EFEITOS DE OBRAS HIDRÁULICAS NA RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS DO SISTEMA LAGUNAR DE JACAREPAGUÁ E NA BALNEABILIDADE DAS PRAIAS ADJACENTES AO CANAL DA JOATINGA

Ana Lígia Favaro dos Santos

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
Maio de 2017

EFEITOS DE OBRAS HIDRÁULICAS NA RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS DO SISTEMA LAGUNAR DE JACAREPAGUÁ E NA BALNEABILIDADE DAS PRAIAS ADJACENTES AO CANAL DA JOATINGA

Ana Lígia Favaro dos Santos

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. Isaac Volschan Junior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MAIO DE 2017

Santos, Ana Lígia Favaro dos

Efeitos de obras hidráulicas na renovação das águas do Sistema Lagunar de Jacarepaguá e na balneabilidade das praias adjacentes ao canal da Joatinga/ Ana Lígia Favaro dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVI, 141 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 139-141.

1. Modelagem Ambiental Aplicada. 2. Renovação de águas. 3. Balneabilidade de águas. I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Vera e Francisco, por sempre me apoiarem em todas as minhas escolhas.

Ao Rosman por ser um professor excepcional, por todos ensinamentos, explicações e orientação.

Ao Marcos Gallo e ao Isaac Volschan por aceitarem o convite e se disponibilizarem a fazer parte da banca e contribuir com este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo apoio financeiro.

À Marise por simplesmente ser a pessoa que é. Aos meus colegas da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, AECO, por tornar meus dias mais divertidos e produtivos também.

À minha família "carioca" por todas as conversas e jogatinas, em especial à Julia por me ajudar desde antes do mestrado começar até os momentos finais dele.

Ao melhor amigo que o mestrado poderia ter me dado, meu companheiro Luciano.

Muito obrigada a todos!

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

EFEITOS DE OBRAS HIDRÁULICAS NA RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS DO SISTEMA LAGUNAR DE JACAREPAGUÁ E NA BALNEABILIDADE DAS PRAIAS ADJACENTES AO CANAL DA JOATINGA

Ana Lígia Favaro dos Santos

Maio/2017

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Oceânica

Desde a década de 1970, as águas do Sistema Lagunar de Jacarepaguá (SLJ) recebem grandes crescentes cargas de águas residuais, ricas em matéria orgânica, oriundas de fontes urbanas e industriais. Este trabalho avaliou, através de modelagem computacional, os efeitos que obras hidráulicas no SLJ suscitariam na circulação hidrodinâmica local e na qualidade de suas águas e das praias adjacentes à embocadura. Tais obras são: desobstrução de canais e recuperação de espaços aquáticos via dragagens e aumento da seção hidráulica da embocadura do canal da Joatinga com alterações do guia-correntes. As intervenções consideradas propiciaram o aumento do prisma de maré nos principais canais do sistema. Permitiram também maior renovação de suas águas, principalmente para as lagoas de Jacarepaguá e Marapendi. Com o maior volume de águas que entra no sistema, há uma maior diluição e consequente diminuição da concentração de coliformes termotolerantes. O prolongamento do guia-correntes beneficiou as condições de balneabilidade das praias adjacentes ao canal da Joatinga.

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

THE EFFECTS OF HYDRAULIC WORKS ON WATER RENEWAL OF JACAREPAGUÁ LAGOON SYSTEM AND ON BATHING CONDITIONS OF BEACHES ADJACENT TO THE JOATINGA CHANNEL

Ana Lígia Favaro dos Santos

May/2017

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Ocean Engineering

Since the 1970s, the waters of the Jacarepaguá's System have received large and growing loads of wastewater, rich in organic matter, from urban and industrial sources. This work evaluated, through computational modeling, the effects that hydraulic works in the lagoon system would induce in the local hydrodynamic circulation and in the quality of it waters and also of the adjacent beaches. These works are: clearing of channels and recovery of aquatic spaces through dredging and improvement of hydrodynamic conditions at the mouth of the Joatinga channel, modifying the jetties. The interventions considered propitiated the increase of the tide prism in the main channels of the system. They also allowed greater renewal of its waters, mainly to the lagoons of Jacarepaguá and Marapendi. The increase of water entering the system leads to a greater dilution and consequent decrease in the concentration of thermotolerant coliforms. The extension of the jetties improved the bathing conditions of the adjacent beaches.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

2. OBJETIVOS 5

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5

3.1. Sistema Lagunar de Jacarepaguá 5

3.1.1. Situação Atual das Águas 8

3.1.2. Projetos na Região do SLJ 15

3.1.3. Aspectos Climáticos 19

3.1.4. Aspectos Oceanográficos 21

4. METODOLOGIA 27

4.1. Modelo Hidrodinâmico 27

4.2. Modelo de Transporte Euleriano 32

4.3. Modelo de Transporte Lagrangeano 33

4.4. Modelo de Propagação de Ondas 38

5. DADOS AMBIENTAIS 39

5.1. Modelagem Digital do Terreno 39

5.1.1. Domínio de Modelagem 39

5.1.2. Batimetria 42

5.1.3. Rugosidade Equivalente no Fundo 43

5.2. Modelo Hidrodinâmico 45

5.2.1. Dados de Vento 45

5.2.2. Marés 48

5.2.3. Vazões Fluviais 54

5.2.4. Condicionantes 54

5.2.5. Calibração do Modelo Hidrodinâmico 58

5.3. Modelo Transporte Lagrangeano 62

5.4. Cenários Simulados 66

6. RESULTADOS 67

6.1. Nova Configuração do Guia-correntes 67

6.2. Modelo Hidrodinâmico 74
6.2.1. Elipses de Maré 85
6.2.2. Prismas de Maré 88
6.2.3. Elevações 91
6.3. Renovação das Águas das Lagoas 99
6.3.1. Verão 99
6.3.2. Inverno 110
6.4. Balneabilidade das Praias 121
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 137
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema Lagunar de Jacarepaguá e a direita o Canal da Joatinga. 1

Figura 2. Pluma de águas provenientes do SLJ com extensão estimada de sete quilômetros. Fonte: https://ogimg.infoglobo.com.br/in/21193905-477-6b7/FT1500A/550/mancha-cianobacterias-praia-barra.jpg. 3

Figura 3. Imagem com detalhe no canal da Joatinga. 7

Figura 4. Análise temporal das imagens de satélite do canal ao longo de um ano. É possível notar que a variação na linha de costa da praia do Pepê não cresce além do atual guia-correntes 8

Figura 5. Boletim da Qualidade das Águas da Região Hidrográfica V – Baía de Guanabara Bacia do Sistema Lagunar de Jacarepaguá referente ao mês de maio de 2017. Fonte: INEA. Disponível em: http://200.20.53.3:8081/cs/groups/public/documents/document/zwew/mdi2/~ed 12

Figura 6. Boletim de avaliação da qualidade das águas das lagoas do SLJ referente ao mês de maio de 2017. Fonte: INEA, disponível em: http://200.20.53.3:8081/cs/groups/public/documents/document/zwff/mda5/~edisp/inea_009596.pdf. 13

Figura 7. Histórico dos boletins de balneabilidade do INEA de janeiro a junho de 2016 das praias da Zona Oeste e Zona Sul. Em verde a classificação do local é própria e em vermelho imprópria para banho. 14

Figura 8. Canais projetados para a realização do projeto de dragagem do SLJ. 16

Figura 9. Alternativas propostas para o prolongamento do guia-correntes do Canal da Joatinga pelo Masterplan (2013). 18

Figura 10. Níveis de probabilidade de concentrações impróprias de coliformes termotolerantes em águas costeiras nas condições de verão e céu totalmente nublado. Fonte: Feitosa, 2017. 19

Figura 11. Séries temporais simultâneas de nível de água medido na Ilha Fiscal (acima das figuras); (a) componente longitudinal (valores positivos têm sentido leste-nordeste) e (b) componente transversal da corrente (valores positivos seguem em direção a costa) e temperatura da água (colorido) medidas ao longo da coluna de água junto ao difusor do ESEI durante o verão de 1997. 25

Figura 12. Séries temporais simultâneas de nível de água medido na Ilha Fiscal (acima das figuras); (a) componente longitudinal (valores positivos têm sentido leste-nordeste) e (b) componente transversal da corrente (valores positivos seguem em direção a costa) e temperatura da água (colorido) medidas ao longo da coluna de água junto ao difusor do ESEI durante o verão de 1997. 26

Figura 13. Condição inicial utilizada para as simulações de renovação das águas do SLJ. 33

Figura 14. Posição da linha difusora utilizada como fonte para o modelo de transporte lagrangeano. 36

Figura 15. Estrutura metodológica do funcionamento do Modelo de Transporte Lagrangeano utilizado neste estudo. 37

Figura 16. Malha utilizada para a discretização espacial do domínio de modelagem. 40

Figura 17. Detalhe da malha no Canal da Joatinga para a discretização espacial do domínio de modelagem para o cenário atual. 41

Figura 18. Detalhe da malha no Canal da Joatinga para a discretização espacial do domínio de modelagem para o cenário pós prolongamento do guia-correntes 41

Figura 19. Batimetria utilizada no domínio de modelagem para o cenário atual. 42

Figura 20. Batimetria utilizada no domínio de modelagem para o cenário com as intervenções de dragagem e de prolongamento do guia corrente no canal da Joatinga..... 43

Figura 21. Rugosidade equivalente discretizada para o domínio de modelagem do cenário atual. 44

Figura 22. Rugosidade equivalente discretizada para o domínio de modelagem do cenário com o guia-correntes prolongado. 45

Figura 23. Localização da estação na qual foram retirados os dados de reanálise dos ventos, a partir do ECMWF. 46

Figura 24. Dados de ventos representativos do mês de janeiro de 2012 inseridos no modelo hidrodinâmico. As setas indicam a direção do vento, o tamanho delas e o padrão de cores ao fundo indicam a intensidade..... 47

Figura 25. Dados de ventos representativos do mês de julho de 2012 inseridos no modelo hidrodinâmico. As setas indicam a direção do vento, o tamanho delas e o padrão de cores ao fundo indicam a intensidade..... 48

Figura 26. Previsão da maré astronômica para o mês de janeiro de 2012 com as constantes harmônicas obtidas da FEMAR da estação Recreio dos Bandeirantes. 49

Figura 27. Previsão da maré astronômica para o mês de julho de 2012 com as constantes harmônicas obtidas da FEMAR da estação Recreio dos Bandeirantes 50

Figura 28. Série temporal dos dados de elevação de janeiro de 2012 provenientes do marégrafo localizado na Ilha Fiscal..... 50

Figura 29. Série temporal dos dados de elevação de julho de 2012 provenientes do marégrafo localizado na Ilha Fiscal..... 50

Figura 30. Previsão da maré para janeiro de 2012 resultante das constantes harmônicas obtidas da análise da série de dados de elevação da Ilha Fiscal. 51

Figura 31. Previsão da maré para julho de 2012 resultante das constantes harmônicas obtidas da análise da série de dados de elevação da Ilha Fiscal. 51

Figura 32. Séries temporais de elevações de janeiro de 2012 dos dados da Ilha Fiscal, da previsão da maré astronômica para o mesmo local e a subtração de uma série a outra, resultando na maré meteorológica..... 52

Figura 33. Séries temporais de elevações de julho de 2012 dos dados da Ilha Fiscal, da previsão da maré astronômica para o mesmo local e a subtração de uma série a outra, resultando na maré meteorológica..... 52

Figura 34. Maré Meteorológica referente ao mês de janeiro de 2012, obtida do registro de elevações da Ilha Fiscal sem filtro e com filtro Gaussiano. 52

Figura 35. Maré Meteorológica referente ao mês de julho de 2012, obtida do registro de elevações da Ilha Fiscal sem filtro e com filtro Gaussiano. 53

Figura 36. Maré referente ao mês de janeiro de 2012 utilizada como forçante maregráfica nas modelagens..... 53

Figura 37. Maré referente ao mês de julho de 2012 utilizada como forçante maregráfica nas modelagens..... 53

Figura 38. Localização das estações utilizadas para o cálculo da diferença de fase. 56

Figura 39. Mapa da região costeira na região metropolitana do Rio de Janeiro e Niterói mostrando, em azul, as fontes poluidoras consideradas pela CEDAE em 2009. Fonte: Fundação Coppetec, 2009. 59

Figura 40. Gráfico referente as elevações medidas nas cercanias da linha difusora do ESEI..... 60

Figura 41 Comparação entre os valores de do nível médio diário obtido a partir dos dados de elevação da ESEI, linha pontilhada. E a linha contínua representa a velocidade média na direção paralela a costa. 60

Figura 42. Comparação das correntes de Leste-Oeste dos dados medidos e dos modelados na região da linha difusora da ESBT. 61

Figura 43. Comparação das correntes de Norte-Sul dos dados medidos e dos modelados na região da linha difusora da ESBT. 61

Figura 44. Imagem representativa da série temporal de radiação solar incidente durante o mês de janeiro na estação automática A654, referente ao Aeroporto de Jacarepaguá. Fonte:http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf 62

Figura 45 Imagem representativa da série temporal de radiação solar incidente durante o mês de julho na estação automática A654, referente ao Aeroporto de Jacarepaguá. Fonte: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf 63

Figura 46. Séries temporais calculadas da radiação solar que foram utilizadas nas modelagens referentes ao cenário de janeiro, em linha contínua e julho, cenário de inverno, em linha pontilhada. 64

Figura 47. Série temporal de concentrações de coliformes termotolerantes no canal da Joatinga. Fonte: CEDAE. 65

Figura 48.Séries temporal dos valores de temperatura medidos nas cercanias do Emissário Submarino de Ipanema utilizados no Modelo de Transporte Lagrangeano. Fonte: LT-COPPE 66

Figura 49. Esquema do novo guia-correntes prolongado proposto. 67

Figura 50. Localização do ponto DOW onde foi obtido dados de entrada para os modelos de propagação de ondas. 69

Figura 51. Grades utilizadas no modelo de propagação de ondas. 71

Figura 52. Resultado espacial da distribuição de altura de onda na região do canal da Joatinga de uma onda propagada na direção este-sudeste com no período de 12 s e altura de 3.13 m. O mapa da esquerda representa o cenário atual e o da direita com o guia-correntes prolongado. 72

Figura 53. Resultado espacial da distribuição de altura de onda na região do canal da Joatinga de uma onda propagada na direção sudeste com no período de 13 s e altura de 3.41 m. O mapa da esquerda representa o cenário atual e o da direita com o guia-correntes prolongado. 72

Figura 54. Resultado espacial da distribuição de altura de onda na região do canal da Joatinga de uma onda propagada na direção sul-sudeste com no período de 14 s e altura de 3.68 m. O mapa da esquerda representa o cenário atual e o da direita com o guia-correntes prolongado. 73

Figura 55. Resultado espacial da distribuição de altura de onda na região do canal da Joatinga de uma onda propagada na direção sul com no período de 15 s e altura de

4.18 m. O mapa da esquerda representa o cenário atual e o da direita com o guia-correntes prolongado. 73

Figura 56. Resultado espacial da distribuição de altura de onda na região do canal da Joatinga de uma onda propagada na direção sul-sudoeste com no período de 15 s e altura de 4.91 m. O mapa da esquerda representa o cenário atual e o da direita com o guia-correntes prolongado. 74

Figura 57. Estações de controle definidas para as análises do modelo hidrodinâmico. 75

Figura 58. Gráfico referente as séries temporais na estação central do modelo hidrodinâmico referente ao mês de janeiro. A série em preto indica a elevação na estação, onde valores crescentes representam marés de enchente e decrescentes marés de vazante. A série em azul indica a intensidade das velocidades de direção leste-oeste, onde valores positivos indicam correntes de oeste para leste e negativos de leste para oeste. 75

Figura 59. Gráfico referente as séries temporais na estação central do modelo hidrodinâmico referente ao mês de julho. A série em preto indica a elevação na estação, onde valores crescentes representam marés de enchente e decrescentes marés de vazante. A série em azul indica a intensidade das velocidades de direção leste-oeste, onde valores positivos indicam correntes de oeste para leste e negativos de leste para oeste. 76

Figura 60. Séries temporais de elevações e de velocidades longitudinais e transversais na estação Canal da Joatinga 2 do mês de janeiro para o C1. 76

Figura 61. Séries temporais de elevações e de velocidades longitudinais e transversais na estação Canal da Joatinga 2 durante dois ciclos de maré de sizígia do mês de janeiro para o C1. 77

Figura 62. Séries temporais de elevações e de velocidades longitudinais e transversais na estação Canal da Joatinga 2 do mês de janeiro para o C2. 77

Figura 63. Séries temporais de elevações e de velocidades longitudinais e transversais na estação Canal da Joatinga 2 durante dois ciclos de maré de sizígia do mês de janeiro para o C2. 78

Figura 64. Mapa do C1 das velocidades de todo o domínio para uma situação de maré vazante e velocidades com sentido leste. 79

Figura 65. Mapa do C2 das velocidades de todo o domínio para uma situação de maré vazante e velocidades paralelas com sentido leste. 79

Figura 66. Mapa do C1 das velocidades de todo o domínio para uma situação de maré vazante e velocidades paralelas à costa com sentido oeste. 80

Figura 67. Mapa do C2 das velocidades de todo o domínio para uma situação de maré vazante e velocidades paralelas à costa com sentido oeste. 80

Figura 68. Correntes fluindo de leste para oeste em situação de maré vazante no dia 12/01/2012 às 20h00. 82

Figura 69. Correntes fluindo de leste para oeste em situação de maré vazante no dia 04/07/2012 às 21h00. 82

Figura 70. Correntes fluindo de leste para oeste em situação de maré enchente no dia 12/01/2012 às 14h00. 82

Figura 71. Correntes fluindo de leste para oeste em situação de maré enchente no dia 04/07/2012 às 13h00. 83

Figura 72.Correntes fluindo no sentido oeste-leste em situação de maré enchente no dia 06/01/2012 às 23h00. 83

Figura 73. Correntes fluindo de oeste para leste em situação de maré enchente no dia 13/07/2012 às 21h00. 84

Figura 74. Correntes fluindo de oeste para leste em situação de maré vazante no dia 07/01/2012 às 06h00. 84

Figura 75. Correntes fluindo de oeste para leste em situação de maré vazante no dia 14/07/2012 às 04h00. 85

Figura 76. Elipse de maré na estação da lagoa da Tijuca 1. Em cinza estão plotadas as velocidades do C1 e em preto as do C2. 86

Figura 77. Elipse de maré na estação da lagoa da Tijuca 2. Em cinza estão plotadas as velocidades do C1 e em preto as do C2. 86

Figura 78. Elipse de maré na estação da lagoa de Jacarepaguá 1. Em cinza estão plotadas as velocidades do C1 e em preto as do C2. 87

Figura 79. Elipse de maré na estação da lagoa de Jacarepaguá 2. Em cinza estão plotadas as velocidades do C1 e em preto as do C2. 88

Figura 80. Vazão afluente (positivo) e efluente (negativo) na embocadura do canal da Joatinga, no canal de Marapendi e no canal de Camorim durante o mês de janeiro para o ambos os cenários, onde a linha contínua representa o cenário atual e a pontilhada representa o cenário após o prolongamento do guia-correntes. 88

Figura 81. Vazão afluente (positivo) e efluente (negativo) na embocadura do canal da Joatinga, no canal de Camorim e no canal de Marapendi durante o mês de julho para o ambos os cenários, onde a linha contínua representa o cenário atual e a pontilhada representa o cenário após o prolongamento do guia-correntes. 89

Figura 82. Série de elevação na estação da Mar, na fronteira aberta, no mês de janeiro. Em azul estão representados os períodos referentes a dois ciclos de maré utilizado para os cálculos do prisma de maré, amortecimento da amplitude e defasagem da onda de maré. 90

Figura 83. Série de elevação na estação da Mar, na fronteira aberta, no mês de julho. Em azul estão representados os períodos referentes a dois ciclos de maré utilizado para os cálculos do prisma de maré, amortecimento da amplitude e defasagem da onda de maré. 90

Figura 84. Variações do nível de água nas lagoas do SLJ para o mês de janeiro. A linha contínua representa o cenário atual e a pontilhada o cenário posterior ao prolongamento do guia-correntes. 92

Figura 85. Variações do nível de água nas lagoas do SLJ para o mês de julho. A linha contínua representa o cenário atual e a pontilhada o cenário posterior ao prolongamento do guia-correntes. 93

Figura 86. Séries temporais de elevação em uma estação representativa de cada lagoa dos cenários 1 e 2, durante o período de dois ciclos de maré representativos de sizígia do mês de julho. 94

Figura 87. Séries temporais de elevação em uma estação representativa de cada lagoa dos cenários 1 e 2, durante o período de dois ciclos de maré representativos de sizígia do mês de julho. 94

Figura 88. Variações do nível de água no mar no canal da Joatinga (vermelho), lagoa da Tijuca (azul) e lagoa de Jacarepaguá (preto) durante o mês de janeiro de 2012 simulado para os cenários 1 (atual) e 2 (com prolongamento do guia-correntes e com dragagem). 97

Figura 89. Variações do nível de água no mar no canal da Joatinga (vermelho), lagoa da Tijuca (azul) e lagoa de Jacarepaguá (preto) durante o mês de julho de 2012 simulado para os cenários 1 (atual) e 2 (com prolongamento do guia-correntes e com dragagem). 97

Figura 90. Série temporal de elevação em uma estação representativa de cada lagoa, durante o período de dois ciclos de maré representativos de sizígia do mês de janeiro 98

Figura 91. Série temporal de elevação em uma estação representativa de cada lagoa, durante o período de dois ciclos de maré representativos de sizígia do mês de julho. 98

Figura 92. Taxa de renovação após 1 dia de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2. 100

Figura 93. Taxa de renovação após 5 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2. 101

Figura 94. Taxa de renovação após 10 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2. 102

Figura 95. Taxa de renovação após 15 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2. 103

Figura 96. Taxa de renovação após 30 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2. 104

Figura 97. Taxa de renovação após 60 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2. 105

Figura 98. Taxa de renovação após 90 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2. 106

Figura 99. Séries temporais da taxa de renovação nas estações da lagoa da Tijuca durante o mês de janeiro para os cenários 1 e 2. 107

Figura 100. Séries temporais da taxa de renovação nas estações da lagoa de Jacarepaguá durante o mês de janeiro para os cenários 1 e 2. 108

Figura 101. Séries temporais da taxa de renovação nas estações das lagoas de Marapendi durante o mês de janeiro para os cenários 1 e 2. 109

Figura 102. Taxa de renovação após 1 dia de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2. 111

Figura 103. Taxa de renovação após 5 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2. 112

Figura 104. Taxa de renovação após 10 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2. 113

Figura 105. Taxa de renovação após 15 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2. 114

Figura 106. Taxa de renovação após 30 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2. 115

Figura 107. Taxa de renovação após 60 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2. 116

Figura 108. Taxa de renovação após 90 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2. 117

Figura 109. Séries temporais da taxa de renovação nas estações da lagoa da Tijuca durante o mês de julho para os cenários 1 e 2. 119

Figura 110. Séries temporais da taxa de renovação nas estações da lagoa de Jacarepaguá durante o mês de julho para os cenários 1 e 2. 119

Figura 111. Séries temporais da taxa de renovação nas estações das lagoas de Marapendi durante o mês de julho para os cenários 1 e 2. 120

Figura 112. Porcentagem de ocorrência de passagem da pluma com concentrações de coliformes termotolerantes maiores que a limite definida pelo CONAMA, 1000 NMP/100mL, durante toda a simulação de verão para o período de 6h às 19h para os cenários 1 e 2. 123

Figura 113. Porcentagem de ocorrência de passagem da pluma com concentrações de coliformes termotolerantes maiores que a limite definida pelo CONAMA, 1000 NMP/100mL, durante toda a simulação de verão para o período de 20h às 5h para os cenários 1 e 2. 124

Figura 114. Porcentagem de ocorrência de passagem da pluma com concentrações de coliformes termotolerantes maiores que a limite definida pelo CONAMA, 1000 NMP/100mL, durante toda a simulação de inverno para o período de 6h às 17h para os cenários 1 e 2. 125

Figura 115. Porcentagem de ocorrência de passagem da pluma com concentrações de coliformes termotolerantes maiores que a limite definida pelo CONAMA, 1000 NMP/100mL, durante toda a simulação de inverno para o período de 18h às 5h para os cenários 1 e 2. 126

Figura 116. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de baixa-mar com sobrelevação no nível médio do mar e correntes fluindo sentido leste no dia 04/01/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2. 129

Figura 117. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de maré vazante, com rebaixamento do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido oeste no dia 12/01/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2. 130

Figura 118. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de maré vazante, com rebaixamento do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido oeste no dia 21/01/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2. 131

Figura 119. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de início de maré vazante, com sobrelevação do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido leste no dia 27/01/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2. 132

Figura 120. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de final de maré vazante, com rebaixamento do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido oeste no dia 03/07/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2. 133

Figura 121. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de maré vazante, com sobrelevação do nível médio do mar durante a quadratura e correntes fluindo no sentido leste no dia 09/07/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2. 134

Figura 122. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de preamar, com rebaixamento do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido oeste no dia 11/07/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2. 135

Figura 123. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de maré vazante, com sobrelevação do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido leste no dia 19/07/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2. 136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais rios do SLJ e suas respectivas lagoas receptoras. 6

Tabela 2. Limites de balneabilidade, segundo resolução CONAMA 274/2000. 10

Tabela 3.Volume de material a ser dragado proposto pelo Projeto de dragagem das Lagoas do SLJ. Fonte: adaptado de Masterplan (2013)..... 16

Tabela 4. Detalhes das estações nas quais foram obtidos os dados analisados no EIA/IMA referente à Estabilização da Barra do Canal de Senambetiba e sua Interligação com as Lagoas de Jacarepaguá, Tijuca e Marapendi..... 20

Tabela 5. Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, ε. Adaptado de Abbot & Basco (1989). 31

Tabela 6. Tabela da FEMAR contendo as constantes harmônicas e seus respectivos valores de período, amplitude e fase para a estação Recreio dos Bandeirantes – RJ..... 49

Tabela 7. Vazões médias para os períodos chuvoso e seco inseridos nos modelos hidrodinâmico, de janeiro e julho, respectivamente. Em preto estão os dados provenientes da Masterplan e em cinza do PEC-7659 (2006)..... 54

Tabela 8. Constantes harmônicas e seus respectivos período, amplitude e fase para a estação maregráfica de Copacabana da FEMAR. 55

Tabela 9. Fase da componente harmônica M2 em graus. 56

Tabela 10. Estatísticas de altura de onda significativa e período de pico para o período de 1948-2008. (Fonte: SMC-Brasil)..... 70

Tabela 11. Parâmetros de entrada das ondas simuladas no Modelo de Propagação de Ondas. .. 71

Tabela 12. Tabela com os prismas médios calculados para os canais da Joatinga, Marapendi e Camorim para o cenário atual (C1) e cenário posterior intervenções (C2) para os meses de janeiro e julho. 91

Tabela 13. Porcentagens de amortecimento da amplitude de maré calculadas para as estações localizadas nas lagoas do SLJ para os cenários atual (C1) e de posterior intervenções (C2) nos meses de janeiro e julho. 95

Tabela 14. Defasagem da maré média calculada para as estações localizadas nas lagoas do SLJ para os cenários atual (1) e de posterior intervenções (2) nos meses de janeiro e julho..... 96

Tabela 15. Horários propostos para o cálculo da ocorrência de passagem de pluma com concentrações acima de 1000NMP/100mL. 121

1. INTRODUÇÃO

Ambientes costeiros ocupam uma das interfaces mais dinâmicas da Terra, entre terra e oceano, e pertencem ao habitat mais diversificado e produtivo. Estas regiões são as que mais apresentam mudanças em sua geomorfologia especialmente devido a erosões costeiras causadas, entre outras causas, pelo aumento do nível médio do mar, pela redução da quantidade de sedimento entregue à região costeira e pela degradação antropogênica (OLIVEIRA; FORTUNATO; REGO, 2006).

O Sistema Lagunar de Jacarepaguá (SLJ) está localizado na região oeste do município do Rio de Janeiro e a sua única ligação com o mar é através do canal da Joatinga. A bacia de drenagem deste sistema é formada pelas linhas de crista dos Maciços da Pedra Branca, a oeste e da Tijuca, a leste, v. Figura 1. Os rios descem as vertentes dessas montanhas e deságuam nas lagoas, que posteriormente chegam ao mar.

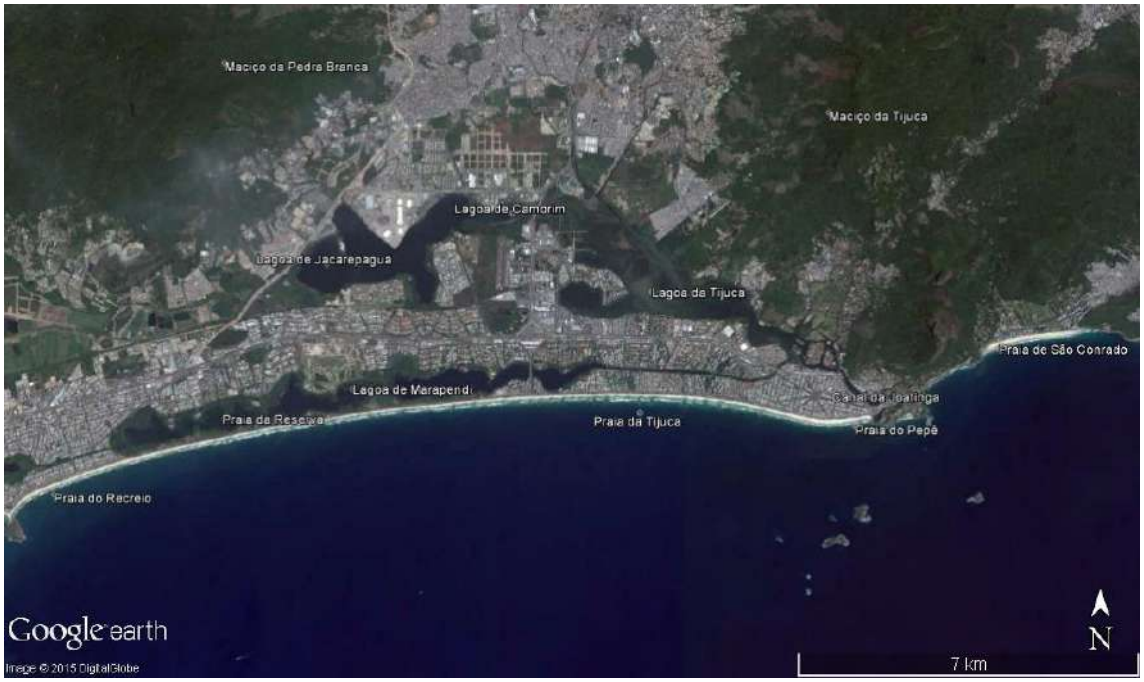


Figura 1. Sistema Lagunar de Jacarepaguá e a direita o Canal da Joatinga.

A bacia hidrográfica da região possui tempo de acumulação de águas de chuvas muito curto, devido ao íngreme relevo dos morros que limitam o divisor de águas e curtas planícies em torno das lagoas. Com isso, o escoamento superficial nos declives dos morros tende a ser rápido, a passagem das cheias pelos trechos de planície dos pequenos rios afluentes tem curta duração e as lagoas funcionam como reservatórios de amortecimento de cheia antes das águas serem descarregadas no mar.

As lagoas recebem também uma grande carga de detritos e sedimentos provenientes dos rios. Devido a atividade antrópica, os rios trazem lixos e esgoto além dos sedimentos fluviais (FALCÃO, 1995). Portanto, o relevo é um fator que propicia o assoreamento das águas da baixada e a intervenção humana acelera este processo.

A expansão populacional na região tem ocorrido de modo desordenado, principalmente desde o final da década de 60, contribuindo para que seus rios e as lagoas fiquem poluídos (SEMAD, 1998). Com o aumento da especulação imobiliária e atividade industrial ao norte da área, decorrentes do crescimento demográfico da região, esta situação tende a agravar-se. Ainda nesta região ausência de uma rede de saneamento de esgoto adequada intensifica este quadro, e até hoje, esgotos e lixos são despejados em parte das lagoas sem qualquer tratamento. Efluentes domésticos ricos em fósforo e nitrogênio propiciam o processo de eutrofização nas lagoas que, somados à baixa taxa de renovação de suas águas, favorecem a produtividade local. Além disso, as lagoas são consideradas lênticas, e isto contribui para o acúmulo de nutrientes e contaminantes.

Destacam-se ainda os eventos de enchentes que atingem a região de Jacarepaguá com frequência decenal para cheias notáveis, como a de fevereiro de 1996, a maior registrada na bacia afluente às lagoas (SEMAD, 2001). As enchentes geram um subsequente aumento na taxa de transporte de sedimentos dos rios por meses devido aos deslizamentos nas encostas desprotegidas, que disponibilizam grandes quantidades de sedimentos, como já mencionado.

O INEA - Instituto Estadual do Meio Ambiente realiza mensalmente o monitoramento sistemático de qualidade de água do SLJ. A análise dos resultados dos últimos 30 anos indica que as águas locais se encontram sob intensa influência de águas residuais, ricas em matéria orgânica oriundas de fontes urbanas e industriais. Valores de nutrientes dissolvidos e a soma das frações dissolvida e particulada indicam enriquecimento do meio aquático devido a ação antrópica, caracterizando este corpo d'água a categoria de hipertrófico.

As águas do SLJ atraem a população por possibilitar atividades como esportes aquáticos nas praias, passeios e transportes no interior das lagoas, bares e restaurantes em suas margens. Além disso, é na região em torno deste sistema localizam-se construções importantes como o Rio Centro, Autódromo, cidade do Rock, cidade Olímpica. Atividades turísticas e de lazer muitas vezes podem ser impedidas devido a imprópria qualidade das águas e dos possíveis riscos à saúde da população (MASTERPLAN, 2013)

Diversos jornais locais divulgam matérias sobre a pluma de águas de cor verde ou marrom que saem através do Canal da Joatinga e alcançam as praias da Barra e de São Conrado. A pluma de águas toma grandes proporções durantes eventos meteorológicos de subida do nível médio do

mar (NMM). Nestes eventos o NMM pode subir por cerca de 50 cm ao longo de 4 a 5 dias e descer de volta em período semelhante. Por conta disso, enormes volumes de água do mar entram nas lagoas na subida e voltam ao mar na descida, trazendo a coloração adquirida na mistura com as águas das lagoas. Além disso, a sobrelevação do NMM aumenta a amplitude das marés no interior das lagoas. Em matéria recente, a estimativa dada, através de imagens aéreas, para o alcance desta pluma foi de sete quilômetros. Além da descrição visual da mancha, pode haver mau cheiro devido a presença de gases sulfídricos afetando a população local (GLOBO, 2017).

Figura 2. Pluma de águas provenientes do SLJ com extensão estimada de sete quilômetros.
Fonte: https://ogimg.infoglobo.com.br/in/21193905-477-6b7/FT1500A/550/mancha-cianobacterias-praia-barra.jpg.

Uma primeira medida a ser tomada para reverter esta situação é a redução do despejo de lixo e de esgoto não tratado, que são as principais fontes de degradação e aceleram o processo deposicional nas lagoas. Outra medida é investir em uma forma de aumentar a entrada de águas no sistema estuarino através de obras como desobstrução de áreas assoreadas com dragagem do material depositado e o aumento da embocadura do canal, permitindo maior troca de águas entre o sistema e o oceano.

A manutenção de ambientes costeiros é complexa devido a interação entre agentes e características do ambiente costeiro, que está repleto de ecossistemas e diversas atividades humanas (ORTEGA-S et al., 2017). O assoreamento de lagoas costeiras é um processo natural que marca envelhecimento e perda do volume aquático. Em escalas de tempo geológicas, lagoas costeiras são corpos de água efêmeros. Pensando em “dias geológicos”, pode-se dizer que ao se permitir a manutenção do processo de assoreamento, “a lagoa de hoje será o alagadiço de amanhã

e a planície costeira de depois de amanhã". No caso do SLJ, a ação antrópica acelera o assoreamento e consequente perda do volume aquático.

O processo de dragagem bem planejado ambientalmente proporciona a reversão do assoreamento, propiciando o rejuvenescimento das lagoas ao recuperar os volumes aquáticos perdidos. Ao dragar de modo adequado o SLJ, as lagoas assoreadas poderão ser regeneradas, favorecendo maior circulação hidrodinâmica, ampliando a diversidade e as trocas biológicas com o mar, e recuperando o patrimônio paisagístico. Os benefícios de longo prazo compensam fartamente os impactos de curto prazo causados pelas intervenções de dragagem.

Além das preocupações de custos e impactos, há uma preocupação crescente com os efeitos de curto e médio prazo sobre a resposta morfodinâmica das marés com as atividades de dragagem. A hidrodinâmica das marés e o clima de ondas são mecanismos fundamentais para a morfodinâmica de marés (ORTEGA-S et al., 2017). A propagação de uma onda de maré depende fortemente da configuração da batimetria e a dragagem de canais e reposicionamento da embocadura de estuários, promovem um fluxo de sedimento em direção ao mar (OLIVEIRA; FORTUNATO; REGO, 2006), beneficiando a recuperação dos espaços aquáticos.

A avaliação da troca de sedimentos a longo prazo, foca no tamanho da seção transversal da bacia de marés e também do volume total de águas trocadas entre o estuário e o mar, sendo este baseado em relações empíricas bem conhecidas (ORTEGA-S et al., 2017). O prisma de maré indica a capacidade desta troca de águas. Com o aumento da área e do volume da lagoa, há a redução do tempo de resistência no interior das lagoas, o que leva a melhora da renovação das águas e mitiga efeitos de poluição da água devido a dragagem (PICADO; DIAS; FORTUNATO, 2010).

Com a dragagem das lagoas, há o aumento da entrada de águas oceânicas e uma maior saída das águas do sistema lagunar. O estudo que comprovou isto, evidenciou que haveria a desobstrução do sistema lagunar, o que permitiria melhor renovação das águas, principalmente nas lagoas de Jacarepaguá e Marapendi. Uma recomendação adicional apresentada, foi alterar a orientação do guia-correntes, aumentando a dimensão da embocadura, atualmente estrangulada do Canal da Joatinga, evitando perdas de carga ao escoamento (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2015).

O Governo do Estado apresentou o Projeto de Recuperação Ambiental do Sistema Lagunar da Barra e Jacarepaguá, da Secretaria de Estado do Ambiente, que teve como objetivo recuperar ambientalmente as lagoas da região. Como parte da recuperação das águas, uma das iniciativas é implantar Unidades de Tratamentos de Rios, UTRs, e aumentar a fiscalização local para que se evite a ocorrência de despejos. Outras duas são: modificar a embocadura do canal da Joatinga, com ampliação de sua seção hidráulica média e prolongamento do guia-correntes, e a

desobstrução e recuperação de áreas assoreadas com dragagens distribuídas em diversos locais (SEA, 2015).

Ao aumentar a largura do canal da Joatinga é esperado que haja o aumento do volume de águas que entra no SLJ propiciando uma renovação hídrica do sistema e melhora na qualidade ambiental das lagoas. Sobretudo, é esperado também que o prolongamento do guia-correntes local evite que as águas eutrofizadas do sistema lagunar influenciem na balneabilidade das praias adjacentes.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é analisar os efeitos da desobstrução de canais e recuperação de espaços aquáticos via dragagens do SLJ, e do aumento da seção hidráulica e prolongamento do atual guia-correntes do canal da Joatinga. Essas intervenções visam contribuir para a solução de dois dos principais problemas da região: a baixa taxa de renovação das águas das lagoas e balneabilidade das praias adjacentes a ele.

Para isso, os objetivos específicos estão divididos em duas partes: um cenário com o guia-correntes atual, e outro referente ao guia-correntes prolongado. No primeiro, foram feitas modelagens ambientais para:

- Análise da atual taxa de renovação das águas do SLJ.
- Análise da balneabilidade das águas das praias adjacentes ao canal.
- Avaliação da altura de ondas próximas ao Canal da Joatinga.
- Definição da configuração do prolongamento do guia-correntes.

Posteriormente, no segundo cenário, avaliou-se a altura das ondas próximas ao canal e foram feitas novas modelagens da taxa de renovação das lagoas e da balneabilidade das praias próximas ao canal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão a seguir aborda-se o conceito de sistemas lagunares; em seguida de canais de marés e de qualidade das águas com foco em balneabilidade; e por último sobre a modelagem computacional e descrição do sistema de modelos utilizados.

3.1. Sistema Lagunar de Jacarepaguá

Sistema Lagunar é um sistema estuarino e, portanto, definido como um corpo d’água costeiro com uma ligação livre com o mar, onde existe mistura de água salgada do mar com água doce, oriundas da drenagem das terras. Como qualquer sistema estuarino, há trocas de massas d’água e

trocas biológicas a cada ciclo de maré entre o mar e o sistema lagunar. Mais propriamente, as lagoas costeiras neste sistema deveriam ser denominadas de lagunas (ROSMAN, 2012a)

O SLJ está localizado no litoral sul do município do Rio de Janeiro, e é formado pelas Lagoas de Marapendi, Tijuca e Jacarepaguá, v. Figura 1. A unidade fisiográfica da região é formada por uma única praia que em diferentes setores são chamadas de praias do Pepê, da Barra da Tijuca, da Reserva e do Recreio. Entre as lagoas da Tijuca e Jacarepaguá havia um largo chamado de lagoa do Camorim, hoje é apenas o canal do Camorim. Estas lagoas recebem rios contribuintes da bacia de drenagem do SLJ, oriundos das vertentes dos maciços da Pedra Branca e da Tijuca. A Tabela 1 descreve os principais rios e sua respectiva lagoa receptora.

Tabela 1. Principais rios do SLJ e suas respectivas lagoas receptoras.

Lagoas	Rios
Jacarepaguá	Rio Marinho, Rio Cortado, Rio Camorim, Rio Caçambê, Rio Pavuninha, Rio dos Passarinhos e Rio Arroio Pavuna.
Camorim	Rio Arroio Fundo, Rio Taquera e Rio Anil.
Tijuca	Rio das Pedras, Rio da Muzema e Rio do Itanhangá.
Marapendi	Canal das Taxas.

As lagoas costeiras tipo laguna são ligadas ao mar através de canais de maré. Estes são considerados estáveis no sentido hidro-sedimentológico, se os fluxos de enchente e vazante de maré possuem a capacidade de expelir o excesso de sedimentos depositados no seu leito, fazendo com que a desembocadura permaneça sempre desobstruída.

A estabilidade de um canal de maré depende do balanço entre os agentes estabilizadores e desestabilizadores. Os agentes desestabilizadores são responsáveis por processos de assoreamento do canal enquanto que os agentes estabilizadores influenciam na estabilidade do canal, retirando os sedimentos depositados no canal devido aos processos sedimentológicos. Este balanço ocorre devido ao efeito das marés, do clima de ondas, do transporte litorâneo ao longo da praia adjacente, da descarga fluvial e das características morfológicas da bacia interior (ROSMAN, 2012a).

Como indica a Figura 3, a única ligação deste Sistema Lagunar com o mar é o canal da Joatinga. O canal da Joatinga é delimitado por um guia corrente e um promontório rochoso, configurando este canal como fixo. Os sedimentos do canal vêm das praias a oeste deste canal e não há importação significativa que leve ao assoreamento do canal.

Figura 3. Imagem com detalhe no canal da Joatinga.

A Figura 4 mostra uma sequência temporal de imagens de satélite do canal ao longo de um ano onde é possível notar que a variação na linha de costa da praia do Pepê sempre está aquém do cabeço do guia-correntes, o que confere certa estabilidade do canal e confiabilidade para o prolongamento deste. A análise foi feita por vários anos de forma que as imagens selecionadas, a cada dois meses, sejam representativas dos demais anos anteriores.

Figura 4. Análise temporal das imagens de satélite do canal ao longo de um ano. É possível notar que a variação na linha de costa da praia do Pepê não cresce além do atual guia-correntes

3.1.1. Situação Atual das Águas

Inicialmente nesta seção será descrito o critério de análise da qualidade das águas utilizada neste trabalho. Os itens seguintes descrevem monitoramentos que são feitos na região de influência do SLJ pelo INEA, que têm como objetivo principal avaliar a qualidade das águas dos rios, das lagoas e das praias.

Qualidade das Águas

Os corpos d'água são classificados de acordo com seus usos, como: recreação por contato, preservação da flora e fauna, uso estético e espécies destinadas à alimentação humana. SLJ é enquadrado como: recreação por contato secundário, preservação da flora e fauna, uso estético e

espécies destinadas à alimentação humana. Por contato secundário entendem-se as atividades em que o contato com a água é esporádico ou acidental, e a possibilidade de ingerir água é pequena. A contaminação por contato e por ingestão de alimentos originados destas águas contaminadas pode resultar em doenças que afetam seriamente a saúde do indivíduo.

No entanto, para a avaliação da qualidade das águas destas lagoas e das bacias contribuintes, os padrões recomendados pelo CONAMA 357/05 que são considerados para classificá-las. Este estabelece a classificação dos limites e/ou condições para águas doces, salinas e salobras em todo território nacional. Esta classificação se enquadra em: Classe 1, para as águas salobras das lagoas e Classe 2 para as águas dos rios.

Já a análise da qualidade das praias quanto a sua balneabilidade é avaliada segundo a resolução do CONAMA 274/00. Esta resolução adota que a recreação de contato primário é definida como a que há contato direto e prolongado com a água e na qual há a possibilidade do banhista de ingerir a água. Para os padrões de qualidade que envolva o contato primário, a resolução estabelece a avaliação das águas nas categorias própria e imprópria, em relação a balneabilidade.

O uso de organismos indicadores para determinar se um corpo de água é balneável ou não, é aceito e utilizado até hoje (WHO, 2009). Estes organismos são eliminados através das fezes humanas ou de animais e indicam a potencial presença de agentes patogênicos que causam doenças gastrointestinais nos indivíduos. Neste trabalho foram escolhidos os indicadores mais comumente utilizados, os coliformes termotolerantes.

A categoria própria, tanto para águas doces (Classe 2) quanto para salobras (Classe 1), é subdividida, através da variável Número Mais Provável (NMP), em excelente, muito boa e satisfatória, como mostra a Tabela 2. Esta classificação é realizada com base em valores de densidades de bactérias fecais resultantes da análise de feitas durante cinco semanas consecutivas, podendo ser utilizado qualquer um dos três indicadores de contaminação fecal: coliformes termotolerantes, *Escherichia coli* e Enterococos.

Tabela 2. Limites de balneabilidade, segundo resolução CONAMA 274/2000.

Categorias	Se em 80% ou mais das amostras houver no máximo (NMP)
Excelente	250 coliformes termotolerantes ou 200 Escherichia coli ou 25 Enterococos por 100 mililitros
Muito Boa	500 coliformes termotolerantes ou 400 Escherichia coli ou 50 Enterococos por 100 mililitro
Satisfatória	1.000 coliformes termotolerantes ou 800 *Escherichia coli* ou 100 Enterococos por 100 mililitros

O NMP/100mL de bactérias coliformes, também chamada de colimetria, é um parâmetro que não visa a avaliar o imediato grau de contaminação por patogênicos de origem fecal e sim o potencial de contaminação da água. Portanto, os limites definidos na Tabela 2 classificam as praias como próprias para banho, e quando estes são superiores aos descritos, outros parâmetros são avaliados para que as águas sejam definidas como impróprias.

Os coliformes termotolerantes são bactérias gram-negativas, do tipo bacilo, oxidase-negativas, caracterizadas pela atividade da enzima β-galactosidase. Podem crescer em meios contendo agentes tenso-ativos e fermentar a lactose nas temperaturas de 44° a 45°C, com produção de ácido, gás e aldeído. Além de estarem presentes em fezes humanas e de animais homeotérmicos, ocorrem em solos, plantas ou outras matrizes ambientais que não tenham sido contaminados por material fecal (CONAMA, 2005).

Os coliformes termotolerantes crescem em temperaturas de até 45°C e em regiões tropicais, onde o solo e as plantas podem chegar a tais temperaturas, pode haver interferência na contagem destes organismos e não indicar a influência antrópica. Porém, temperaturas tão altas não são encontradas em águas costeiras e oceânicas, fazendo deles bons indicadores de contaminação por não haver interferência em suas contagens (ROSMAN, 2012).

