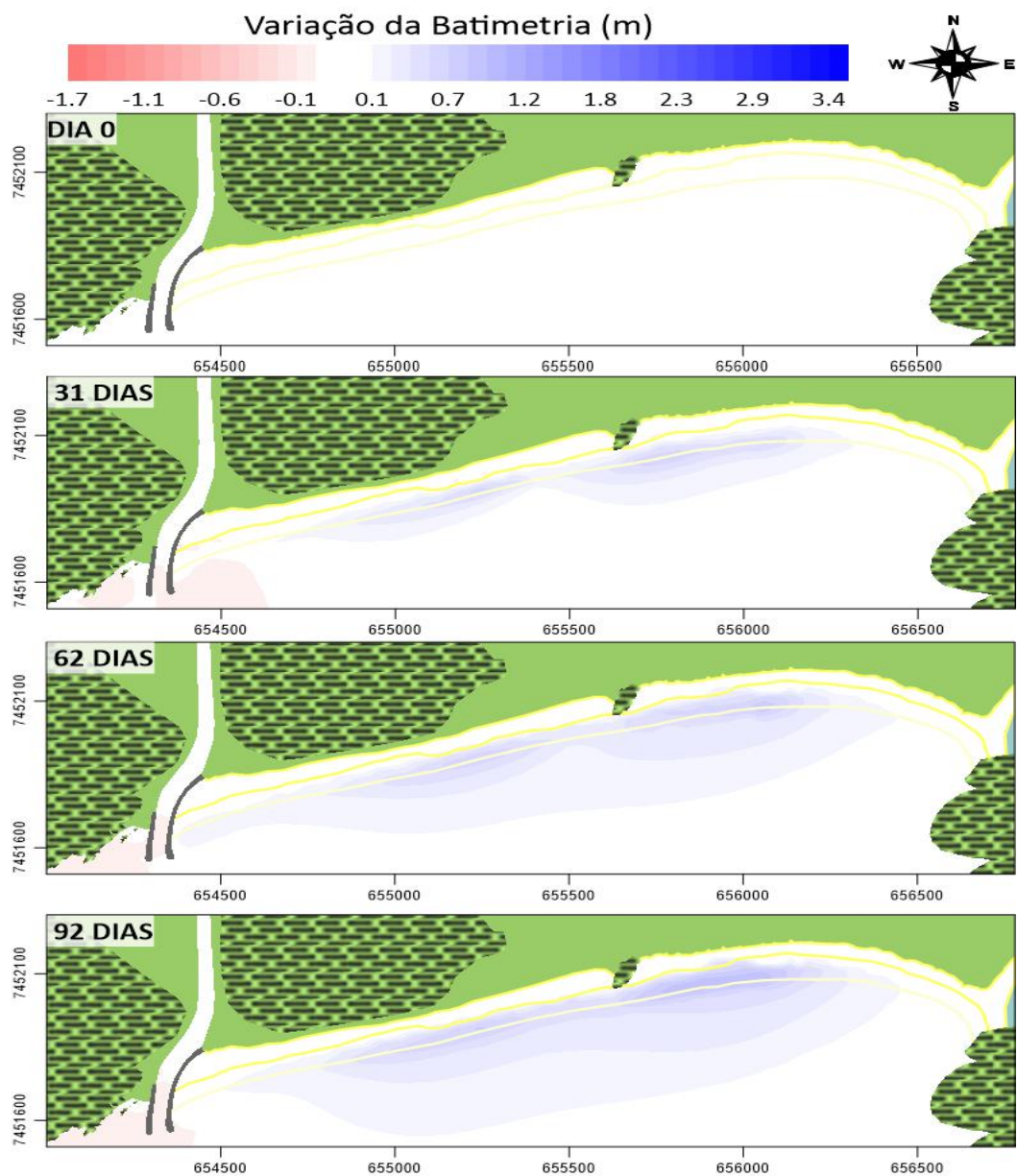


Figura 78. Variação da batimetria no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2014 para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento.