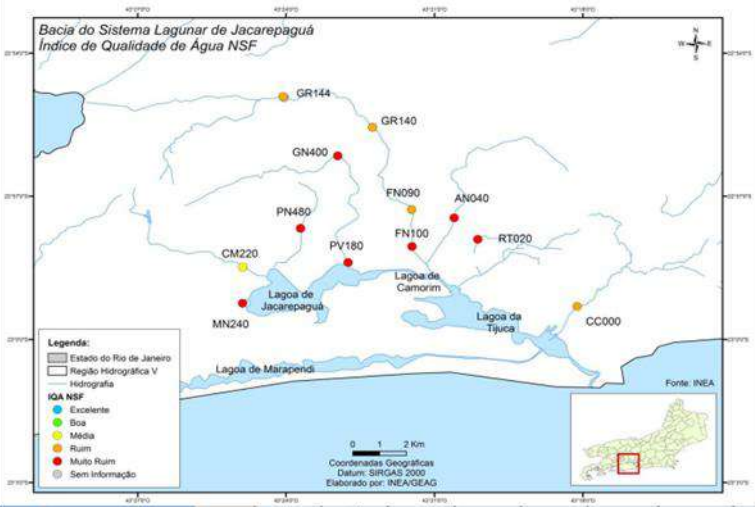
Diversos fatores contribuem para o decaimento das bactérias em corpos de águas como foto-oxidação (induzido pela radiação solar), temperatura, salinidade, adsorção, floculação, coagulação e sedimentação. As taxas de mortalidade de coliformes estão significativamente relacionada a quantidade de radiação solar incidente, sendo este fator um dos mais importantes para o decaimento dos coliformes. Além disso, maiores temperaturas, resultam em maiores

decaimentos, fator mais significativo diante da ausência de radiação solar (NOBLE; LEE; SCHIFF, 1997).

Qualidade das Águas Doces da Região

O INEA lança mensalmente com frequência um boletim que apresenta os últimos resultados do monitoramento dos corpos de água doce da Região Hidrográfica V, que corresponde à bacia do SLJ. A qualidade da água neste monitoramento é retratada por meio da aplicação do Índice de Qualidade de Água (IQA_{NSF}). Este índice consolida em um único valor os resultados dos parâmetros: Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Fósforo Total (PT), Nitrogênio Nitrato (NO3), Potencial Hidrogeniônico (pH), Turbidez (T), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), temperatura da Água e do Ar e Coliformes Termotolerantes.

O mapa e o quadro da Figura 5, mostram resultados deste boletim para maio de 2017. As águas das estações, segundo o IQA_{NSF}, estão classificadas como média, ruim e muito ruim. As concentrações de coliformes termotolerantes foram < 300 NMP/100mL no ponto de amostragem do Rio Camorim, > 10500 NMP/100mL, para a estação mais ao norte do Rio Grande e para os demais rios de > 24000 NMP/100mL. Estes dois últimos valores estão acima do permitido segundo a resolução do CONAMA 357/05.



Estação de amostragem	Localização	Município	Data	IQA_{NSF}	Demanda Bioquímica Oxigênio (DBO) - mg/L	Fósforo Total (P.) - mg/L	Nitrato (NO_3) - mg/L	Oxigênio Dissolvido (OD) - mg/L	Potencial Hidrogeniônico (pH)	Turbidez (T) - uT	Coliformes Termotolerantes - NMP/100mL	Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) - mg/L	*Temperatura da água - °C	*Temperatura do ar - °C
AN040	Rio do Anil	Rio de Janeiro	8/5/17	23,3	68,0	1,87	0,10	2,4	6,1	30,90	> 24.196	200	25	27
CC000	Rio Cachoeira		8/5/17	37,0	28,0	0,57	1,23	6,8	6,0	11,90	> 24.196	97	24	27
CM220	Rio Camorim		8/5/17	64,0	10,0	0,03	0,51	8,2	5,7	4,12	288	62	24	25
FN090	Arroio Fundo		8/5/17	25,6	28,0	1,28	0,17	1,6	6,0	17,50	> 24.196	165	26	26
FN100			8/5/17	20,3	56,0	1,39	< 0,01	0,8	6,0	21,70	> 24.196	192	26	26
GN400	Rio Guerenguê		8/5/17	19,3	72,0	1,88	0,02	0,8	6,2	33,60	> 24.196	274	26	29
GR140	Rio Grande		8/5/17	26,0	38,0	1,47	0,16	3,4	6,2	24,50	> 24.196	223	26	28
GR144			8/5/17	40,1	18,0	0,61	0,25	5,2	6,2	5,35	10.502	3.088	26	28
MN240	Rio do Marinho		8/5/17	24,8	28,0	0,95	< 0,01	1,8	6,3	34,10	> 24.196	2.393	26	25
PN480	Rio Pavuninha		8/5/17	16,3	40,0	1,91	0,04	0,8	6,1	107,00	> 24.196	222	26	25
PV180	Arroio Pavuna		8/5/17	16,1	110,0	1,78	0,01	0,0	6,0	33,90	> 24.196	473	26	26
RT020	Rio Retiro		8/5/17	24,9	48,0	1,91	0,21	3,2	6,3	35,80	> 24.196	215	25	27

*Na composição do IQA_{NSF} usa-se o valor de temperatura corresponde à diferença entre a temperatura da água no ponto de coleta e a temperatura do ar.
Obs: A ausência de resultado, referente a pelo menos um dos nove parâmetros, inviabiliza a aplicação do índice.

Categoria de Resultados	EXCELENTE	BOA	MÉDIA	RUIM	MUITO RUIM
IQA_{NSF}	100 ≥ IQA ≥ 90	90 > IQA ≥ 70	70 > IQA ≥ 50	50 > IQA ≥ 25	25 > IQA ≥ 0
Significado	Águas apropriadas para tratamento convencional visando o abastecimento público			Águas impróprias para tratamento convencional visando abastecimento público, sendo necessários tratamentos mais avançados	

Figura 5. Boletim da Qualidade das Águas da Região Hidrográfica V – Baía de Guanabara Bacia do Sistema Lagunar de Jacarepaguá referente ao mês de maio de 2017. Fonte: INEA. Disponível em: http://200.20.53.3:8081/cs/groups/public/documents/document/zwew/mdi2/~ed

Qualidade das águas do Sistema Lagunar de Jacarepaguá

O INEA lança mensalmente um boletim avaliando a conformidade dos dados do monitoramento das águas do SLJ. Diversos parâmetros são considerados nestas análises, entre eles, os de coliformes termotolerantes. O percentual de desvio em relação ao padrão, relacionado a Resolução do CONAMA 357/05 gera uma classificação de conformidade em quatro categorias: satisfatório, regular, ruim ou péssimo. O quadro da Figura 6 mostra o boletim de maio de 2017 e mostra que apenas a Lagoa de Jacarepaguá foi classificada como satisfatória enquanto que as demais lagoas, como péssimas.

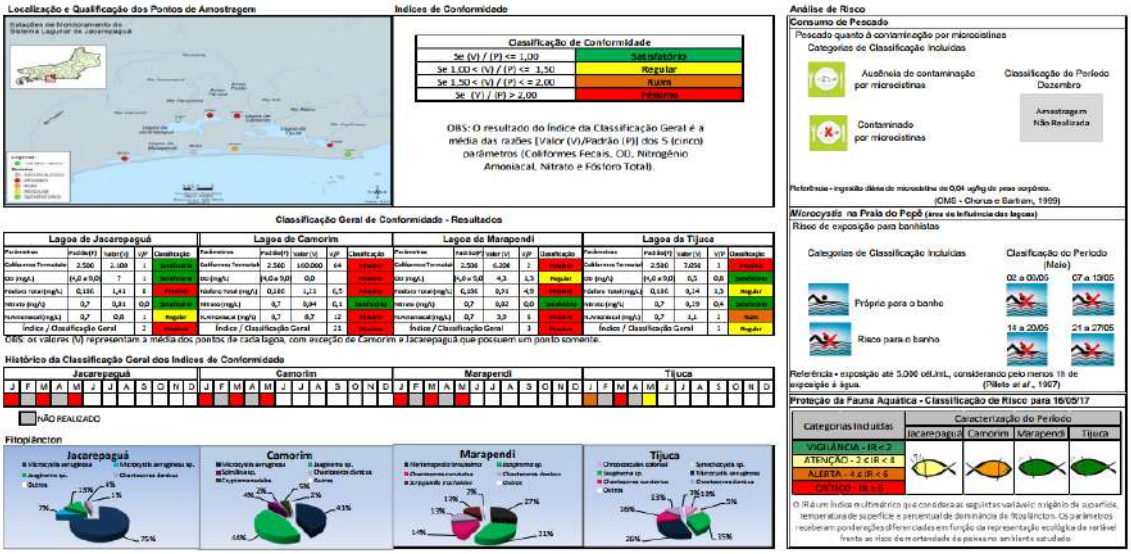


Figura 6. Boletim de avaliação da qualidade das águas das lagoas do SLJ referente ao mês de maio de 2017. Fonte: INEA, disponível em: http://200.20.53.3:8081/cs/groups/public/documents/document/zwff/mda5/~edisp/inea_009596.pdf.

Corpos d'água sujeitos a contaminação e poluição, como o caso do SLJ, carregam ao longo de seu percurso tais constituintes devido ao fato da água conservá-los, tornando-os potencialmente nocivos à saúde de quem os utiliza. A má qualidade das águas em trechos das praias e dos balneários permite que os órgãos de controle ambiental local responsáveis por esta avaliação interditem e sinalizem que o contato primário nestas águas deve ser evitado, como mostra na região central a direita do quadro mostrado acima (Figura 6).

Qualidade das Águas das Praias

Em análise do boletim de balneabilidade do INEA para o primeiro semestre de 2016, é possível observar que nas estações de monitoramento, distribuídas segundo o mapa da Figura 7, correspondentes ao Canal da Joatinga, Praia do Pepe, são classificadas como impróprias na maior parte dos meses, como mostra o histórico dos boletins de balneabilidade das praias da Zona Oeste e Sul no quadro abaixo. Portanto, a qualidade das águas do SLJ está comprometida, assim como a balneabilidade das praias adjacentes ao Canal da Joatinga que recebem esta pluma rica em matéria orgânica e nutrientes, e também sofrem influência destas águas eutrofizadas.

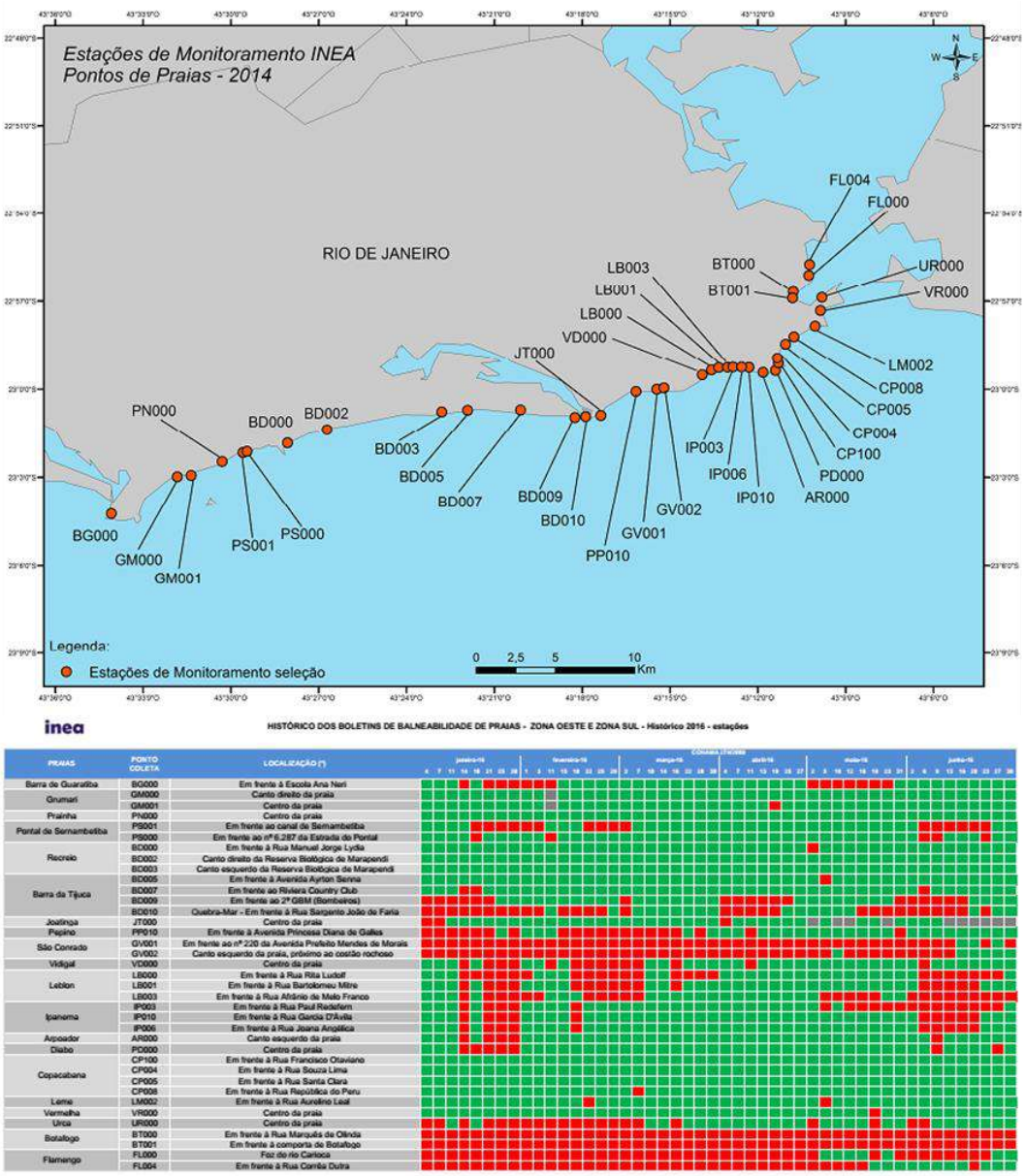


Figura 7. Histórico dos boletins de balneabilidade do INEA de janeiro a junho de 2016 das praias da Zona Oeste e Zona Sul. Em verde a classificação do local é própria e em vermelho imprópria para banho.

Como já mencionado, além do INEA, a CEDAE também realiza monitoramento das condições de balneabilidade das praias do Rio de Janeiro destes indicadores termotolerantes através de uma análise pontual, e este parâmetro está sujeito a diversas variações no tempo e espaço. A modelagem ambiental é uma ferramenta complementar a estas análises que irá permitir uma distribuição espacial e temporal da destes indicadores de forma diferenciada.

3.1.2. Projetos na Região do SLJ

Diante do atual cenário que se encontra o SLJ, este item apresentará alguns projetos e medidas que compõem o *Projeto de Recuperação Ambiental do Sistema Lagunar de Jacarepaguá*, projeto não concluído e também parte do *Programa de Saneamento da Barra da Tijuca, Recreio dos Bandeirantes e Jacarepaguá*, em andamento. Ambos visam a melhora do sistema de saneamento e qualidade das águas locais.

Projeto de Recuperação Ambiental do Complexo Lagunar da Barra e de Jacarepaguá

O governo do Estado do Rio de Janeiro através da Companhia Estadual de Águas e Esgotos, CEDAE, e a Secretaria do Meio Ambiente, SEA, junto com a Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro propuseram a Recuperação Ambiental do SLJ. O projeto previa executar as seguintes ações:

i) Dragagem das Lagoas da Tijuca, Jacarepaguá, Camorim e Marapendi e Canal da Joatinga;
ii) Extensão do mole existente na barra do Canal do Joatinga;
iii) Criação de uma Ilha Parque;
iv) Construção de quatro Unidades de Tratamento de Rios (UTR), a serem implantadas nos rios do Anil, das Pedras, Arroio Pavuna e Pavuninha;
v) Expansão do sistema de coleta e tratamento de esgoto das baixadas da Barra da Tijuca e Jacarepaguá, no âmbito do Programa de Saneamento da Barra da Tijuca, Recreio dos Bandeirantes e Jacarepaguá, PSBJ.

Em síntese, o projeto visa com essas ações propiciar a melhoria na qualidade das águas sob aspectos físicos, químicos e biológicos, de forma a recuperar o espaço aquático e o ecossistema lagunar e do entorno comprometido pelo assoreamento resultando na melhora do aspecto estético das lagunas.

A Masterplan – Consultoria de Projetos e Meio Ambiente apresentou um relatório simplificado que teve como objetivo avaliar a viabilidade do licenciamento ambiental de uma parte das ações necessárias à Recuperação Ambiental do SLJ em especial as atividades descritas anteriormente nos itens i, ii e iii. Este trabalho considerou os itens i e ii para alcançar seus objetivos.

Dragagem das Lagoas da Tijuca, Jacarepaguá, Camorim e Marapendi e Canal da Joatinga

O Projeto de Dragagem do SLJ fundamenta-se na dragagem de aproximadamente 5.8 milhões de m³ de sedimentos do fundo das lagoas, desde a embocadura do Canal da Joatinga até as lagoas de Marapendi, Tijuca, Camorim e Jacarepaguá, incluindo o Canal de Marapendi. Os volumes de material a serem dragados em cada lagoa está disposto na Tabela 3.

Tabela 3.Volume de material a ser dragado proposto pelo Projeto de dragagem das Lagoas do SLJ. Fonte: adaptado de Masterplan (2013)

Região	**Área (m^2)**	**Volume (m^3)**
Canal da Joatinga	169750	377323
Lagoa da Tijuca	2428867	1558191
Canal de Camorim	141604	151771
Lagoa de Jacarepaguá	2634381	1537405
Lagoa de Marapendi	1708323	2238715
TOTAL	**7082925**	**5863405**

No mapa das lagoas da Figura 8. Canais projetados para a realização d estão desenhados os canais de dragagem propostos no projeto. As dragagens também permitiriam o nivelamento dos fundos até a cota de -2 m, com o enchimento de várias cavas profundas, criadas em dragagens indevidas nos anos 70 e 80. Tais cavas funcionam como biodigestores anaeróbicos produzindo gases tóxicos como o gás sulfídrico e o metano.

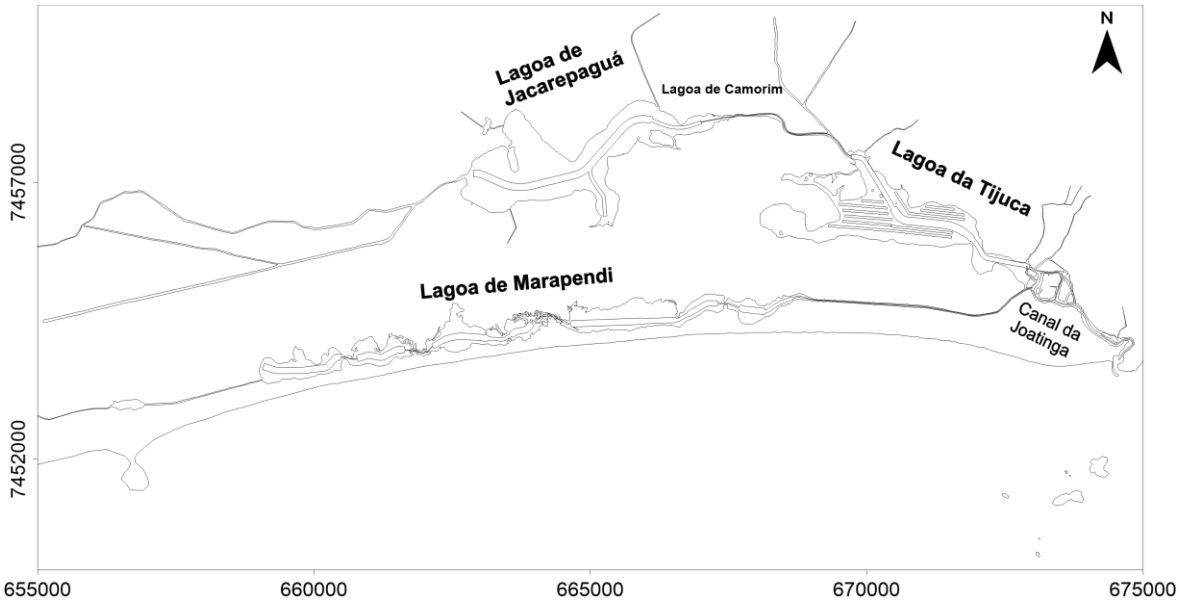


Figura 8. Canais projetados para a realização do projeto de dragagem do SLJ.

O relatório da Masterplan (2013) mostrou que as correntes de maré aumentam, em média, 66% com a realização do projeto e que a renovação das águas das lagoas será mais eficiente para a região do canal da Joatinga e da lagoa da Tijuca que nas de Marapendi e Jacarepaguá. O prolongamento do guia-correntes diminuirá o fluxo hidrodinâmico na praia do Pepê, aumentando a concentração de sedimentos contribuindo para o alargamento da praia neste local.

O projeto de dragagem seria também benéfico para a remoção do lixo e dos poluentes acumulados no sistema. Além disso, o aumento da renovação das águas do complexo diminuirá a taxa de residência destes poluentes. O material dragado seria compactado, armazenado em *geobags* e cobertos por camadas de terra e argila, cujo destino seriam: Ilha Parque, Marapendi e Centro Metropolitano, locais criados para a inovação paisagística do SLJ.

Extensão do mole existente na barra do Canal do Joatinga

Este projeto consiste também no prolongamento do guia-correntes do canal da Joatinga em 180 metros e posteriormente construir um bar panorâmico no local. Esta extensão tem por objetivo evitar o assoreamento de sua embocadura com areia proveniente da praia da Barra da Tijuca. No contexto do projeto, o prolongamento será composto por um braço do lado oeste da desembocadura do canal da Joatinga com extensão de 225 m prolongando-se até a profundidade de 9.5 m. O traçado é linear, seguindo o alinhamento do enrocamento já existente.

No relatório ambiental realizado pela Masterplan (2013), cinco alternativas de guia-correntes foram propostas. A que julgaram melhor foi a alternativa 5 da Figura 9, que mesmo que não diminua a área da seção da embocadura do canal, foi julgada a mais conveniente do ponto de vista construtivo. Também concluíram que, o guia corrente da alternativa 5, não resulta em amplificações nas ondas de sudeste, atingindo um dos objetivos proposto no projeto no qual desenvolveram tal estudo, que era a melhora da navegabilidade do canal.

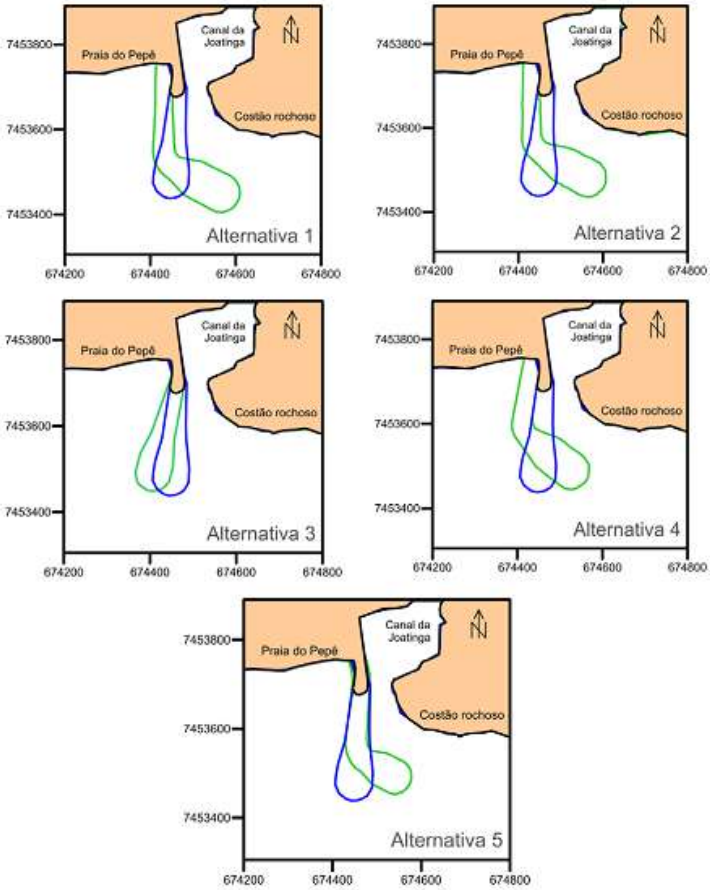


Figura 9. Alternativas propostas para o prolongamento do guia-correntes do Canal da Joatinga pelo Masterplan (2013).

Emissário Submarino da Barra

O emissário Submarino da Barra da Tijuca integra o sistema de esgotamento sanitário da Barra da Tijuca, Recreio dos Bandeirante e Jacarepaguá e foi projetado para viabilizar a retirada dos esgotos que eram lançados no SLJ inicialmente. O projeto foi embasado nos resultados de diversas campanhas de medição de correntes em alto mar, realizadas pela CEDAE, que demonstram um padrão paralelo à linha de costa com sentidos oeste e leste, favorecendo o descarte do Emissário, sem causar risco para as praias.

Em estudo mais recente (FEITOSA, 2017) são apresentados mapas com percentuais de probabilidade referentes às condições impróprias de balneabilidade em uma simulação de quatorze dias de simulação. Foram simuladas três situações de acordo com as características sazonais e meteorológicas: i) verão e céu claro; ii) verão e céu totalmente nublado e iii) inverno e céu claro. A condição de verão com o céu totalmente nublado apresentou-se a mais desfavorável e está representada pelo mapa da Figura 10. As concentrações de coliformes termotolerantes superiores às estabelecidas como satisfatória, na maior parte do tempo, permanece na região

delimitada entre os emissários da Barra da Tijuca e Ipanema não afetando a balneabilidade das praias em que estão instalados.

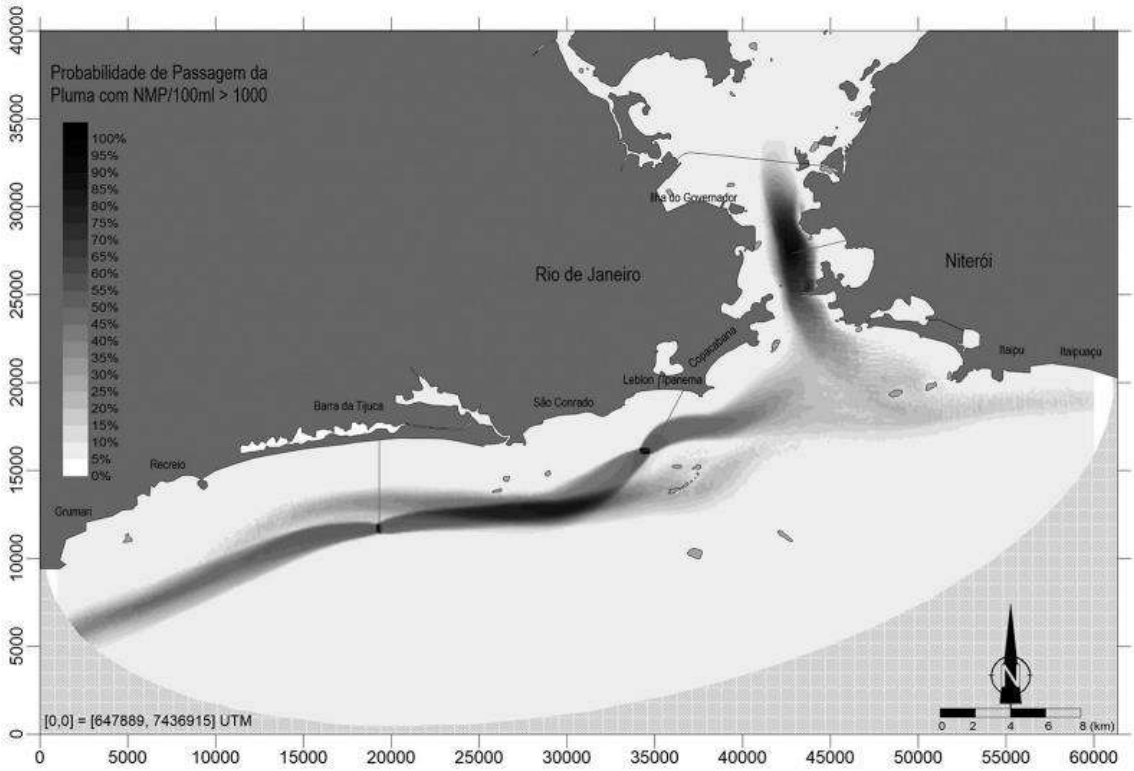


Figura 10. Níveis de probabilidade de concentrações impróprias de coliformes termotolerantes em águas costeiras nas condições de verão e céu totalmente nublado. Fonte: Feitosa, 2017.

3.1.3. Aspectos Climáticos

Os dados apresentados nas subseções seguintes foram retirados do EIA/RIMA referente à Estabilização da Barra do Canal de Sernambetiba e sua Interligação com as Lagoas de Jacarepaguá, Tijuca e Marapendi (COHIDRO, 2006).

As análises de dados pluviométricos documentados foram feitas a partir de uma série histórica de 1970 a 1994, responsáveis pela SERLA, Superintendência de Rios e Lagos do Rio de Janeiro, agora representada pelo INEA. Os dados climatológicos analisados pertencem a uma série de oito anos de dados diários de 1994 a 2001, de uma estação localizada no Aeroporto de Jacarepaguá pertencente a Força Aérea Brasileira, FAB. A Tabela 4 abaixo mostra os detalhes das estações nas quais os dados foram obtidos:

Tabela 4. Detalhes das estações nas quais foram obtidos os dados analisados no EIA/IMA referente à Estabilização da Barra do Canal de Senambetiba e sua Interligação com as Lagoas de Jacarepaguá, Tijuca e Marapendi.

Nome/Código	**Município**	**Localização**		**Altitude (m)**	**Órgão Responsável**	**Período de Observação**
		Longitude	Latitude			
Via – 9DR 2343007	Rio de Janeiro	43°21'59''	23°00'00''	10	SERLA-RJ	1970-1994
Aeroporto de Jacarepaguá	Rio de Janeiro	43°21'36''	22°58'48''	3	FAB	1994-2001

O clima na região de estudo utilizando a classificação de Köppen foi definido como tropical, quente e úmido, com regime de chuva monçônico e predominantemente úmido e com verões quentes. Utilizando a metodologia de Thornthwaite, a aérea de estudo foi classificada como subsumida megatérmica.

Pluviometria

Quanto a análise pluviométrica, a precipitação anual acumulada é de aproximadamente 1206 mm, com número médio de dias com chuva, durante o ano de 112 dias. O período de novembro a abril concentra 60,7% (731.9 mm) da precipitação anual e 55,4% (62 dias) dos dias com chuva. Enquanto que de maio a outubro esses valores se reduzem a 473,8 mm (39,3) e apenas 50 dias com chuva (44,6%).

A tendência de diminuição dos dias com chuva no inverno é explicada pelo deslocamento do anticiclone subtropical do Atlântico Sul para o continente, provocando movimento de subsidência do ar inibindo a formação de nuvens. Já no verão, o Anticiclone Subtropical encontra-se mais sobre o Oceano Atlântico, dando origem a uma massa de ar quente e úmida, o que resulta em aumento de precipitação e do número de dias de chuva. Além disso, no verão os sistemas de larga escala, como frentes frias e de meso-escala, como movimentos convectivos regionais e locais, acarretam no aumento nos valores de precipitação e de dias com chuva.

Temperatura do ar

Nas análises da temperatura do ar, a média mensal na região varia entre 22,5°C, em junho e julho, e 29,2°C, em fevereiro, resultando em uma amplitude térmica anual de 6,7°C. Os limites extremos de temperatura mínima diária foi de 18,6°C em junho e em fevereiro de 25,0°C. Já as temperaturas máximas tiveram extremos observados em julho, 25,°C e 32°C em fevereiro.

Extremos superiores de temperatura são observados do período de dezembro a março pois existe mais disponibilidade de radiação solar nesta época do ano para o Hemisfério Sul. Além disso, o posicionamento do Anticiclone Tropical durante o ano e a movimentação de massas de ar frio influenciam a variação de temperatura do ar.

Ventos

A velocidade média diária do vento registrada no Aeroporto de Jacarepaguá foi de 7.1m/s, classificado, segundo a escala de Beaufort como Vento Moderado. Da circulação geral no Rio de Janeiro, os ventos de leste e nordeste são os mais relevantes e também estão relacionados ao Anticiclone Tropical do Atlântico Sul. Estes ventos refratam em função do atrito causado pela presença da Serra do Mar, resultando em ventos com direção leste/sudeste predominantes ao longo do ano (GUERRA, 2000).

O que interrompe a inércia desta circulação geral é a passagem dos sistemas frontais sobre os oceanos, que serão melhor explicados da seção sobre maré meteorológica. Estes estão acompanhados de anticiclones que sofrem influência de sistemas de baixa pressão que contêm um ar frio de origem polar. Este é o mecanismo que explica a chegada de frentes frias com ventos mais forte que os padrões, que se deslocam de sudeste para nordeste.

3.1.4. Aspectos Oceanográficos

Nos itens a seguir serão dadas definições sobre cada parâmetro oceanográfico importantes para a região Sudeste do Brasil, seguidos da caracterização dos mesmos.

Marés

As marés são definidas como a subida e descida periódica de um corpo d'água resultante da superposição de diversas ondas com diferentes amplitudes, períodos e fases. As marés são ondas de comprimento equivalente à metade da circunferência da Terra, sendo consideradas ondas de águas rasas sendo sempre forçadas por astros e eventos meteorológicos.

O movimento vertical da água ocorre em função aos movimentos horizontais, é denominado corrente de maré. Quando o nível de água sobe, a corrente associada é chamada de enchente e é vazante quando o nível de água desce. Estas correntes são responsáveis pela água fluir para dentro e para fora de estuários, baías ou lagoas. A estofa de maré é denominada como o período sem correntes, de velocidade zero, no qual a corrente tem sua direção invertida.

Maré Astronômica

A maré astronômica é provocada pela força de atração gravitacional exercida pelos astros Lua e Sol que atrai e move a água dos oceanos da Terra. A atração gravitacional entre dois corpos é

proporcional às massas dos corpos e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. O Sol está aproximadamente 387 mais distante do que a Lua sendo a sua influência nas marés o dobro a do Sol.

A Lua é, portanto, responsável pela principal componente harmônica que rege as marés em toda a Terra. Esta é denominada lunar semidiurna, M2, com período de 12 horas e 25 minutos, onde ocorrem duas preamares (subida da maré) e duas baixa-mares (descida da maré) por dia, sendo que os horários das mesmas atrasam cerca de 50 minutos de um dia para o outro. Isto se deve ao fato da Lua cruzar o meridiano de um lugar para o outro defasada 50 minutos, resultando no dia lunar que possui período médio de 24 horas e 50 minutos.

Na região do Rio de Janeiro, as curvas de marés apresentam desigualdades diurnas, onde as duas preamares ou as duas baixa-mares possuem diferentes alturas. Isto é explicado por pela superposição de outras componentes diurnas, com períodos próximos a um dia na componente semidiurna. Estas e outras desigualdades ocorrem de acordo com a posição da Lua, que nem sempre está no plano do Equador.

As máximas variações de altura, amplitude de preamar somada a amplitude de baixa-mar, ocorrem nas sizígias, quando a Terra, a Lua e o Sol estão alinhados, ou seja, nas luas cheia e nova. As mínimas ocorrem nas quadraturas, nas fases minguante e crescente da lua, quando a Lua, a Terra e o Sol fazem um ângulo de 90° entre si.

A partir de série de elevações é possível fazer a análise harmônica que consiste em identificar as diferentes componentes harmônicas das ondas que compõem uma maré. E utilizando estas componentes harmônicas conhecidas de um determinado local, é possível reconstruir a séries de elevações em um período desejado, obtendo a previsão da maré neste local.

A diferença entre a série de temporal de elevações da maré observada e a maré prevista resulta na soma da maré astronômica somada a um ruído aleatório. O ruído nas baixas frequências corresponde a oscilações de período maior do que um ciclo de maré, e sua ocorrência aleatória geralmente está associada a fenômenos meteorológicos.

Maré Meteorológica

Maré meteorológica é definida como a diferença entre a maré observada e a prevista e causa certas irregularidades no padrão harmônico das marés astronômicas. Eventos meteorológicos são responsáveis, portanto, por sobrelevações (altura positiva) e rebaixamentos (altura negativa) no nível médio do mar, observados em séries temporais medidas.

As condições meteorológicas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil estão associadas a sistemas frontais que se deslocam acompanhados de ciclones e anticiclones que alteram os campos de pressão atmosférica e ventos ao longo de sua trajetória. Estes sistemas frontais dão origem a um vento com direção paralelo a costa que ocasionam o empilhamento (sobrelevarão do nível) ou rebaixamento dos níveis de água da costa.

A Teoria de Ekman explica o transporte resultante estar sempre a esquerda da direção do vento, no Hemisfério Sul e a direita no Hemisfério Norte, assim como Coriolis. Portanto, ventos de leste-nordeste (sentido sul) sucedem em um nível médio negativo, os seja, afasta as águas da costa. E um vento de sul-sudoeste (sentido norte) sucede no empilhamento da água na costa.

Quando existe a influência de um anticiclone de alta pressão sobre oceano que gera o vento de norte-nordeste, uma corrente residual próximo à costa, vindo de leste é gerada leva ao rebaixamento do nível médio do mar. E quando ocorre o posicionamento de um centro de alta pressão sobre o Uruguai, onde a retaguarda do mesmo resulta em ventos de sudoeste, geram-se correntes residuais próximos a costa vindas de oeste e a resultante sobrelevação do nível médio do mar (FILHO, 2016).

No Rio de Janeiro, estas duas condições de tempo local de acordo com os sistemas frontais são comumente chamadas de tempo bom e tempo ruim, respectivamente. Este padrão de correntes de deriva produzidos por efeitos de mesoescala foram descritos e também considerados muito importante para a representação da hidrodinâmica das águas costeiras da região do Rio de Janeiro (COPPETEC, 2009; FEITOSA, 2003; PECLY, 2000)

Temperatura e Salinidade

A Plataforma Continental Sudeste do Brasil, limitada ao norte por Cabo Frio (23°S), no Rio de Janeiro, a sul pelo Cabo de Santa Marta (28°40’S), e no litoral do Rio de Janeiro segue a direção nordeste-sudoeste. Na região mais próxima a costa, há o predomínio da Água Costeira (AC), com temperaturas acima de 20°C e salinidade entre 32.2 e 35.4, resultante da mistura de águas doces de origem continental com águas da plataforma continental (MIRANDA, 1985).

Durante o verão é observada uma forte estratificação de densidades em função da penetração da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) sobre a plataforma. A ACAS chega a plataforma e devido a maior predominância de ventos de norte/nordeste durante esta estação, o que faz com que a AC seja transportada em direção ao oceano. A ACAS apresenta temperaturas menores que 20°C e salinidade abaixo de 36.4 resultando a formação de um termoclina, camada com intenso gradiente térmico. Já no inverno, a ACAS tende a se afastar da região costeira devido aos ventos

predominantes de sul/sudeste e a coluna de água é considerada homogênea e com temperaturas mais baixas.

Uma análise foi feita da relacionando séries temporais de nível de água medido na Ilha Fiscal, componentes das velocidades longitudinal e transversal a costa e temperatura da água medidos ao longo da coluna de água, ambos os últimos na região do Emissário Submarino de Ipanema (ESEI) mostra a correlação existente entre estes parâmetros (CARVALHO, 2003). A Figura 11 mostra os resultados da campanha de verão que evidenciou períodos com a coluna de água homogênea e com águas relativamente frias, pouco inferiores a 15°C e que provavelmente alcançavam a superfície.

O autor ainda evidencia que a oscilação vertical da termoclina ocorre em fase oposta com oscilação da corrente e de nível do mar. Quando a corrente tem sentido este-nordeste, a termoclina tende a aprofundar-se na coluna de água e o nível tende a elevar-se. A situação oposta ocorre quando a corrente aponta para oeste-sudoeste, quando a água de fundo tende a elevar-se na coluna de água e o nível do mar rebaixar.

No inverno, as temperaturas superficiais variaram entre 21 e 22°e também foi observado padrões de ascensão e subsidência da termoclina. As diferenças de temperatura apresentam um gradiente térmico menor que no verão e as alturas de oscilações são maiores também. Os gradientes de temperatura mais acentuado no verão produzem ondas internas com amplitude menor do que as geradas no inverno, quando os gradientes são menores.

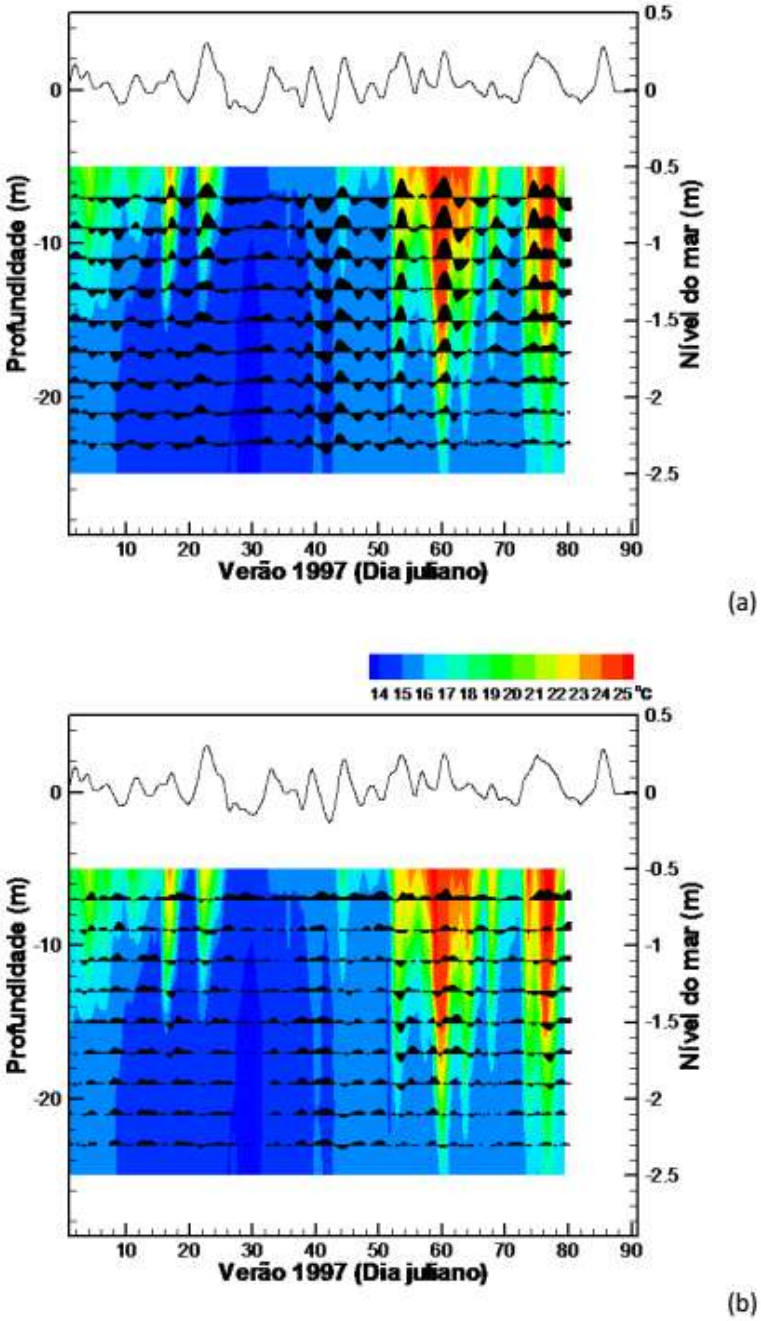


Figura 11. Séries temporais simultâneas de nível de água medido na Ilha Fiscal (acima das figuras); (a) componente longitudinal (valores positivos têm sentido leste-nordeste) e (b) componente transversal da corrente (valores positivos seguem em direção a costa) e temperatura da água (colorido) medidas ao longo da coluna de água junto ao difusor do ESEI durante o verão de 1997.

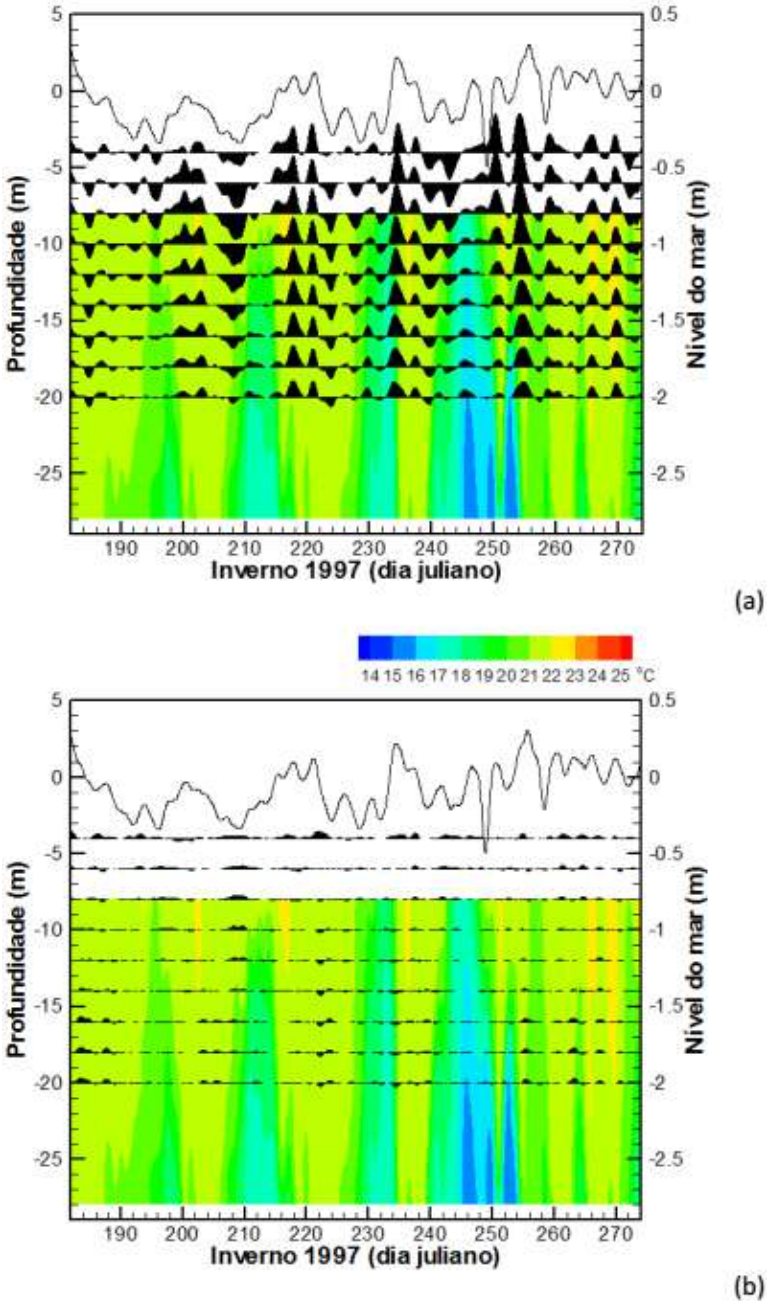


Figura 12. Séries temporais simultâneas de nível de água medido na Ilha Fiscal (acima das figuras); (a) componente longitudinal (valores positivos têm sentido leste-nordeste) e (b) componente transversal da corrente (valores positivos seguem em direção a costa) e temperatura da água (colorido) medidas ao longo da coluna de água junto ao difusor do ESEI durante o verão de 1997.

4. METODOLOGIA

Os modelos numéricos vêm sendo são amplamente utilizados para projetar obras e intervenções em corpos d'água. Os modelos são capazes de representar de forma integrada a visão dinâmica de processos em complexos sistemas ambientais.

O sistema de modelos computacionais SisBaHiA® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) foi escolhido para o desenvolvimento deste trabalho. Este vem sendo continuadamente desenvolvido no COPPE/UFRJ desde 1987 e utilizado em dezenas de estudos e projetos envolvendo modelagem de corpos d'água naturais. A metodologia utilizada nas modelagens encontra descrita com detalhes na referência técnica do modelo e será apresentada de forma resumida nas seções a seguir (ROSMAN, 2015).

4.1. Modelo Hidrodinâmico

O Modelo Hidrodinâmico (MH) é a base fundamental de um sistema de modelos que tem como principal objetivo simular a circulação hidrodinâmica e a qualidade de água em corpos de água naturais. O MH permite obter o padrão de circulação do corpo d´água, definido pela magnitude das correntes elevação diferencial do nível d'água ao longo do domínio modelado.