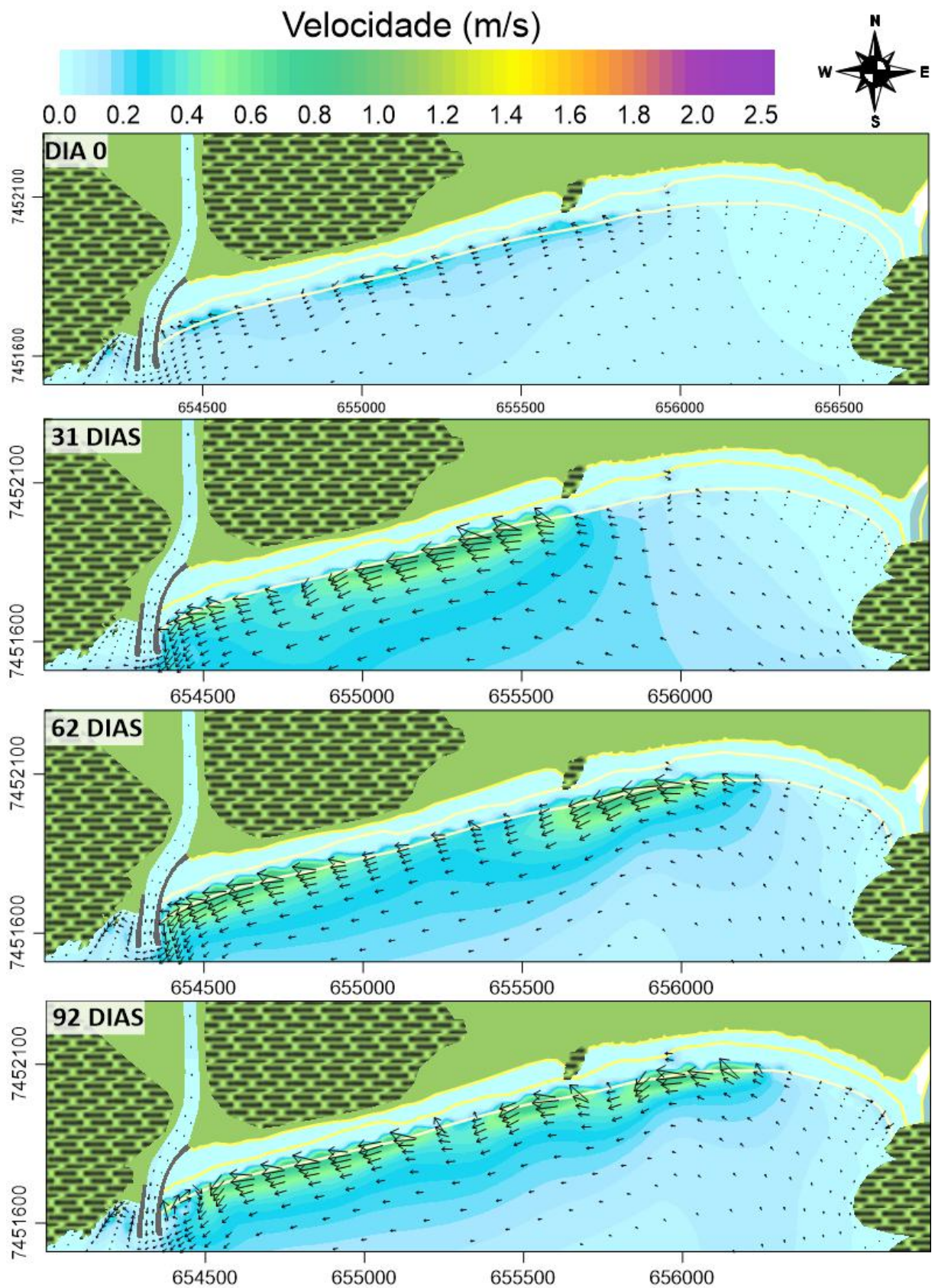


Figura 79. Distribuição das correntes na praia da Macumba no dia 0, dia 31, dia 62 e dia 92 de simulação, num período representativo dos meses de julho, agosto e setembro de 2014 para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno.

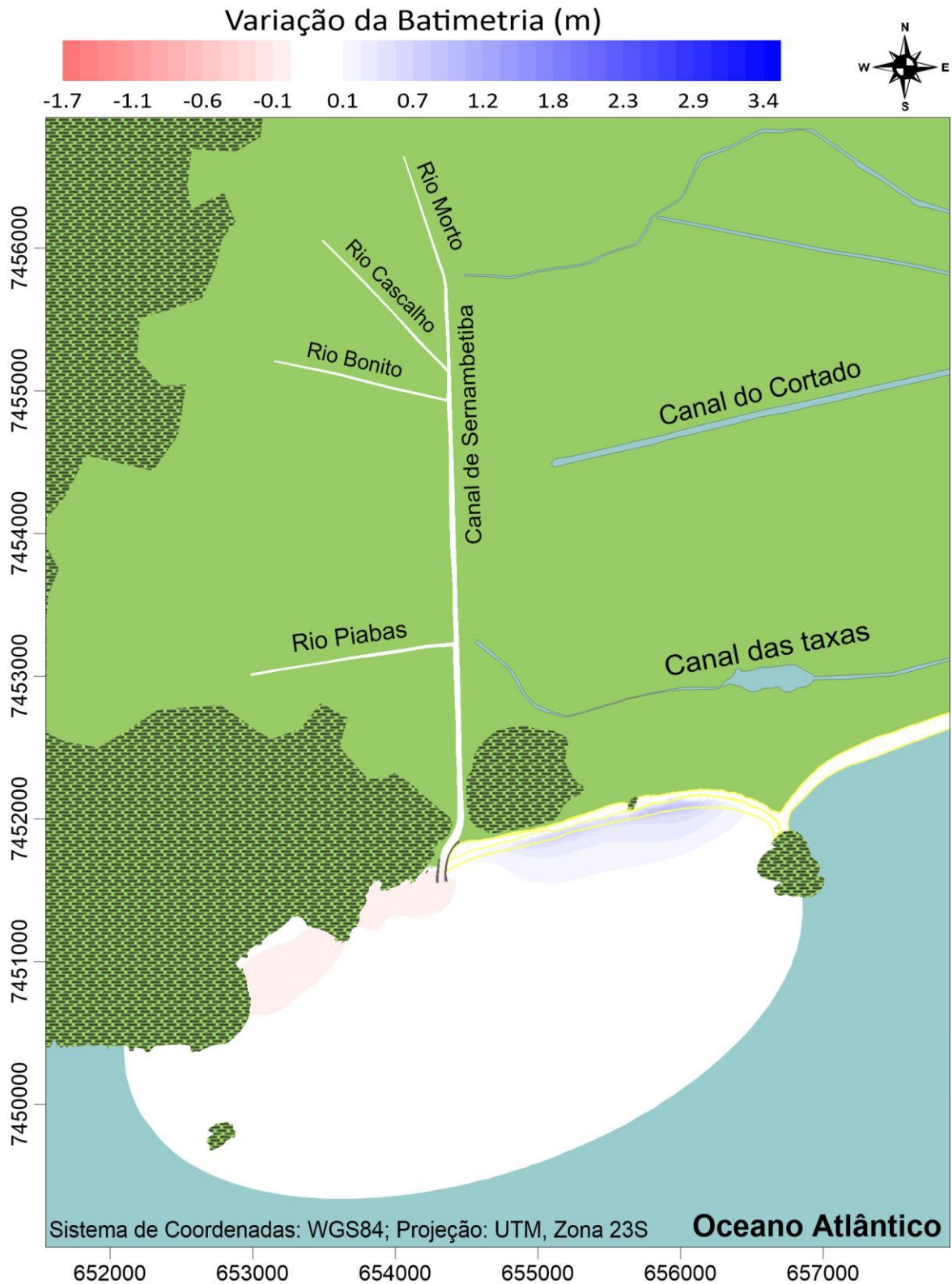


Figura 80. Variação da batimetria no dia 92 de simulação para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Os valores positivos representam erosão e os valores negativos representam assoreamento.

Analisando o gráfico da evolução morfológica, observamos que não houve variação morfológica nas estações Embocadura do Canal de Sernambetiba e Praia próxima a Pedra do Pontal. A

estação Leste da pedra de Itapuã apresentou uma variação irrelevante. A estação Oeste da pedra de Itapuã apresentou os maiores valores de erosão dentre as estações, atingindo até 0,3 metros (Figura 81).

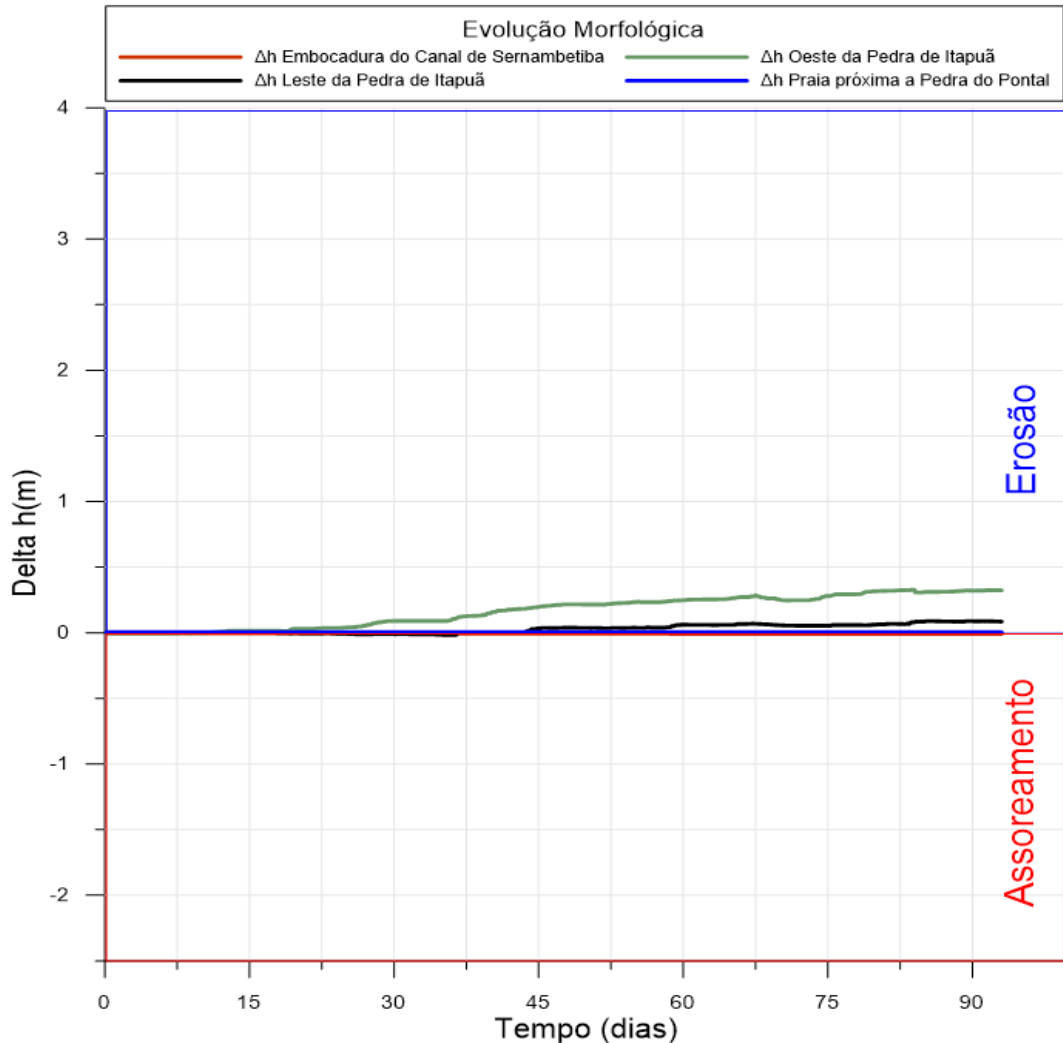


Figura 81. Evolução morfológica nas estações denominadas Leste da Pedra de Itapuã, Oeste da Pedra de Itapuã, Praia próxima a Pedra do Pontal e Embocadura do Canal de Sernambetiba para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. Valores negativos indicam assoreamento, enquanto valores positivos indicam erosão.

Enquanto nos outros cenários a ocorrência de fenômenos de ressaca era bem evidente, nesse temos condições oceanográficas mais amenas, com ondas de até 2,6 metros. As ondas mais energéticas são de leste e sudeste presentes no mês de agosto e setembro. A Figura 82, Figura 83 e Figura 84 expõem o clima de ondas da região, com sua altura, período e direção.

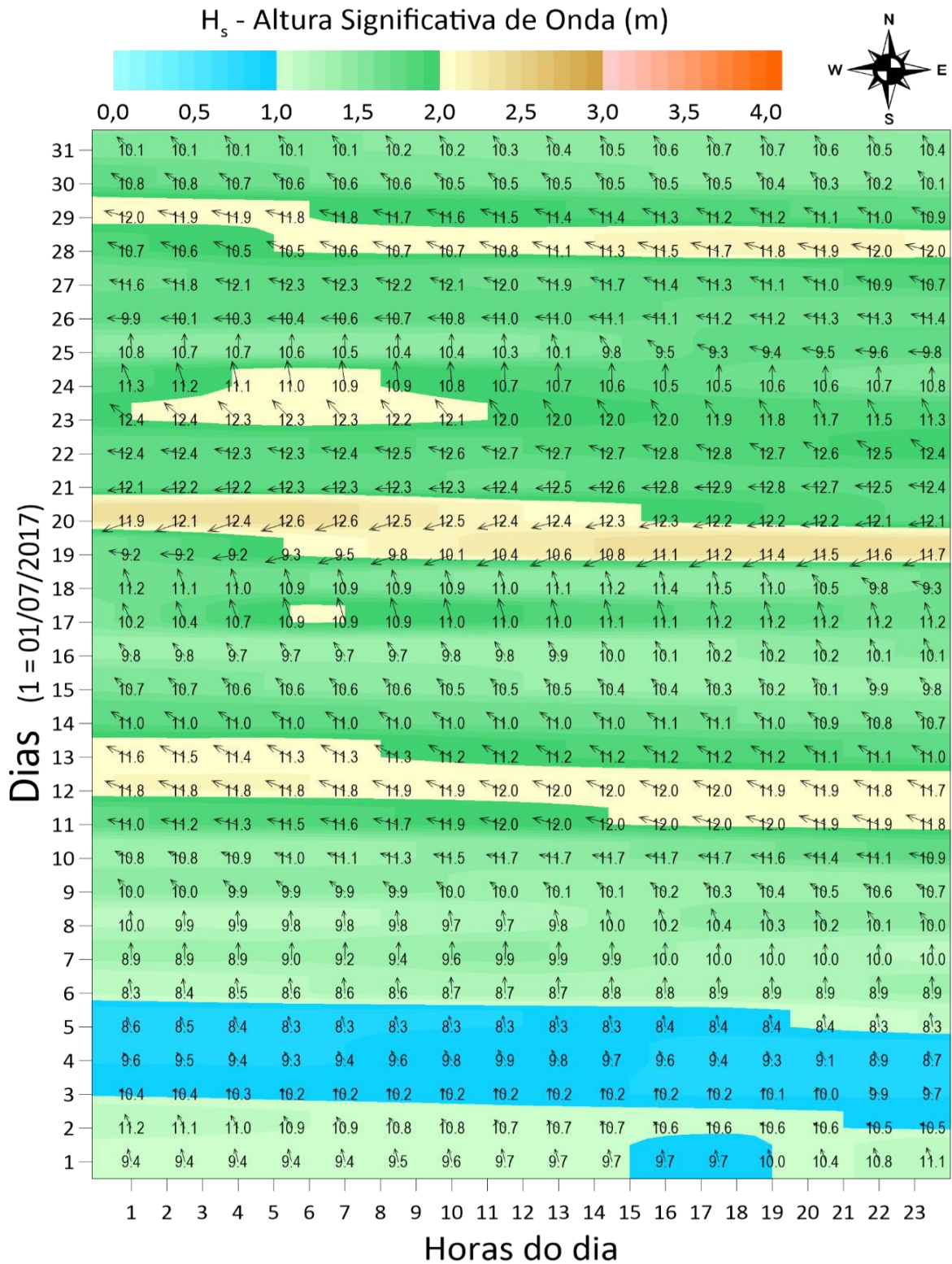


Figura 82. Altura, direção e período das ondas nos 31 dias de simulação, num período representativo do mês de julho de 2014. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade.