A mecânica do movimento para escoamentos em regime turbulento é governada pelas equações de Navier-Stokes, que são baseadas no princípio de conservação da quantidade de movimento. Esta equação juntamente com as equações da continuidade, de estado e do transporte para cada constituinte da equação do estado resultam no modelo matemático fundamental para qualquer corpo de água.

O MH do SisBaHiA® é da linhagem FIST (*filtered in space and time*), descrito pelas equações de Navier-Stokes, filtradas no espaço e no tempo. Este é um modelo numérico hidrodinâmico, tridimensional, para escoamentos homogêneos, de grande escala e é composto pelos módulos 2DH e 3D.

Para as modelagens deste trabalho utilizou-se o módulo 2DH, que calcula correntes promediadas na vertical e a elevação da superfície livre. Para resolver as velocidades em todas as direções u_i (x,y,z,w) do movimento e a elevação da superfície livre (ζ) são necessárias quatro equações, que no módulo 3D: equação de quantidade de movimentos, com aproximação hidrostática, na direção x (1), a mesma para a direção y (2), a equação da continuidade do volume (3) e a equação da continuidade do volume integrada ao longo da vertical (4), dispostas abaixo:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-g\frac{\partial \zeta}{\partial x}-\frac{1}{\rho_0}g\int_z^{\zeta}\frac{\partial \rho}{\partial x}dz+\frac{1}{\rho_o}\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right)+2\Phi\,\mathrm{sen}\,\theta v \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-g\frac{\partial \zeta}{\partial x}-\frac{1}{\rho_0}g\int_z^{\zeta}\frac{\partial \rho}{\partial x}dz+\frac{1}{\rho_o}\left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right)-2\Phi\,\mathrm{sen}\,\theta u \tag{2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\int_{-h}^{\zeta}u\,dz+\frac{\partial}{\partial y}\int_{-h}^{\zeta}v\,dz=q_P-q_E+q_I \tag{4}$$

Onde:

- u, v, e w são as componentes do vetor velocidade nas direções x, y, e z, respectivamente;
- P é a pressão;
- ρ é a densidade local do fluído;
- ρ_o é a densidade constante de referência
- Φ é a velocidade angular da rotação da Terra.
- θ é o ângulo da latitude local;
- τ_{ij} são as componentes do tensor de tensões viscosas.
- h é o valor de z no fundo
- q_P, q_E e q_I são os fluxos de precipitação, evaporação e infiltração, respectivamente.

O FIST3D do SisBaHiA® considera que os escoamentos na natureza podem ser tratados como o de um fluido incompressível devido a compressibilidade da água ser desprezível. A equação da continuidade do volume exprime que se o fluido é incompressível, o campo de velocidades do escoamento tem que ter divergente nulo. De fato, se o divergente fosse > 0, indicaria que o volume estaria expandindo e, se o divergente fosse < 0 o volume estaria contraindo.

Assumindo a massa específica com valor constante, a conservação do volume é equivalente a conservação da massa. Além disso, o FIST resolve as equações completas de Navier-Stokes considerando a aproximação de pressão hidrostática, aproximação de águas rasas e a aproximação de Boussinesq.

O modelo 2DH representado pela promediação vertical das equações do modelo tridimensional. Em corpos de água onde as escalas verticais do movimento são muito menores que as horizontais, como é caso de corpos de água na região costeira, é razoável representar o escoamento por meio de variáveis médias na vertical apresentadas em plantas.

Integrando as equações do movimento nas direções *x* e *y* e a da continuidade, obtém-se as equações governantes para um modelo hidrodinâmico na horizontal, o 2DH, que são apresentadas pelas três equações a seguir:

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}=-g\frac{\partial \zeta}{\partial x}-g\frac{H}{2}\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x}+\frac{1}{\rho_0 H}\left(\frac{\partial(H\,\hat{\tau}_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial(H\,\hat{\tau}_{xy})}{\partial y}\right)$$
$$+\frac{1}{\rho_0 H}\left(\tau_x^S-\tau_x^B\right)+2\Phi\mathrm{sen}\theta V-\frac{U}{H}\Sigma q \tag{5}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}=-g\frac{\partial \zeta}{\partial y}-g\frac{H}{2}\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y}+\frac{1}{\rho_0 H}\left(\frac{\partial(H\hat{\tau}_{xy})}{\partial x}+\frac{\partial(H\hat{\tau}_{yy})}{\partial y}\right)$$
$$+\frac{1}{\rho_0 H}\left(\tau_y^S-\tau_y^B\right)-2\Phi\mathrm{sen}\theta U-\frac{V}{H}\Sigma q \tag{6}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial UH}{\partial x}+\frac{\partial VH}{\partial y}=\sum q \tag{7}$$

Onde *U* e *V* são as velocidades médias na vertical das direções *x* e *y*, respectivamente. O *H* é a profundidade instantânea equivalente ao valor de $\zeta+h$, ou seja, é a altura da coluna de água. As tensões de atrito na superfície livre estão representadas por τ_x^S e τ_y^S enquanto que as de fundo por τ_x^B e τ_y^B, nas direções *x* e *y*. E Σq representa os fluxos de precipitação, evaporação e infiltração, por unidade de área.

O atrito na superfície livre decorrente do vento é escrito em termos de formulação de velocidade quadrática:

$$\tau_i^S=\rho_{ar}C_D W_{10}^2\cos\phi_i \tag{8}$$

Onde ρ_{ar} é a densidade do ar, C_D é o coeficiente de arraste do vento, W_{10} é o valor local da velocidade do vento medida a 10 metros acima da superfície livre, e ϕ_i é o ângulo ente o vetor velocidade do vento local e direção x_i.

Já a tensão de atrito no fundo é calculada através da expressão a seguir:

$$\tau_i^B = \rho_o \beta U_i \quad [i = 1,2] \tag{9}$$

onde o parâmetro β é definido como:

$$\beta = \frac{g}{C_h^2}\sqrt{U^2 + V^2} \tag{10}$$

E C_h é o coeficiente de Chézy, definido como:

$$C_h = 18\log_{10}\left(\frac{12H}{2\varepsilon}\right) = 18\log_{10}\left(\frac{6H}{\varepsilon}\right) \tag{11}$$

Na equação acima, 2ε é a altura e ε é a amplitude da rugosidade de fundo que é definido segundo a natureza do fundo do domínio de modelagem. A Tabela 5 sugere valores para a amplitude em questão, quando não há efeitos de ondas.

Tabela 5. Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, ε. Adaptado de Abbot & Basco (1989).

Leito de sedimentos com rugas e similares	
Predominância de siltes e finos	0,0001 m < ε < 0,0100 m
Predominância de areias finas	0,0070 m < ε < 0,0150 m
Predominância de areias médias	0,0100 m < ε < 0,0300 m
Predominância de areias grossas	0,0250 m < ε < 0,0500 m
Predominância de areias muito grossas	0,0400 m < ε < 0,0800 m
Predominância de areias com cascalho	0,0500 m < ε < 0,1200 m
Sedimentos com vegetação	0,0500 m < ε < 0,1500 m
Sedimentos com obstáculos (*e.g.* pedras, troncos)	0,1500 m < ε < 0,4000 m
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	0,0003 m < ε < 0,0010 m
Fundo de pedra lisa	0,0010 m < ε < 0,0030 m
Fundo de asfalto ou similar	0,0030 m < ε < 0,0070 m
Fundo com pedregulho (D_{50} < 3 cm)	0,0070 m < ε < 0,0150 m
Fundo com pedras médias (D_{50} < 8 cm)	0,0150 m < ε < 0,0400 m
Fundo com pedras (D_{50} < 20 cm)	0,0400 m < ε < 0,1000 m
Fundo com rochas (D_{50} < 50 cm)	0,1000 m < ε < 0,2500 m
Fundo de Concreto	
Fundo de concreto liso	0,0001 m < ε < 0,0005 m
Fundo de concreto inacabado	0,0005 m < ε < 0,0030 m
Fundo de concreto antigo	0,0030 m < ε < 0,0100 m

Para o cálculo da densidade da água o modelo utiliza a Equação do Estado segundo a Fórmula de Eckart representada pela equação:

$$\rho(S,T) = 1000\frac{1+A}{B+0.698A} \tag{12}$$

Sendo que,

$$A = 5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S$$

$$B = 1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2 - (3.8 + 0.01T)S$$

Onde *T* é o valor da temperatura da água em graus Celsius e *S* é o valor da salinidade em unidades práticas de salinidade.

4.2. Modelo de Transporte Euleriano

Para o cálculo da taxa de renovação das águas do SLJ foi utilizado o Modelo de Transporte Euleriano. Este modelo é básico e pode ser utilizado em diversas análises ambientais em corpos de águas naturais. O SisBaHiA® utiliza o modelo de transporte Euleriano advectivo-difusivo com reações cinéticas (MTEADR), com esquema numérico igual ao da linhagem FIST.

O transporte de um constituinte qualquer em um corpo de água natural pode ser determinado a partir do princípio de conservação de massa. A equação matemática que expressão o princípio da conservação da massa pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_c \delta_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \sum R_{P\&C} \qquad (13)$$

Onde C é a concentração do constituinte, u_i é a componente do vetor velocidade na direção *i*, D_c é coeficiente de difusão molecular e $R_{P\&C}$ são as reações cinéticas de produção ou consumo. O delta de Kröenecker foi introduzido para possibilitar a notação indicial, quando $i = j \rightarrow \delta_{ij} = 1$ e quando $i \neq j \rightarrow \delta_{ij} = 0$.

A equação 13 é chamada de equação de transporte advectivo difusivo com reações cinéticas. Ela expressa que a variação local da concentração do constituinte mais o balanço de fluxo advectivo do constituinte é igual ao balanço difusivo do constituinte, modelado pela Lei de Fick, mais o somatório de reação de produção e consumo do constituinte.

Esta simulação consiste em marcar no instante inicial um valor de referência igual a zero para as águas que estão dentro do sistema. A renovação devido ao efeito da maré considera que a água que entra no domínio pela fronteira aberta e através das vazões fluviais afluentes possui valor de referência igual a cem. A renovação total das águas consiste na combinação destas duas condições.

Então uma substância genérica com concentração C é utilizada como traçador de água nova carregada pela entrada da maré e pelos rios afluentes. Então, no início da simulação toda a água dentro do sistema lagunar, considerada velha, é prescrita com concentração C=0. E Todas as águas afluentes seja ela pela maré ou pelos rios é considerada água nova, com concentração C=100.

Desta forma, a porcentagem de água renovada no domínio será diretamente proporcional a esta concentração, variando de 0% a 100%, sofrendo apenas advecção e dispersão em todo domínio. Ao longo das simulações, trocas de águas e processos de mistura ocorrem desde o instante inicial, originadas das bacias hidrográficas e da região costeira. Os valores resultantes destas simulações são interpretados como porcentagem de água nova que entrou na região de interesse, delimitada pelo sistema lagunar.

A Figura 13 mostra a condição inicial dada ao Modelo de Transporte Euleriano que representa a taxa de renovação espacial do domínio de modelagem. Foram rodados cenários de verão e inverno durante noventa dias, no qual trinta dias correspondem aos dias de simulação do hidrodinâmico e reproduzido em mais dois ciclos.

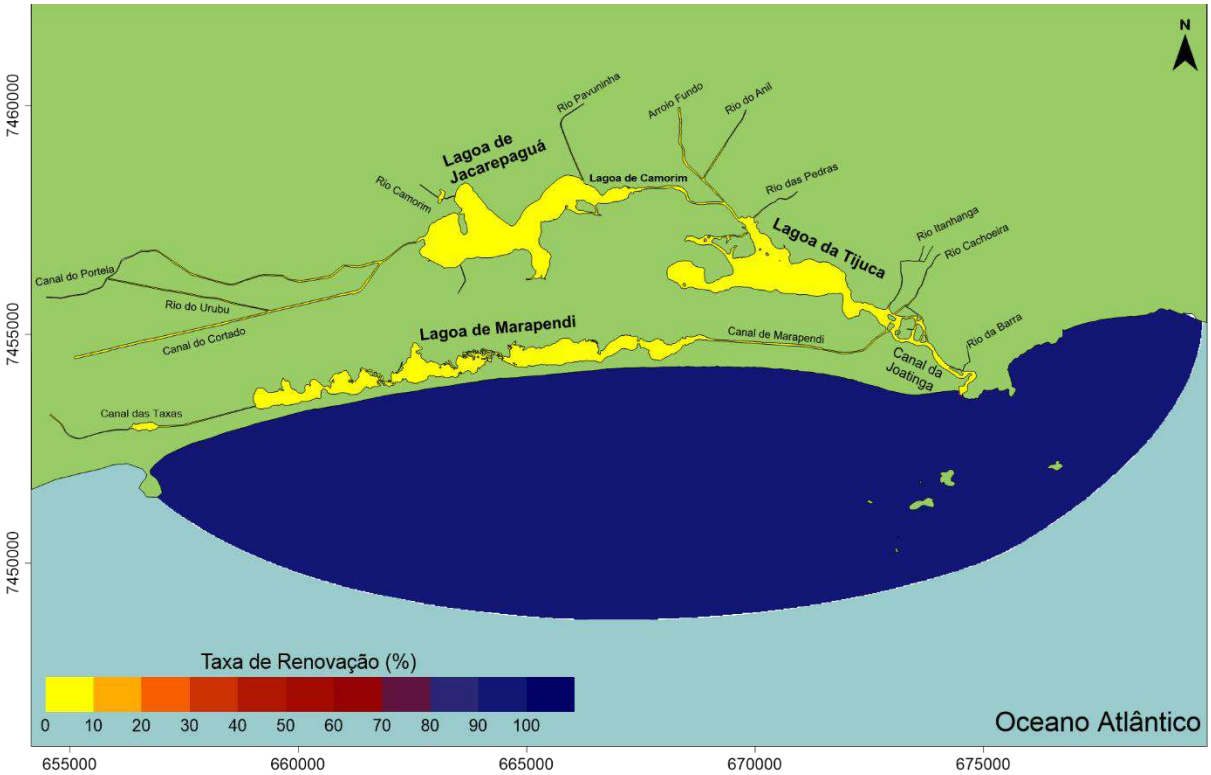


Figura 13. Condição inicial utilizada para as simulações de renovação das águas do SLJ.

4.3. Modelo de Transporte Lagrangeano

O Modelo de Transporte Lagrangeano (MTL) é utilizado para o transporte de constituintes, como os indicadores termotolerantes, sendo este capaz de reproduzir processos de difusão turbulenta e de reações cinéticas de decaimento bacteriano.

A metodologia do MTL consiste em representar a mancha ou a pluma de contaminantes por uma nuvem com inúmeras partículas. O espaço e posição de partículas é contínuo e a discretização do

modelo hidrodinâmico é usada apenas para interpolações do campo de velocidades. Então, somente nos instantes escolhidos para computar a concentração, é gerada uma malha dedicada e suficientemente refinada entorno da nuvem de partículas, permitindo o cálculo com grande acurácia.

O MTL do SisBaHiA® é composto de diversos modelos capazes de representar diferentes tipos de fontes sendo estas representadas por um dado número de partículas lançadas na região fonte, em intervalos de tempos regulares. As partículas são dispostas na região fonte de forma aleatória e sofrem advecção conforme as correntes computadas pelo modelo hidrodinâmico. A posição de qualquer partícula no instante P^{n+1}, é determinada através da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior conhecida, P^n.

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{\Delta P^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2 P^n}{dt^2} + T.A.D. \tag{14}$$

Onde *T.A.D.* são os termos de alta ordem desprezados. As derivadas temporais de *P* são obtidas a partir do campo de velocidades do modelo hidrodinâmico resolvível, equacionado como:

$$\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w) \tag{15}$$

$$\frac{d^2 P^n}{dt^2} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \tag{16}$$

As velocidades que promovem o transporte advectivo das partículas $\vec{V}(u, v, w)$ são as mesmas do modelo hidrodinâmico. Após determinar a posição de uma dada partícula, as velocidades difusivas podem ser incluídas por meio de desvio aleatório em função das derivadas espaciais das difusividades turbulentas.

Conhecida a posição das partículas, é possível determinar o campo de concentração de um constituinte de interesse, formado pelo conjunto de partículas. No caso de efluentes saindo de uma fonte, a quantidade de massa M_a de uma dada espécie *a*, presente em cada partícula que entra no domínio, é dada por:

$$M_a = \frac{QC_a \times \Delta t}{N_P} \tag{17}$$

Onde, Q é a descarga proveniente da fonte, C_a é a concentração da substância a presente na descarga da fonte e N_P é o número de partículas que entra no domínio pela fonte por passo de tempo Δt.

A quantidade de massa de cada partícula, cujo centro encontra-se na posição (x, y, z) é distribuída nas células que formam a malha de discretização do modelo. A quantidade de massa da espécie a presente em cada célula i é calculada através da fórmula:

$$m_{ai}(x, y, z) = \frac{M_a R(t_v) f_i}{\sum_{n=1}^{NP} f_n} \tag{18}$$

Onde,

- f_i é função de distribuição espacial (Gaussiana)
- $R(t_v)$ é a função cinética da reação;
- t_v é o tempo de vida, ou idade da partícula
- NP é o número de partículas que contribui para a quantidade de massa em uma dada célula e o volume da célula.

E por fim, a concentração é calculada pela razão entre a quantidade de massa da substância presente na célula e o volume da célula. Para este estudo o constituinte escolhido como indicador de poluição foram os coliformes termotolerantes pois medições das concentrações dos mesmo no canal da Joatinga foram disponibilizados pela CEDAE.

Para simular a pluma proveniente do SLJ, foi inserida no domínio de modelagem uma fonte distribuída na seção indicada na Figura 14. No modelo a maneira mais simples de fazer esta distribuição na seção utilizando as ferramentas do MTL, é através de uma pseudo linha difusora que se estende pela largura da seção. No caso, a pseudo linha difusora contém cinquenta difusores ao longo do fundo da calha com diâmetro de 0.5 m espaçado a cada metro. A linha difusora emite um efluente com vazão estimada e concentração do indicador simulado.

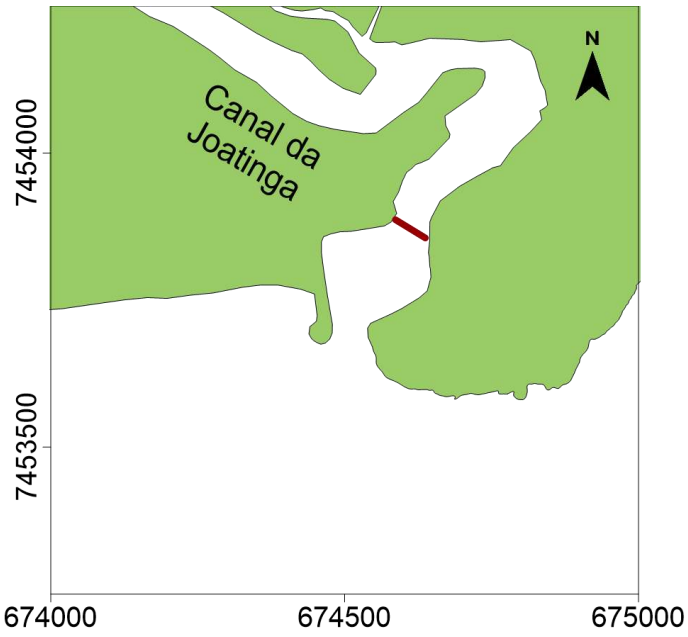


Figura 14. Posição da linha difusora utilizada como fonte para o modelo de transporte lagrangeano.

Inicialmente, no campo próximo o modelo simula o processo dispersivo do efluente que passa primeiramente por uma diluição inicial, onde a quantidade de movimento do efluente e os efeitos dinâmico locais resultam em uma rápida mistura do contaminante nas águas do corpo receptor. Após esta fase inicial, a pluma sofre espalhamento dinâmico horizontal e ao alcançar sua altura terminal, ocorre o seu colapso vertical. Por último, a pluma sofre difusão turbulenta passiva e advecção produzidas pelas correntes oceânicas na região de campo afastado.

Portanto, acoplado ao modelo hidrodinâmico estão os modelos de campo próximo e campo afastado. Como a modelagem em questão se trata de efluentes domésticos compostos por microrganismos indicadores de contaminação fecal, existe o acoplamento do modelo de decaimento bacteriano ao modelo de campo afastado. O esquema da Figura 15 mostra a metodologia adotada no acoplamento destes modelos.

As modelagens do MTL permitem resultados a respeito do alcance e área de influência da pluma oriunda das do sistema lagunar, determinando a distribuição das concentrações do contaminante no corpo de água receptor no campo afastado.

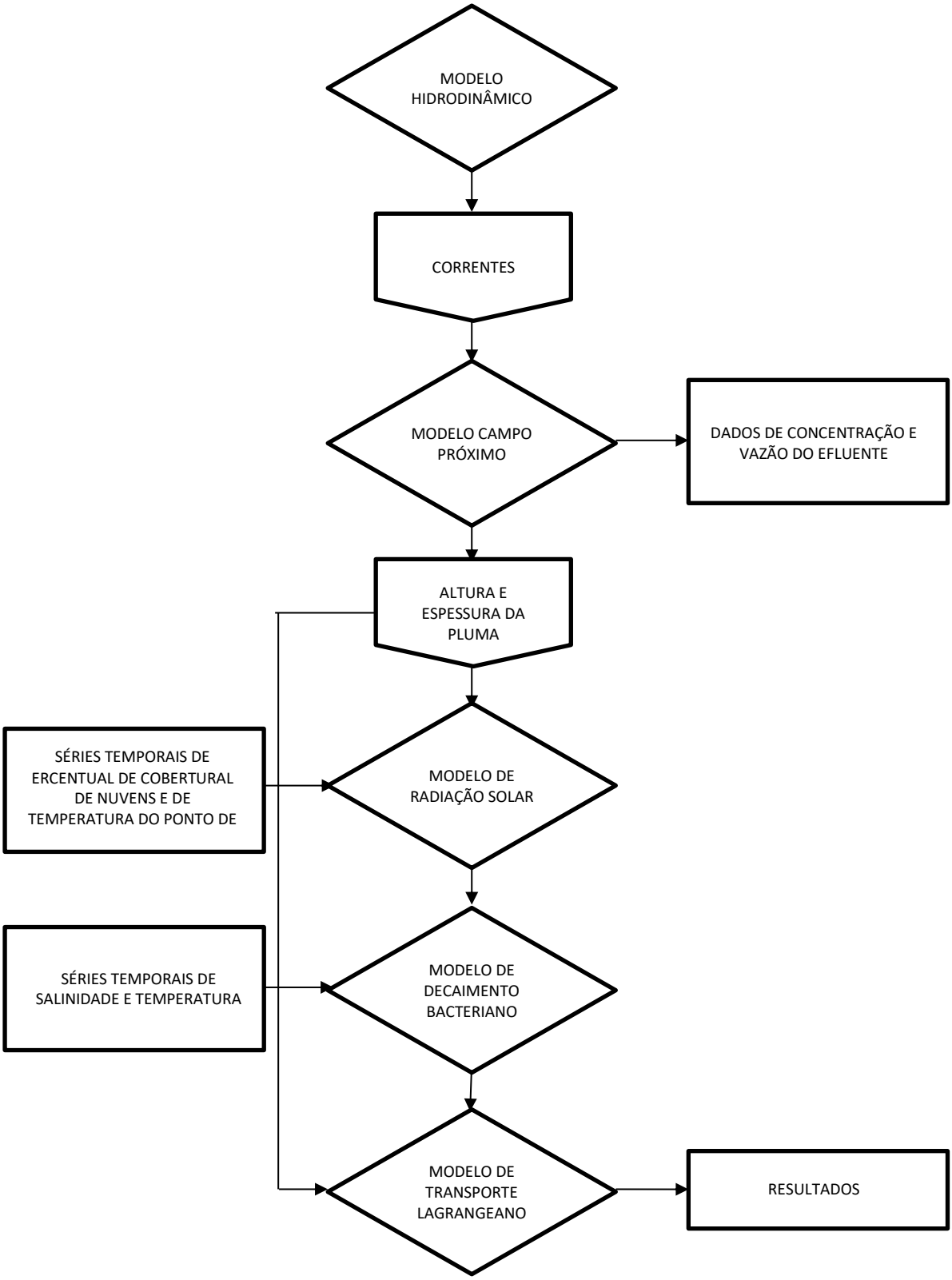


Figura 15. Estrutura metodológica do funcionamento do Modelo de Transporte Lagrangeano utilizado neste estudo.

4.4. Modelo de Propagação de Ondas

Para definir a nova configuração do guia-correntes foi utilizado o Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® (MPO), que é capaz de representar o comportamento das ondas que são originadas em águas profundas na região de águas rasas, no caso deste estudo, próxima ao Canal da Joatinga.

Os ventos são gerados por gradientes de pressão em grande escala na atmosfera. A cerca de 1000 metros acima da superfície o vento é uma resultante do equilíbrio entre a força de Coriolis e os gradientes de pressão, que é o vento geostrófico. Abaixo da região puramente geostrófica, o efeito do atrito causado pelos oceanos distorce o campo de ventos, definindo a região chamada de camada limite planetária. A camada atmosférica nesta região pode ser dividida e duas seções: uma de cisalhamento constante (de 10 a 100 m de altura) e acima desta, a camada de Ekman. Portanto, a velocidade e direção dos ventos tornam-se dependentes da elevação do nível do mar, da rugosidade da superfície e de diferenças na temperatura entre o ar e o mar.

Existe uma velocidade de vento que há uma energia máxima que pode ser transferida para o oceano, fazendo com que as ondas geradas por esta atinjam um crescimento máximo, expresso em termos de altura de onda. Este estágio do mar é denominado como "totalmente desenvolvido", quando toda a energia transferida pelo vento é dissipada por processos como a arrebentação.

O MPO é um modelo de diferenças finitas que calcula a propagação de ondas em águas costeiras considerando fenômenos de refração e difração, efeitos de *shoaling* e dissipação de energia. Este modelo é baseado no modelo REF/DIF que utiliza a equação do declive suave representava pela equação 19:

$$\nabla_h . \left(C C_g \nabla_h \eta \right) + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \eta = D \tag{19}$$

Onde,

$$C = \sqrt{(g / k) \tanh kh} \tag{20}$$

$$C_g = C \left\{ 1 + 2kh / \sinh kh \right\} / 2 \tag{21}$$

Sendo C a velocidade da onda e C_g a velocidade de grupo. D é a dissipação, $h(x, y)$ é a profundidade local e g é a aceleração da gravidade. O número de onda $k(x, y)$ está relacionado à σ, frequência angular das ondas, e à profundidade h através da relação de dispersão:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \tag{22}$$

5. DADOS AMBIENTAIS

Este tópico descreve os passos iniciais para a construção do domínio de modelagem do SLJ. Em seguida serão descritos os dados ambientais utilizados para a execução do modelo hidrodinâmico, bem como as condições iniciais e de contorno impostas.

5.1. Modelagem Digital do Terreno

O primeiro passo para a modelagem hidrodinâmica ambiental em uma região é a definição do domínio de interesse e a modelagem digital do terreno deste domínio.

5.1.1. Domínio de Modelagem

A definição dos contornos de terra e água da área de estudo foi obtida através de imagens de satélite no programa Google Earth (imagem correspondente ao dia 27/04/2015). Ambos contornos foram unidos e redesenhados no software Surfer 13, constituindo então, o mapa base do estudo.

Contornos abertos delimitam o domínio de modelagem não prescrito pelo contorno físico, como no caso de entradas de baías e estuários. Os contornos de terra representam, portanto, as margens e seções de rios ou canais que estejam dentro do domínio de modelagem.

A malha de elementos quadrangulares e triangulares foi definida no programa SisBaHiA® baseando-se nos contornos delimitados. Para a discretização do domínio utilizou-se 3044 elementos quadráticos, sendo 2888 elementos quadrangulares e 156 triangulares, contendo um total de 13645 nós de cálculo.

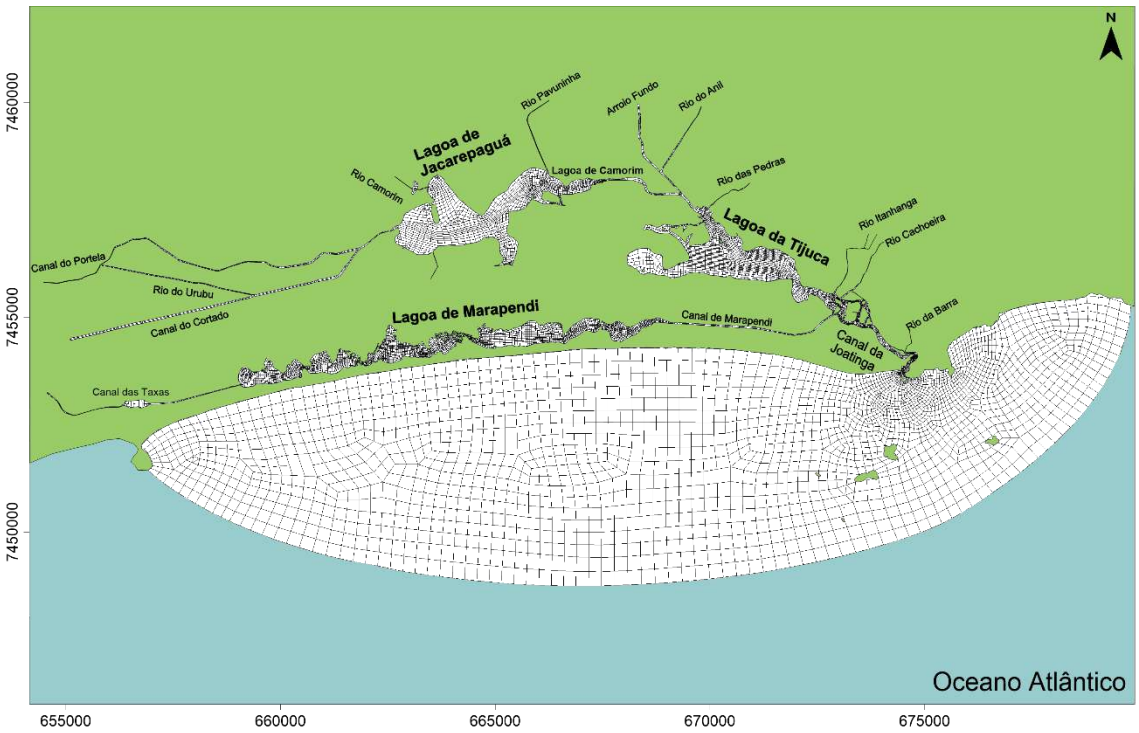


Figura 16. Malha utilizada para a discretização espacial do domínio de modelagem.

Para o segundo cenário, onde o guia-correntes foi redimensionalizado, um novo contorno terra foi redesenhado e a malha adaptada ao seu redor. Esta nova discretização resultou em 3038 elementos totais, 2881 quadrangulares, 157 triangulares e 13622 nós de cálculo. A Figura abaixo mostra a malha adaptada ao novo cenário.

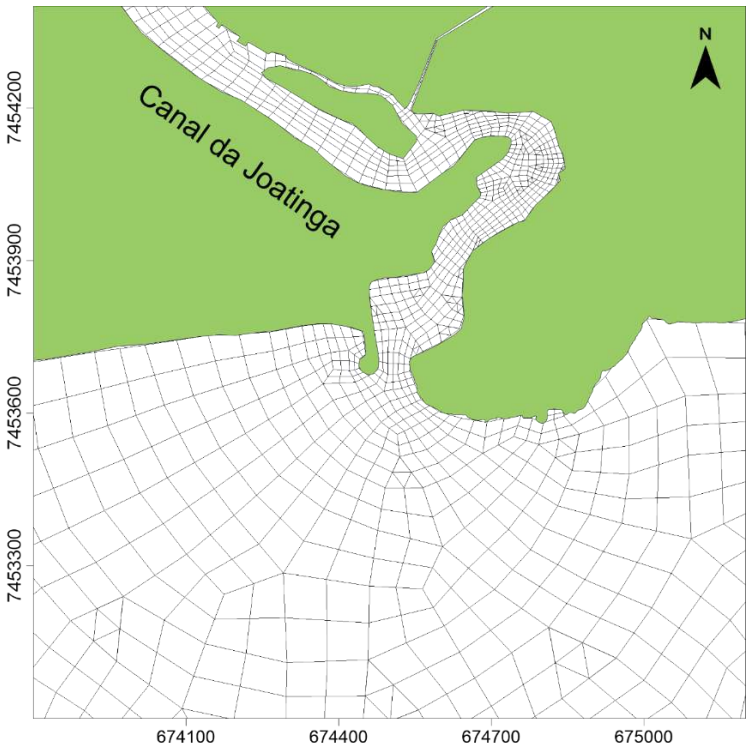


Figura 17. Detalhe da malha no Canal da Joatinga para a discretização espacial do domínio de modelagem para o cenário atual.

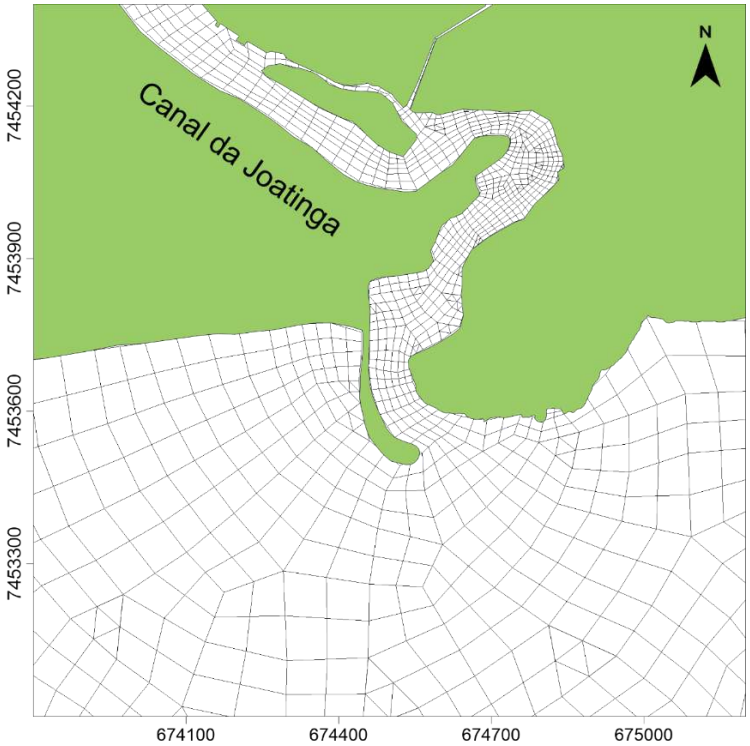


Figura 18. Detalhe da malha no Canal da Joatinga para a discretização espacial do domínio de modelagem para o cenário pós prolongamento do guia-correntes.

5.1.2. Batimetria

As informações referentes à batimetria foram obtidas a partir de duas fontes:

- CRAF Engenharia – referente a toda região do sistema lagunar, incluindo os canais de dragagem projetados. As cotas estão referidas ao Datum Imbituba do IBGE.
- Carta Náutica 1506 da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, DHN – referente a região de mar aberto. As cotas são referidas ao zero da DHN, que é similar ao zero da DHN da Ilha Fiscal, considerado na cota -0.88 m do Datum Imbituba.

As batimetrias referentes à CRAF Engenharia foram fornecidas para a execução de parte dos projetos da Recuperação Ambiental do SLJ, apresentado no item 3.1.2. Além dos canais de dragagem projetados, ilustrados na Figura 8, o projeto considerou o preenchimento das cavas das lagoas da Tijuca e de Jacarepaguá na cota de -2m com o material dragado.

Os dados de batimetria foram reunidos e organizados para serem interpolados, utilizando o método de kriging através do software Surfer. O mapa com as batimetrias interpoladas para o domínio de modelagem do cenário atual está disposto na Figura 19 e na Figura 20 a batimetria para o cenário posterior as dragagens e prolongamento do guia-correntes do Canal da Joatinga.

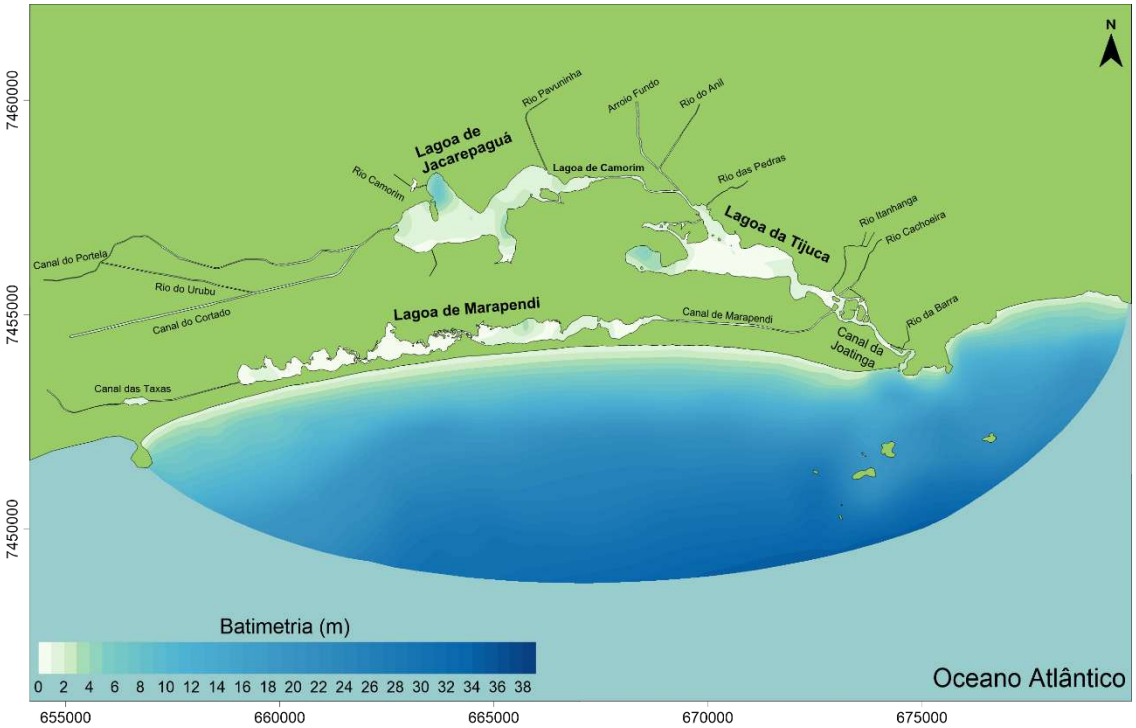


Figura 19. Batimetria utilizada no domínio de modelagem para o cenário atual.

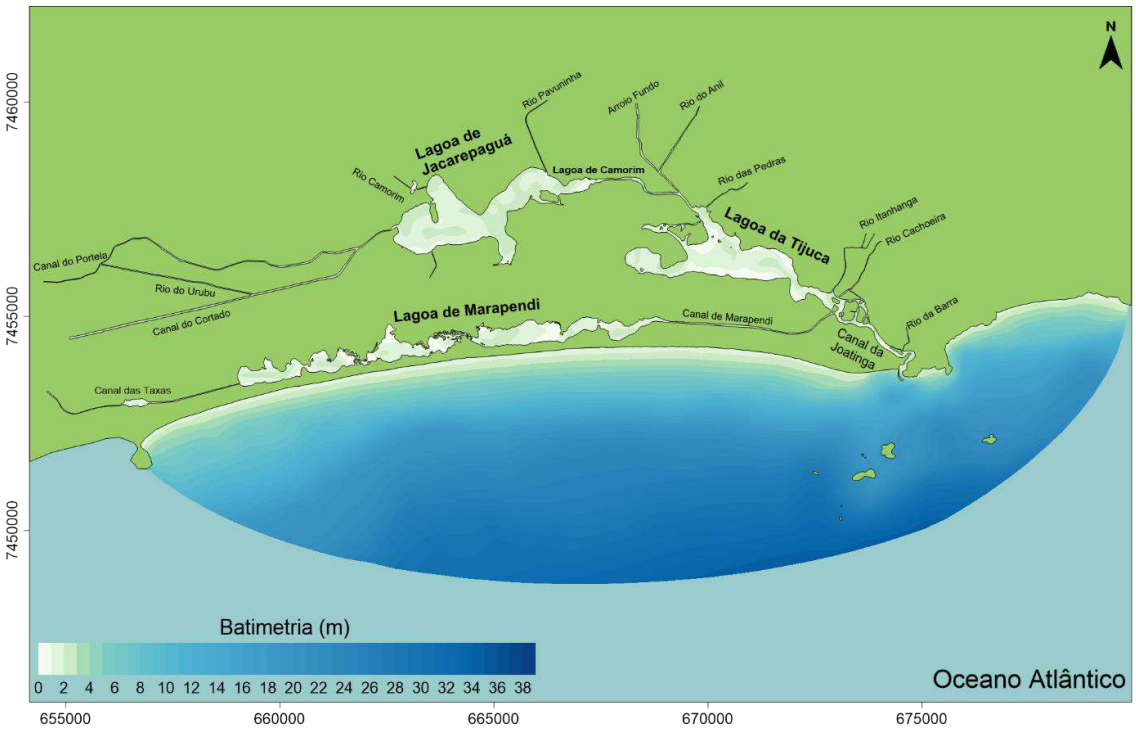


Figura 20. Batimetria utilizada no domínio de modelagem para o cenário com as intervenções de dragagem e de prolongamento do guia corrente no canal da Joatinga.

O que se destaca entre as duas batimetrias são as cavas presentes em nas lagoas da Tijuca, à oeste, e na de Jacarepaguá, ao norte e que no cenário dragado seriam preenchidas com parte do material dragado. No cenário posterior às intervenções é possível notar o aumento da profundidade nas regiões centrais de todas as lagoas do sistema lagunar, que correspondem a um aprofundamento de -2 m nos canais, e o preenchimento das cavas até a cota -2 m.

5.1.3. Rugosidade Equivalente no Fundo

A tensão de atrito no fundo depende da amplitude da rugosidade equivalente de fundo que é determinada em função da sua natureza. Os valores desta rugosidade devem ser dados ao modelo hidrodinâmico em todo seu domínio. Estes são adotados através de uma aproximação seguindo os valores sugeridos por Abbot e Basco (1989) adaptado por Rosman (2017), como já mostrado na Tabela 5.

Estudos anteriores (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2015; MASTERPLAN, 2013) consideram que o fundo do SLJ é composto por silte na Lagoa da Tijuca e areia média nas demais lagoas e canais. Na região de mar aberto do domínio considerou-se um fundo com areias variando de fina a média. Nos pontos de cálculo que correspondem ao guia corrente e de estruturas de enrocamento contidas na embocadura do Canal da Joatinga, foi considerado fundo com rochas. Portanto, para o fundo siltoso foi determinada amplitude de rugosidade de 0,001 m, para o arenoso de 0,030 m e para as

regiões com rochas, 0.250 m. A Figura 21 e a Figura 22 mostram a interpolação resultante dos dados de rugosidade no domínio de modelagem.

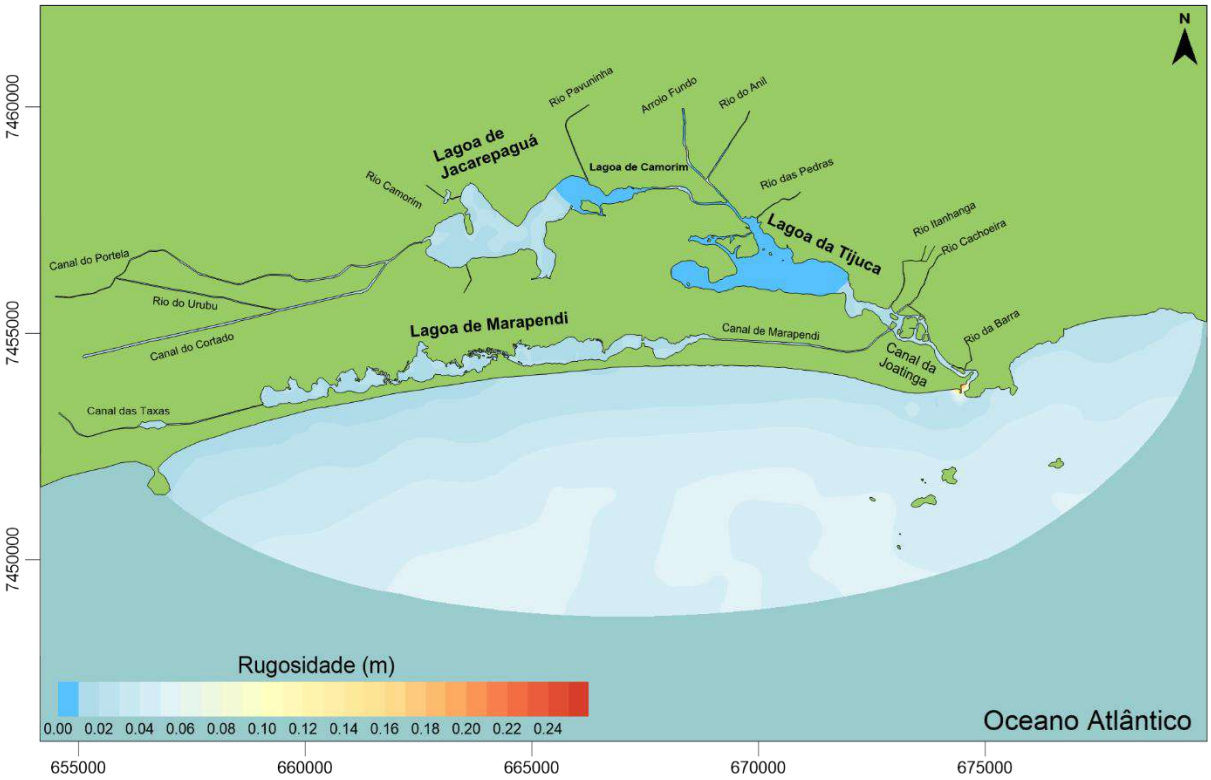


Figura 21. Rugosidade equivalente discretizada para o domínio de modelagem do cenário atual.

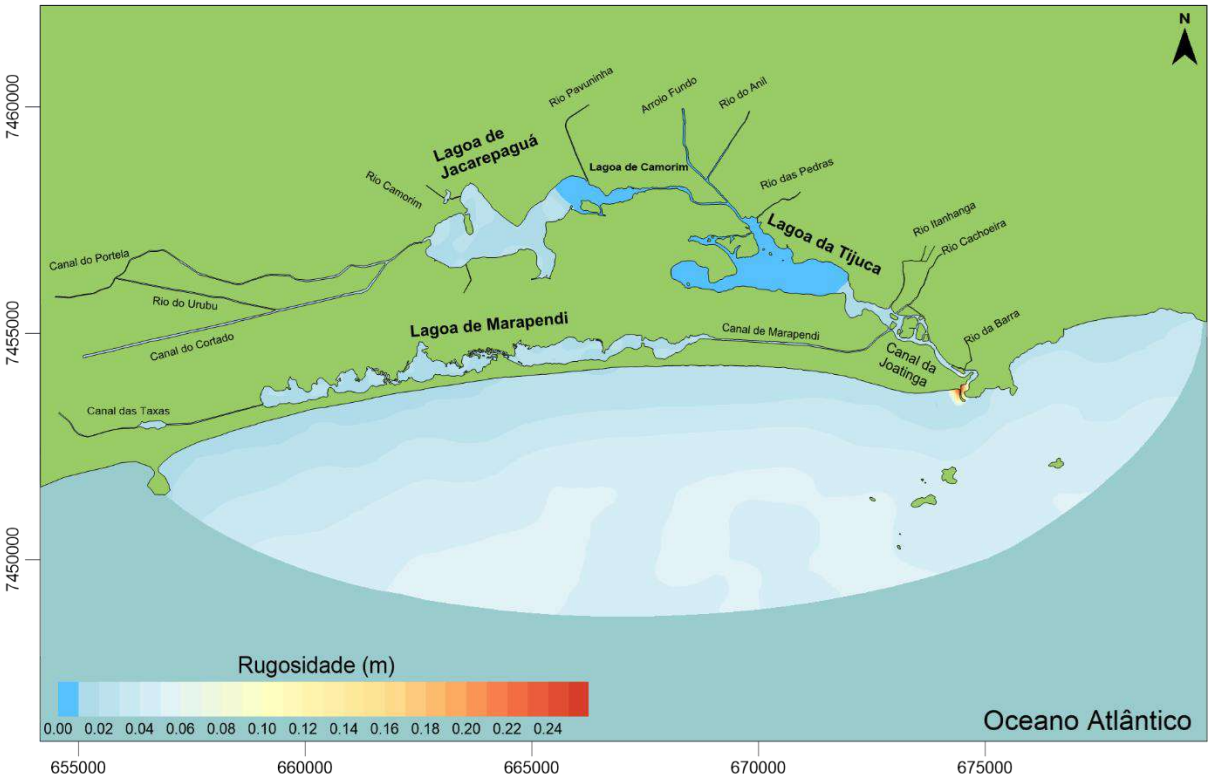


Figura 22. Rugosidade equivalente discretizada para o domínio de modelagem do cenário com o guia-correntes prolongado.