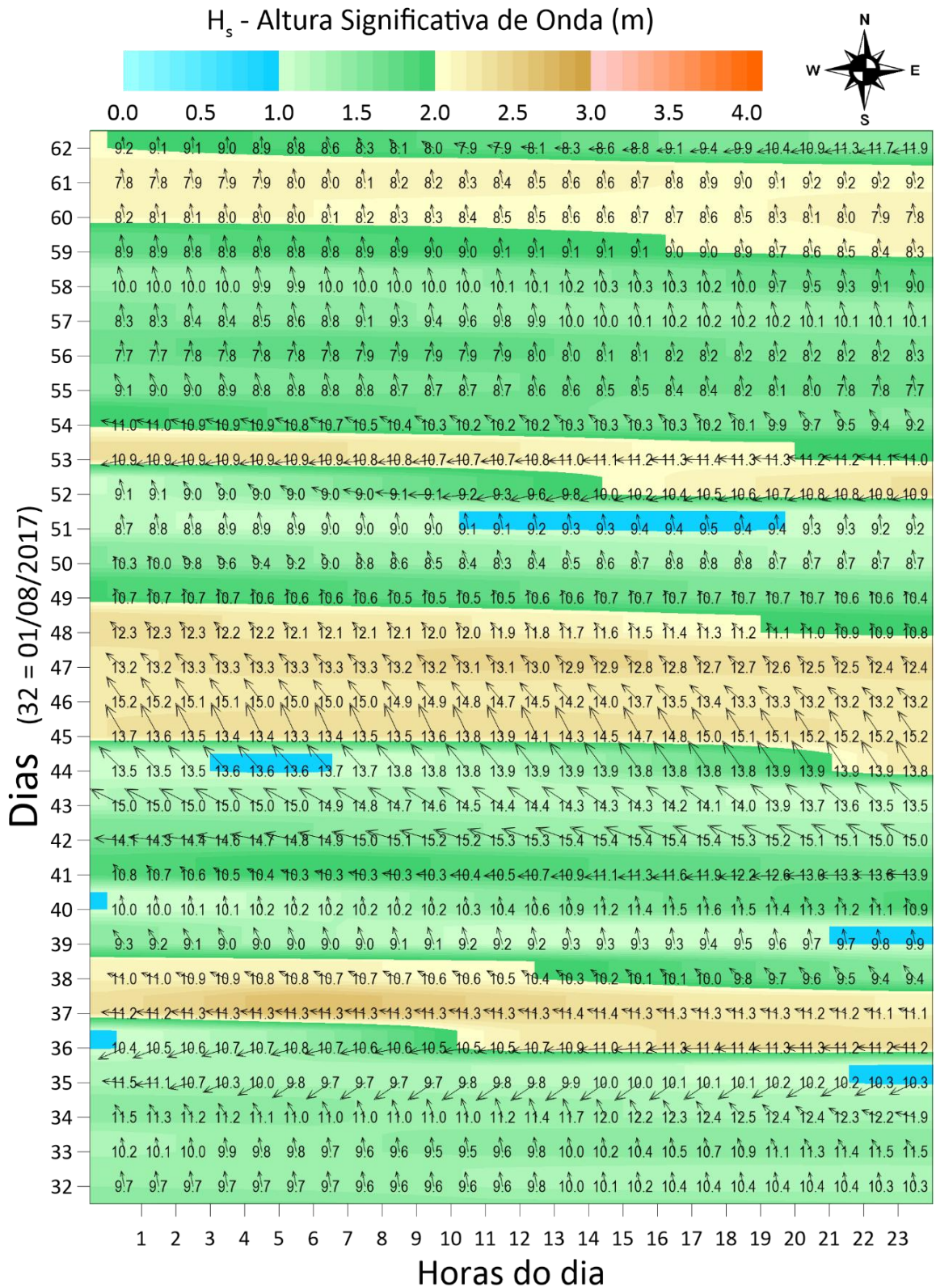


Figura 83. Altura, direção e período das ondas entre 32 dias e 62 dias de simulação, num período representativo do mês de agosto de 2014. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade.

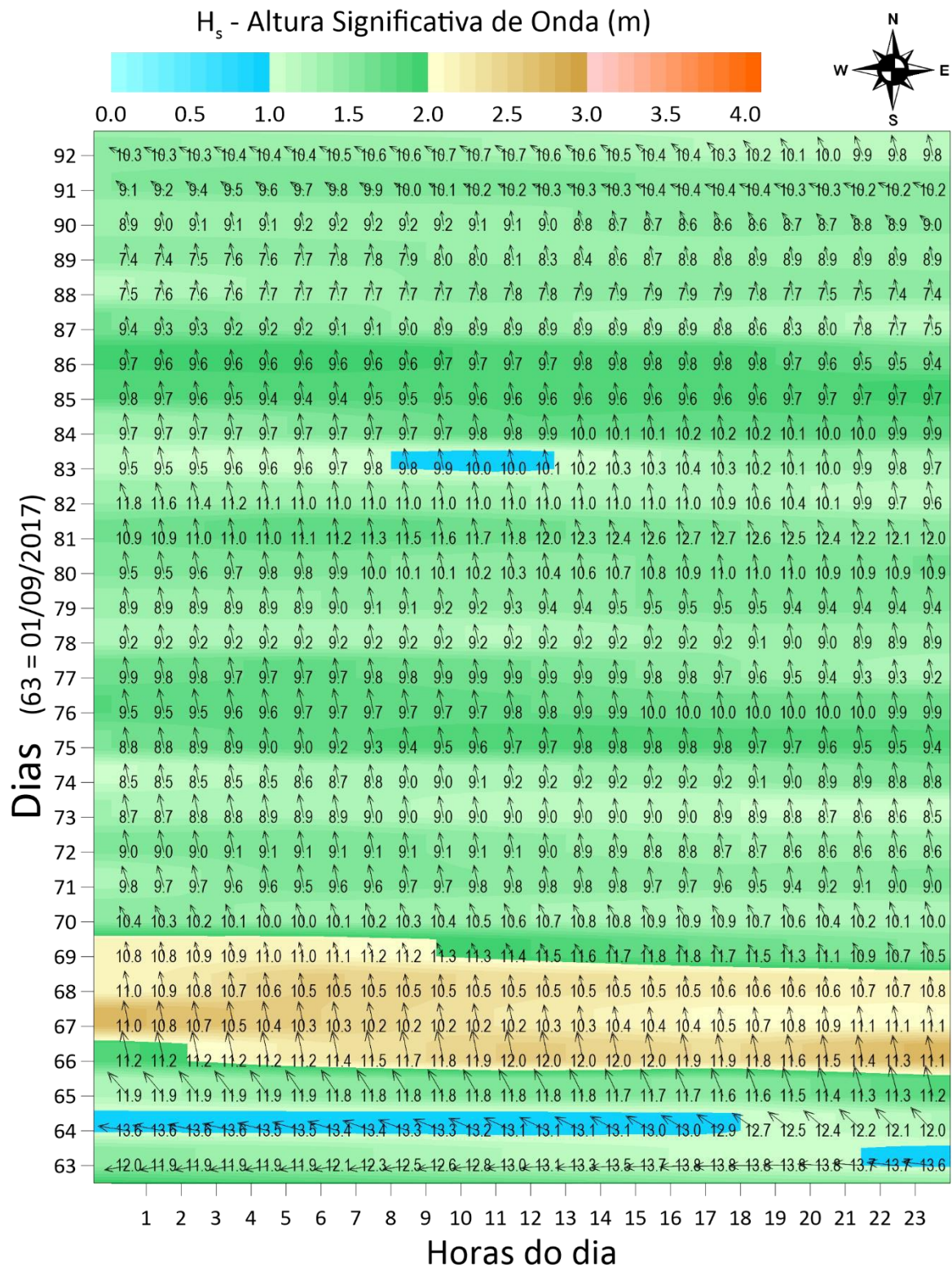


Figura 84. Altura, direção e período das ondas entre 63 dias e 92 dias de simulação, num período representativo do mês de setembro de 2014. As setas representam a direção das ondas com os valores dos respectivos períodos e o padrão de cores ao fundo indica a intensidade.