5.2. Modelo Hidrodinâmico

Neste item estão descritos os dados ambientais utilizados como forçantes, condicionantes para a modelagem da hidrodinâmica do SLJ.

5.2.1. Dados de Vento

A tensão de atrito do vento na superfície livre é calculada pelo modelo ao prescrever valores de velocidades e direção dos ventos em cada nó da malha no domínio. Para esta representação foi utilizada uma série temporal de velocidades e direções em uma estação de vento variável no tempo e, portanto, homogêneo no espaço.

Os dados de ventos utilizados neste trabalho são de reanálise disponibilizados pelo ECMWF, do ERA-Interim (ERA-INTERIM, 2016). Obteve-se a série temporal a cada seis horas da intensidade do vento em U e V nas seguintes coordenadas: 22°59’54,19’’S e 43°23’23,73’’O, marcadas no mapa da Figura 23.

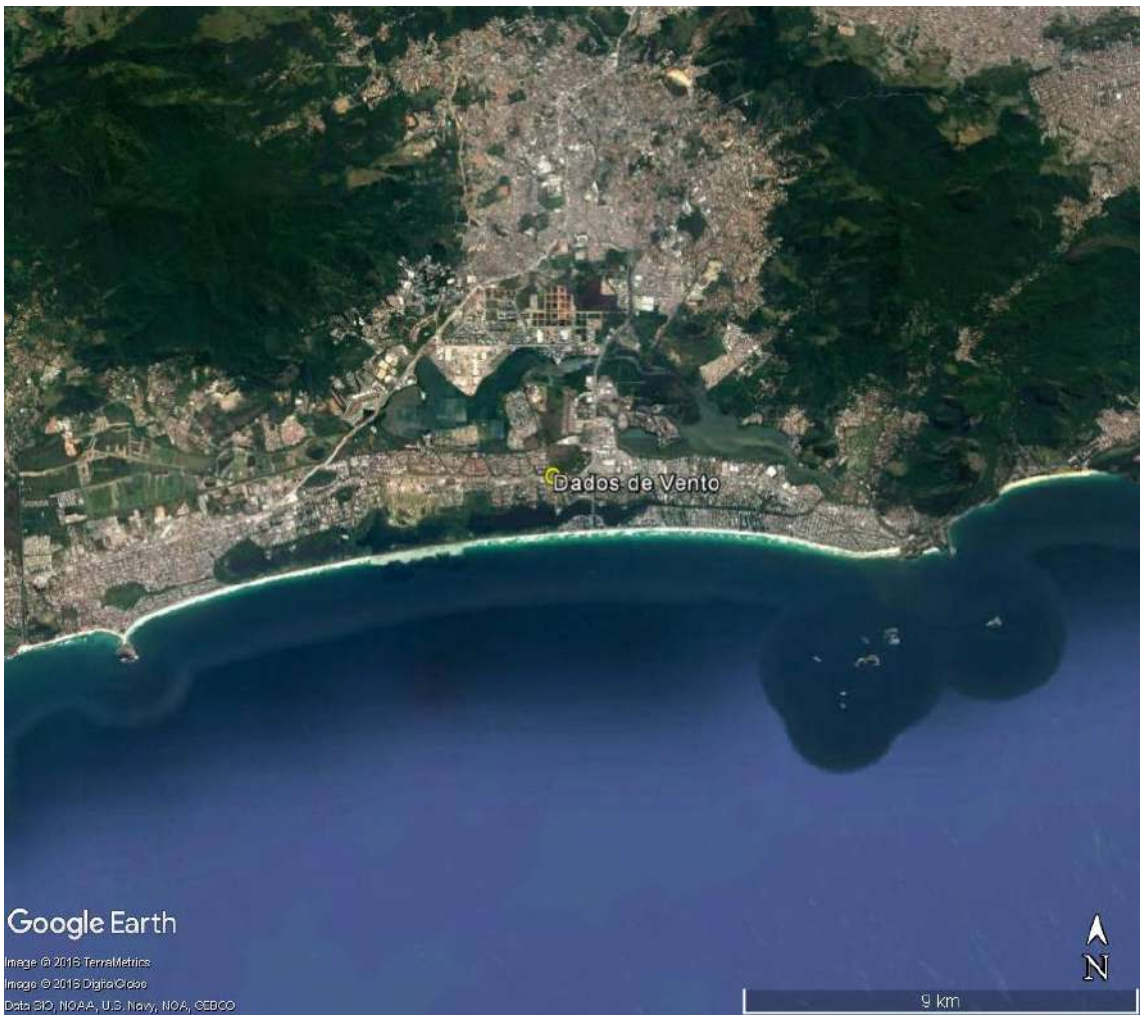


Figura 23. Localização da estação na qual foram retirados os dados de reanálise dos ventos, a partir do ECMWF.

As imagens da Figura 24 e da Figura 25 ilustram os padrões de ventos obtidos para os meses de janeiro e julho que foram utilizados para as modelagens deste trabalho. Os ventos possuem certa predominância na direção nordeste-sudeste e velocidade máxima de 8.5 m/s. Estes ventos mais intensos são de nordeste no mês de janeiro e no mês de julho são de sudoeste, devido a maior passagem de frentes frias por ser inverno. Nas duas estações os ventos mais fracos possuem direções predominantemente leste/nordeste, mostrando-se coerentes com a descrição dos ventos dada pela COHIDRO (2006).

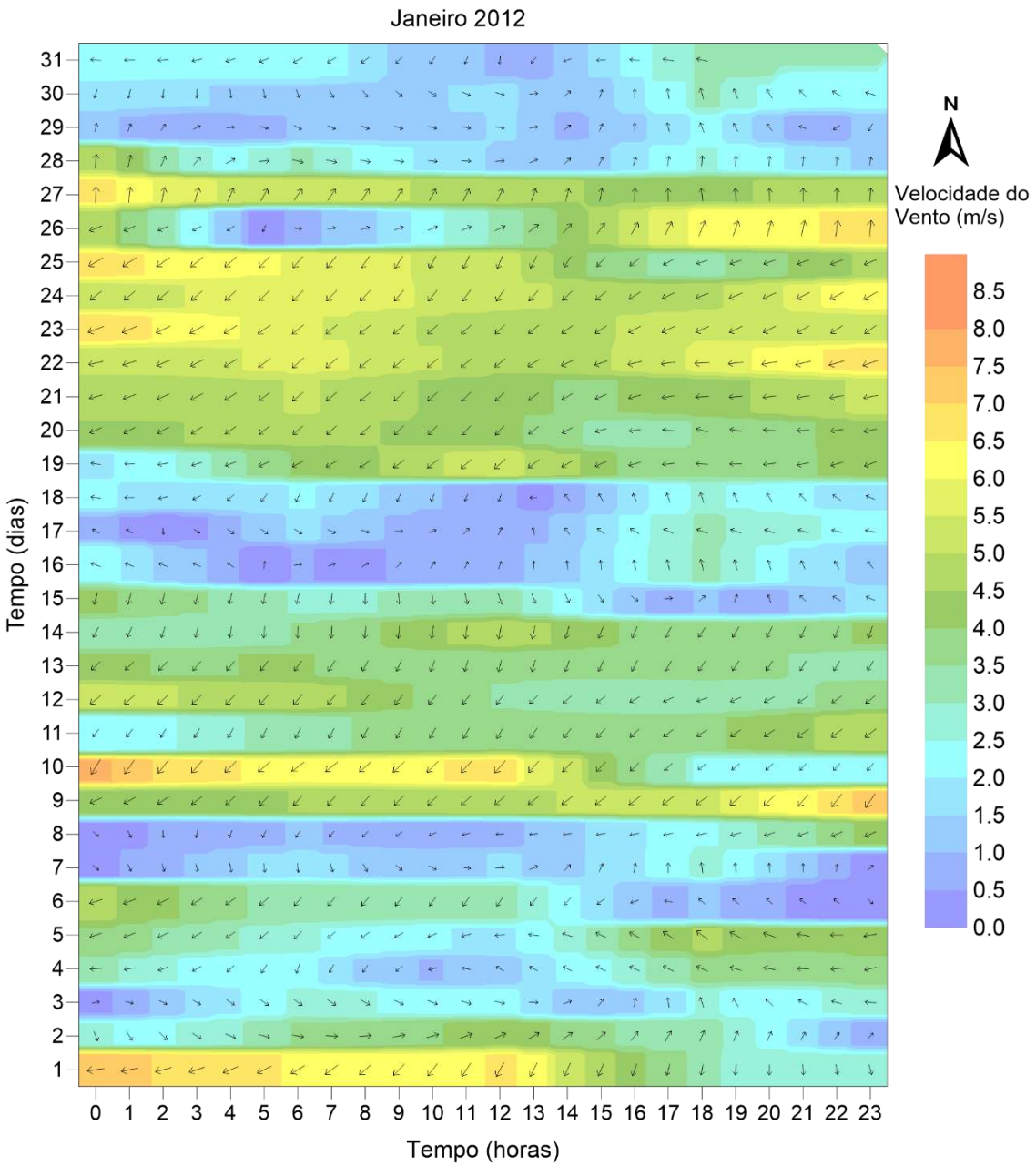


Figura 24. Dados de ventos representativos do mês de janeiro de 2012 inseridos no modelo hidrodinâmico. As setas indicam a direção do vento, o tamanho delas e o padrão de cores ao fundo indicam a intensidade.

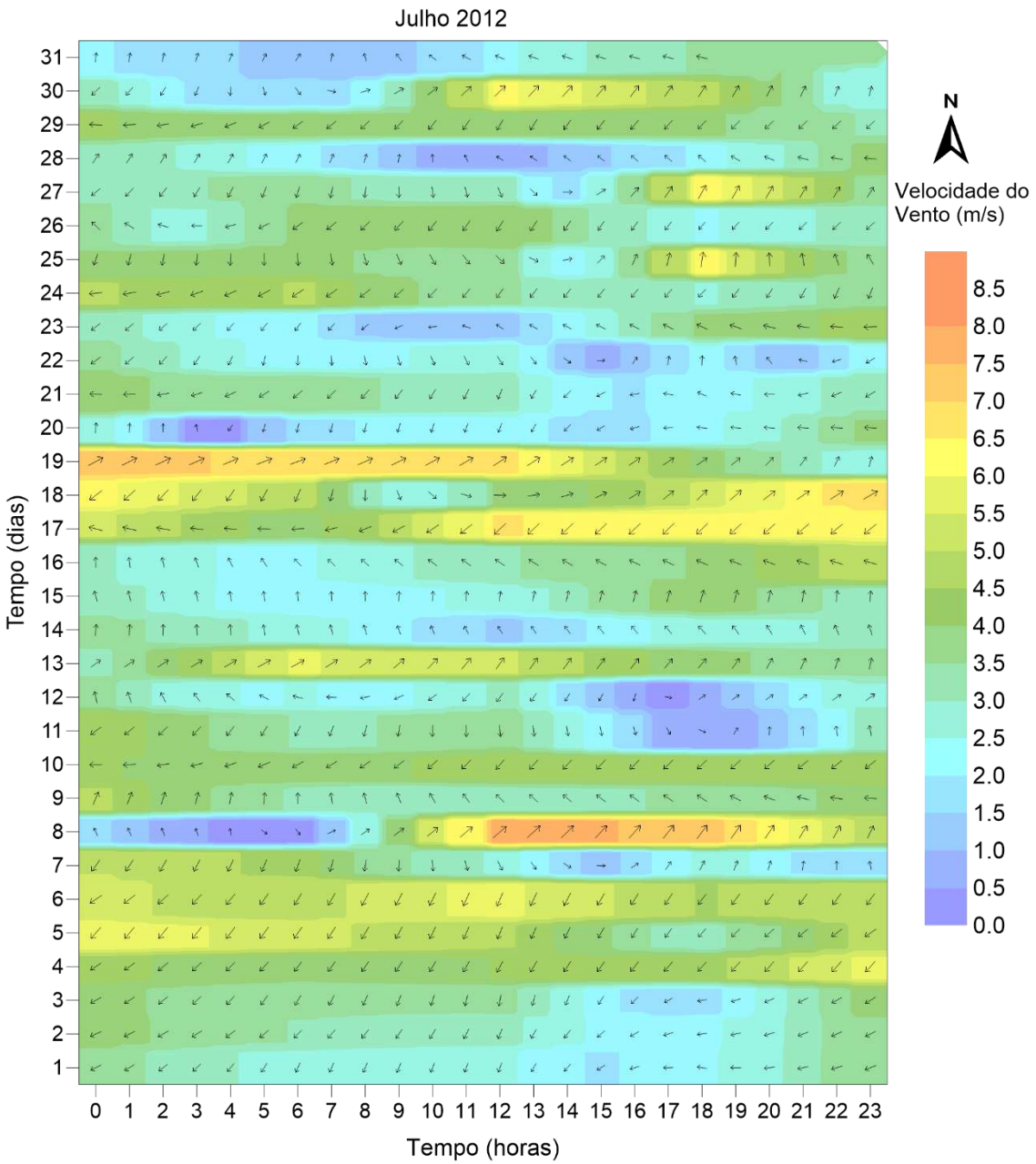


Figura 25. Dados de ventos representativos do mês de julho de 2012 inseridos no modelo hidrodinâmico. As setas indicam a direção do vento, o tamanho delas e o padrão de cores ao fundo indicam a intensidade.

5.2.2. Marés

A maré inserida na fronteira aberta é composta pela combinação da maré astronômica com maré meteorológica representativa do domínio das modelagens. A maré astronômica utilizada foi gerada a partir das constantes obtidas da Fundação de Estudos do Mar, referente a estação Recreio dos Bandeirantes (FEMAR, 2016), representadas pela Tabela 6. A série gerada para as datas definidas paras as modelagens deste estudo estão representadas pela Figura 26 e pela Figura 27.

Tabela 6. Tabela da FEMAR contendo as constantes harmônicas e seus respectivos valores de período, amplitude e fase para a estação Recreio dos Bandeirantes – RJ.

Recreio do Bandeirantes			
Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (rad)
SN4	22176.69402	0.009	0
M4	22357.0822	0.036	0.384
Q1	96726.08402	0.027	0.925
mu2	46338.32748	0.04	1.1694
K2	43082.04524	0.044	1.3439
S2	43200	0.162	1.3614
T2	43259.21711	0.009	1.3614
M2	44714.16439	0.304	1.4137
O1	92949.62999	0.115	1.4312
MS4	21972.0214	0.02	1.8151
nu2	45453.61588	0.007	2.1118
N2	45570.05368	0.039	2.2166
P1	86637.20458	0.024	2.4609
K1	86164.09076	0.073	2.5482
2N2	46459.34813	0.005	3.0369
M3	29809.44293	0.01	3.1416
MN4	22569.02607	0.013	5.8818

Figura 26. Previsão da maré astronômica para o mês de janeiro de 2012 com as constantes harmônicas obtidas da FEMAR da estação Recreio dos Bandeirantes.

Figura 27. Previsão da maré astronômica para o mês de julho de 2012 com as constantes harmônicas obtidas da FEMAR da estação Recreio dos Bandeirantes

A maré meteorológica extraída da série de dados de elevação provenientes da estação maregráfica da Ilha Fiscal foi combinada a maré astronômica da estação Recreio dos Bandeirantes. Estes dados foram obtidos do sistema de monitoramento de dados de elevação no Brasil, o Global Sea Level Observing System (GLOSS, 2016). As séries de elevações para esta estação estão representadas pela Figura 28 e da Figura 29.

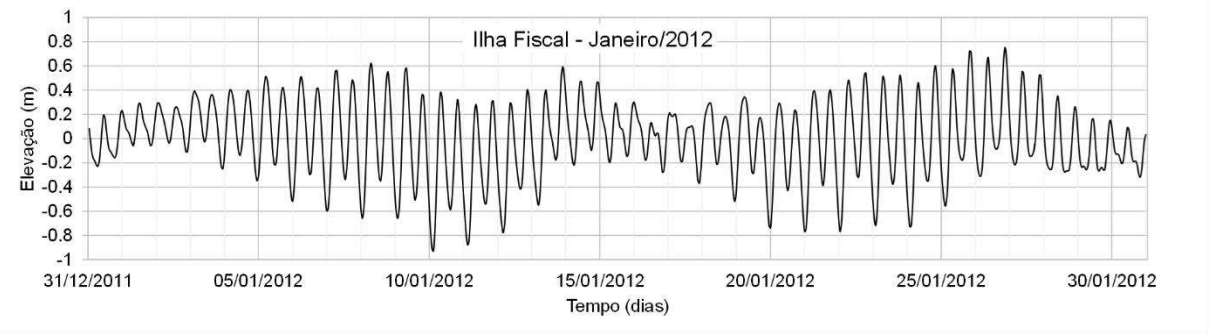


Figura 28. Série temporal dos dados de elevação de janeiro de 2012 provenientes do marégrafo localizado na Ilha Fiscal.

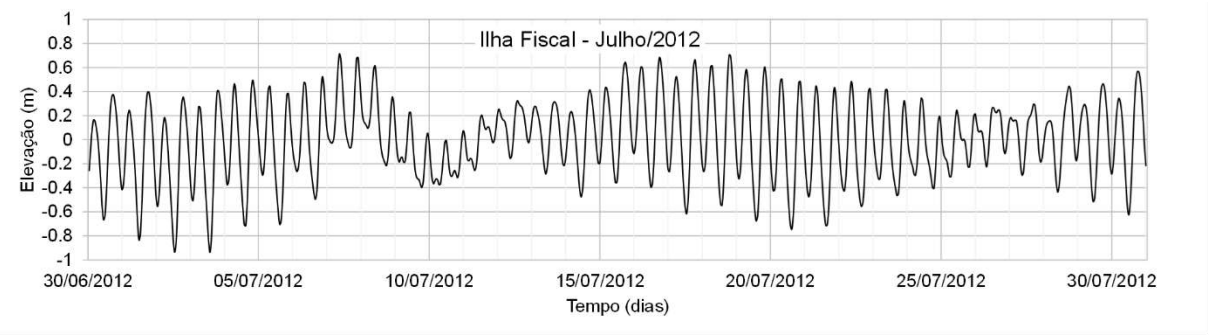


Figura 29. Série temporal dos dados de elevação de julho de 2012 provenientes do marégrafo localizado na Ilha Fiscal.

Foi feita análise harmônica destas séries de dados e em seguida a previsão da maré astronômica destas séries como mostram os gráficos abaixo da Figura 30 e da Figura 31.

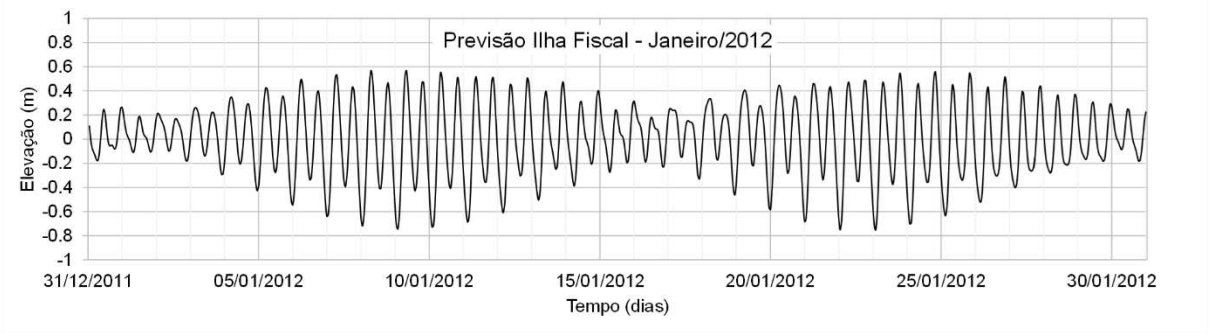


Figura 30. Previsão da maré para janeiro de 2012 resultante das constantes harmônicas obtidas da análise da série de dados de elevação da Ilha Fiscal.

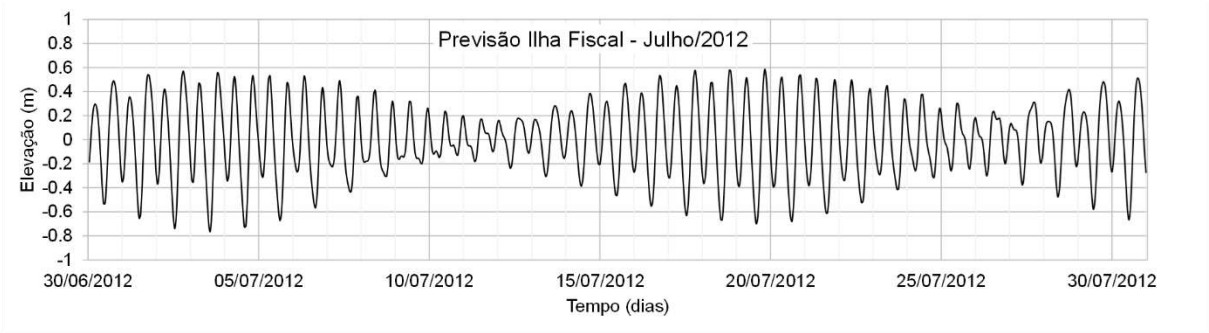


Figura 31. Previsão da maré para julho de 2012 resultante das constantes harmônicas obtidas da análise da série de dados de elevação da Ilha Fiscal.

Uma perturbação de longa duração em uma série de registros de dados de nível pode ser identificada e analisada com filtro de passa-baixa. Portanto, todas as oscilações diurnas, semidiurnas e de frequências mais altas da maré astronômica seriam eliminadas. Contudo, as componentes meteorológicas de escala de tempo menores que um dia também seriam eliminadas, inclusive mudanças na amplitude e fase de constituintes de maré astronômicas oriundas da interação entre estes dois fenômenos.

Com isso, a altura da maré meteorológica pode ser obtida subtraindo a altura da maré astronômica prevista a partir da série de elevações medidas (BOWDEN, 1983). Da série obtida desta diferença (Figura 32 e Figura 33), foi passado um filtro gaussiano resultando na série representada pelos gráficos da Figura 34 e da Figura 35.

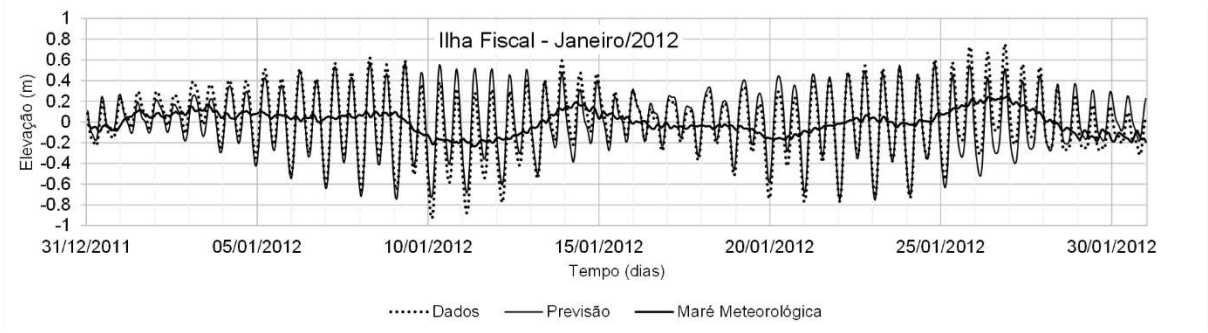


Figura 32. Séries temporais de elevações de janeiro de 2012 dos dados da Ilha Fiscal, da previsão da maré astronômica para o mesmo local e a subtração de uma série a outra, resultando na maré meteorológica.

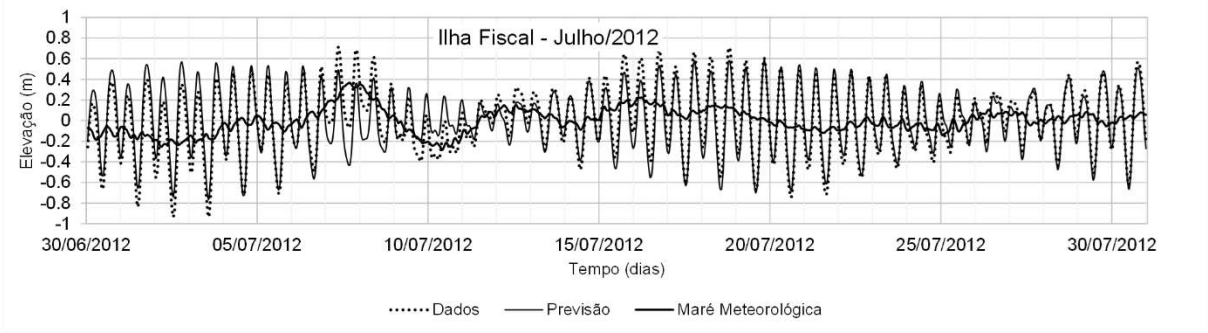


Figura 33. Séries temporais de elevações de julho de 2012 dos dados da Ilha Fiscal, da previsão da maré astronômica para o mesmo local e a subtração de uma série a outra, resultando na maré meteorológica.

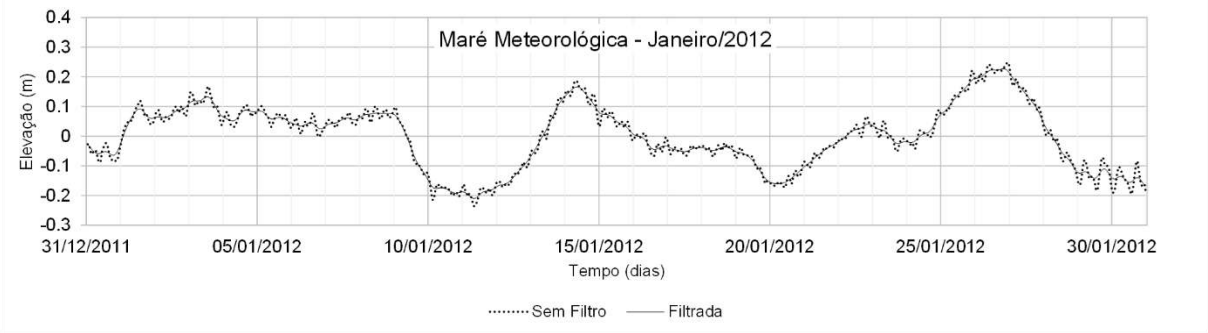


Figura 34. Maré Meteorológica referente ao mês de janeiro de 2012, obtida do registro de elevações da Ilha Fiscal sem filtro e com filtro Gaussiano.

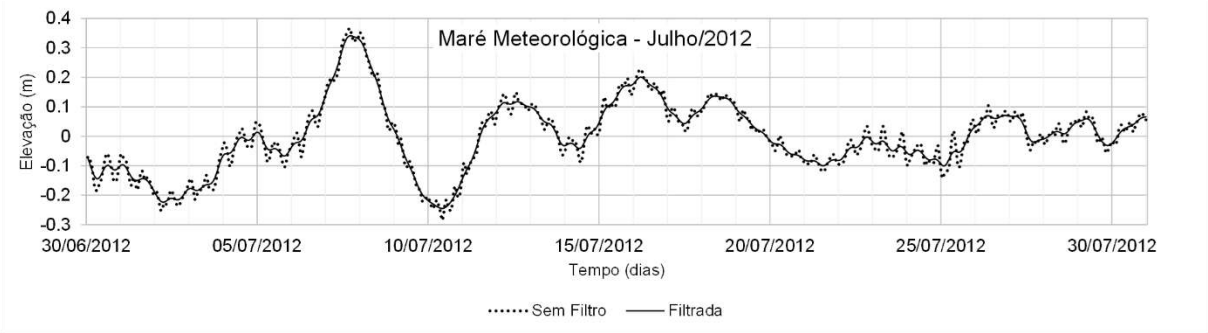


Figura 35. Maré Meteorológica referente ao mês de julho de 2012, obtida do registro de elevações da Ilha Fiscal sem filtro e com filtro Gaussiano.

A maré meteorológica obtida foi somada a maré astronômica prevista das constantes da estação Recreio dos Bandeirantes, resultando então nas marés inseridas na fronteira aberta dos modelos hidrodinâmicos de janeiro e julho de 2012. As séries resultantes estão dispostas na Figura 36 e na Figura 37.

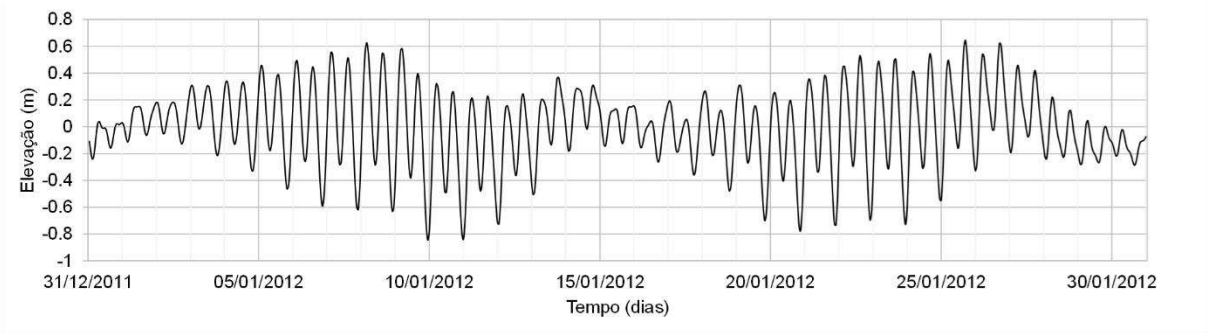


Figura 36. Maré referente ao mês de janeiro de 2012 utilizada como forçante maregráfica nas modelagens.

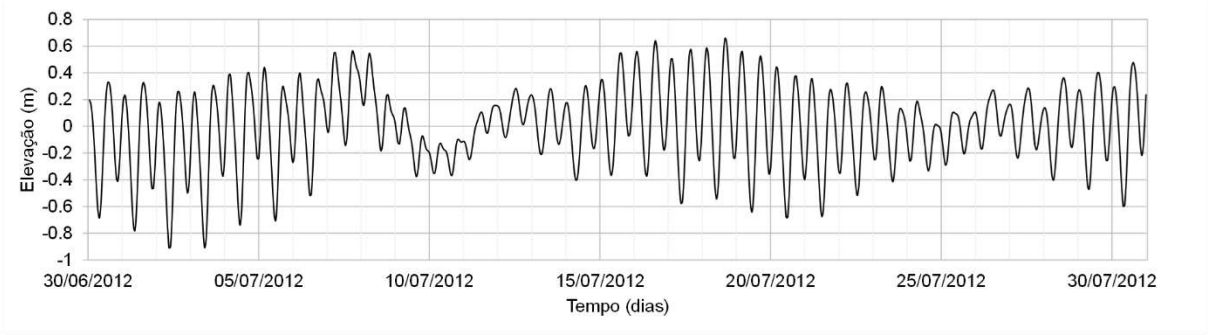


Figura 37. Maré referente ao mês de julho de 2012 utilizada como forçante maregráfica nas modelagens.

5.2.3. Vazões Fluviais

As vazões fluviais são prescritas nos nós da fronteira terrestre do modelo que correspondem aos rios afluentes. Foram prescritas vazões médias para os rios e canais. Estes valores foram obtidos de duas fontes:

- Relatório da Masterplan, dados de precipitação do Banco de Dados Climáticos do Brasil. Este relatório apresenta vazões calculadas para períodos seco e chuvoso a partir das precipitações através do método racional. Para este trabalho foram consideradas as vazões de período chuvoso para o mês representativo de verão e de período seco para o mês representativo de inverno (MASTERPLAN, 2013).
- Relatório PEC-7659, dados cedidos pelos seguintes órgãos: Departamento de Hidrologia da Divisão de Recursos Hídricos da SERLA (atual INEA) e da Fundação Rio Águas. As vazões correspondem a médias anuais e foram calculadas através do método racional também (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2006).

Tabela 7. Vazões médias para os períodos chuvoso e seco inseridos nos modelos hidrodinâmico, de janeiro e julho, respectivamente. Em preto estão os dados provenientes da Masterplan e em cinza do PEC-7659 (2006).

Rio	Q seco (m^3/s)	Q chuvoso (m^3/s)
Canal do Portelo	0.0209	0.0368
Canal do Cortado	0.3018	0.5311
Arroio Fundo	0.7687	1.353
Rio do Anil	0.2181	0.3839
Rio Itanhanga	0.0394	0.0693
Canal das Taxas	0.0026	0.0046
Canal do Urubu	0.058	0.058
Arroio Pavuna	0.551	0.551
Rio das Pedras	0.183	0.183
Rio Cachoeira	0.436	0.436

5.2.4. Condicionantes

Para chegar à solução de equações de águas rasas é necessário que seja dado um grupo consistente de condições iniciais e de contorno. No caso da circulação hidrodinâmica estas duas condições de contorno são estabelecidas através do campo de velocidade e da elevação da superfície livre da água.

Condições de Contorno

A principal forçante imposta ao longo do contorno aberto é a elevação da superfície. Duas forçantes foram consideradas para as modelagens, a maré prescrita para cada nó da fronteira aberta e a maré meteorológica que rege correntes paralelas a costa.

Para que as marés entrem em todo domínio de modelagem de forma coerente, esta maré é prescrita para o primeiro nó da esquerda para direita na fronteira aberta. Aos demais nós, nesta ordem, é adicionado um valor que corresponde à diferença de fase que esta maré apresenta. A diferença de fase foi calculada utilizando duas estações maregráficas da FEMAR próxima as duas extremidades do domínio de modelagem. De acordo com o domínio aqui proposto temos as estações de Recreio dos Bandeirantes já apresentada, e de Copacabana, cujas constante estão na Tabela 8. A Figura 40 apresenta a localização destas estações.

Tabela 8. Constantes harmônicas e seus respectivos período, amplitude e fase para a estação maregráfica de Copacabana da FEMAR.

Copacabana - RJ			
Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (rad)
M2	44714.16	0.303	1.3788
S2	43200.00	0.172	1.5184
O1	92949.63	0.107	1.5010
K1	86164.09	0.063	2.6529
N2	45570.05	0.038	2.1118
M4	22357.08	0.034	0.5934
Q1	96726.08	0.028	1.0123
mu2	46338.33	0.015	1.4486
MS4	21972.02	0.015	2.1991
MN4	22569.03	0.015	6.1261
M1	89399.69	0.009	2.1991
MO3	30190.69	0.005	0.6632
M3	29809.44	0.005	3.4208

O cálculo foi feito considerando que a constante mais representativa M2, por ter uma maior amplitude que as demais e, portanto, ser mais significativa. A Tabela 9 mostra a fase da M2 em cada estação, chegando a diferença de fase da maré existente entre estas duas estações de 1.99°.

Tabela 9. Fase da componente harmônica M2 em graus.

Estação	Fase da M2 (°)
Recreio dos Bandeirante	80.92
Copacabana	78.99

Sabendo o período da M2 é de 44714.16 s em 360° de fase então o tempo que a maré leva de uma estação a outra é de aproximadamente 248,36 s. Aplicando o mesmo princípio, através de regra de três, sabe-se que esta diferença entre as extremidades do domínio de modelagem é de aproximadamente 191,25 s. No SisBaHiA® a maré é inserida no primeiro nó de fronteira aberta (orientado no sentido trigonométrico) e a defasagem de maré é calculada linearmente para cada nó de fronteira aberta do modelo.

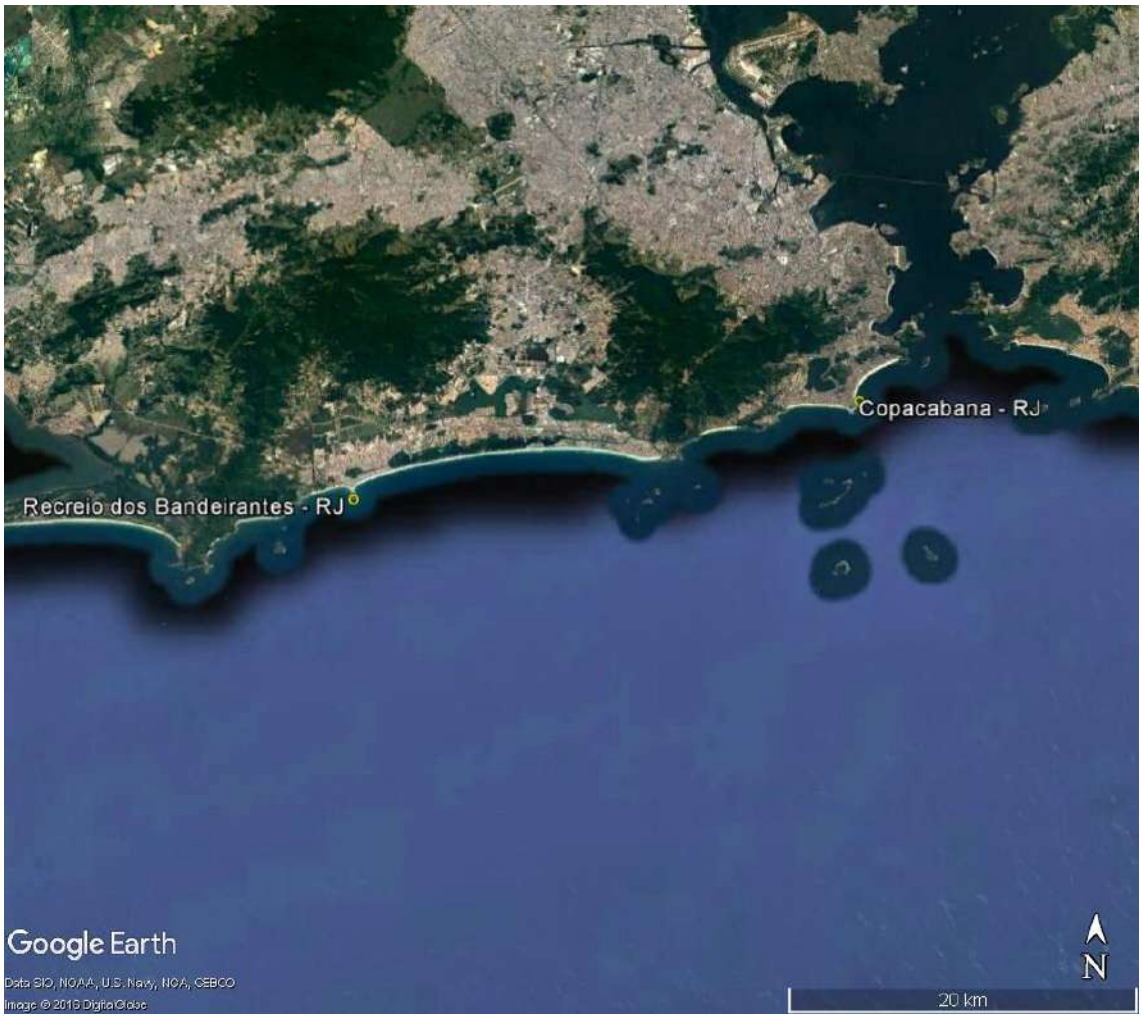


Figura 38. Localização das estações utilizadas para o cálculo da diferença de fase.

Outra condição de fronteira inserida ao domínio de modelagem foi a série de valores do nível médio diferencial da região, descritas na seção 5.1.5 e representadas pela Figura 34 e pela Figura 35. Como explicado no Capítulo 3, na seção sobre as forçantes oceanográficas da região, existem correntes residuais no domínio de modelagem que são regidas pelos eventos meteorológicos que afetam a região. Estas correntes fluem de forma cíclica pelo período de 2 a 8 dias, como os eventos meteorológicos, e invertem seu sentido por período semelhante.

O SisBaHiA® possui uma ferramenta denominada Nível Médio Diferencial (NMD), que consiste em colocar os valores da forçante em questão que gera estas correntes residuais, definir um eixo pivô pelo qual estas correntes se direcionam, a partir de dados previamente analisados. No caso do domínio deste estudo, como já definido anteriormente, estas correntes ocorrem paralelamente a costa, na direção leste-oeste.

Em função da variação do nível do mar, considerou-se no modelo hidrodinâmico áreas que podem sofrer alagamento e secamento, ou seja, áreas alagadas na preamar e secas na baixa-mar. Neste modelo adotou-se o método poroso-rugoso, que considera uma faixa de meio poroso abaixo da superfície do terreno ou do fundo quando coberto por água.

Condições Iniciais

O nível médio do mar está na cota 0.7 m referido a estação da Ilha Fiscal, disposto na Carta Náutica 1506, utilizada para inferir as informações batimétricas da malha. Como a fonte utilizada para definir a batimetria das lagoas tem origem diferente, esta foi corrigida para todo o domínio fosse referenciado igual.

Inicialmente, o valor de elevação colocado no modelo correspondeu ao nível médio adotado somado ao valor da primeira elevação da série inserida no modelo para todos os nós do domínio. Os valores das velocidades transversais e longitudinais inicialmente foram definidos como nulos. Esta é a chamada “partida fria” do modelo, que gera resultados errôneos no início da simulação.

Depois de um determinado tempo rodado, quando o modelo passa a apresentar valores próximos aos reais é escolhido um tempo no qual os valores de elevação sejam próximos a primeira elevação da maré inserida na fronteira aberta. Sabendo o comportamento das velocidades locais a partir de dados do local, as velocidades resultantes são analisadas também. Quando ambos parâmetros apresentarem coerência aos reais, estes são colocados como condição inicial para que o modelo seja rodado de fato, com uma “partida quente”.

5.2.5. Calibração do Modelo Hidrodinâmico

Para confirmar que os modelos rodados representam coerentemente os fenômenos que ocorrem na natureza foi feita a calibração, no qual se compara valores medidos com valores computados através de um processo interativo seguido de ajustes. A calibração de modelos de hidrodinâmica ambiental é um processo que segue três passos:

1. **Calibração geométrica**: aferir se a modelagem digital do terreno do domínio de modelagem representa adequadamente os contornos e batimetrias da região de interesse, garantindo que este represente adequadamente os contornos e batimetrias da região de interesse.
2. **Calibração hidrodinâmica**: aferir se os modelos hidrodinâmicos representam adequadamente a variação de níveis de água e correntes na região de interesse, sob diversas condições, sejam elas marés, ventos e vazões. É importante que estas informações sobre as forçantes da circulação hidrodinâmica local estejam corretas.
3. **Calibração de modelos de transporte de escalares**: aferir se os modelos de transporte de escalares são capazes de representar adequadamente as concentrações de parâmetros de qualidade de água ou vazões sólidas ao longo do tempo. As informações sobre fontes poluentes e sobre taxas de reação de parâmetros não conservativos, como de coliformes tolerantes, sejam corretas.

Uma boa calibração do passo 3 depende fortemente de uma ótima calibração do passo 2, que só é conquistada se a calibração do passo 1 for executada com sucesso.

A execução do passo 1 foi explicada detalhadamente na seção 5.1.1 e 5.1.2. Para o cumprimento do passo 2 foi desenvolvido um modelo de calibração para o período que existem dados medidos em um ponto dentro do domínio de modelagem. Os dados medidos utilizados para a validação foram obtidos pelo Laboratório de Traçadores da COPPE, no período entre 28/03/2008 e 30/04/2008.

Para o desenvolvimento do Modelo de Calibração foi adotada a série temporal de ventos de reanálise, para este período, disponibilizados pelo ECMWF, do ERA-Interim. Dados de vazões utilizados foram os mesmos que para um período chuvoso, descritos na seção 5.1.6, já que o período em questão, início de outono, pode ainda ter características chuvosas.

Os valores de correntes foram disponibilizados pela CEDAE e foram medidos a cada dez minutos pelo Laboratório de Traçadores – COPPE/UFRJ para um estudo desenvolvido pela COPPETEC (2009). As medições foram realizadas com dois equipamentos do tipo ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler, fundeados nas proximidades das linhas difusoras do Emissário Submarino da

Barra da Tijuca (ESBT) e do Emissário Submarino de Ipanema (ESEI), cujas localizações estão dispostas na Figura 39.

Para reproduzir melhor os resultados, os dados de maré utilizados na calibração foram obtidos a partir das medições realizadas próximas a linha difusora do ESEI. A maré prescrita para o primeiro nó da esquerda para direita na fronteira aberta está representada na Figura 40 e assim como no modelo hidrodinâmico, aos demais nós foram adicionados valores que correspondem a diferença de fase neste sentido.

As correntes que fluem na direção Leste-Oeste, e vice-versa, foram reproduzidas em função dos dados de velocidade na direção paralela a costa na região da linha difusora da ESBT, através da ferramenta NMD. Esta foi calculada a partir da aplicação de uma média móvel ao longo da série de velocidades e o resultado está representado pela linha contínua no gráfico da Figura 41. Nesta figura também foi plotada a série temporal do nível médio diário da elevação, também mostrado na Figura 21, mostrando que há uma certa correspondência entre as oscilações causadas por eventos meteorológicos com as velocidades residuais paralelas a costa.

Figura 39. Mapa da região costeira na região metropolitana do Rio de Janeiro e Niterói mostrando, em azul, as fontes poluidoras consideradas pela CEDAE em 2009. Fonte: Fundação Coppetec, 2009.

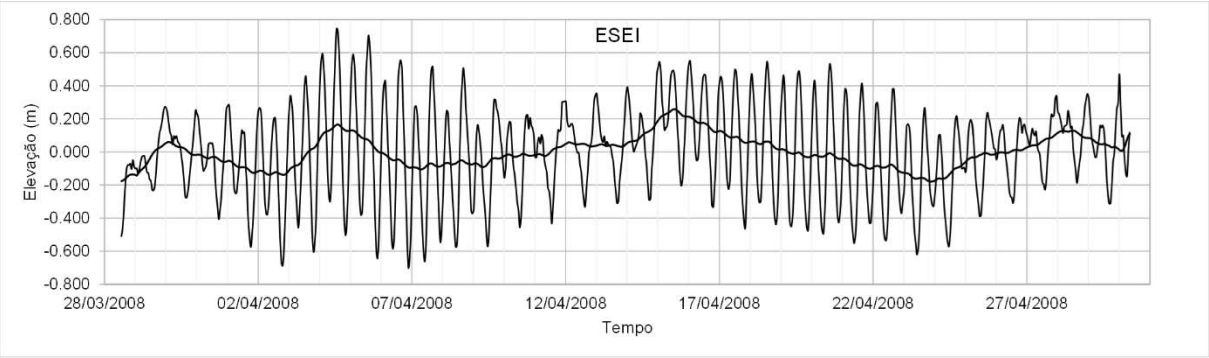


Figura 40. Gráfico referente as elevações medidas nas cercanias da linha difusora do ESEI.

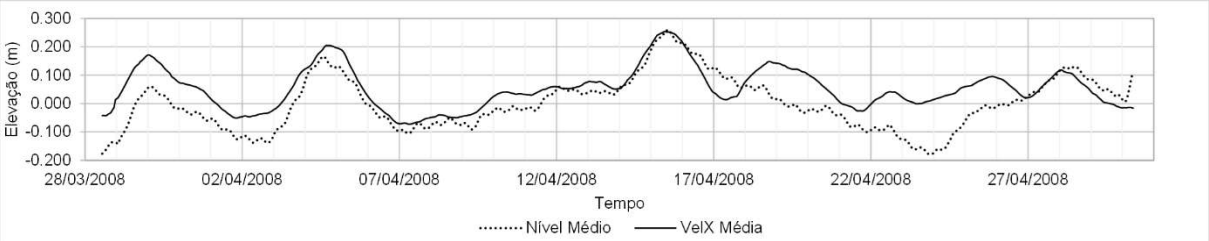


Figura 41 Comparação entre os valores de do nível médio diário obtido a partir dos dados de elevação da ESEI, linha pontilhada. E a linha contínua representa a velocidade média na direção paralela a costa.

Nos modelos hidrodinâmicos a maré meteorológica foi calculada através da diferença entre os dados da Ilha Fiscal e a previsão através da análise harmônica destes dados. Para o mesmo período do modelo de calibração, esta maré meteorológica foi calculada. Comparando a maré obtida com o nível médio dos dados de elevação da ESEI, e também os dados de velocidade na direção leste-oeste na ESBT, é possível notar que ambas possuem ciclos de oscilação muito parecidos. Isto valida o fato da série de maré meteorológica utilizada nos modelos hidrodinâmicos como forçante das correntes residuais paralelas a costa.