### 4.3.3 Variação de perfis de praia no instante com maior velocidade da corrente

Nesse cenário não foi observado nenhum evento de ressaca. Assim, foi escolhido o dia em que houve a incidência das maiores ondas, referente ao dia 67 da simulação (Figura 85). Essas ondas de sul apresentaram cerca de 2,6 metros e períodos em torno de 11 segundos. A partir disso, foram comparados o perfil de praia nos instantes de 1 dia antes e 5 dias após o dia com as maiores ondas nas quatro estações de análise.

Os resultados mostraram que o perfil da seção transversal da embocadura do canal de Sernambetiba e os perfis de praia das três estações em análise não sofre modificação após o instante analisado (Figura 86, Figura 87, Figura 88 e Figura 89). Isso também fica evidente na Figura 90 que mostra que não há variação nas linhas de cota fundo nos mesmos instantes.

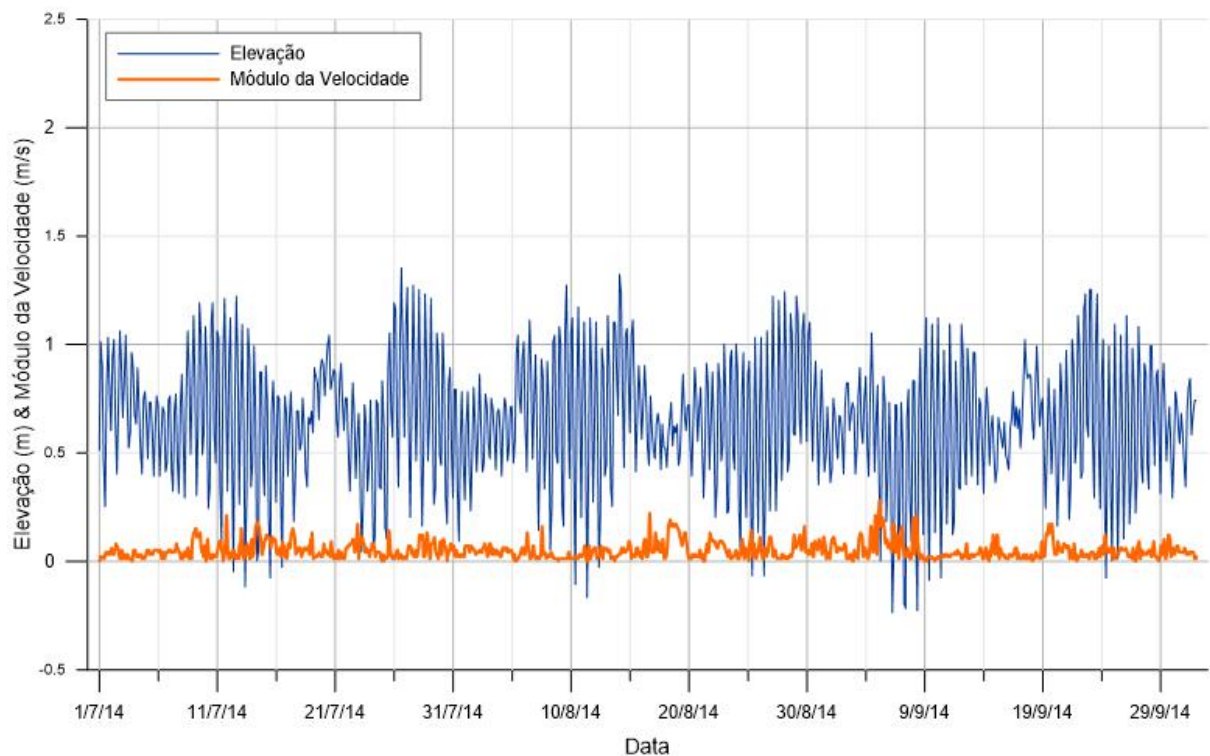


Figura 85. Série temporal de elevação e módulo da velocidade no período de simulação para o ano de 2014. Nota-se o pico no módulo de velocidade representando o dia com a maior onda no período simulado.

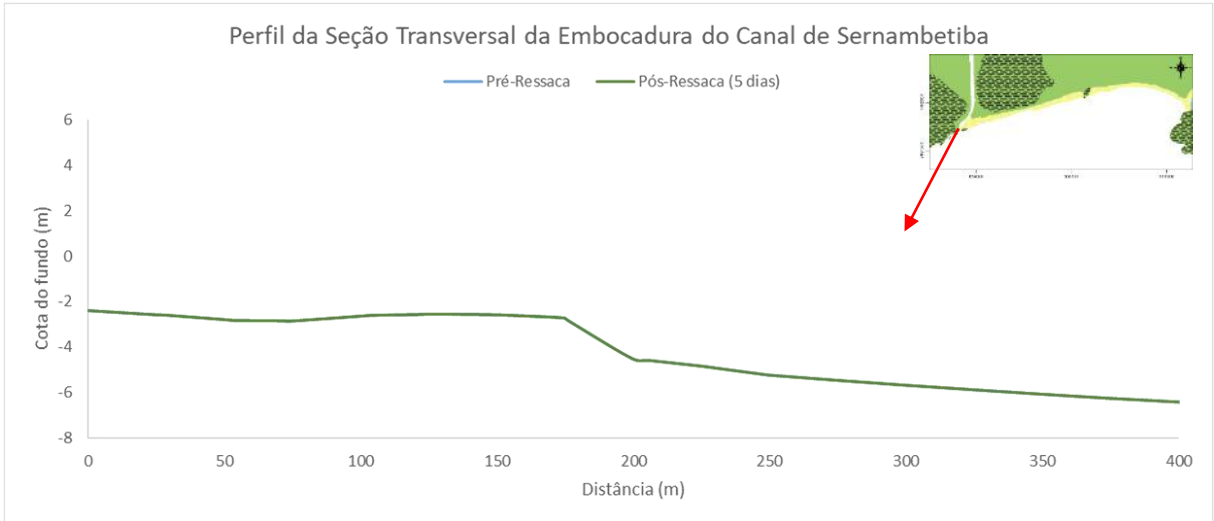


Figura 86. Variação do perfil da seção transversal correspondente a estação denominada Embocadura do Canal de Sernambetiba para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias após o dia com as maiores ondas.

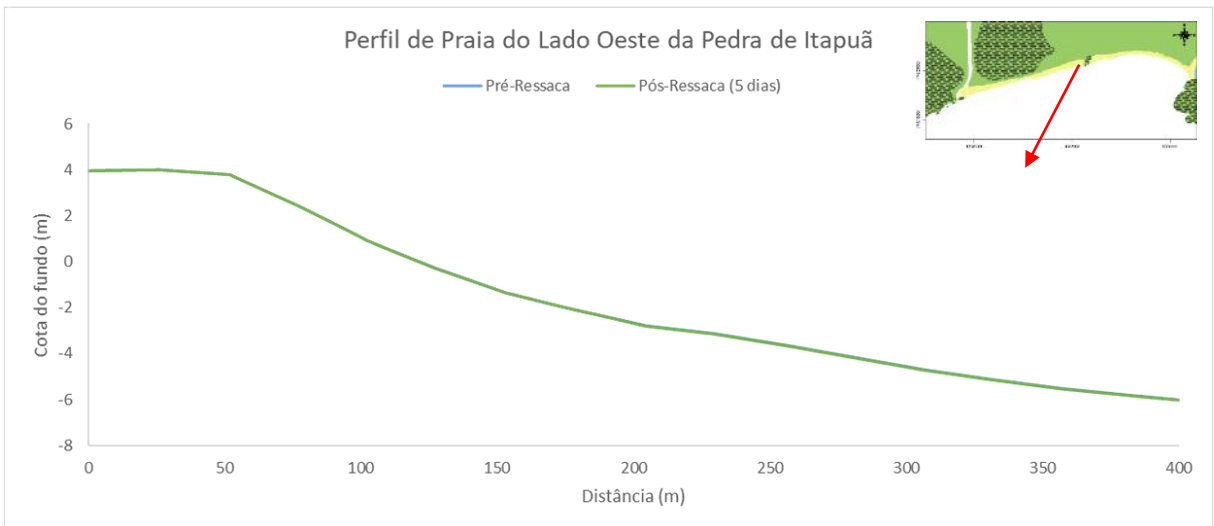


Figura 87. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Oeste da Pedra de Itapuã para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias após o dia com as maiores ondas.

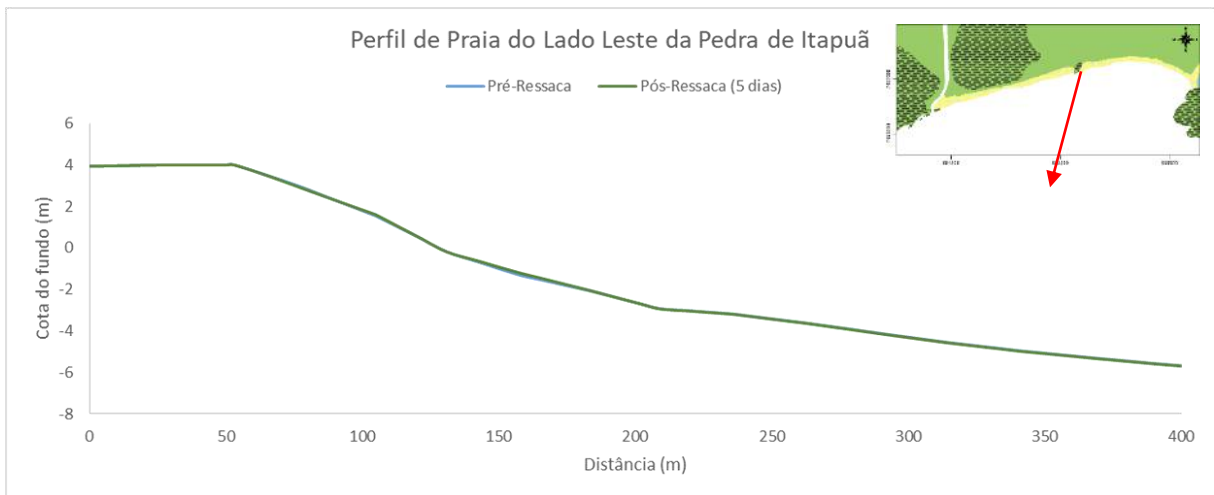


Figura 88. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Lado Leste da Pedra de Itapuã para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias após o dia com as maiores ondas.

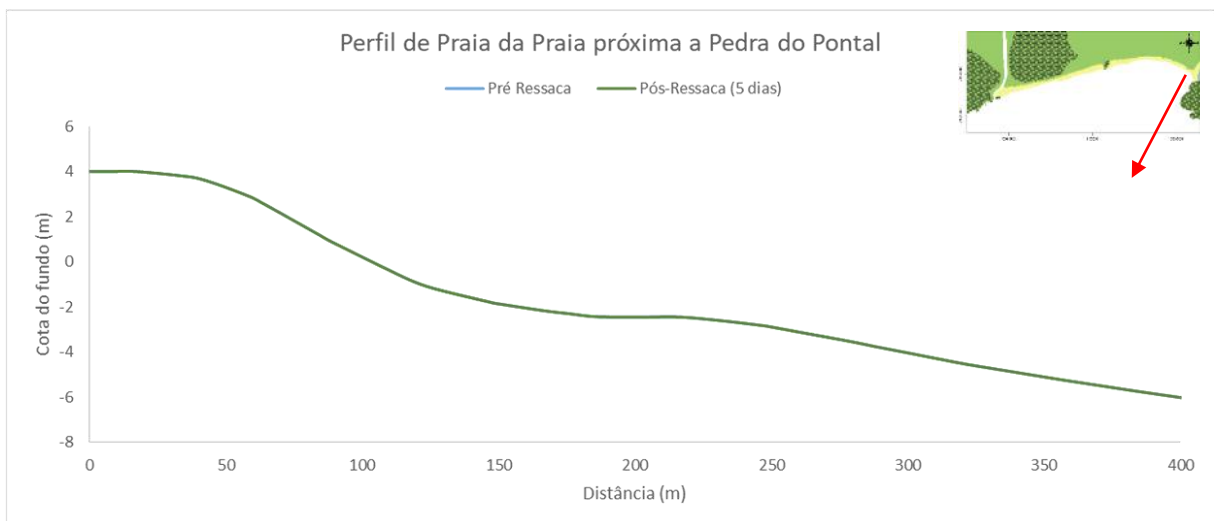


Figura 89. Variação do perfil de praia correspondente a estação denominada Praia próxima a Pedra do Pontal para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. A linha azul representa o instante de 1 dia antes e a linha verde representa o instante de 5 dias após o dia com as maiores ondas.