As comparações dos valores das velocidades medidas com as modeladas para a região da linha difusora da ESBT estão no gráfico da Figura 23. Os valores da velocidade das correntes norte-sul computadas na modelagem com o SisBaHiA® mostraram-se coerentes aos medidos pelo LT-COPPE em termos de magnitude e períodos das oscilações.

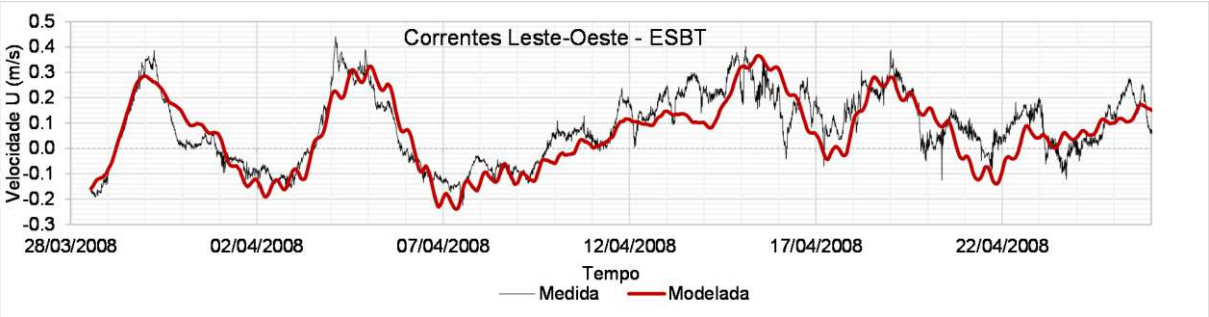


Figura 42. Comparação das correntes de Leste-Oeste dos dados medidos e dos modelados na região da linha difusora da ESBT.

Por questões de escala mínima detectável pelo modelo, este apresenta resultados mais suavizados que os dados medidos. O modelo, portanto, pode não representar movimentos variados e em diversas escalas que existem na natureza. No caso das velocidades das correntes na direção Norte-Sul, Figura 43, há bastante influência de ruídos que podem ter sido detectados devido as ondas, que não foram incluídas nesta modelagem.

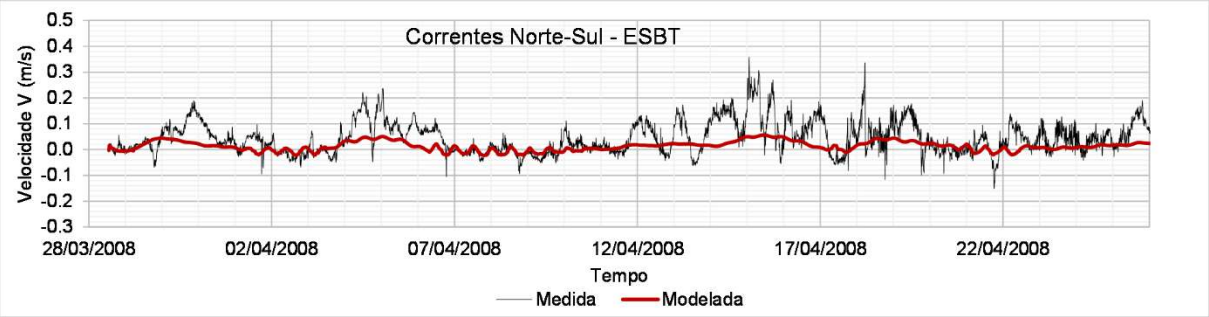


Figura 43. Comparação das correntes de Norte-Sul dos dados medidos e dos modelados na região da linha difusora da ESBT.

Como já descrito na caracterização dos aspectos oceanográficos da região deste estudo, as correntes com direção leste-oeste são as mais importantes para a hidrodinâmica na região externa as lagoas. Além disso, uma boa representação delas indica bons resultados quanto ao transporte advectivo-difusivo ao longo da costa, muito importante para o resultado espacial da concentração dos contaminantes modelados neste trabalho.

Coerências entre os valores calculados e os medidos de concentração de contaminantes são semelhantes as verificadas para a velocidade e direção de correntes. O modelo de transporte destes contaminantes recebem como entradas os resultados de níveis e correntes dos modelos hidrodinâmicos, portanto sua confiabilidade é função da qualidade calibração deste modelo.

5.3. Modelo Transporte Lagrangeano

Para o funcionamento de todas as etapas da sequência metodológica de acoplamentos do modelo de Transporte Lagrangeano, mostrado na Figura 15 da seção 4.3, alguns dados de entrada são necessários. No caso da modelagem deste estudo o modelo de radiação solar não foi incluído em todas as etapas pois séries temporais da radiação durante os períodos das simulações foram inseridas diretamente.

Os valores de radiação solar foram estimados a partir de gráficos destes dados disponibilizados Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2017), representados pela Figura 44 referente ao mês de janeiro, e pela Figura 45 referente ao mês de julho. Referenciando as figuras a partir dos valores nos gráficos, foram obtidos os valores de radiação solar máximos de cada dia e estes distribuídos ao longo em horas através de interpolação harmônica.

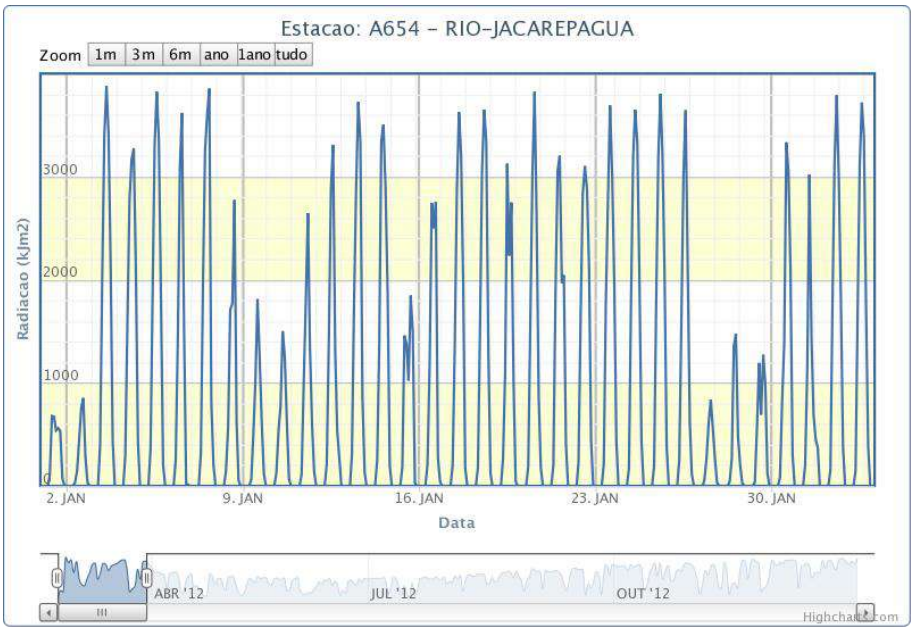


Figura 44. Imagem representativa da série temporal de radiação solar incidente durante o mês de janeiro na estação automática A654, referente ao Aeroporto de Jacarepaguá. Fonte:http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf

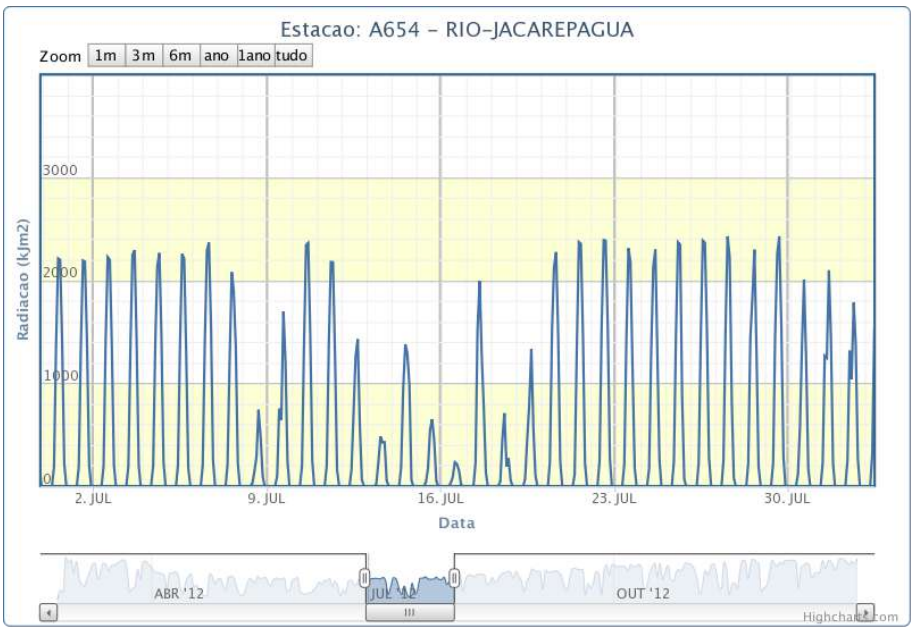


Figura 45 Imagem representativa da série temporal de radiação solar incidente durante o mês de julho na estação automática A654, referente ao Aeroporto de Jacarepaguá. Fonte: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf

Foi feita uma análise quanto aos horários de nascer, de meio-dia e ocaso do Sol, que possui diferenças para o mês de janeiro e de julho. Em janeiro, os dias são mais longos, o do meio-dia solar ocorre por volta das 13h e o Sol se põe por volta das 19h40. Já em julho, o meio-dia solar acontece por volta de 12h e o Sol se põe mais cedo em relação ao verão, por volta das 17h40h. Os valores resultantes de radiação solar para cada mês estão nos gráficos da Figura 46.

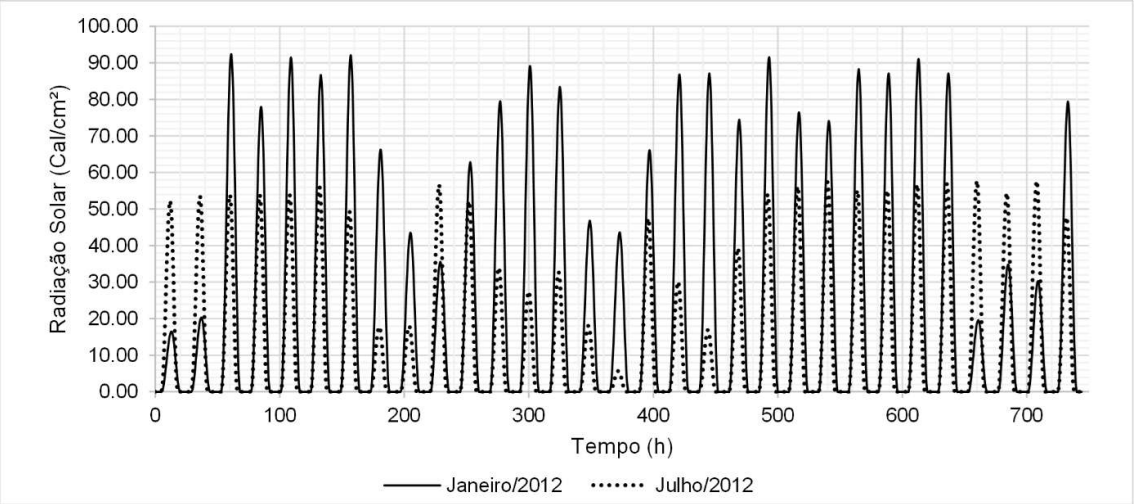


Figura 46. Séries temporais calculadas da radiação solar que foram utilizadas nas modelagens referentes ao cenário de janeiro, em linha contínua e julho, cenário de inverno, em linha pontilhada.

Comparando as duas séries temporais da radiação solar calculada é verifica-se que a radiação solar incidente é maior no verão, quando de fato o Hemisfério Sul está mais exposto a radiação solar. Além disso, a duração dos picos de radiação solar no verão é maior, como já explicado anteriormente, esta estação possui dias mais longos que no inverno.

Na pseudo linha difusora, os dados requeridos para o cálculo da concentração de massa do constituinte são a descarga do efluente e a concentração de coliformes termotolerantes na fonte. Foi inserido como vazão na linha difusora a própria série temporal de vazões na seção da embocadura do canal da Joatinga, calculada para resultados de prismas de maré que serão apresentados na seção 6.2.2 e estão dispostos no gráfico da Figura 80, referente a janeiro e no da Figura 81, a julho.

Já a concentração de coliformes termotolerantes foi estimada a partir da média dos valores da série temporal disponibilizada pela CEDAE. Os dados da série estão dispostos no gráfico da Figura 47, cuja a média resulta em aproximadamente 35000 NMP/100mL, dado de concentração considerado para o cenário atual.

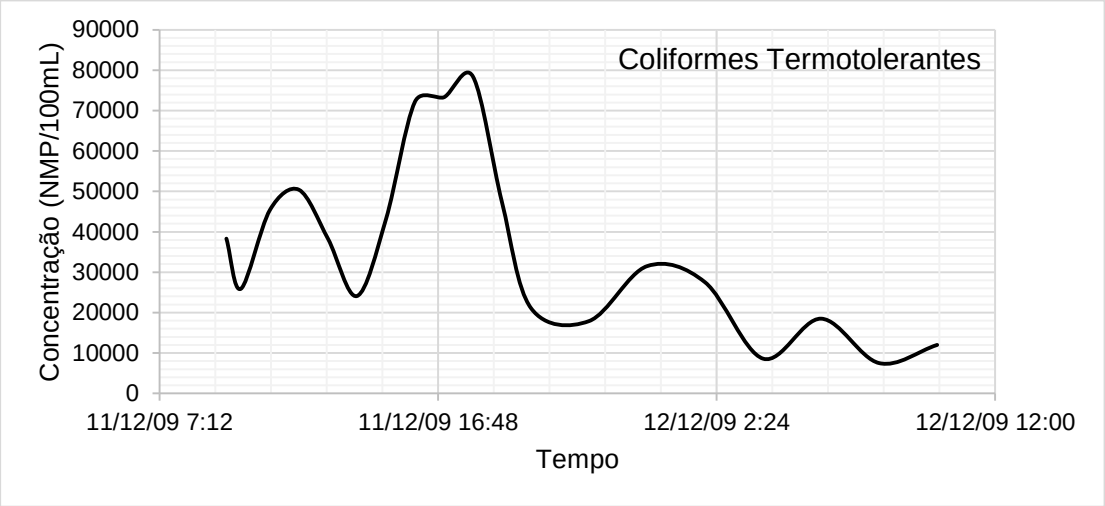


Figura 47. Série temporal de concentrações de coliformes termotolerantes no canal da Joatinga. Fonte: CEDAE.

Conhecendo a vazão emitida *Q* e a concentração *C*, a carga da fonte é definida através da expressão: $\Theta = Q \times C$. A vazão varia de acordo com a entrada das marés no canal da Joatinga e no cenário com as obras houve o aumento do volume de águas que entram através do canal. Sabendo que a carga deve-se manter para o segundo cenário, faz-se necessário o cálculo do fator de diluição para esta modelagem.

O fator de diluição calculado baseou-se na razão entre a média das vazões do cenário atual e a média das vazões para o cenário posterior as obras resultou em aproximadamente 0.57 para os cenários de janeiro e julho. O fator de diluição foi multiplicado a concentração de coliformes termotolerantes estimada da curva de concentração resultando em cerca de 20000 NMP/100mL para que a carga simulada fosse a mesma para ambos os cenários.

E para concluir o cálculo da quantidade de massa do constituinte, é necessário dar o número de partículas para que o modelo simule a advecção dos coliformes termotolerantes e resulte nas plumas de concentração. A experiência mostra que para uma pluma ficar bem representada por uma nuvem de partículas é recomendado um mínimo de 2000 partículas. Para uma boa resolução deste cálculo, estimou-se a emissão de oito partículas a cada cem segundos, passo de tempo escolhido para as simulações de acordo com o decaimento dos indicadores que têm tempo de vida de aproximadamente de dez horas.

Os perfis de temperatura, tanto para o inverno quanto para o verão, inseridos neste modelo foram obtidos a partir de medições feitas pelo LT/COPPE durante o período de novembro de 1996 a janeiro de 1998 nas cercanias do ESEI. Os dados foram obtidos por uma cadeia de termistores a

cada meia-hora, entre 7.7 e 27.7 metros com espaçamento de 2 metros entre os sensores e estão expostos de forma gráfica na Figura 48. Os valores de salinidade foram estimados em 34.4 para todo perfil e para ambas estações como no estudo de Carvalho (2003).

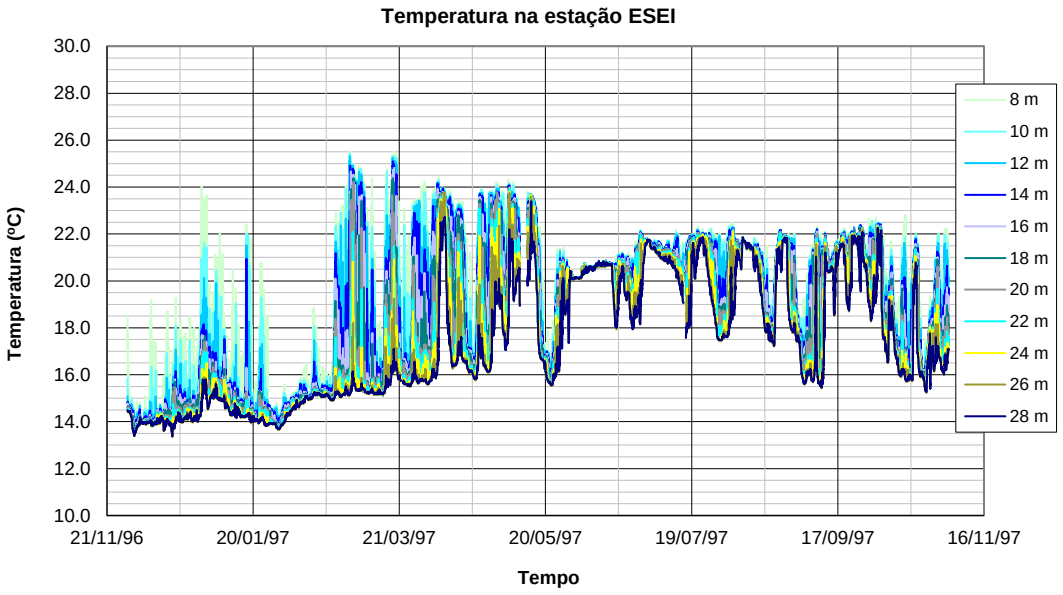


Figura 48.Séries temporal dos valores de temperatura medidos nas cercanias do Emissário Submarino de Ipanema utilizados no Modelo de Transporte Lagrangeano. Fonte: LT-COPPE

5.4. Cenários Simulados

Para caracterizar a diferença entre o cenário atual e o posterior aumento da embocadura do canal com o prolongamento do guia-correntes do canal da Joatinga e dragagem das lagoas, dois principais cenários foram modelados:

- Cenário 1 (C1): cenário correspondente a situação atual do SLJ.
- Cenário 2 (C2): cenário com as obras hidráulicas propostas.

Devido as diferenças sazonais nos padrões de ventos, marés, descargas fluviais e radiação solar, para cada um dos destes dois cenários foram modelados uma situação de verão, correspondente a janeiro de 2012 e outra de inverno, a julho de 2012. Então quatro modelos hidrodinâmicos foram simulados e para cada um dos quatro foram rodados os modelos de transporte euleriano e o de transporte lagrangeano.

6. RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os resultados do modelo de propagação de ondas, das modelagens hidrodinâmicas, da taxa de renovação das águas do SLJ e, por fim, do modelo de transporte lagrangeano.

6.1. Nova Configuração do Guia-correntes

Com o prolongamento do guia-correntes e aumento da embocadura do canal da Joatinga, espera-se que a hidrodinâmica local melhore, auxiliando na renovação das águas do SLJ. Assim sendo, as águas das praias adjacentes poderiam estar menos sujeitas a dispersão da descarga de efluentes, ricos em nutrientes e matéria orgânica, que o canal viabiliza que entre na água do mar. Diferente do que foi apresentado pelo relatório da Masterplan (2013), Figura 9, o presente estudo não preocupou-se com a estrutura do guia-correntes e sim a melhor configuração que objetiva a melhora da qualidade das águas do SLJ.

Foi proposto o aumento da área da seção hidráulica em aproximadamente 25 m na embocadura deste canal de ligação com o mar, no qual hoje é o ponto mais estreito de todos os canais. Aumentar a largura da seção além dos 25 m não seria necessário pois há seções menores ao longo do canal, como é possível ver próximo a estrada da imagem da Figura 49. Aumentar a seção da embocadura e desobstruir o canal é possível apenas modificando a seção final do guia-correntes, implementando seu prolongamento a partir do atual, o que é uma alternativa economicamente favorável que também melhora a navegabilidade do canal.

Figura 49. Esquema do novo guia-correntes prolongado proposto.

Para justificar a forma do guia-correntes reconfigurado e mostrar que esta configuração oferece maior proteção para o canal foram propagadas ondas mais frequentes monocromáticas e unidimensionais com o Modelo de Propagação de Ondas (MPO). Estas ondas possuem diferentes direções e períodos de acordo com a direção incidente e permitem avaliar a incidência das mesmas ao atingirem a região de estudo antes e depois da reestruturação do guia-correntes.

As grades de propagação de ondas do MPO são definidas a partir de dados estatísticos de altura de onda significativa (Hs) e período de pico (Tp). Estes dados foram obtidos através da base de dados do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil), por meio do módulo SMC-Tools. O módulo utiliza a base de dados de reanálise DOW (Downscaled Ocean Waves), pelo período de 60 anos, para analisar o clima de ondas em diferentes pontos da costa brasileira em águas rasas e profundas. Cada um dos pontos DOW fornece dados estatísticos de Hs, Tp e direção média (θ_m).

O ponto DOW escolhido está localizado nas coordenadas de latitude: -24,168°S e longitude: -43,336°O a aproximadamente 200 metros de profundidade, como mostra a Figura 50. Como explicado na seção 4.4, a formação das ondas que chegam à costa se dá em águas profundas o que justifica a escolha desta localização.

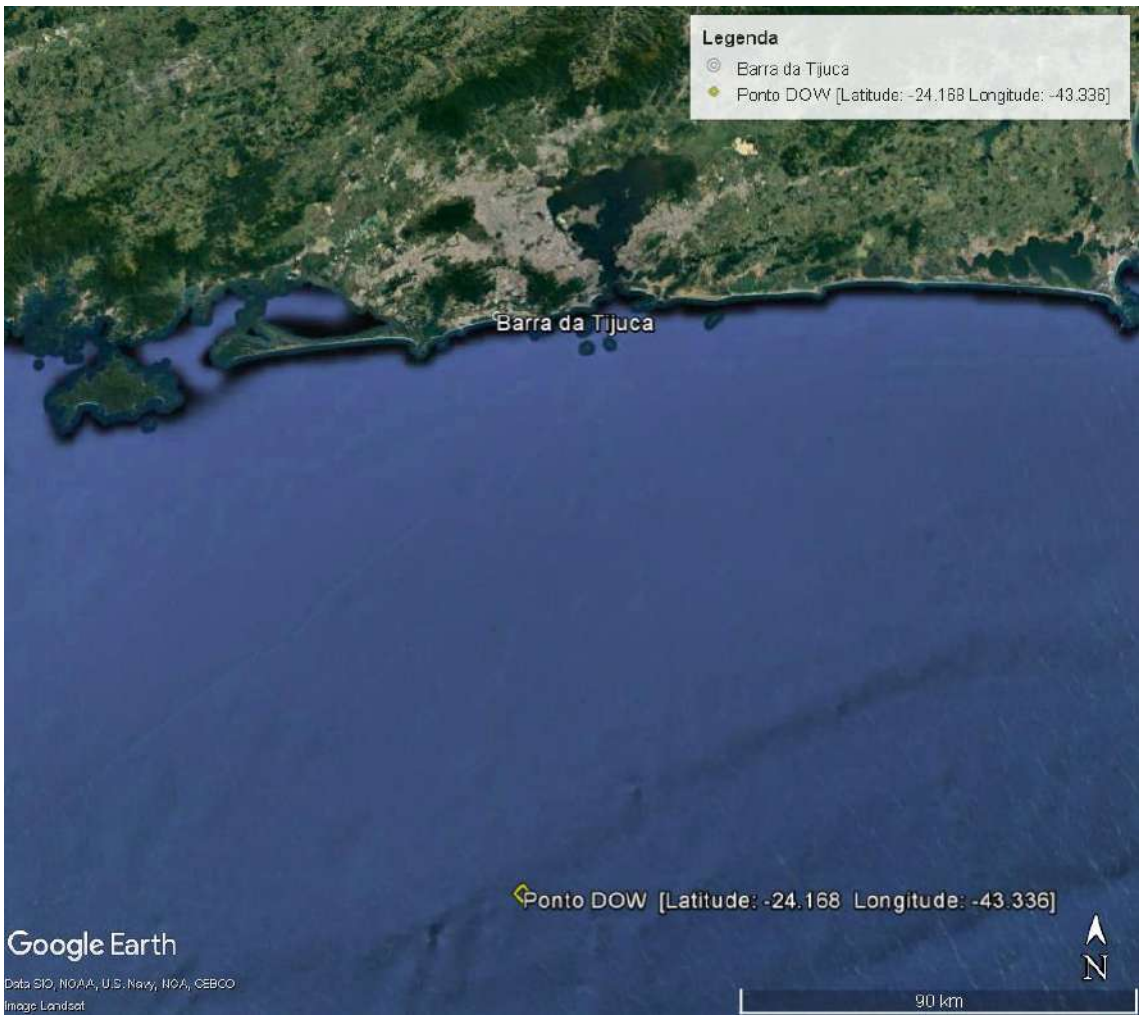


Figura 50. Localização do ponto DOW onde foi obtido dados de entrada para os modelos de propagação de ondas.

O modelo digital do terreno foi obtido através de imagens georeferenciadas do Google Earth para contornos e a batimetrias através da digitalização das seguintes cartas náuticas:

- Carta Náutica\DHN\23000 – Do Cabo de São Tomé ao Rio de Janeiro
- Carta Náutica\DHN\23100 – Do Rio de Janeiro a Santos.

Com base nos dados estatísticos gerados pelo SMC-Brasil, mostrados na Tabela 10, de altura de onda significativa e período de pico das séries temporais, foram escolhidas as ondas de projeto conforme sua maior probabilidade de ocorrência e principais direções que chegam na costa do Rio de Janeiro. Cada uma das ondas foi propagada em grades divididas em um leque de azimutes.

Tabela 10. Estatísticas de altura de onda significativa e período de pico para o período de 1948-2008. (Fonte: SMC-Brasil)

Dir	Probabilidade direção	Hs 50%	Hs 90%	Hs 99%	Hs 12	Tp 50%	Tp 90%	Tp 99%	Tp 12
N	0.00	1.79	2.37	3.01	3.31	6.33	7.71	8.75	9.33
NNE	0.00	1.67	2.14	2.79	3.26	6.54	7.65	8.66	9.39
NE	0.00	1.51	2.00	2.76	3.30	6.73	7.77	8.95	10.13
ENE	0.02	1.48	2.08	2.64	3.35	7.44	8.66	9.72	10.40
E	0.18	1.79	2.41	2.91	3.37	8.04	9.59	11.15	12.22
ESE	0.29	1.87	2.52	3.13	3.58	8.01	10.45	12.56	13.96
SE	0.19	2.00	2.75	3.42	3.93	9.22	11.72	13.84	15.26
SSE	0.16	2.12	2.91	3.69	4.53	10.25	12.67	14.87	15.99
S	0.11	2.46	3.29	4.19	4.90	10.91	13.20	15.17	16.19
SSW	0.03	2.89	3.87	4.92	5.74	10.92	13.21	14.92	15.53
SW	0.00	2.04	2.91	3.56	3.78	8.21	10.40	12.49	13.18
WSW	0.00	1.95	2.77	3.30	3.83	7.31	9.46	11.85	12.17
W	0.00	1.97	2.69	3.29	3.37	6.92	8.13	10.13	11.85
WNW	0.00	1.97	2.74	3.23	3.34	6.40	7.58	8.88	9.89
NW	0.00	2.01	2.53	2.96	3.07	6.20	7.50	8.43	9.01
NNW	0.00	1.87	2.49	3.16	3.18	6.16	7.53	8.82	8.93

Para cada leque foi desenvolvida uma Grade de Propagação de Ondas (GPO) com orientação do Lado Transversal à Costa (LTC) apropriado a direção de propagação das ondas em águas profundas. Os parâmetros de entrada de ondas simuladas, e o ângulo LTC-Norte das grades obtidas como referência para os cenários realizados então descritos na Tabela 11 e as GPOs na Figura 51.

Tabela 11. Parâmetros de entrada das ondas simuladas no Modelo de Propagação de Ondas.

Direção	Tp (s)	H (m)	A (m)	Azimute (°)	Âng LTC-N (°)
ESE	12	3.13	1.56	112.5	67.5
SE	13	3.41	1.70	135	45
SSE	14	3.68	1.84	157.5	22.5
S	15	4.18	2.09	180	0
SSW	15	4.91	2.45	202.5	337.5

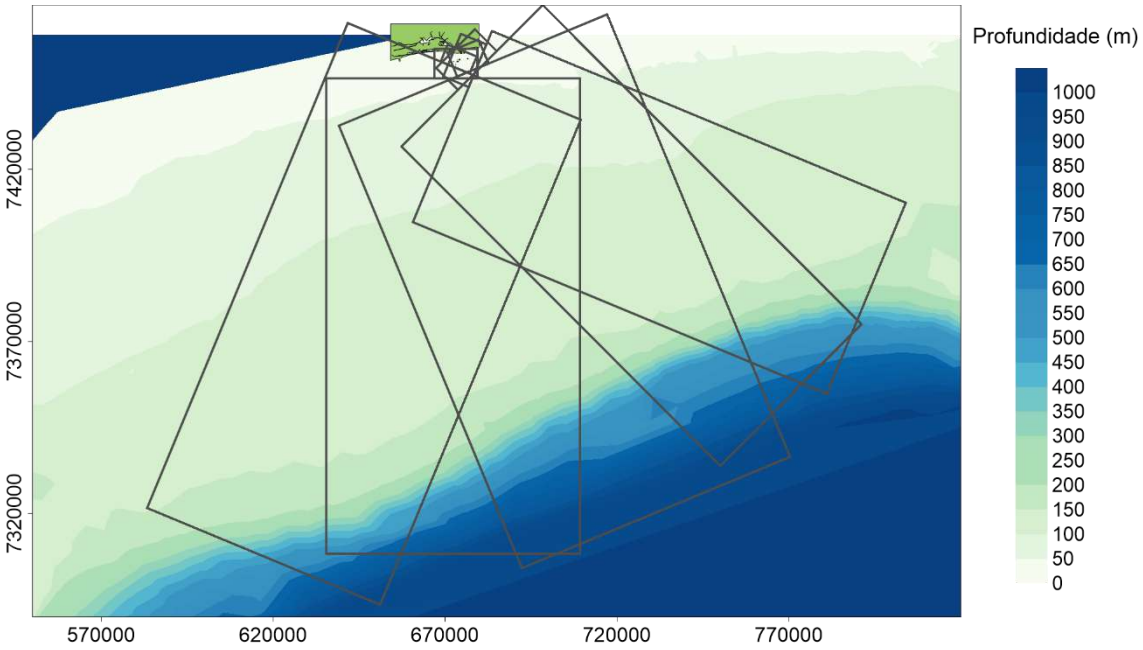


Figura 51. Grades utilizadas no modelo de propagação de ondas.

Os mapas das figuras de Figura 52 a Figura 56 mostram os resultados espaciais das alturas das ondas que foram propagadas em águas profundas chegando no canal da Joatinga. As piores ondas propagadas foram as de direção sul-sudeste (SSE), sul (S) e sul-sudoeste (SSW) com período acima de 14 s. A de SSE chegou com altura de cerca de 3 m enquanto que a de S chegaram com altura próxima a 4 m na costa.

A onda de SSW foi atenuada antes de chegar no canal da Joatinga devido a presença das ilhas Pontuda e Alfavaca, que protegem a costa para ondas desta direção. A altura desta onda chegou a no máximo 1m. As ondas de leste-sudeste (ESE), sudeste (SE) com altura de aproximadamente 1 m e não afetam a entrada do canal.

De maneira geral, as imagens mostram que a altura da onda que entra no canal diminui em até 1 m de altura para as ondas que chegaram com 3 ou 4 m de altura, de S e de SSE respectivamente. As ondas de menores períodos têm suas alturas atenuadas em 0.5 m assim como a de SSW, que mostrou as menores diferenças de um cenário para outro.

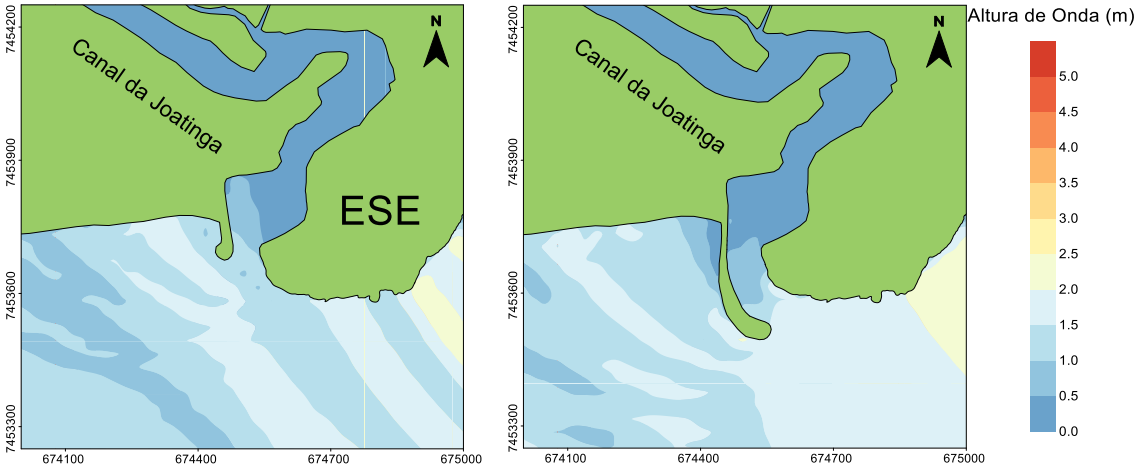


Figura 52. Resultado espacial da distribuição de altura de onda na região do canal da Joatinga de uma onda propagada na direção este-sudeste com no período de 12 s e altura de 3.13 m. O mapa da esquerda representa o cenário atual e o da direita com o guia-correntes prolongado.

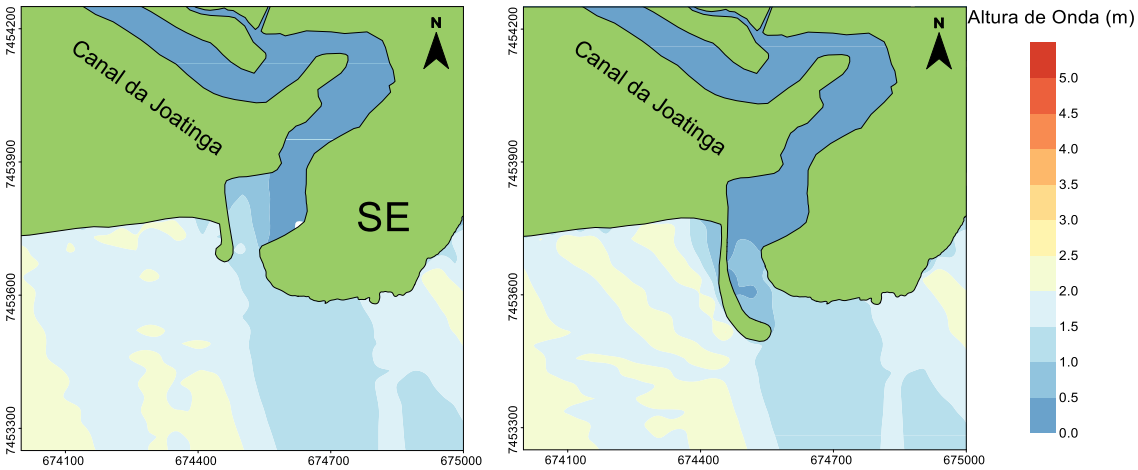


Figura 53. Resultado espacial da distribuição de altura de onda na região do canal da Joatinga de uma onda propagada na direção sudeste com no período de 13 s e altura de 3.41 m. O mapa da esquerda representa o cenário atual e o da direita com o guia-correntes prolongado.

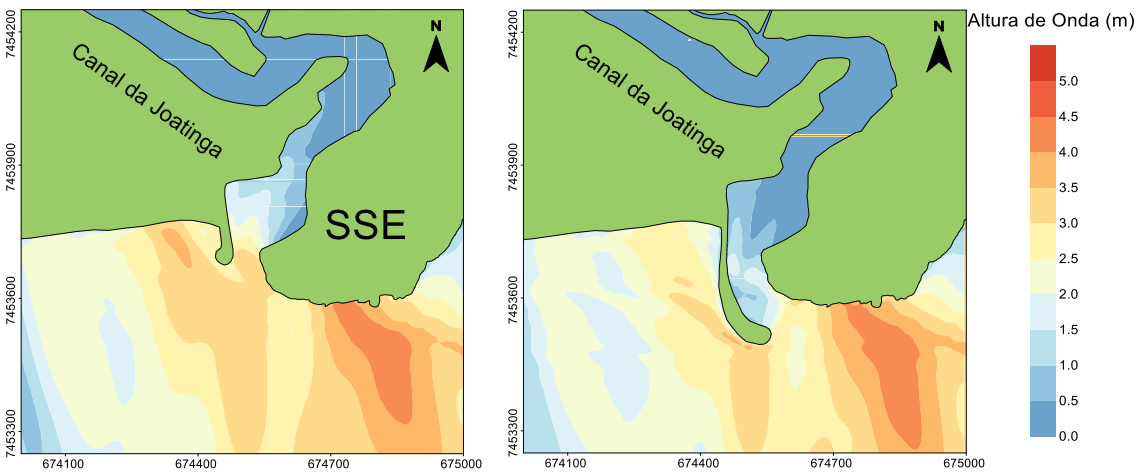


Figura 54. Resultado espacial da distribuição de altura de onda na região do canal da Joatinga de uma onda propagada na direção sul-sudeste com no período de 14 s e altura de 3.68 m. O mapa da esquerda representa o cenário atual e o da direita com o guia-correntes prolongado.

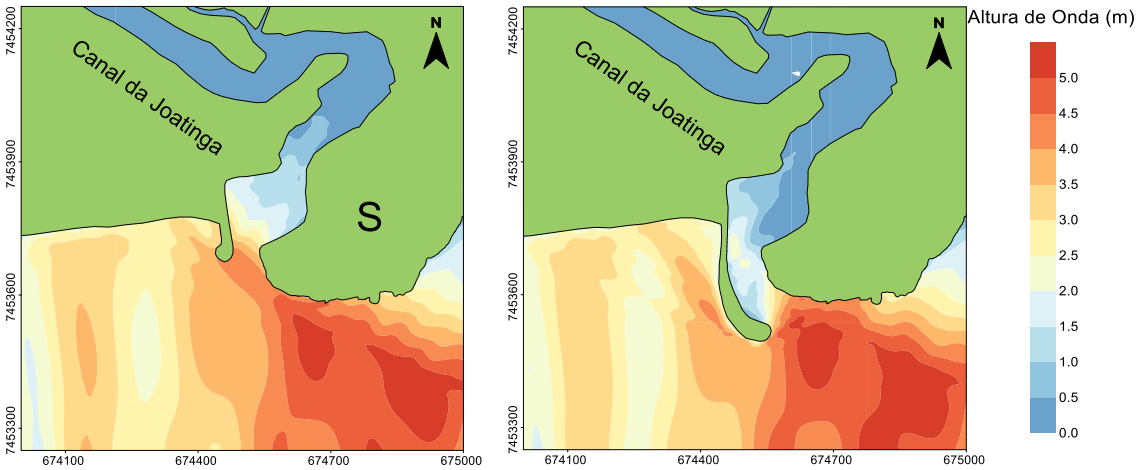


Figura 55. Resultado espacial da distribuição de altura de onda na região do canal da Joatinga de uma onda propagada na direção sul com no período de 15 s e altura de 4.18 m. O mapa da esquerda representa o cenário atual e o da direita com o guia-correntes prolongado.

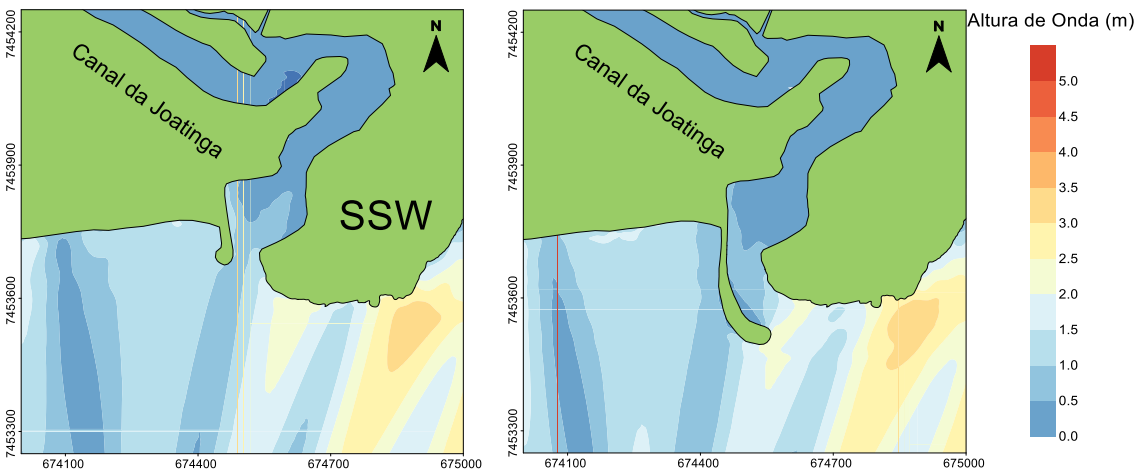


Figura 56. Resultado espacial da distribuição de altura de onda na região do canal da Joatinga de uma onda propagada na direção sul-sudoeste com no período de 15 s e altura de 4.91 m. O mapa da esquerda representa o cenário atual e o da direita com o guia-correntes prolongado.

É importante ressaltar que o MPO não simula a reflexão à medida que estas ondas atingem a região costeira. As ondas escolhidas para cada direção apresentam características diferentes de acordo com a estatística da frequência com que ocorrem. Os resultados aqui apresentados dão uma noção de como ocorre a dissipação, difração e efeitos de *shoaling* conforme estas ondas atingem a costa e a altura de onda representa de maneira geral, que ocorre a atenuação das mesmas dentro do canal da Joatinga cuja a seção foi aumentada e seu guia corrente prolongado.

6.2. Modelo Hidrodinâmico

Para as análises do modelo hidrodinâmico foram feitas comparações para os cenários definidos como C1 e C2 no item 5.4 para os meses de janeiro, representativo de verão e julho, representativo de inverno. As estações definidas para a análise das séries temporais de elevação, vazões e prismas estão dispostas na Figura 57.

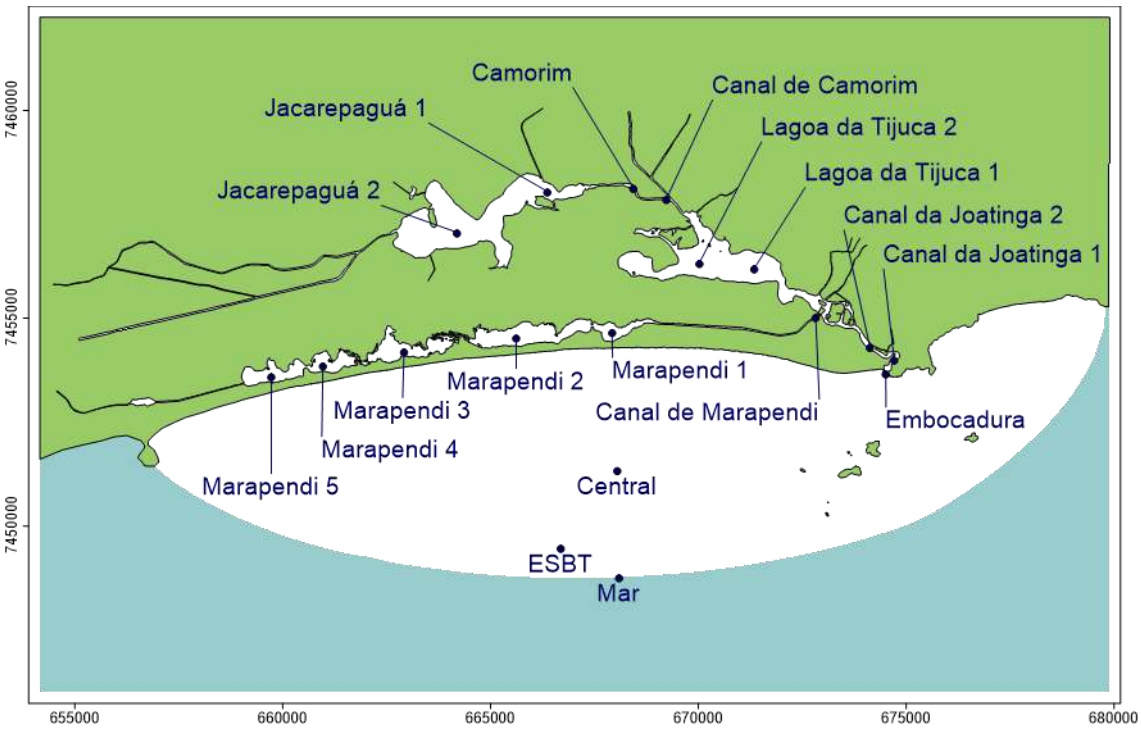


Figura 57. Estações de controle definidas para as análises do modelo hidrodinâmico.

Para cada modelo hidrodinâmico rodado escolheu-se tempos de análise representativos de situações de marés enchente e vazante, ligadas as marés meteorológicas, e também para situações correntes paralelas a costa, para leste ou para oeste. Os gráficos da Figura 58 e da Figura 59 estão destacados os momentos escolhidos para as análises dos modelos hidrodinâmico.

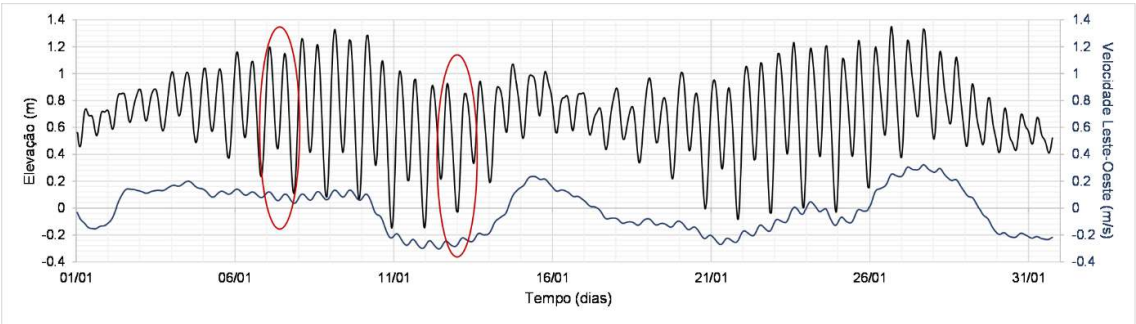


Figura 58. Gráfico referente as séries temporais na estação central do modelo hidrodinâmico referente ao mês de janeiro. A série em preto indica a elevação na estação, onde valores crescentes representam marés de enchente e decrescentes marés de vazante. A série em azul indica a intensidade das velocidades de direção leste-oeste, onde valores positivos indicam correntes de oeste para leste e negativos de leste para oeste.

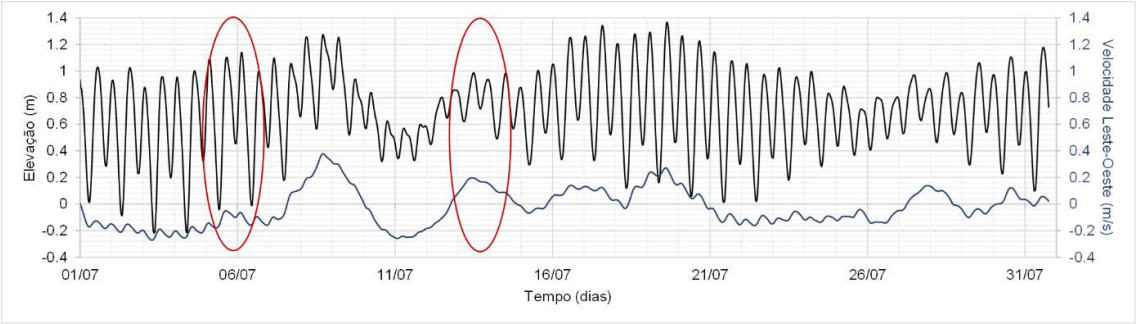


Figura 59. Gráfico referente as séries temporais na estação central do modelo hidrodinâmico referente ao mês de julho. A série em preto indica a elevação na estação, onde valores crescentes representam marés de enchente e decrescentes marés de vazante. A série em azul indica a intensidade das velocidades de direção leste-oeste, onde valores positivos indicam correntes de oeste para leste e negativos de leste para oeste.

Os períodos escolhidos para representar as maiores velocidades foram os de baixa-mares e de preamares pois a maré no canal da Joatinga é classificada como progressiva. Uma maré progressiva é definida por ter sua máxima intensidade de velocidade nos períodos próximos ao de maior amplitude de maré na enchente e menor amplitude na vazante. Este padrão de maré é constatado nos gráficos abaixo que mostram as variações das velocidades transversais e longitudinais e das elevações na estação Canal da Joatinga 2 na Figura 60 e na Figura 61 e o gráfico com detalhe para dois períodos de sizígia.

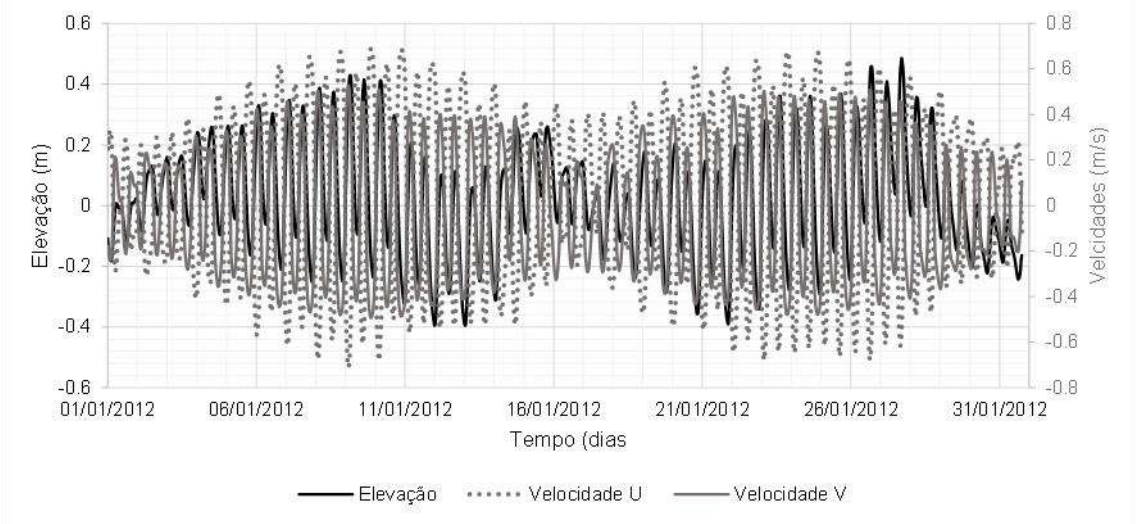


Figura 60. Séries temporais de elevações e de velocidades longitudinais e transversais na estação Canal da Joatinga 2 do mês de janeiro para o C1.

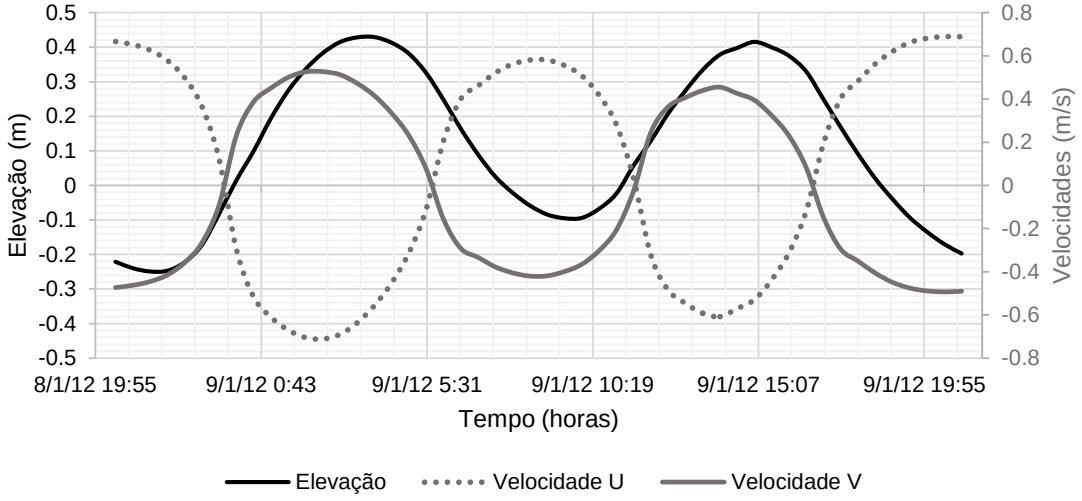


Figura 61. Séries temporais de elevações e de velocidades longitudinais e transversais na estação Canal da Joatinga 2 durante dois ciclos de maré de sizígia do mês de janeiro para o C1.

Os gráficos da Figura 62 e Figura 63 são as mesmas séries para o C2, mostrando que o tipo da maré não muda diante das intervenções. Em ambos cenários a velocidade longitudinal tem seu máximo valor quando positivos, ou seja, a vazante apresenta maiores velocidades, típicas de uma maré progressiva. Isto é explicado pela seção hidráulica de enchente ser maior que na vazante e ao diminuir a seção hidráulica, as velocidades tendem a aumentar. Além disso, os gráficos do C2 mostram que a velocidade longitudinal aumenta cerca de 0.2 m/s e a transversal 0.1 m/s na estação do canal da Joatinga 2.

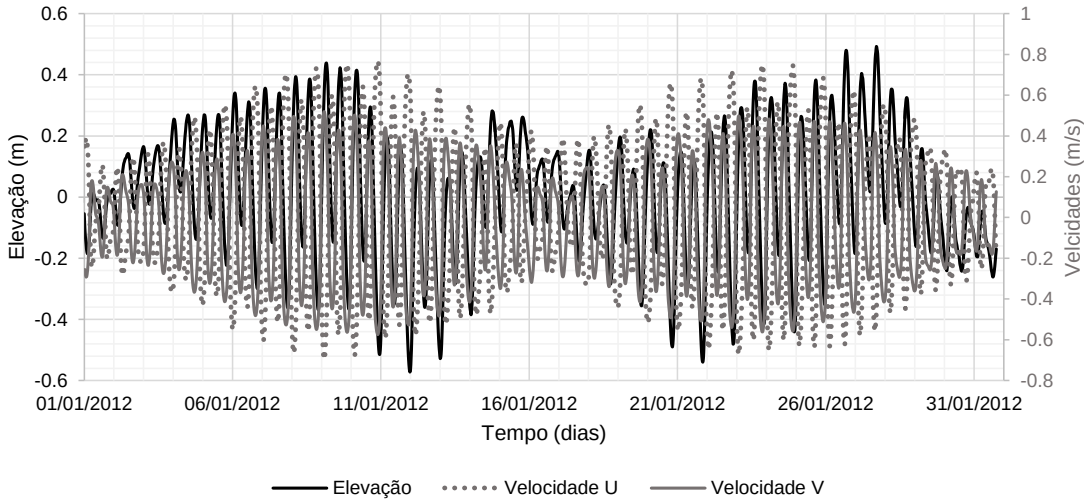


Figura 62. Séries temporais de elevações e de velocidades longitudinais e transversais na estação Canal da Joatinga 2 do mês de janeiro para o C2.

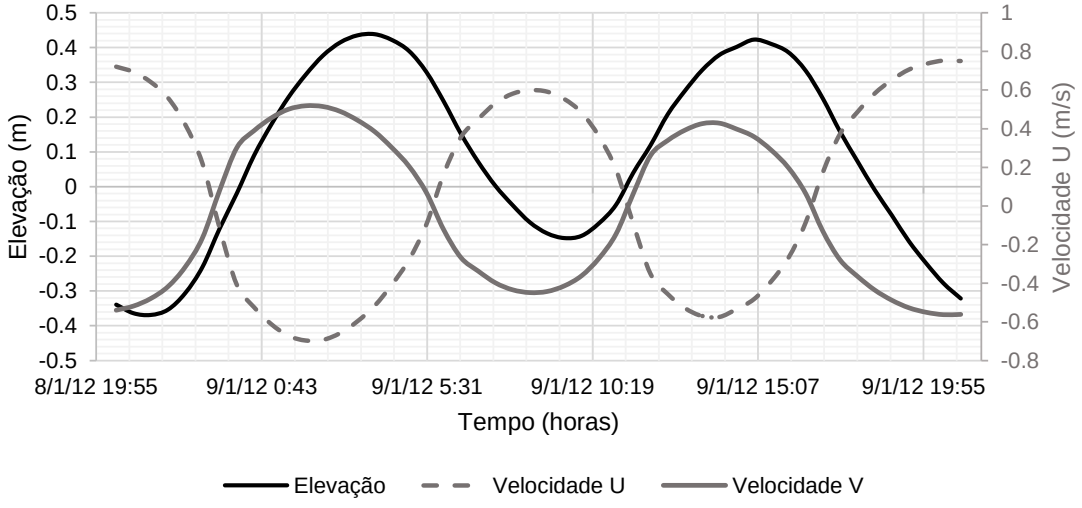


Figura 63. Séries temporais de elevações e de velocidades longitudinais e transversais na estação Canal da Joatinga 2 durante dois ciclos de maré de sizígia do mês de janeiro para o C2.

Foram escolhidos tempos de vazante da simulação de janeiro do C1 e do C2 para apresentar os mapas de velocidades em todo o domínio. Diferenças na hidrodinâmica deste mês para o de julho serão mostradas e discorridas nas seções a seguir.

Os mapas da Figura 64 a Figura 67 mostram que as velocidades hidrodinâmicas nas lagoas são baixas durante os tempos de enchente e vazante tanto do C1 quanto do C2, onde as velocidades não ultrapassam de valores de 0.1 m/s. As velocidades paralelas a costa, variam de 0 a 0.4 m/s no domínio tanto para oeste quanto para leste, sendo as maiores intensidades encontradas na região entre o a embocadura do canal e as ilhas à frente.

Há o aumento da velocidade na região entre o canal da Joatinga e as ilhas Pontuda e Alfavaca, à frente da embocadura pois nesta região ocorre a diminuição da área da seção transversal pela qual as correntes de direção leste-oeste passam, ocasionando o aumento da intensidade destas nesta região. Além disso, estas ilhas protegem esta região das ondas, como visto na seção 6.1, e propiciam a sedimentação depois delas, fazendo com que esta região seja mais rasa aumentando as velocidades locais.

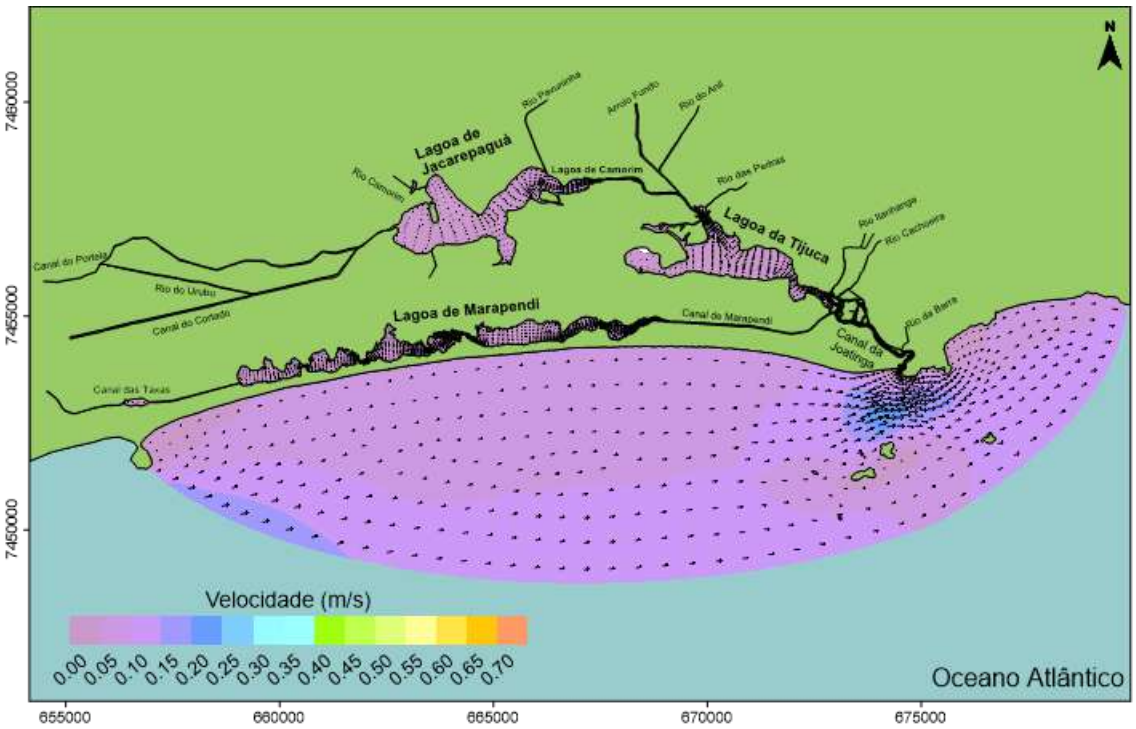


Figura 64. Mapa do C1 das velocidades de todo o domínio para uma situação de maré vazante e velocidades com sentido leste.

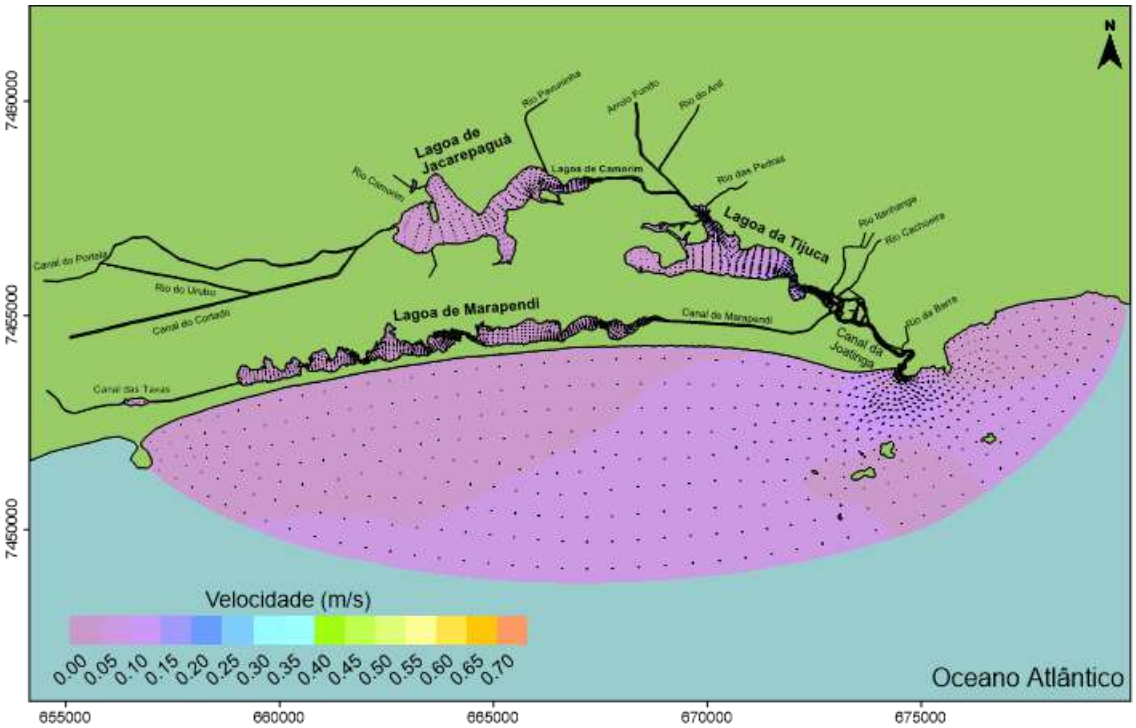


Figura 65. Mapa do C2 das velocidades de todo o domínio para uma situação de maré vazante e velocidades paralelas com sentido leste.

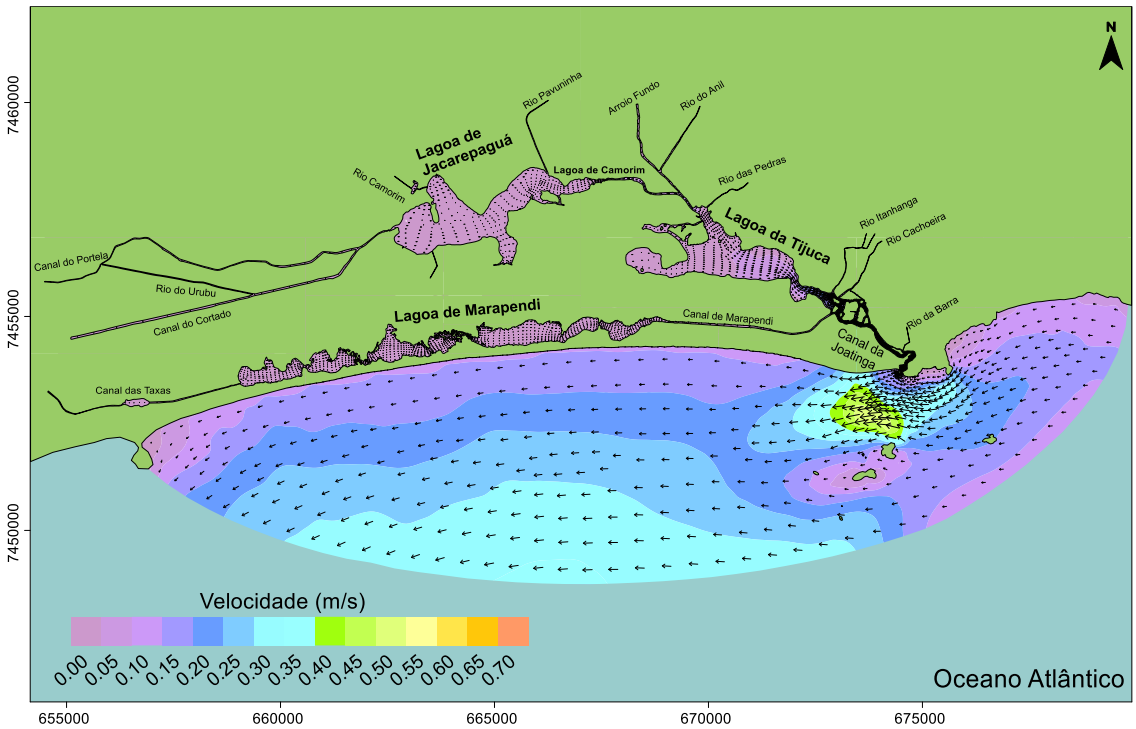


Figura 66. Mapa do C1 das velocidades de todo o domínio para uma situação de maré vazante e velocidades paralelas à costa com sentido oeste.

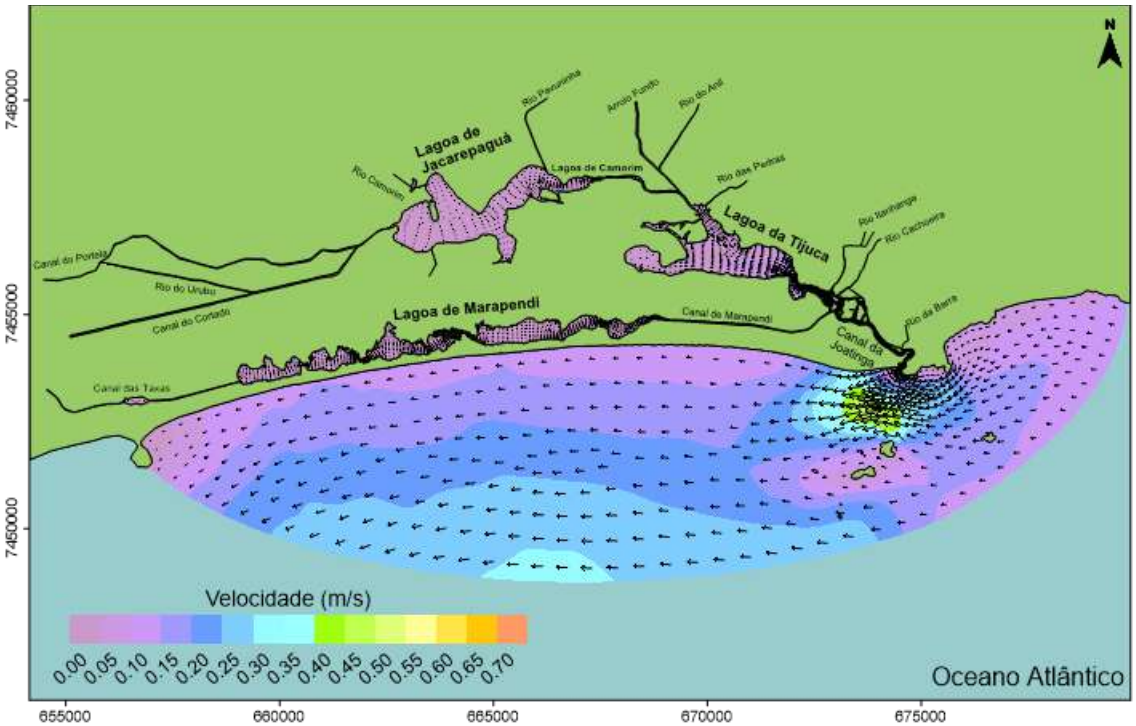


Figura 67. Mapa do C2 das velocidades de todo o domínio para uma situação de maré vazante e velocidades paralelas à costa com sentido oeste.

A região do canal da Joatinga está destacada nos mapas de velocidade da Figura 68 a Figura 75. Em todos os mapas é visível o aumento da intensidade das correntes no canal da Joatinga do C2 em relação ao C1. Se há uma maior entrada de águas e consequente diminuição da perda de carga com fundo devido a dragagem, há o aumento das velocidades no canal.

A maré no canal da Joatinga é progressiva e, portanto, maiores velocidades são encontradas nas marés vazantes. Isto explica o aumento da velocidade na embocadura do canal ser mais relevante em situações de enchente no C2 em relação as do C1. As velocidades aumentam cerca de 0.2 m/s nos cenários com velocidades sentido oeste tanto em janeiro (Figura 70), quanto em julho (Figura 71). Nas situações de correntes em direção a leste, houve um aumento considerável de 0.3 m/s apenas para janeiro (Figura 72) e em julho não houveram diferenças notáveis nas velocidades no canal (Figura 73).

O novo guia-correntes protege a região da praia do Pepê, a oeste do canal da Joatinga, das correntes em todas as situações, mas principalmente nas de vazante. No cenário atual as águas que saem do sistema lagunar vão direto para a praia, principalmente quando as correntes litorâneas estão fluindo de leste para oeste, como é possível verificar na Figura 68 e na Figura 69.

A Figura 70 e a Figura 71 mostram que quando as correntes estão vindo de leste, aumenta a velocidade dentro do canal da Joatinga, porque o direcionamento do guia-correntes para leste propicia a entrada destas águas no sistema lagunar. Estas velocidades aumentam cerca de 0,2 m/s no C2. Quando estas correntes estão de oeste para leste, a entrada das águas pelo canal não é dificultada e ainda é possível notar o aumento da velocidade dentro do canal, como mostram as imagens da Figura 72 e da Figura 73.

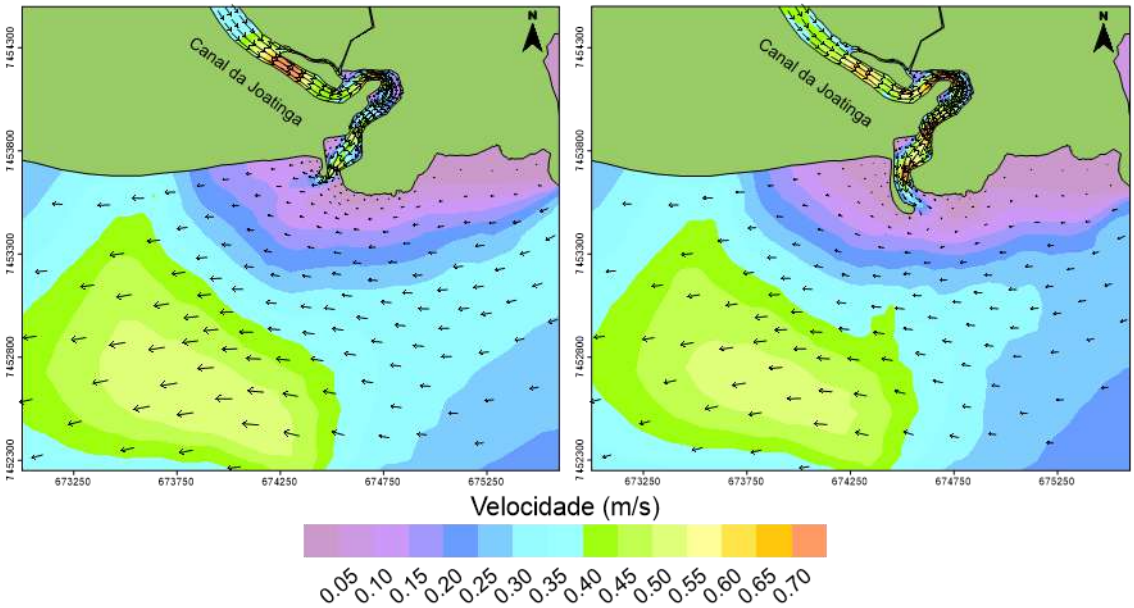


Figura 68. Correntes fluindo de leste para oeste em situação de maré vazante no dia 12/01/2012 às 20h00.

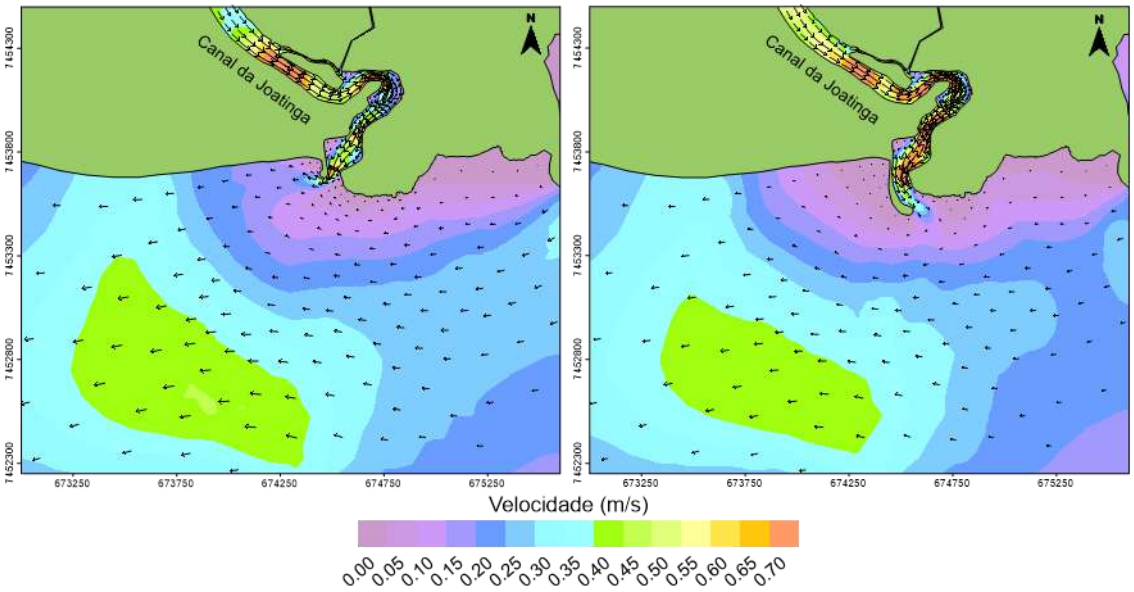


Figura 69. Correntes fluindo de leste para oeste em situação de maré vazante no dia 04/07/2012 às 21h00.

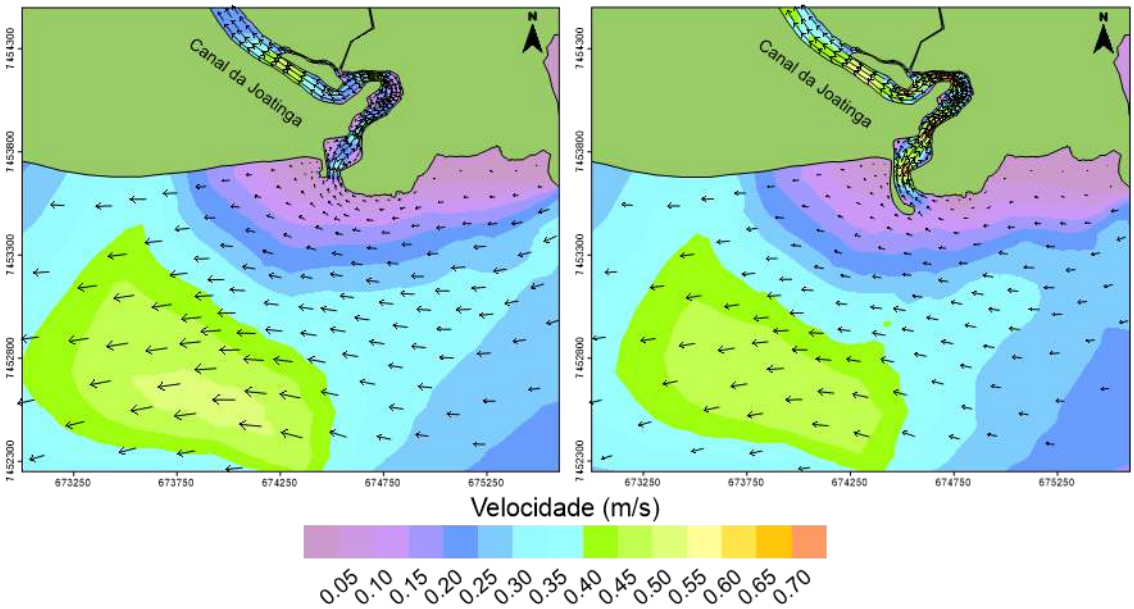


Figura 70. Correntes fluindo de leste para oeste em situação de maré enchente no dia 12/01/2012 às 14h00.

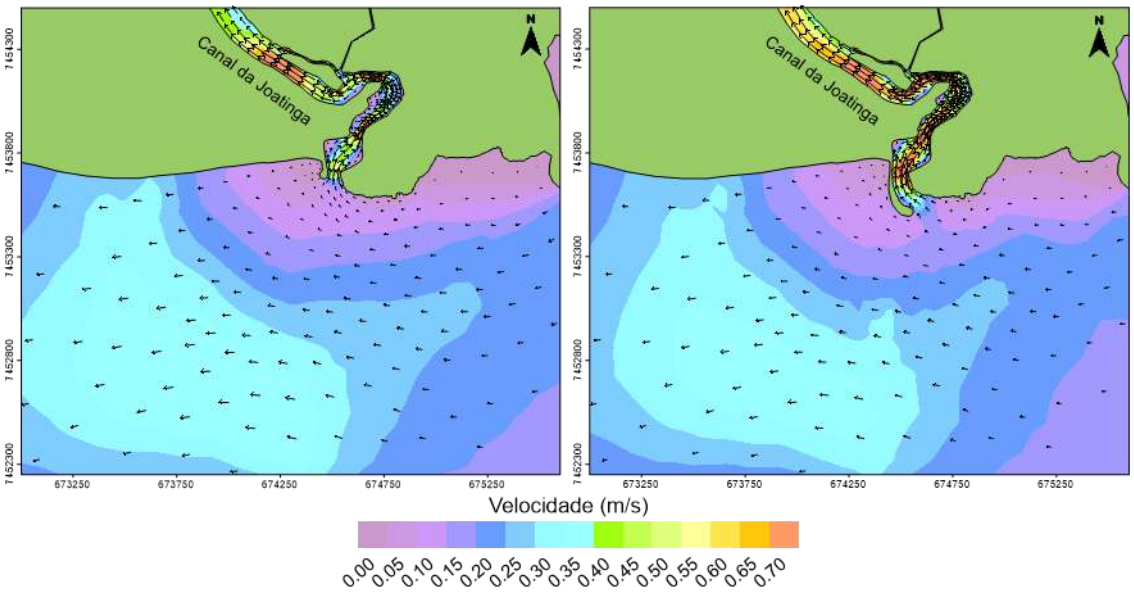


Figura 71. Correntes fluindo de leste para oeste em situação de maré enchente no dia 04/07/2012 às 13h00.

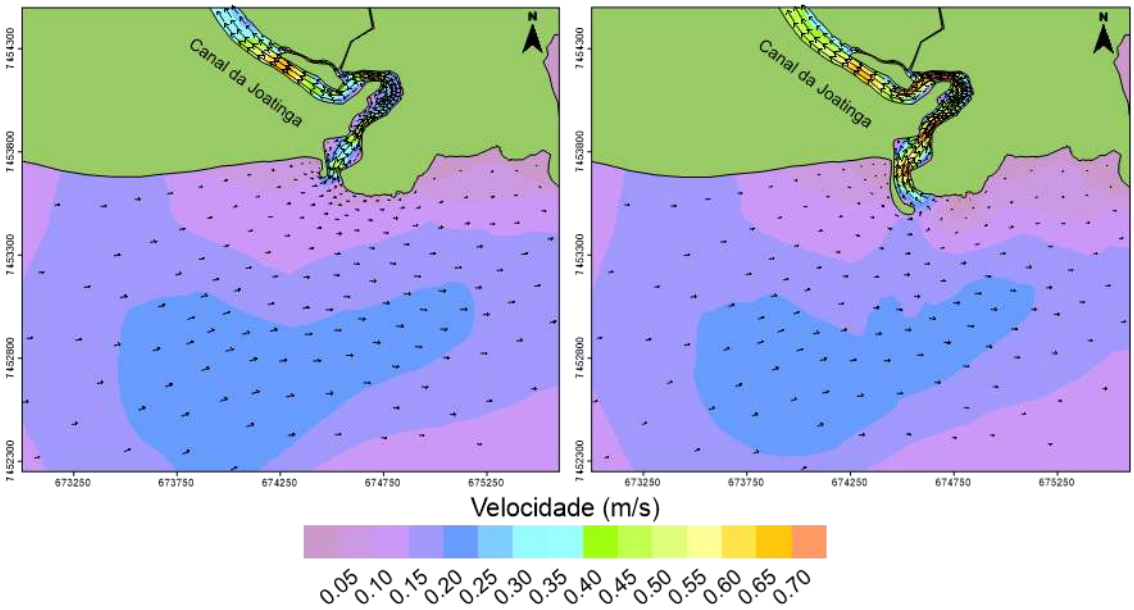


Figura 72.Correntes fluindo no sentido oeste-leste em situação de maré enchente no dia 06/01/2012 às 23h00.

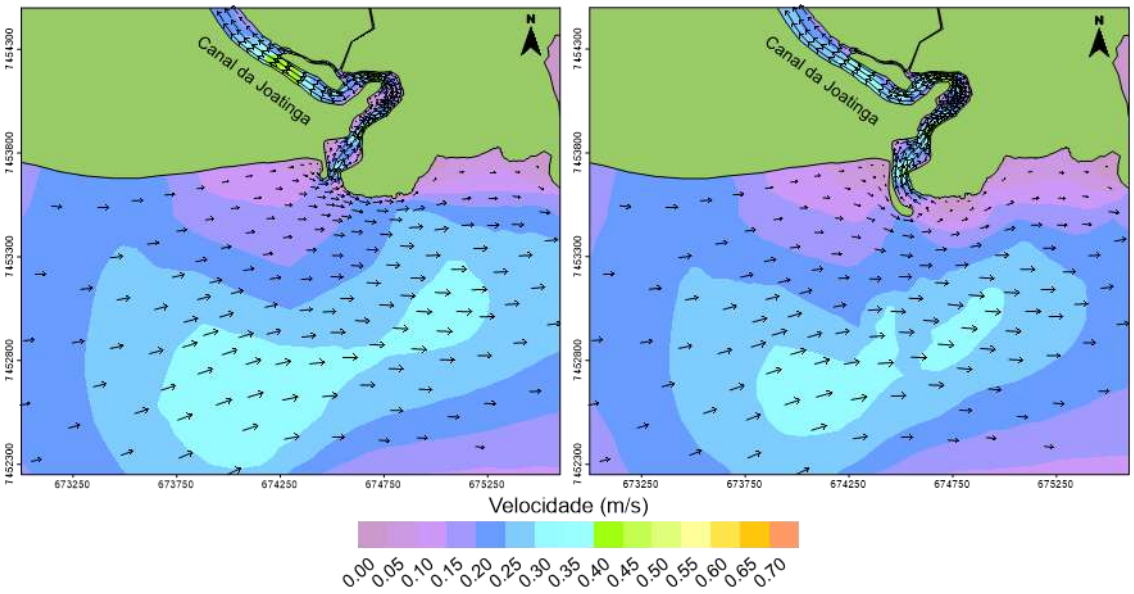


Figura 73. Correntes fluindo de oeste para leste em situação de maré enchente no dia 13/07/2012 às 21h00.

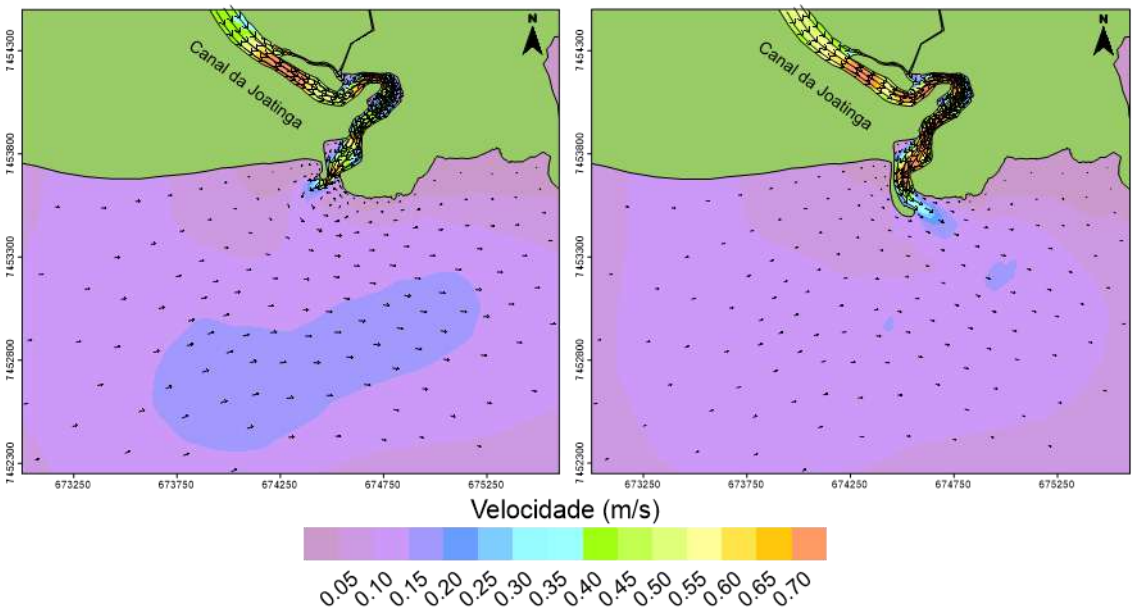


Figura 74. Correntes fluindo de oeste para leste em situação de maré vazante no dia 07/01/2012 às 06h00.

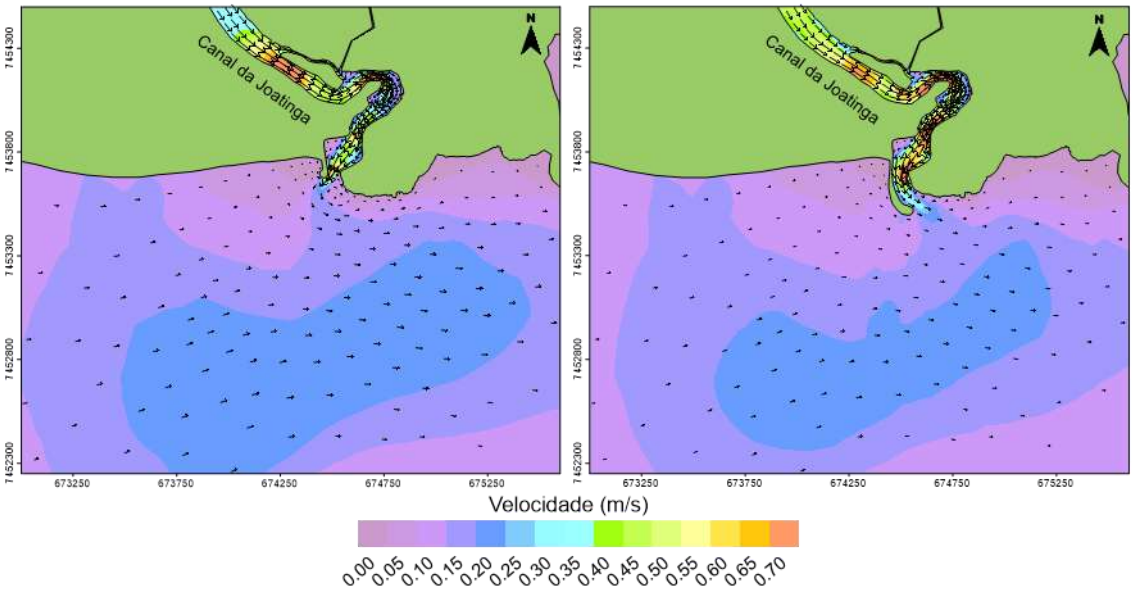


Figura 75. Correntes fluindo de oeste para leste em situação de maré vazante no dia 14/07/2012 às 04h00.

6.2.1. Elipses de Maré

O gráfico de elipse de maré relaciona a as intensidades das correntes norte-sul e leste-oeste durante todo o período simulado, o que permite avaliar a variabilidade da direção e intensidade das velocidades em cada estação. Foram plotados gráficos de elipse de maré para as duas estações na lagoa da Tijuca e duas na de Jacarepaguá comparando a intensidade das velocidades no C2 sobreposto ao C1.

A Figura 76 mostra a elipse de maré na Lagoa da Tijuca 1, onde a circulação hidrodinâmica atual não está tão prejudicada pelo assoreamento como a estação 2 na mesma lagoa. A melhora na hidrodinâmica é notável assim como ocorre uma pequena diminuição na variabilidade das correntes que ficam mais restritas a direção sudeste-noroeste.

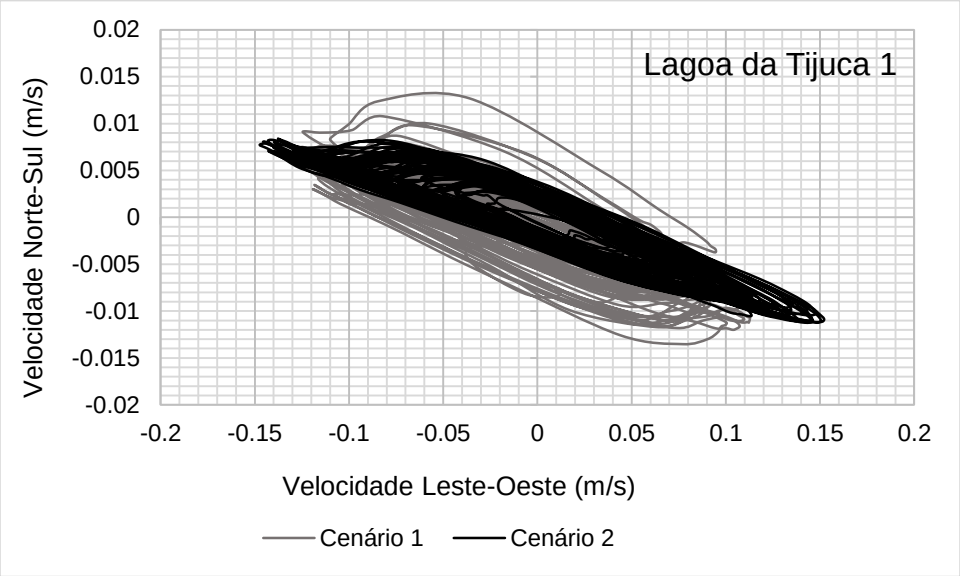


Figura 76. Elipse de maré na estação da lagoa da Tijuca 1. Em cinza estão plotadas as velocidades do C1 e em preto as do C2.

Já as modificações nas velocidades na estação 2 da lagoa da Tijuca, a melhora no direcionamento das correntes é bastante considerável como mostra a Figura 77. Isto é explicado pelos canais de dragagem propostos para o C2 (Figura 8), onde o a direção destas velocidades se encaixa na posição do canal. As velocidades na direção norte-sul diminuem cerca de 0.02 m/s e as de leste-oeste aumentam em 0.02m/s, mostrando o redirecionamento do escoamento e melhora da hidrodinâmica nesta região da lagoa da Tijuca.

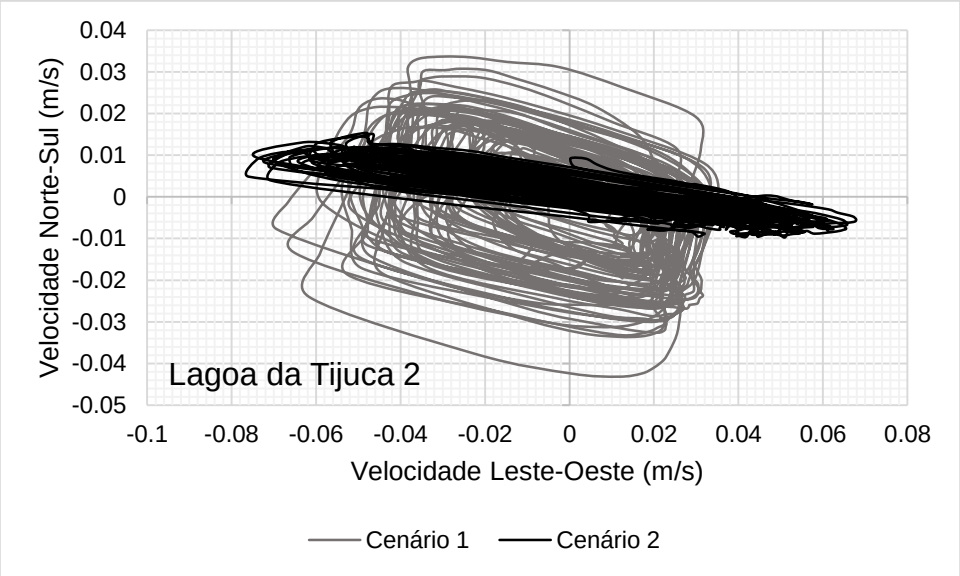


Figura 77. Elipse de maré na estação da lagoa da Tijuca 2. Em cinza estão plotadas as velocidades do C1 e em preto as do C2.

Nas estações da lagoa de Jacarepaguá é notado o aumento da intensidade das correntes no eixo da direção principal de cada estação. Na estação 1 desta lagoa, mostrado no gráfico da Figura 78, as correntes de norte-sul e leste-oeste aumentam em 0.01 m/s, o que mostra um redirecionamento favorecido pelo aumento da hidrodinâmica local. Já na estação 2, localizada mais interior na lagoa de Jacarepaguá, a direção das velocidades não muda, aumentando apenas as velocidades cerca de 0.1m/s, como mostra a Figura 79.