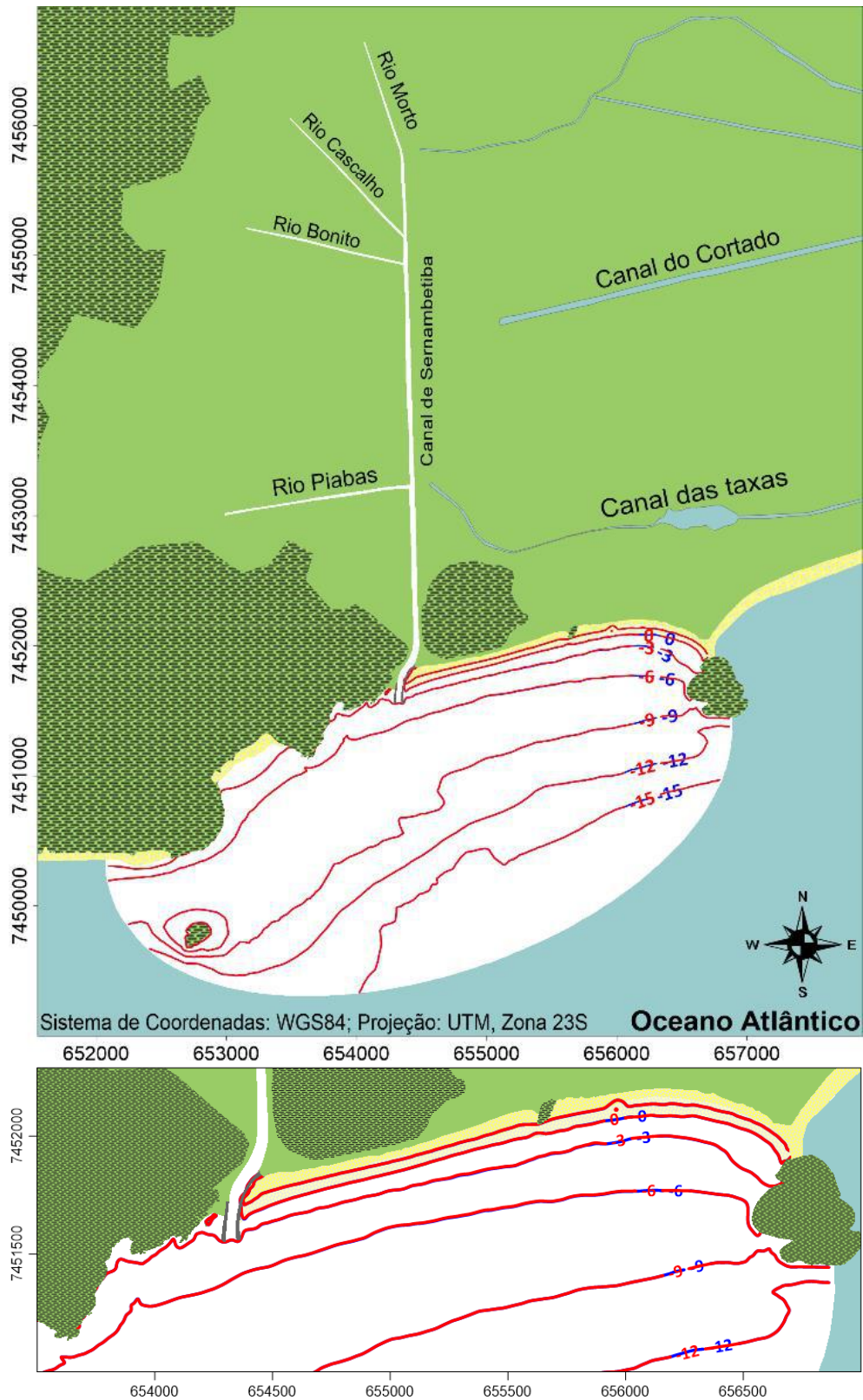


Figura 90. Isolinas de cota de fundo (m) para o período simulado referente ao ano de 2014 para o cenário pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes e com o clima de ondas típico de inverno. As linhas de cor azul representam o instante de 1 dia antes e as linhas vermelhas representam o instante de 5 dias após o dia com as maiores ondas.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos no estudo contribuem para o conhecimento acerca dos processos hidrodinâmicos e morfológicos da praia da Macumba. Também possibilitam a avaliação da eficácia de um projeto de solução dos problemas na região, Rosman et al. (2000), através da estabilização da embocadura do canal de Sernambetiba e replenimento do estoque de areia da praia da Macumba.

A metodologia de análise através de simulações de diferentes cenários utilizando modelos do SisBaHiA<sup>®</sup>, mostrou-se adequada, pois os resultados permitiram alcançar os objetivos propostos. As simulações apresentaram os mesmos padrões de ondas, correntes e morfologia descritos na literatura disponível, demonstrando a coerência dos resultados apresentados com os processos hidrodinâmicos e morfológicos observados na praia.

No cenário em que a praia da Macumba está no seu estado natural, antes das intervenções propostas, com o clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte, observa-se nos resultados pontos de erosão acima de 3 metros, com as areias sendo transportadas para oeste, causando assoreamento da embocadura do canal de Sernambetiba e formação de amplos depósitos defronte ao costão rochoso a oeste da embocadura. Embora não haja dados para uma comparação quantitativa, destaca-se que a simulação reproduziu as mesmas feições observadas localmente de julho a setembro de 2017. Vale lembrar que as ressacas no inverno de 2017 foram de frequência e intensidades acima do usual.

Na simulação pós-replenimento do estoque de areia da praia e guia-correntes com o mesmo clima de ondas de um ano pós El Niño muito forte, no mesmo período de julho a setembro de 2017, houve uma diminuição considerável nas taxas de erosão. A máxima erosão ocorreu na mesma zona, próxima a pedra de Itapuã, porém não passou de 1 metro. O assoreamento na embocadura do canal de Sernambetiba também teve uma diminuição significativa, alcançando máximo de 0,2 metros no final da simulação, sem formação de bancos significativos defronte ao costão rochoso. Evidenciou-se que o guia-correntes funcionou adequadamente como retentor de sedimentos do arco praiado mesmo em condições adversas de ondas no inverno de 2017.

No último cenário simulado, pós-replenimento da praia e estabilização da embocadura do canal com guia-correntes, sob ação de um clima de ondas típico de inverno, as taxas de erosão foram ainda menores, não passando de 0,8m. Também não houve assoreamento na embocadura do

canal de Sernambetiba nem formação de bancos defronte ao costão rochoso a oeste da embocadura. Evidenciou-se neste caso, que o guia-correntes reteve completamente os sedimentos do arco praial.

Conclui-se que os guia-correntes estabilizaram adequadamente a embocadura do canal de Sernambetiba e impediram escape significativo de sedimentos para fora do arco praial. O replenimento da praia proporcionou uma melhor proteção contra a ação das ondas, conservando a faixa de praia atual e as benfeitorias públicas.