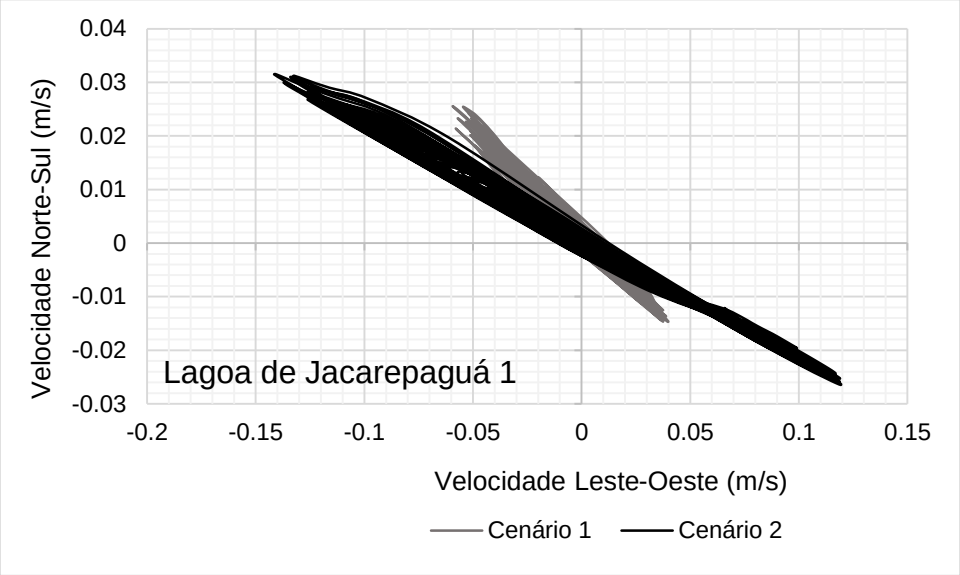


Figura 78. Elipse de maré na estação da lagoa de Jacarepaguá 1. Em cinza estão plotadas as velocidades do C1 e em preto as do C2.

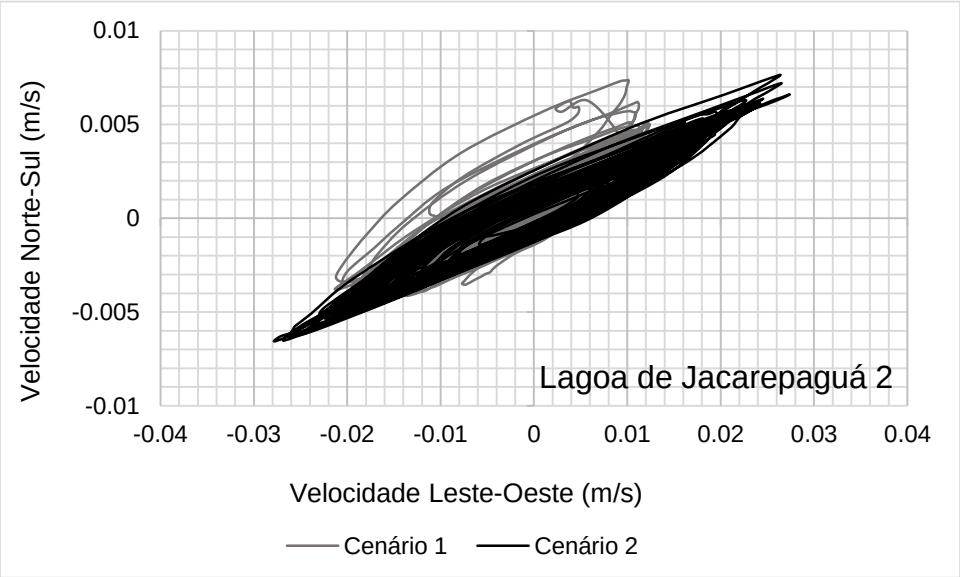


Figura 79. Elipse de maré na estação da lagoa de Jacarepaguá 2. Em cinza estão plotadas as velocidades do C1 e em preto as do C2.

6.2.2. Prismas de Maré

As vazões afluentes e efluentes em um canal resultam-no volume de água que passa por sua seção. As vazões que são calculadas no canal da Joatinga representam, portanto, o volume total de água que é trocado entre o mar e o sistema estuarino. As imagens da Figura 80, referente a janeiro, e da Figura 81, referente a julho, mostram a comparação das vazões dos principais canais do sistema.

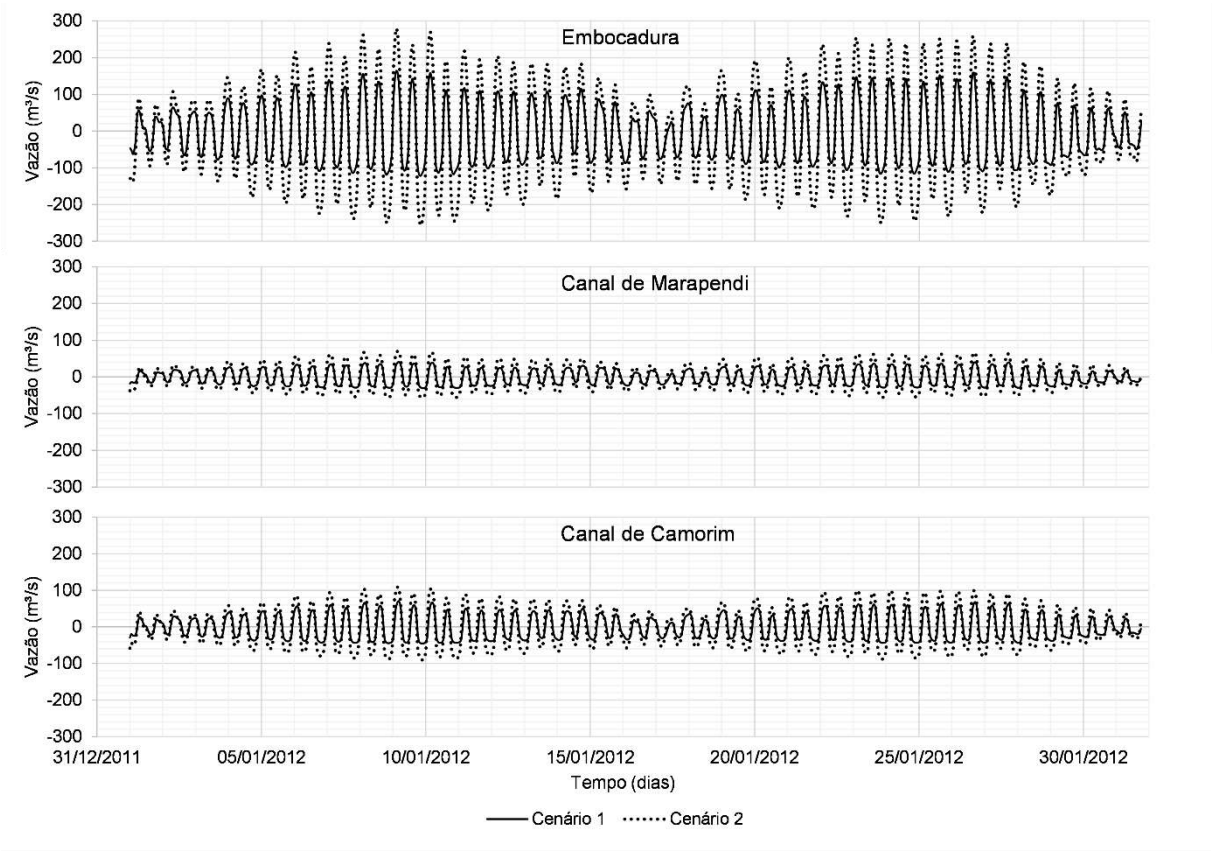


Figura 80. Vazão afluente (positivo) e efluente (negativo) na embocadura do canal da Joatinga, no canal de Marapendi e no canal de Camorim durante o mês de janeiro para o ambos os cenários, onde a linha contínua representa o cenário atual e a pontilhada representa o cenário após o prolongamento do guia-correntes.

É possível notar que as vazões aumentam após as intervenções, que de fato permitem uma maior troca de águas entre o sistema lagunar e o mar. A variação das vazões ocorre conforme a altura da maré e por isso ciclos de sizígia resultam em maiores volumes de água trocados do que no ciclo de quadratura.

Para a análise de trocas e renovação de águas em um determinado estuário, foi calculado o prisma de maré, definido como o volume de água do mar que entra em um corpo d'água interior durante o período de enchente de uma maré. Como a maré local apresenta desigualdades diurnas foi calculado o prisma médio a partir da média de dois ciclos subsequentes, que corresponde a aproximadamente 24 horas e 50 minutos.

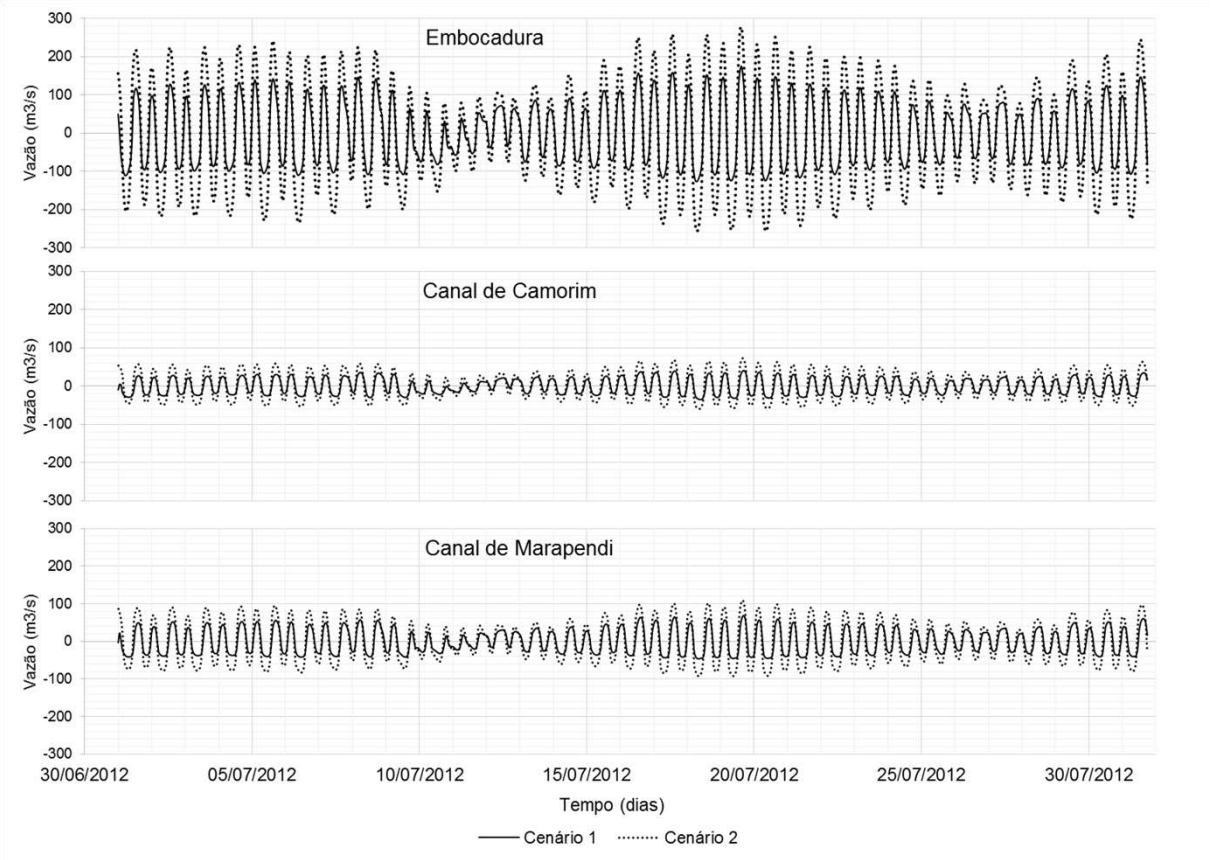


Figura 81. Vazão afluente (positivo) e efluente (negativo) na embocadura do canal da Joatinga, no canal de Camorim e no canal de Marapendi durante o mês de julho para o ambos os cenários, onde a linha contínua representa o cenário atual e a pontilhada representa o cenário após o prolongamento do guia-correntes.

Para representar melhor os valores dos prismas foram escolhidos dois destes períodos de quadratura e sizígia, que estão representados em azul na Figura 82, referente ao mês janeiro, e na Figura 83, referente a julho.

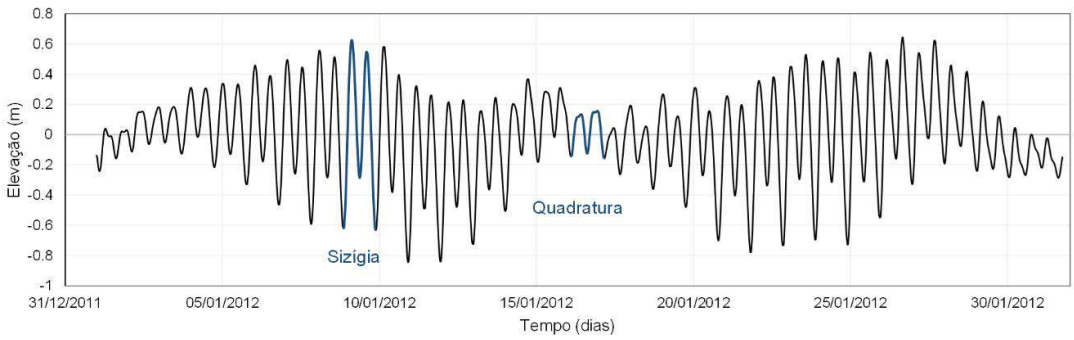


Figura 82. Série de elevação na estação da Mar, na fronteira aberta, no mês de janeiro. Em azul estão representados os períodos referentes a dois ciclos de maré utilizado para os cálculos do prisma de maré, amortecimento da amplitude e defasagem da onda de maré.

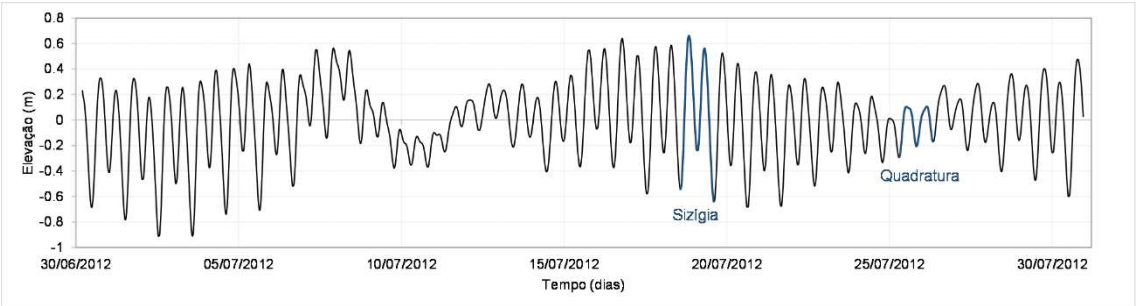


Figura 83. Série de elevação na estação da Mar, na fronteira aberta, no mês de julho. Em azul estão representados os períodos referentes a dois ciclos de maré utilizado para os cálculos do prisma de maré, amortecimento da amplitude e defasagem da onda de maré.

Os resultados do cálculo do prisma médio nos principais canais do SLJ, Joatinga, Marapendi e Camorim, estão na Tabela 12. De forma geral, os volumes de troca de água aumentam no C2 comparado ao C1, tanto para janeiro e julho quanto nas sizígias e quadraturas. É possível notar que os maiores prismas ocorrem nos períodos de sizígia para ambos os meses, sendo os de janeiro maiores. Porém, são nas quadraturas do mês de julho que ocorrem os maiores aumentos em porcentagens destes prismas diante da intervenção proposta no C2.

Tabela 12. Tabela com os prismas médios calculados para os canais da Joatinga, Marapendi e Camorim para o cenário atual (C1) e cenário posterior intervenções (C2) para os meses de janeiro e julho.

		Prisma Médio de Maré (x10 ^{6} m^{3})								
		Embocadura			Canal de Marapendi			Canal de Camorim		
	Maré	C1	C2	Aumento (%)	C1	C2	Aumento (%)	C1	C2	Aumento (%)
Janeiro	Sizígia	2.04	3.43	59.45	0.57	0.91	62.69	0.84	1.38	60.81
	Quadratura	0.69	1.45	47.71	0.23	0.43	53.32	0.33	0.61	54.54
Julho	Sizígia	1.99	3.33	59.67	0.53	0.94	55.61	0.80	1.37	58.86
	Quadratura	1.15	1.84	62.64	0.36	0.58	62.80	0.50	0.80	62.63

Vale ressaltar que os prismas de quadratura em julho são maiores que os de quadratura de janeiro e muito próximos no período de sizígia para ambos cenários. O aumento de prisma mais significativo é de ~62% para todos os canais na situação de quadratura em julho, isto pode ser explicado por julho representar um período de seca, com menores vazões nos rios, e, portanto, melhor entrada e saída de águas do mar. Além disso, no inverno há maior passagem de frentes frias responsáveis pela sobrelevação do nível médio do mar favorecendo a maior entrada de águas oceânicas no sistema lagunar.

As águas do mar que entram através do canal da Joatinga aumentam em aproximadamente 59% em janeiro e 61% julho. A Lagoa de Jacarepaguá ligada a da Tijuca pelo canal de Camorim, receberia um aumento de volume de água médio de aproximadamente 57% em janeiro e 60% em julho. Já as lagoas de Marapendi se beneficiariam com um aumento no prisma médio de seu canal de entrada em 58%, aproximadamente, em janeiro e 59% em julho.

6.2.3. Elevações

No C1 os canais de ligação entre as lagoas apresentam seções hidráulicas estreitas e menores, o que dificulta a entrada de águas provenientes do mar. Ao dragar todo complexo e aumentar a embocadura do canal da Joatinga, há o favorecimento de entrada das águas do mar e o consequente aumento da amplitude da maré que entra em todas as lagoas como visto na seção anterior. O aumento na amplitude da maré é notado nos gráficos da Figura 84 e com detalhe no da Figura 86, referente ao mês de janeiro e no da Figura 85, e com detalhe na Figura 87, para de julho.

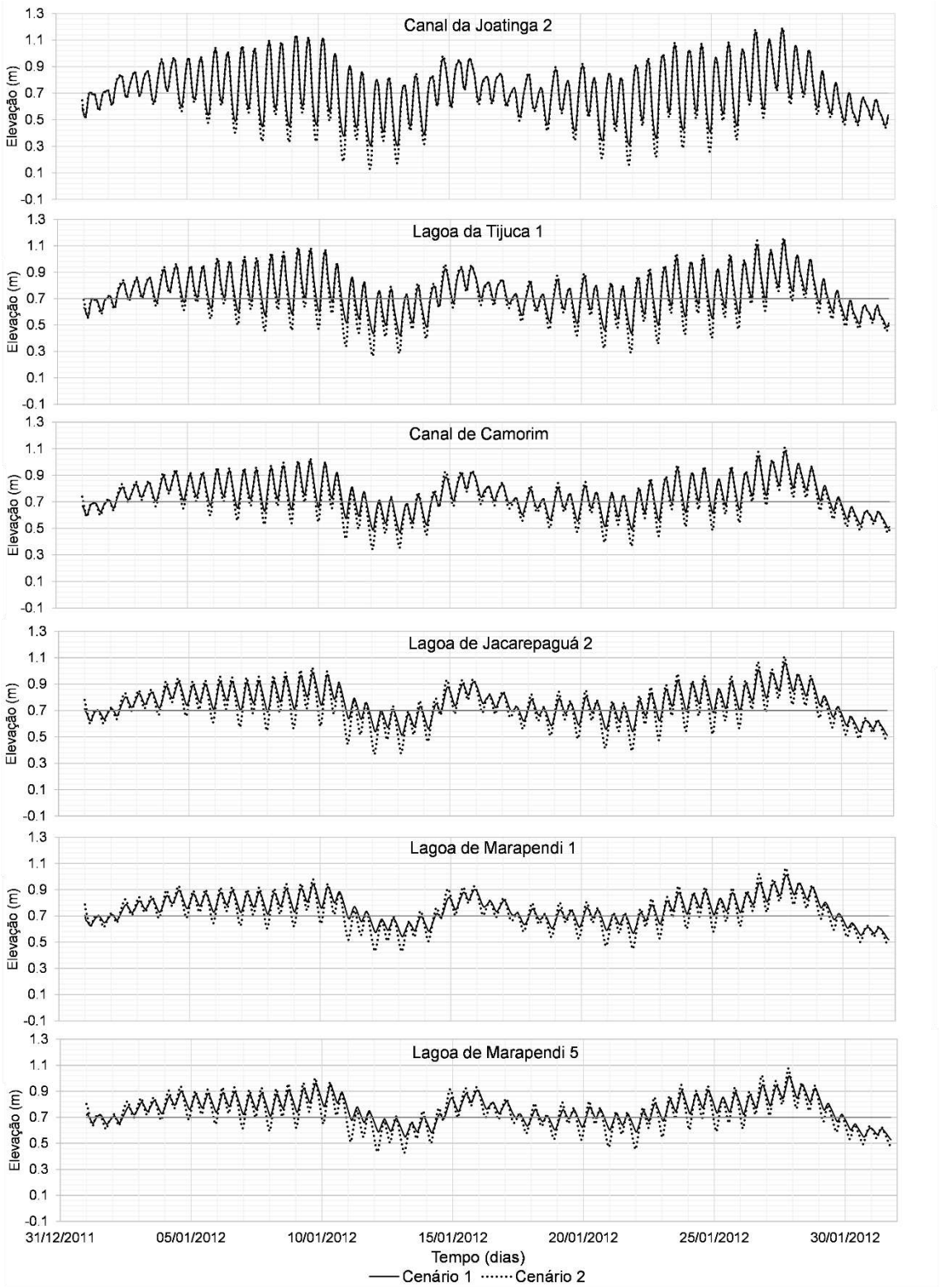


Figura 84. Variações do nível de água nas lagoas do SLJ para o mês de janeiro. A linha contínua representa o cenário atual e a pontilhada o cenário posterior ao prolongamento do guia-correntes.

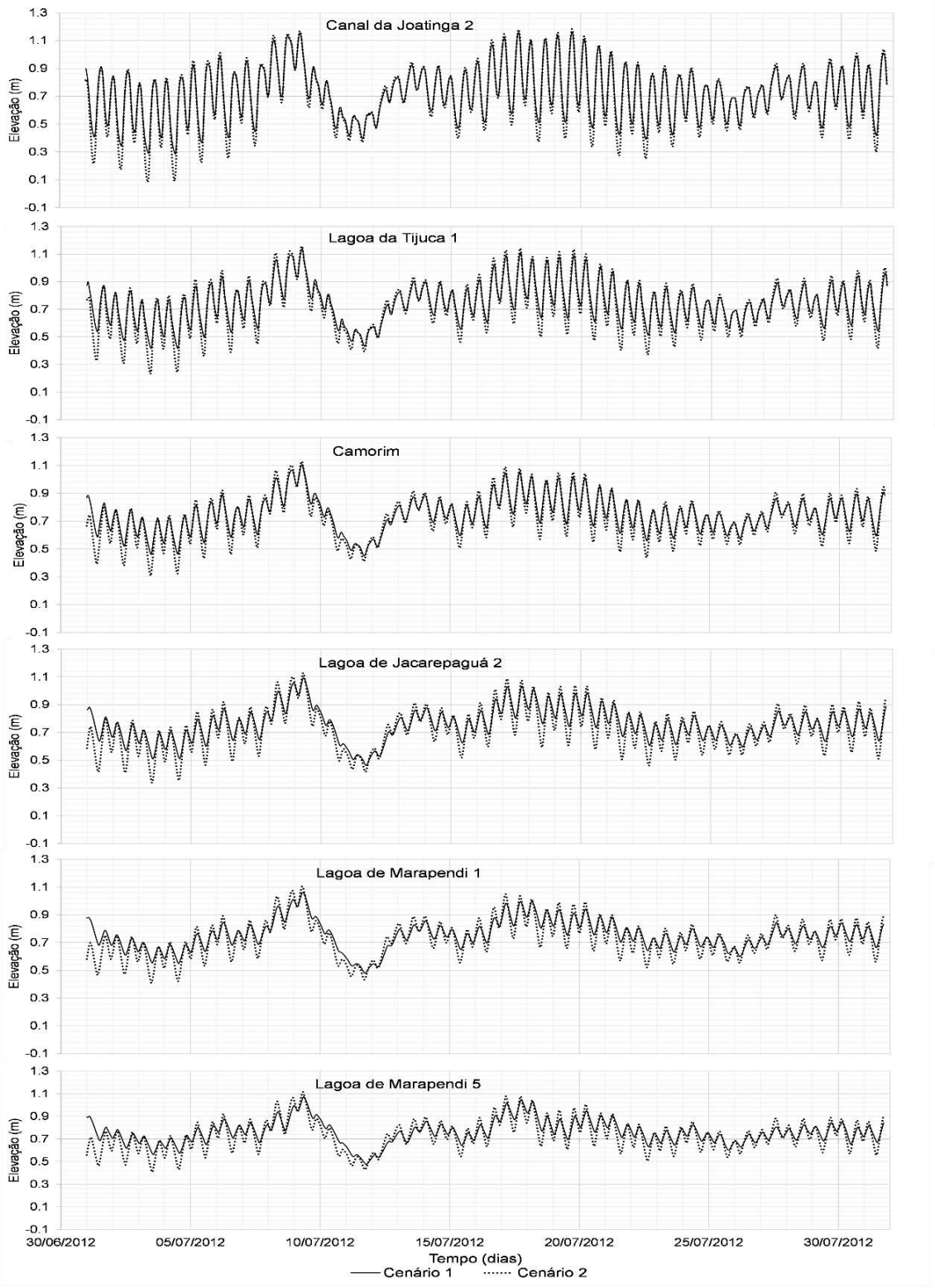


Figura 85. Variações do nível de água nas lagoas do SLJ para o mês de julho. A linha contínua representa o cenário atual e a pontilhada o cenário posterior ao prolongamento do guia-correntes.

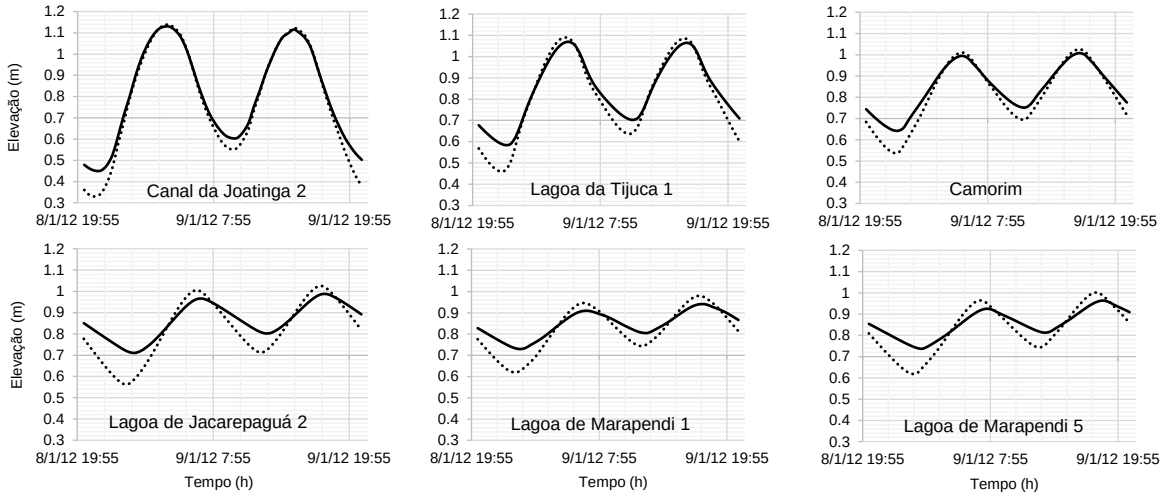


Figura 86. Séries temporais de elevação em uma estação representativa de cada lagoa dos cenários 1 e 2, durante o período de dois ciclos de maré representativos de sizígia do mês de julho

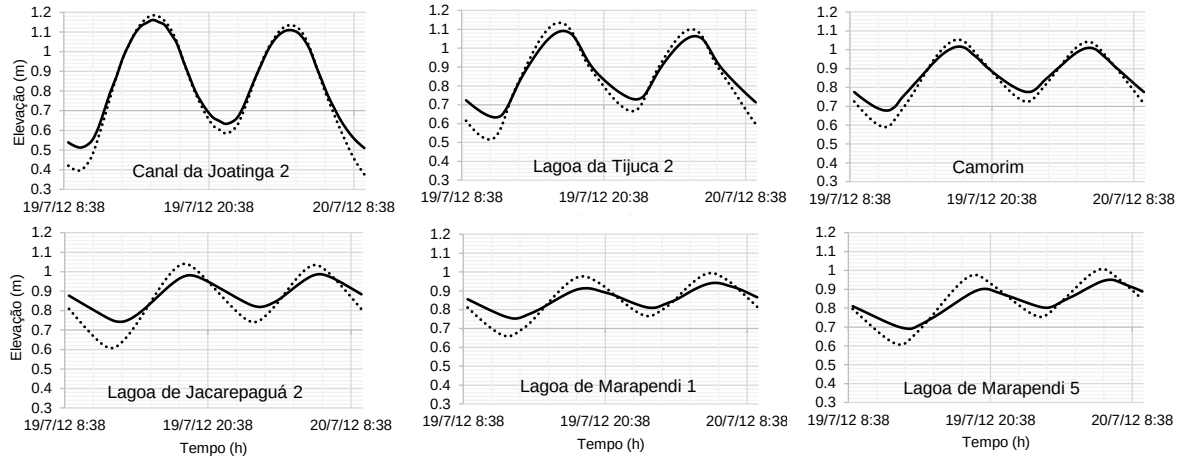


Figura 87. Séries temporais de elevação em uma estação representativa de cada lagoa dos cenários 1 e 2, durante o período de dois ciclos de maré representativos de sizígia do mês de julho

As alturas das marés aumentam para ambos os meses e em todas as lagoas do complexo no C2 comparado ao C1. É interessante notar também que há um maior aumento na amplitude da maré vazante. Isto é explicado pelo princípio de conservação de energia. Quando um canal de maré é raso e apresenta muita perda de carga devido ao atrito, é exigido dele uma força extra para que as águas saiam de seu domínio e isso faz com que o nível médio aumente. Quando há uma menor perda de carga devido ao aumento da área da seção de um canal de maré, a entrada de águas em uma maré enchente é favorecida e a amplitude das marés dentro das lagoas aumenta. Com isso, o

nível médio das lagoas diminui e fica mais próximo do nível do mar pois a saída das marés de dentro das lagoas é também é favorecida, sem que necessite de um esforço extra.

À medida que a corrente de maré entra por todo complexo, sofre um amortecimento em sua altura. A perda de altura é explicada pela perda de energia causada pelo atrito do escoamento com o fundo e as margens das lagoas, que na situação atual, apresentam seções hidráulicas obstruídas. Esta perda de carga é sentida através do amortecimento dos níveis de água de todo sistema lagunar.

A Tabela 13 mostra a porcentagem do amortecimento desta amplitude à medida que a maré penetra por todos canais e lagoas do complexo. Este cálculo é feito comparando as elevações de preamar e de baixa-mar em cada lagoa tendo como referência a entrada da a altura da maré que entra na fronteira aberta do domínio de modelagem.

Tabela 13. Porcentagens de amortecimento da amplitude de maré calculadas para as estações localizadas nas lagoas do SLJ para os cenários atual (C1) e de posterior intervenções (C2) nos meses de janeiro e julho.

	Amortecimento da Amplitude (%)							
	Janeiro				Julho			
	Sizígia		Quadratura		Sizígia		Quadratura	
Local	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Mar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Canal da Joatinga 2	45.43	35.06	33.14	22.26	51.97	34.54	23.09	20.48
Lagoa da Tijuca 1	60.98	49.38	55.37	36.68	63.71	48.62	47.53	31.40
Canal de Camorim	71.65	62.14	69.38	48.98	71.91	61.58	58.96	41.57
Lagoa de Jacarepaguá 2	79.48	64.51	76.82	49.67	80.20	64.14	64.56	43.00
Marapendi 1	85.57	73.72	83.83	59.35	86.61	73.64	68.93	49.32
Marapendi 5	84.89	72.25	81.00	55.76	82.53	69.26	70.40	48.29

Os valores na tabela acima mostram que, com a intervenção proposta no C2, ocorre a diminuição do amortecimento da amplitude para ambos meses. Com isso, a corrente de maré entra com maior facilidade e as ondas de maré viajam por todo complexo de forma mais rápida corroborando com os resultados mostrados nas análises de velocidade em todo complexo.

Para saber se as ondas de maré que entram pelo complexo viajam de forma mais rápida foi calculada a defasagem média da maré para cada lagoa e seus canais de comunicação, dispostas

na Tabela 14. Esta análise é feita através do cálculo da diferença de tempo entre o instante da preamar no mar e o instante da preamar na estação de referência de cada lagoa.

Tabela 14. Defasagem da maré média calculada para as estações localizadas nas lagoas do SLJ para os cenários atual (1) e de posterior intervenções (2) nos meses de janeiro e julho.

	Defasagem Média (h)							
	Janeiro/2012				Julho/2012			
	Sizígia		Quadratura		Sizígia		Quadratura	
Local	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Mar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Canal da Joatinga 2	1.00	1.00	0.50	0.50	1.00	1.00	1.25	0.61
Lagoa da Tijuca 1	2.25	1.75	1.50	1.25	2.25	2.00	2.75	2.50
Canal de Camorim	2.75	2.75	2.00	1.75	2.75	2.75	3.50	3.00
Lagoa de Jacarepaguá 2	4.25	3.50	3.25	2.75	4.25	3.50	4.50	3.75
Marapendi 1	3.75	3.50	3.00	2.50	4.00	3.75	4.25	4.00
Marapendi 5	4.75	4.00	4.00	3.00	5.00	4.25	5.00	4.50

De fato, no C1 a defasagem das correntes de maré é maior que no C2 tanto para o mês de janeiro quanto para julho. Com o aumento da profundidade dos canais e lagoas, a hidrodinâmica da lagoa é melhorada e a perda de carga é diminuída. No cenário atual a maré que passa pela fronteira aberta do domínio demora cerca de cinco horas para chegar na última lagoa de Marapendi e cerca de quatro horas para chegar na de Jacarepaguá. No C2 estas defasagens chegam a diminuir em até uma hora.

Em momentos de sizígia não há alteração na defasagem do C1 para o C2. Para a lagoa da Tijuca esta diferença chega a no máximo uma diminuição de meia hora em todos os cenários. De forma geral, a lagoa de Jacarepaguá e a de Marapendi são as que mais se beneficiam com as obras do C2.

Além do amortecimento da amplitude ocorre também a defasagem da corrente de maré a medida que entra pelo sistema, também explicada perda de carga. Estes efeitos podem ser observadas nas séries de elevações comparativas de ambos cenários na Figura 88, para janeiro e Figura 89 para julho e os respectivos detalhes durante dois ciclos de sizígia nos gráficos da Figura 90 e da Figura 91.

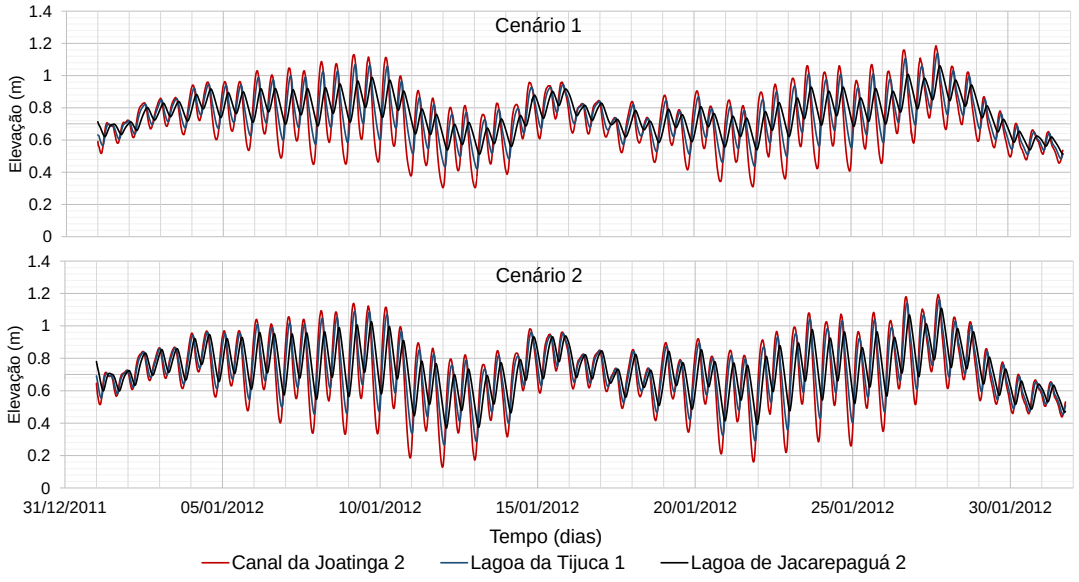


Figura 88. Variações do nível de água no mar no canal da Joatinga (vermelho), lagoa da Tijuca (azul) e lagoa de Jacarepaguá (preto) durante o mês de janeiro de 2012 simulado para os cenários 1 (atual) e 2 (com prolongamento do guia-correntes e com dragagem).

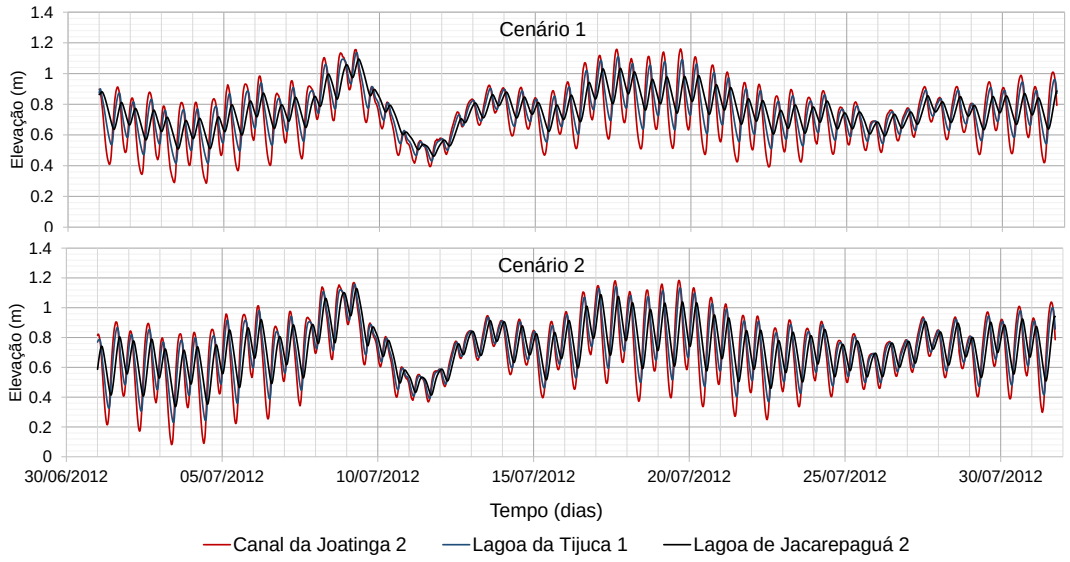


Figura 89. Variações do nível de água no mar no canal da Joatinga (vermelho), lagoa da Tijuca (azul) e lagoa de Jacarepaguá (preto) durante o mês de julho de 2012 simulado para os cenários 1 (atual) e 2 (com prolongamento do guia-correntes e com dragagem).

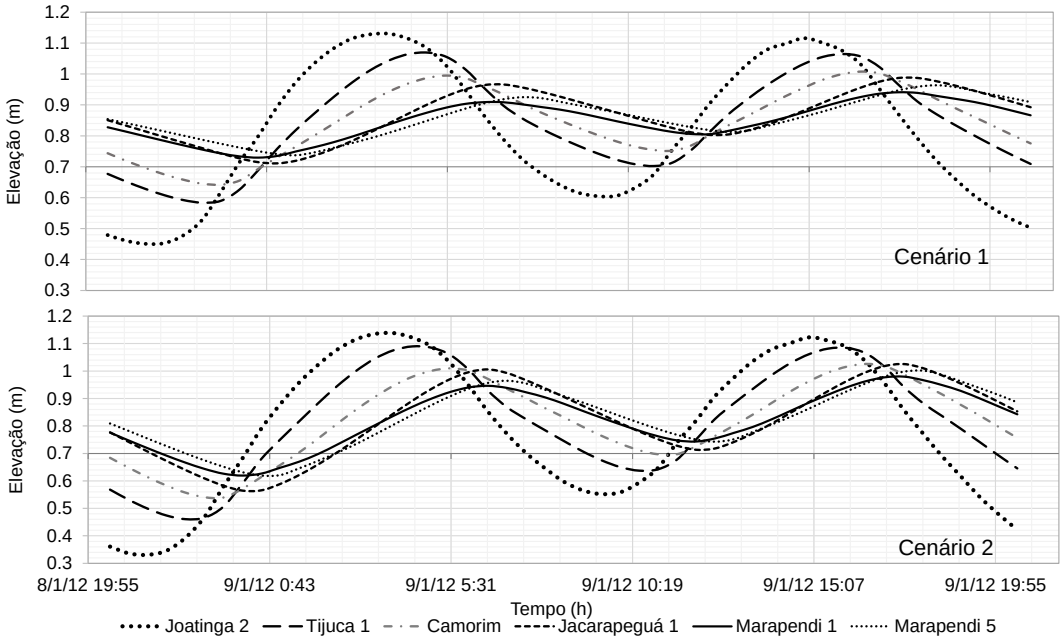


Figura 90. Série temporal de elevação em uma estação representativa de cada lagoa, durante o período de dois ciclos de maré representativos de sizígia do mês de janeiro

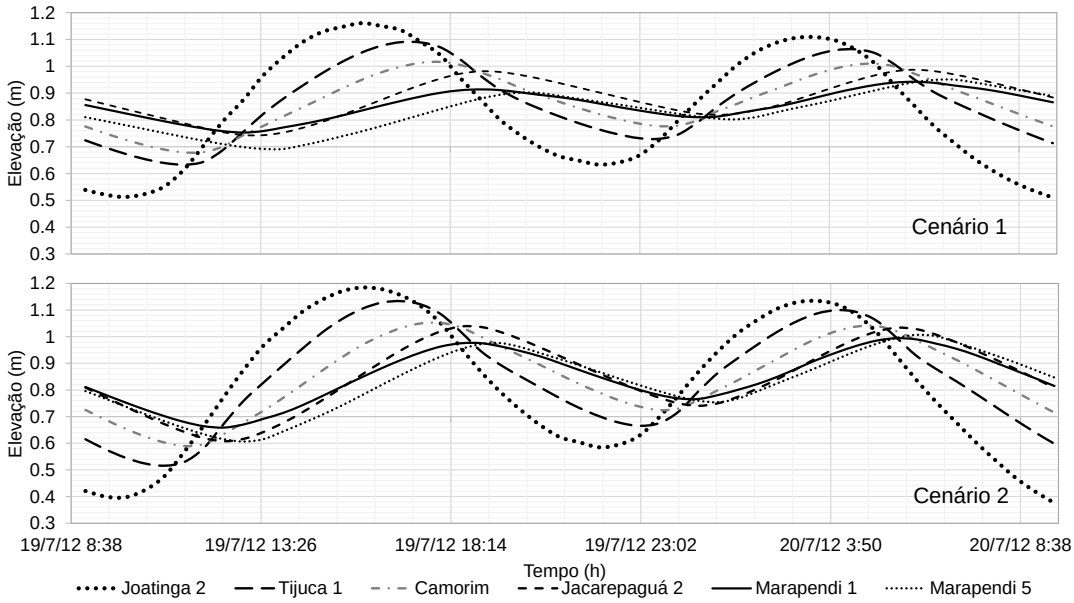


Figura 91. Série temporal de elevação em uma estação representativa de cada lagoa, durante o período de dois ciclos de maré representativos de sizígia do mês de julho.

As séries temporais de elevação mostram a atenuação da amplitude de maré e a defasagem que esta sofre no complexo para cada um dos quatro modelos hidrodinâmicos rodados. É notório que a defasagem da maré nas elevações do C2 é menor que a do C1 e que as elevações estão mais em fase após o aumento da embocadura do canal da Joatinga.

6.3. Renovação das Águas das Lagoas

As taxas de renovação do SLJ foram obtidas através da metodologia descrita na seção 4.2. Foram realizadas quatro simulações, representativos de verão e inverno para o C1 e o C2, com duração de noventa dias cada uma.

A condição inicial para todos os modelos está representada na Figura 13, onde águas fora do complexo e as vazões dos rios são prescritos com concentração igual a 100 e as de dentro do complexo igual a 0. Sendo assim, as águas oceânicas e dos rios são águas 100% novas, não necessariamente limpas, e as das lagoas 0% nova.

Conforme a simulação decorre, a água marcada como nova sofre processos de advecção e difusão e mistura-se por todo o domínio dentro das lagoas. Esta mistura se dá principalmente através do efeito das marés que entram pelo canal da Joatinga e também pelos aportes fluviais. Dois resultados foram gerados para representar a taxa de renovação. O primeiro, na forma de isolinhas, o que permite saber a distribuição espacial da renovação para instantes específicos e o segundo na forma de séries temporais nas estações nas lagoas, mostradas na Figura 57.

6.3.1. Verão

Os resultados espaciais para a modelagem representativa de verão estão apresentados da Figura 92 a Figura 98. Em todas as imagens é possível acompanhar a intrusão das águas do mar através das lagoas ao longo do tempo e que a taxa de renovação é aumentada conforme os ciclos de maré e o aporte fluvial.

Com cinco dias de simulação a lagoa de Jacarepaguá começa a mostrar a renovação devido ao aporte fluvial do rio Pavuninha, enquanto que a entrada das marés renova a região da Lagoa da Tijuca e da primeira lagoa de Marapendi. Com dez dias de simulação a lagoa de Marapendi mostra-se menos renovada do que com cinco dias, evento explicado pela influência dos ciclos de maré.

Os mapas mostram que as diferenças entre o C1 e o C2 foram mais perceptíveis a partir de quinze dias de simulação, quando a lagoa de Jacarepaguá apresenta uma gradação cerca de 10% mais renovada no C2 comparado ao 1 (Figura 95). Esta diferença se manteve até o instante de noventa dias de simulação, salvo as regiões onde a renovação ocorreu devido aos rios.

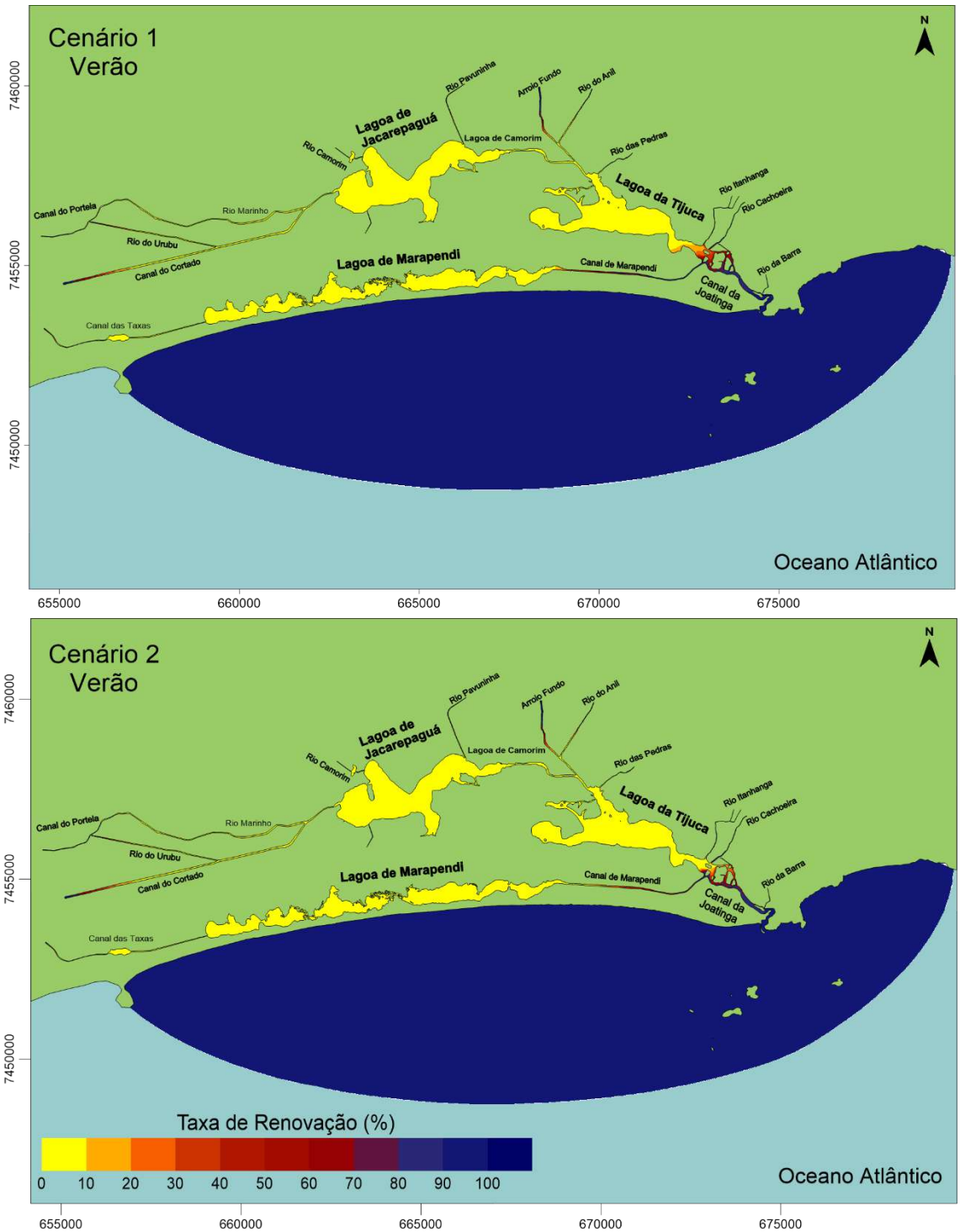


Figura 92. Taxa de renovação após 1 dia de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2.