A confiabilidade nos resultados da modelagem pode ser ampliada com melhora na quantidade de dados disponíveis para a região, especialmente atualização na batimetria. Recomenda-se também realizar outras análises utilizando diferentes estoques de sedimento para replenimento da praia, pois o estoque utilizado nesse trabalho é preliminar e conservador, podendo ser considerado preparatório para possíveis mudanças climáticas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOT, M. B.; BASCO, D. R. **Computational Fluid Dynamics: an Introduction for Engineers**, Longman Scientific and Technical. New York. 1989

BIRD, E. **Submerging Coasts – The effects of a rising sea level on coastal environments**. John Wiley & Sons Ltd. 184 p. Chichester, London, 1993.

BIRKEMEIER, W. A. **Field data on seaward limit of profile change**. Journal of waterway, Port, Coastal and coastal engineering, ASCE, Vol 111, No. 3, pp 598-602. 1985.

CORREIO DO BRASIL. Ressaca danifica calçadão da Praia da Macumba. 2006. Disponível em: <<https://www.correiodobrasil.com.br/ressaca-danifica-calçada-da-praia-da-macumba/>> Acesso em: 20 novembro 2018.

DHN – **Diretoria de Hidrografia e Navegação**. Ministério da Marinha. Folhas de Bordo n 1620, 23000 e 23100.

ENCAL, S.A, SONDOTÉCNICA, S.A, TECNOSAN ENGENHERIA, S.A. **Disposição final dos esgotos sanitários da baixada de Jacarepaguá**. Relatório técnico. 1985

ERA-INTERIM. **Centre for Medium Range Weather Forecasts**. Disponível em: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>. Acesso em: 15 jan. 2018.

FEMAR. **Fundação de Estudos do Mar**. Disponível em: <<https://fundacaofemar.org.br/portalwordpress/>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

JORNAL DO BRASIL. Calçadão na Praia da Macumba é destruído por ondas. 2008. Disponível em: <<http://www.jb.com.br/rio/noticias/2008/12/04/calçada-na-praia-da-macumba-e-destruido-por-ondas/>> Acesso em 20/11/2017.

KIRBY, J.T., DALRYMPLE, R.A., SHI, F., 2002. **Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 3.0, Documentation and User's manual**. Research Report No. CARC-02-02, Centre for Applied Coastal Research, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware, Newark, EUA.

NEW ENGLAND BOATING. Disponível em: <<http://newenglandboating.com/jetties-in-green-harbor-ma-closed-for-repair/>>. Acesso em: 25 jan. 2019.

NORTH ATLANTIC DIVISION. **Risk management strategies**. <<https://www.nad.usace.army.mil/CompStudy/Risk-Management-Strategies/>>, Acesso em: 25 jan 2019.

G1. **Calçadão da Praia da Macumba afunda e desmorona no Rio**. 2017. Disponível em:<<https://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/calçada-da-praia-da-macumba-afunda-e-desmorona-no-rio.ghtml>>. Acesso em 27 novembro 2017.

G1. **Ressaca dos últimos dias volta a causar estragos na Praia da Macumba, Zona Oeste do Rio**. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/ressaca-dos->

ultimos-dias-volta-a-fazer-estragos-na-praia-da-macumba-zona-oeste-do-rio.shtml>. Acesso em: 27 set. 2019.

GGWEATHER. **El Niño and La Niña Years and Intensities**. Disponível em: <<https://ggweather.com/enso/oni.htm>>. Acesso em 24 setembro 2019.

O GLOBO. **Ressaca na Praia da Macumba provoca novos estragos**. 2017. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/rio/ressaca-na-praia-da-macumba-provoca-novos-estragos-21984406/>>. Acesso em: 23 maio 2018.

O GLOBO. **Acervo O Globo**. 2006. Disponível em: <<https://acervo.oglobo.globo.com/busca/?tipoConteudo=artigo&pagina=7&ordenacaoData=ataDescendente&allwords=Praia+da+Macumba&anyword=Ressaca&noword=&exactword=>>>. Acesso em: 21 janeiro 2019.

O GLOBO. **Ciclovía na Praia da Macumba já tem rachaduras; moradores temem novo desmoronamento do calçadão**. 2018. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/rio/cicloviana-praia-da-macumba-ja-tem-rachaduras-moradores-temem-novo-desmoronamento-do-calçada-23105868>>. Acesso em: 27 set. 2019.

PENA, J. do N. **Dinâmica geomorfológica das praias oceânicas urbanas da cidade do Rio de Janeiro e impactos associadas a ressacas do mar: uma contribuição à gestão costeira**. Dissertação (Mestrado) em Geografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBaHiA®. V. 9d**. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

ROSMAN, P.C.C.; VALENTINI, E.; VINZÓN, S. **Estudos de Estabilização da Barra do Canal de Sernambetiba e Recuperação da Praia da Macumba, Rio de Janeiro – RJ**. Relatório de Cooperação Técnica em Projetos nas Bacias Hidrográficas do Município do Rio de Janeiro, no PENO-0556. Fundação COPPETEC, Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica. Rio de Janeiro, 2000.

SHORT, A. D. e JACKSON, D.W.T. **Beach Morphodynamics**. Coastal Geomorphology, vol. 10, pp. 106-129. San Diego, CA, 2013.

SILVA, V. M. A. P. da.; GROHMANN, P. A.; ESTEVES, A. M. Aspectos gerais do estudo da meiofauna de praias arenosas. Ecologia de praias arenosas no litoral brasileiro. Volume III. Programa de pós-graduação em Ecologia. Instituto de Biologia- Universidade Federal do Rio de Janeiro. p. 67-92. Rio de Janeiro – RJ, 1997.

SIGMA GEOSYNTHETICS. **Geobags**. <<http://www.simageosynthetics.com/geobags/>>. Acesso em: 02 out 2019.

SOUSA, R.S; CASTRO, J.W.A. **Erosão costeira no arco praias da Barra da Tijuca – Recreio dos Bandeirantes, zona oeste do Rio de Janeiro: identificação de áreas de retrogradação e progradação da linha de costa**. XII Congresso de Associação Brasileira de Estudos do Quaternário ABEQUA. Anais de Congresso da ABEQUA 2011. p. 1-7. Armação de Búzios, 2011. Disponível em: <[http://www.abequa.org.br/trabalhos/ABEQUA\\_2011-RAFAEL.pdf](http://www.abequa.org.br/trabalhos/ABEQUA_2011-RAFAEL.pdf)>.



VALENTINI, E. M. S e ROSMAN, P. C. C, “**Apostila EEH604**” – **Apostila de Aulas – Curso de Engenharia Fluvial e Costeira**. AECO – Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

VAN RIJN, L. **Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 133, n. 6, pp 668 – 689, 2007.

VAN RIJN, L. C. **Coastal erosion and control**. Ocean & Coastal Management. v. 54, p. 857-956, 2011.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Coastal Engineering Manual**, Engineer Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes), USA. 2002

WRIGHT, L. D. e SHORT, A. D. **Morphodynamics variability of surf zones and beaches: A synthesis**. Marine Geology. vol. 53, p. 93-118, 1984.