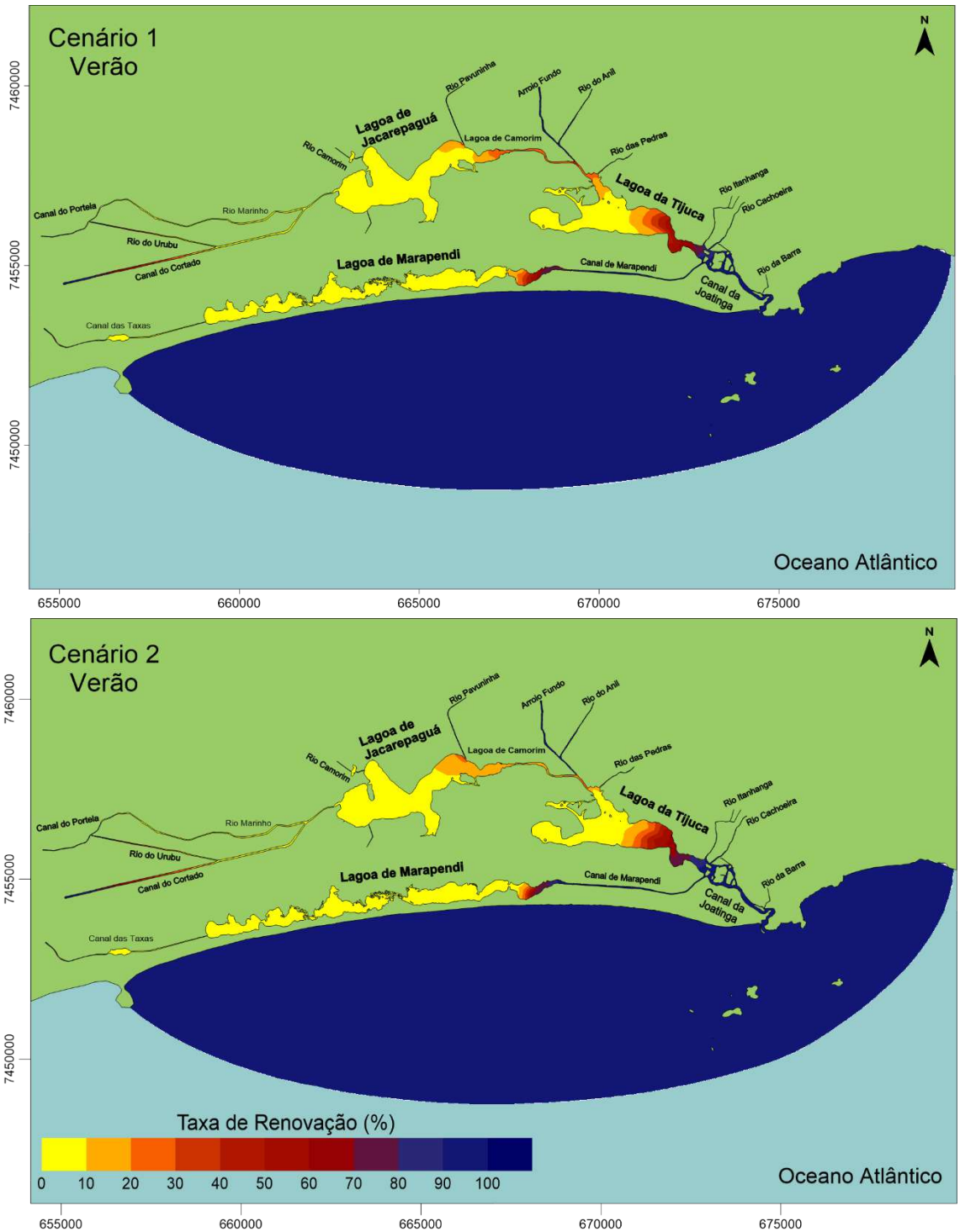


Figura 93. Taxa de renovação após 5 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2.

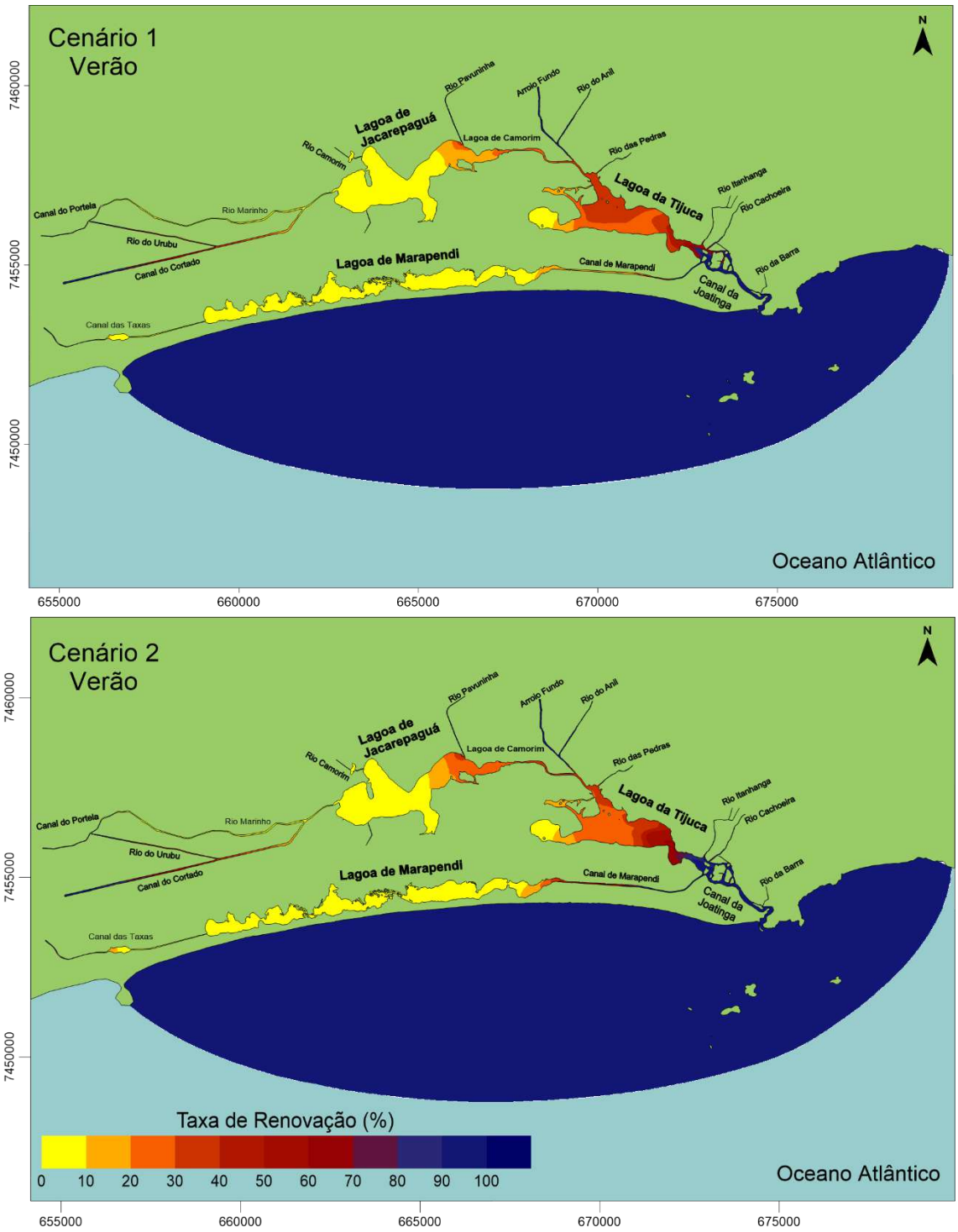


Figura 94. Taxa de renovação após 10 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2.

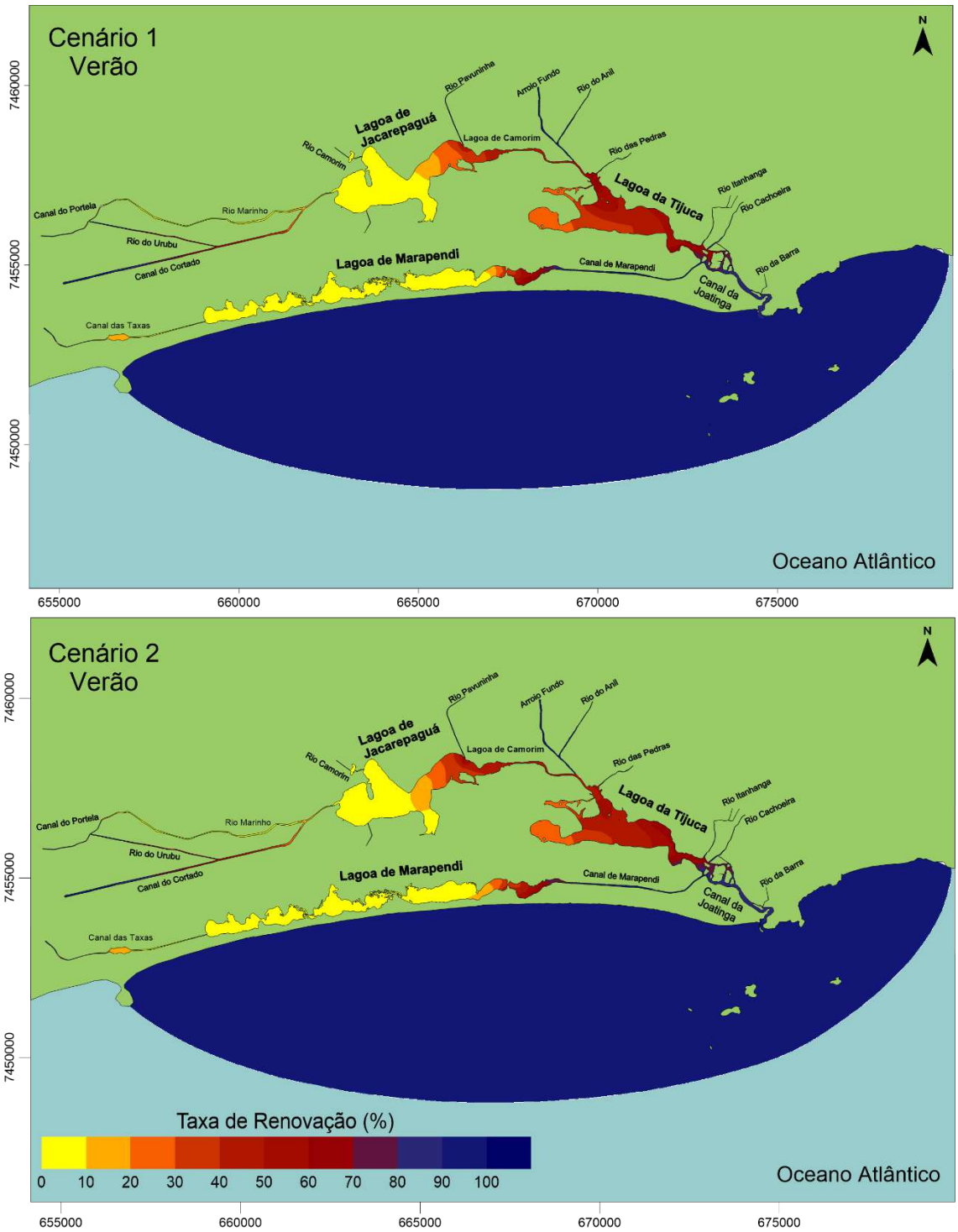


Figura 95. Taxa de renovação após 15 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2.

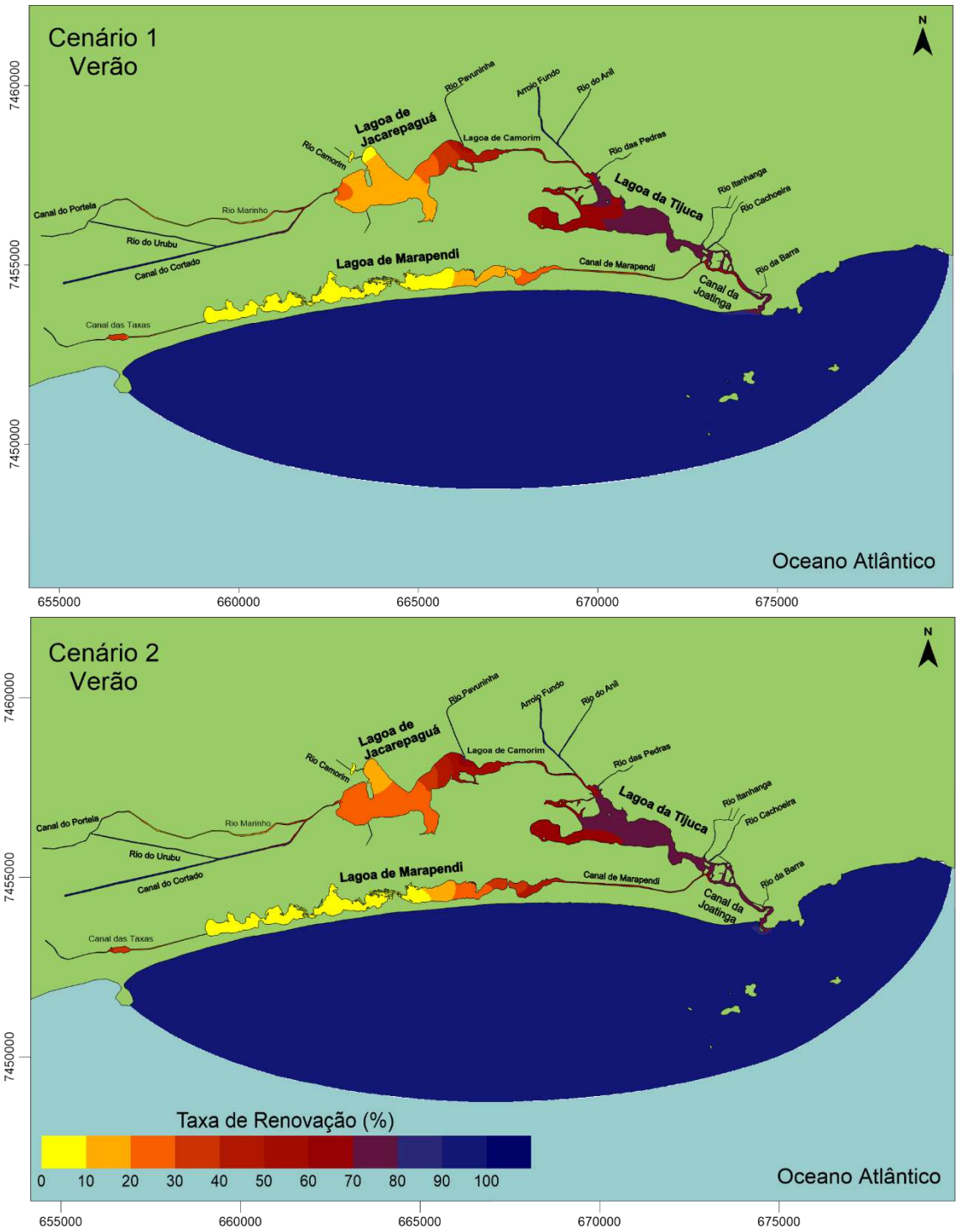


Figura 96. Taxa de renovação após 30 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2.

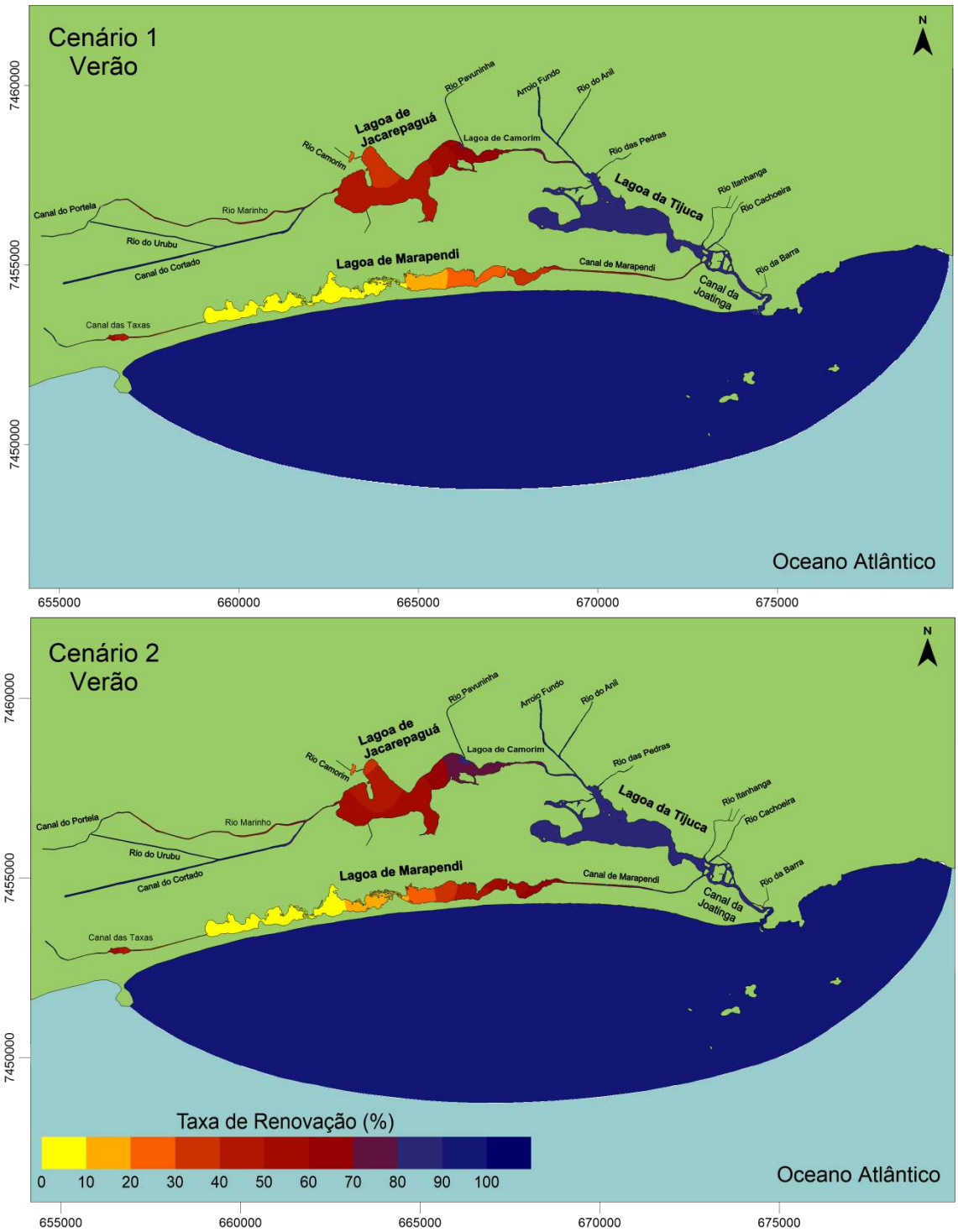


Figura 97. Taxa de renovação após 60 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2.

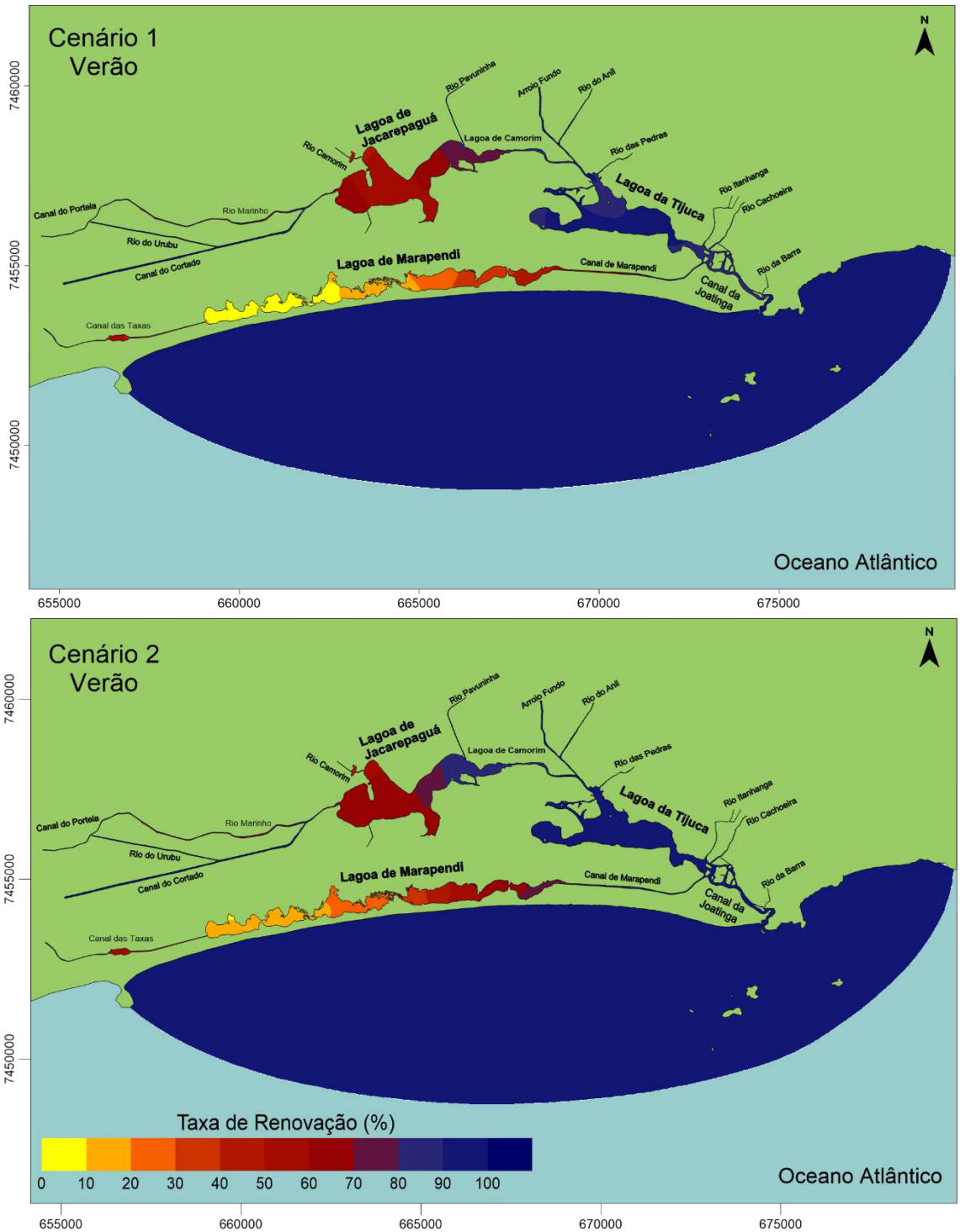


Figura 98. Taxa de renovação após 90 dias de simulação do mês de janeiro para os cenários 1 e 2.

As séries temporais da taxa de renovação em cada lagoa mostram que a renovação do SLJ é principalmente dependente dos ciclos de maré que adentram nas lagoas, como mostra a Figura 99. Os resultados das séries foram filtrados por meio de média móvel com o período de 48 horas

e com isso é possível perceber a influência da maré meteorológica nas oscilações de renovação em cada lagoa.

As taxas de renovação atingem valores altos à medida que a maré entra nas lagoas principalmente nas preamares de sizígia, e quando há sobrelevação do nível médio do mar devido a maré meteorológica. Os menores valores são encontrados quando ocorre a vazante das marés, com valores mínimos nas sizígias também quando ocorre o rebaixamento do nível médio do mar devido a eventos meteorológicos.

As séries temporais mostram a porcentagem final dos valores da taxa de renovação obtidas no final de cada simulação. Como observado nas imagens, a renovação das águas das lagoas mais próximas a embocadura não apresenta grandes diferenças entre o C1 e o C2, chegando a uma diferença de 3%. Já a lagoa de Jacarepaguá em seu início, próximo ao canal de Camorim, é renovada cerca de 8% a mais que no C1 e mais no seu interior cerca de 9%.

Já as lagoas de Marapendi são renovadas aproximadamente 13% a mais no C2 em relação ao C1. Em ambos cenários há pouca renovação das águas de Marapendi 5 com 90 dias de simulação. As águas começam a ser renovadas nas estações de Marapendi 4 e 5 só depois de cinquenta dias de simulação. No C1, apenas 6.93% de suas águas são renovadas e no C2, 11.05% delas são renovadas.

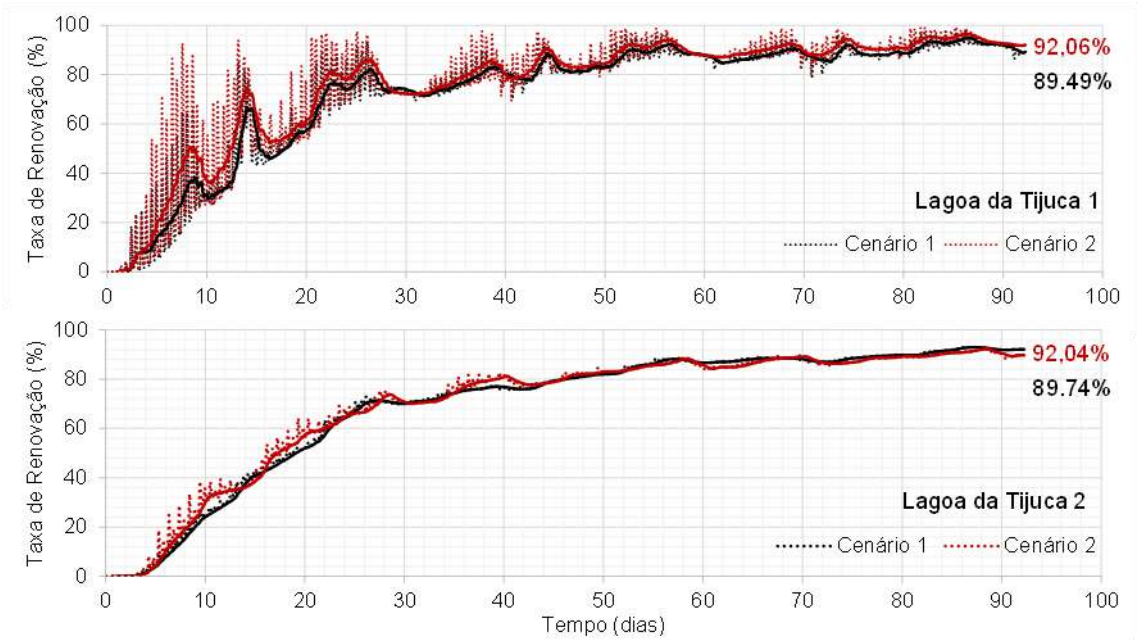


Figura 99. Séries temporais da taxa de renovação nas estações da lagoa da Tijuca durante o mês de janeiro para os cenários 1 e 2.

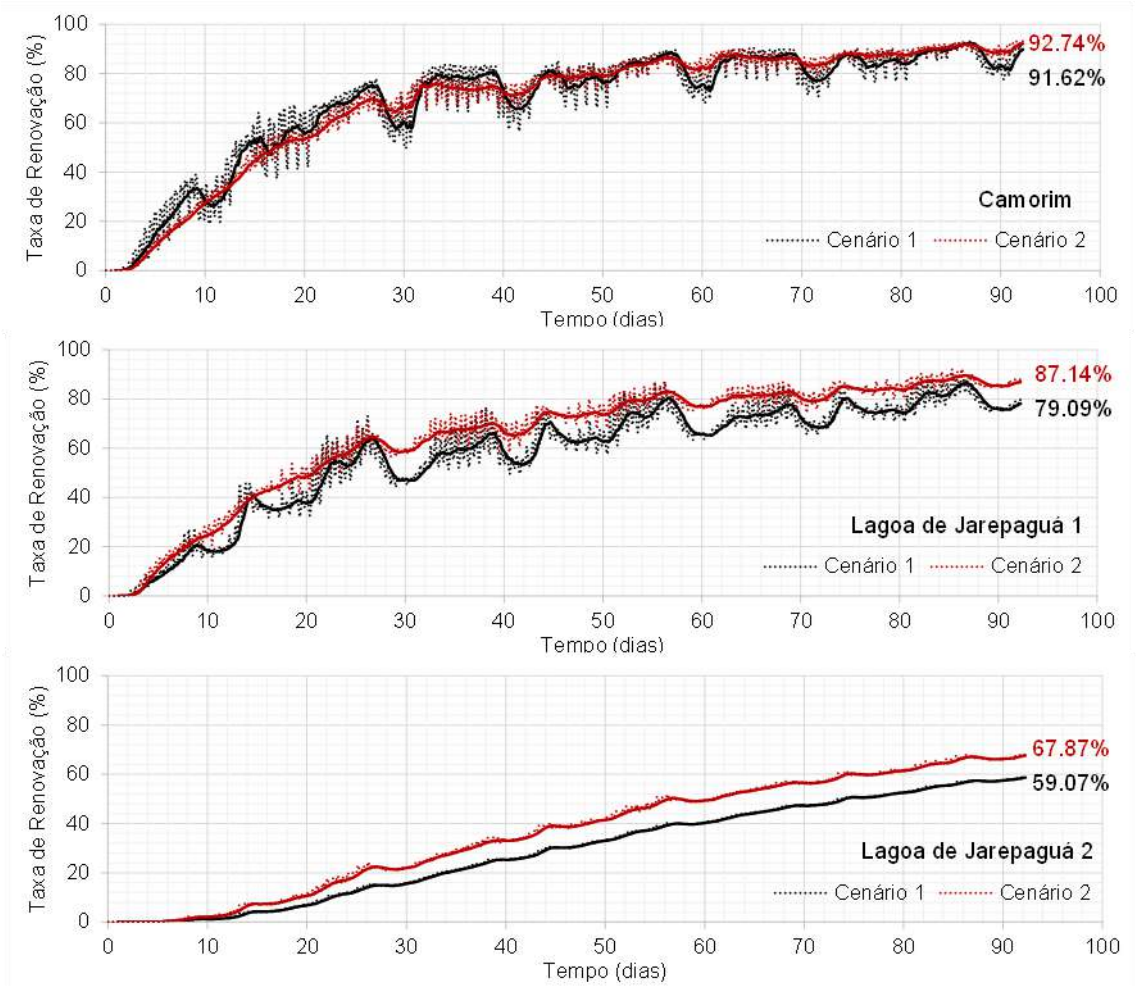


Figura 100. Séries temporais da taxa de renovação nas estações da lagoa de Jacarepaguá durante o mês de janeiro para os cenários 1 e 2.

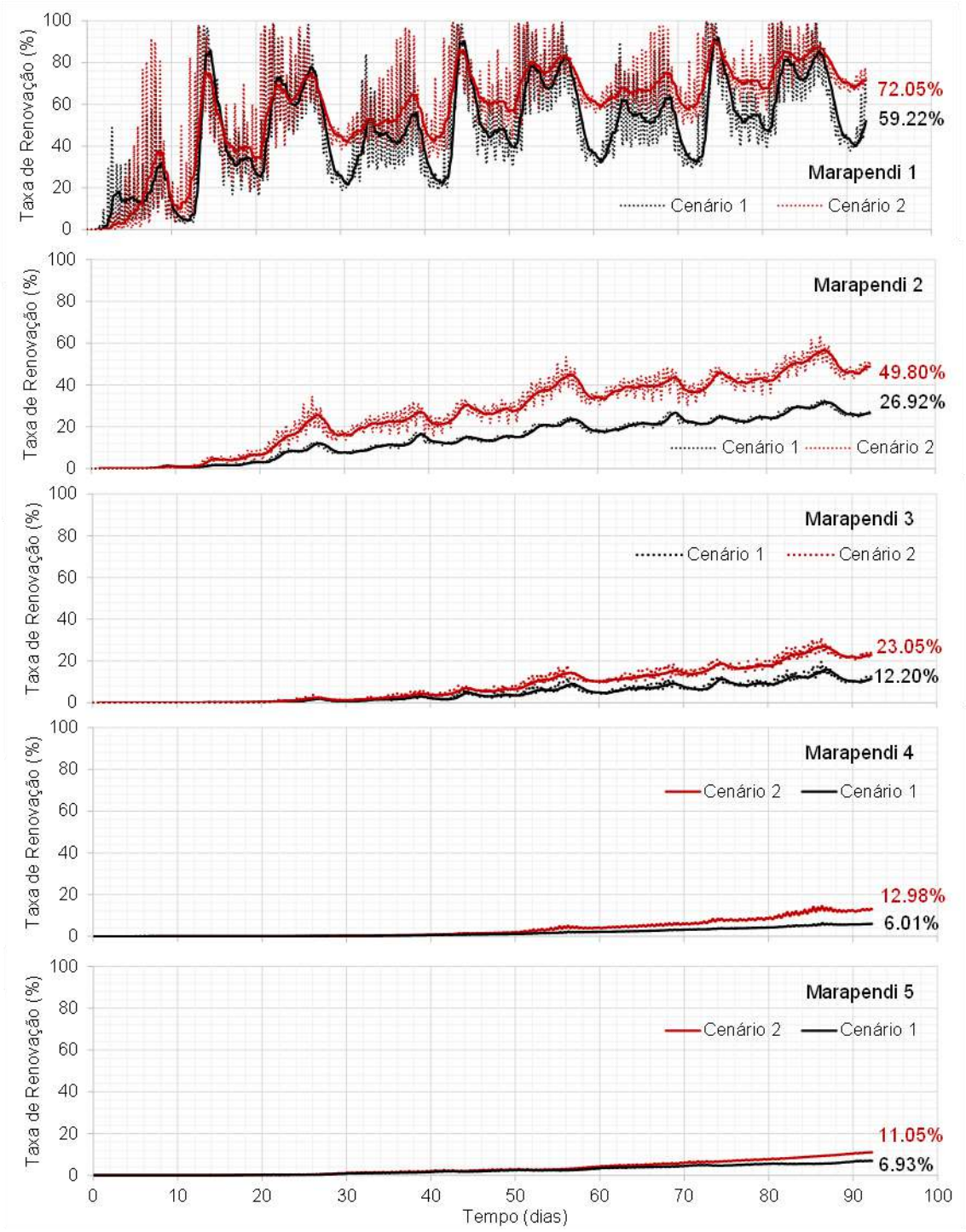


Figura 101. Séries temporais da taxa de renovação nas estações das lagoas de Marapendi durante o mês de janeiro para os cenários 1 e 2.

6.3.2. Inverno

Os resultados espaciais da taxa de renovação em julho estão dispostos da Figura 102 a Figura 108 e mostram que desde o primeiro dia de simulação existem diferenças consideráveis entre o C1 e o C2. Com cinco dias de duração, é possível notar que a maré já influencia a região entre o canal de Camorim e a lagoa de Jacarepaguá. Nota-se que a influência da maré empurra o aporte fluvial do Rio Pavuninha.

Há, portanto, uma maior intrusão das águas do mar no cenário de julho. Isto pode ser explicado pelo aumento do prisma de maré neste mês principalmente nas quadraturas, como já discutido na seção 6.2.2. As vazões no período de inverno apresentam menor aporte fluvial com parado ao verão e também pela maior passagem de frentes frias neste período, ambos influenciando em uma maior entrada de águas oceânica no estuário.

Na imagem referente ao décimo dia de simulação de julho (Figura 104), é importante notar a saída das águas não renovadas do sistema lagunar pelo canal da Joatinga. No C1 estas águas atingem as praias da Barra, a oeste do canal, indicando a influência destas em uma maré de vazante. No C2, estas águas ficam restritas a região na frente do canal, mostrando o efeito que o guia-correntes prolongado no desvio as águas da região das praias da barra.

Com o menor aporte fluvial, as águas próximas aos canais presentes a oeste das lagoas contribuem menos para a renovação das águas nesta região, que estão mais afastadas da embocadura também. Portanto, estas regiões no instante final da simulação apresentam taxa de renovação de 0-10%. Para o cenário de verão estas regiões apresentam renovação em 100%. O canal das Taxas é um bom exemplo para observar nas figuras apresentadas, pois é renovado 100% com trinta dias de simulação no verão (Figura 96) e com sessenta dias no inverno (Figura 107).

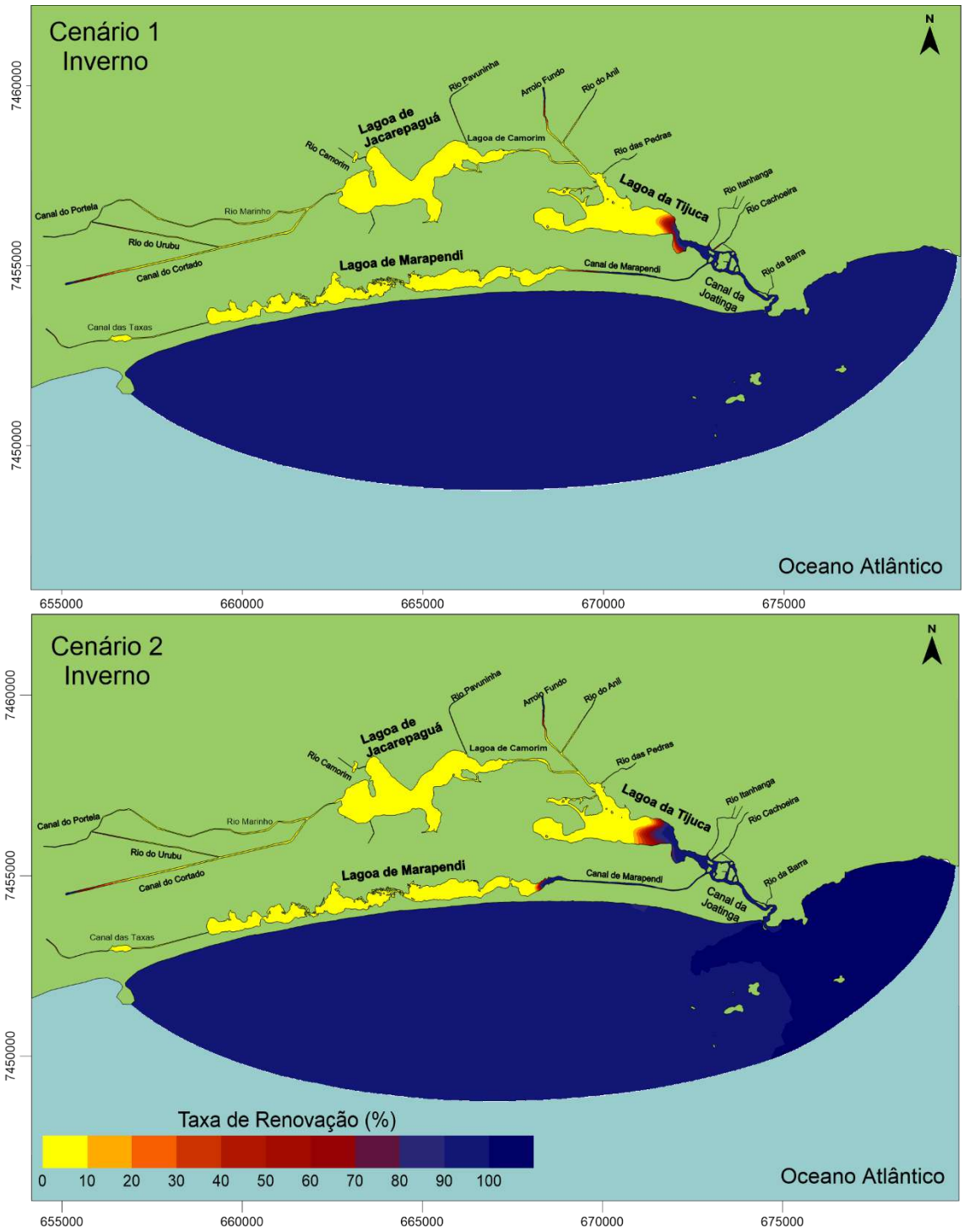


Figura 102. Taxa de renovação após 1 dia de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2.

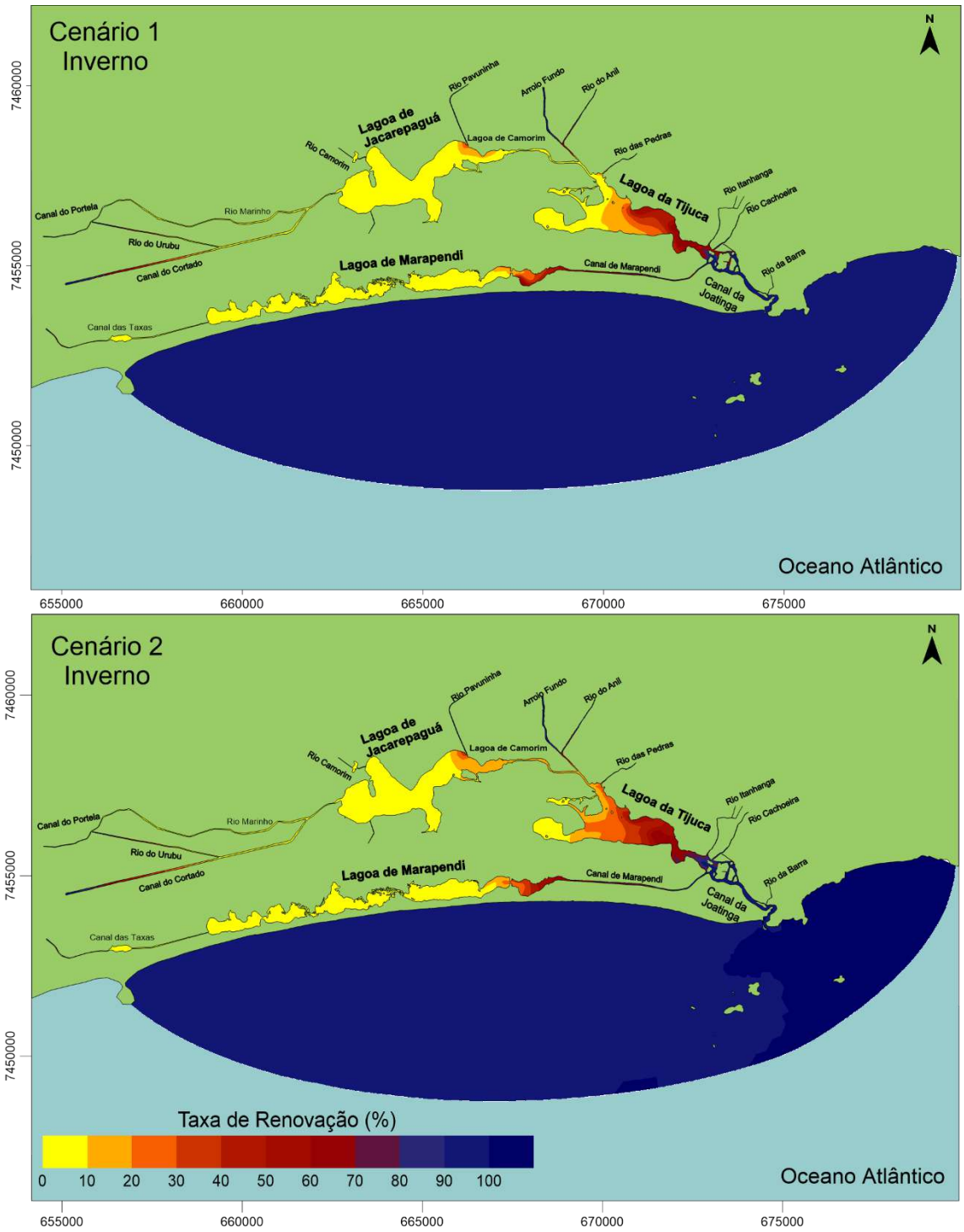


Figura 103. Taxa de renovação após 5 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2.

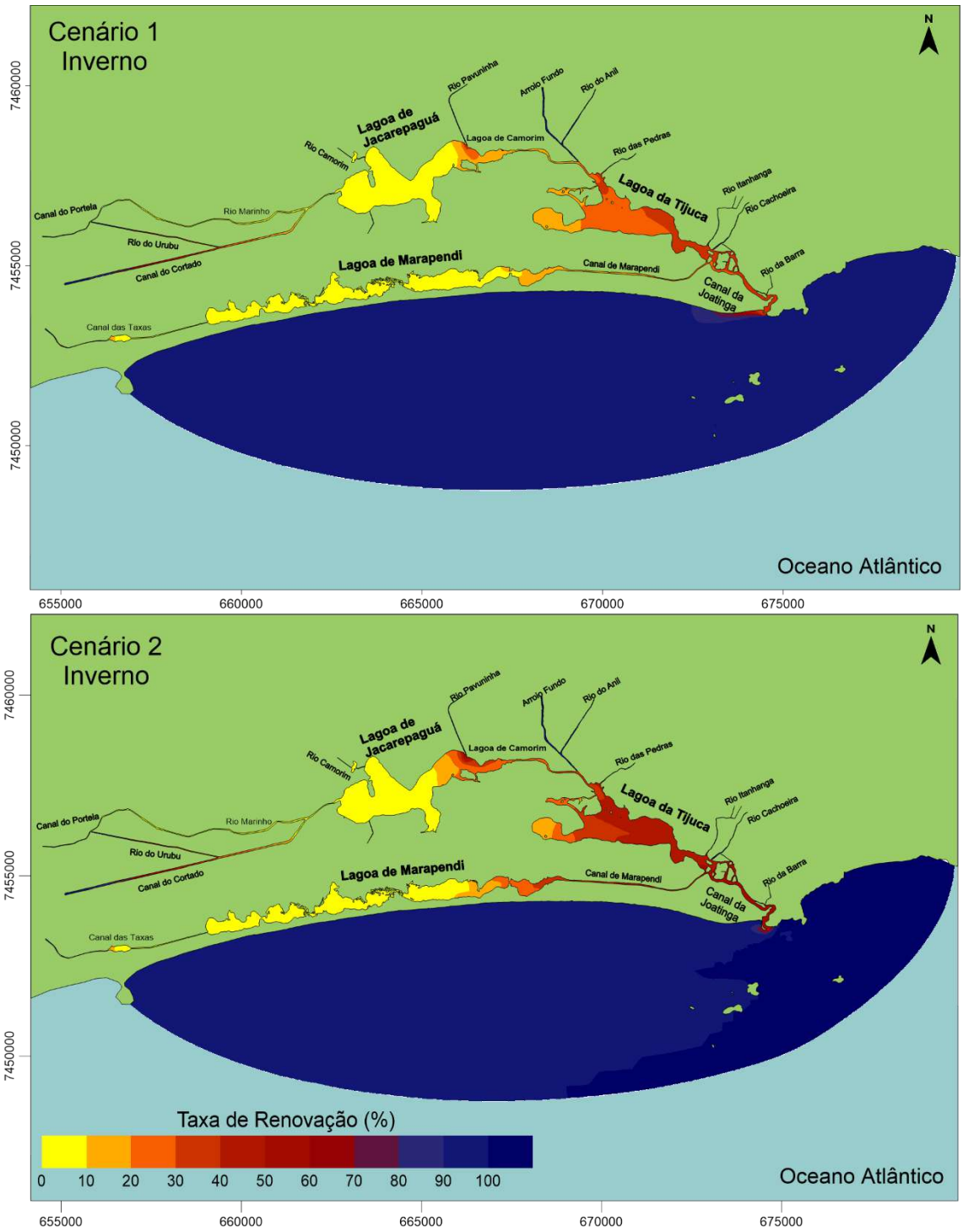


Figura 104. Taxa de renovação após 10 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2.

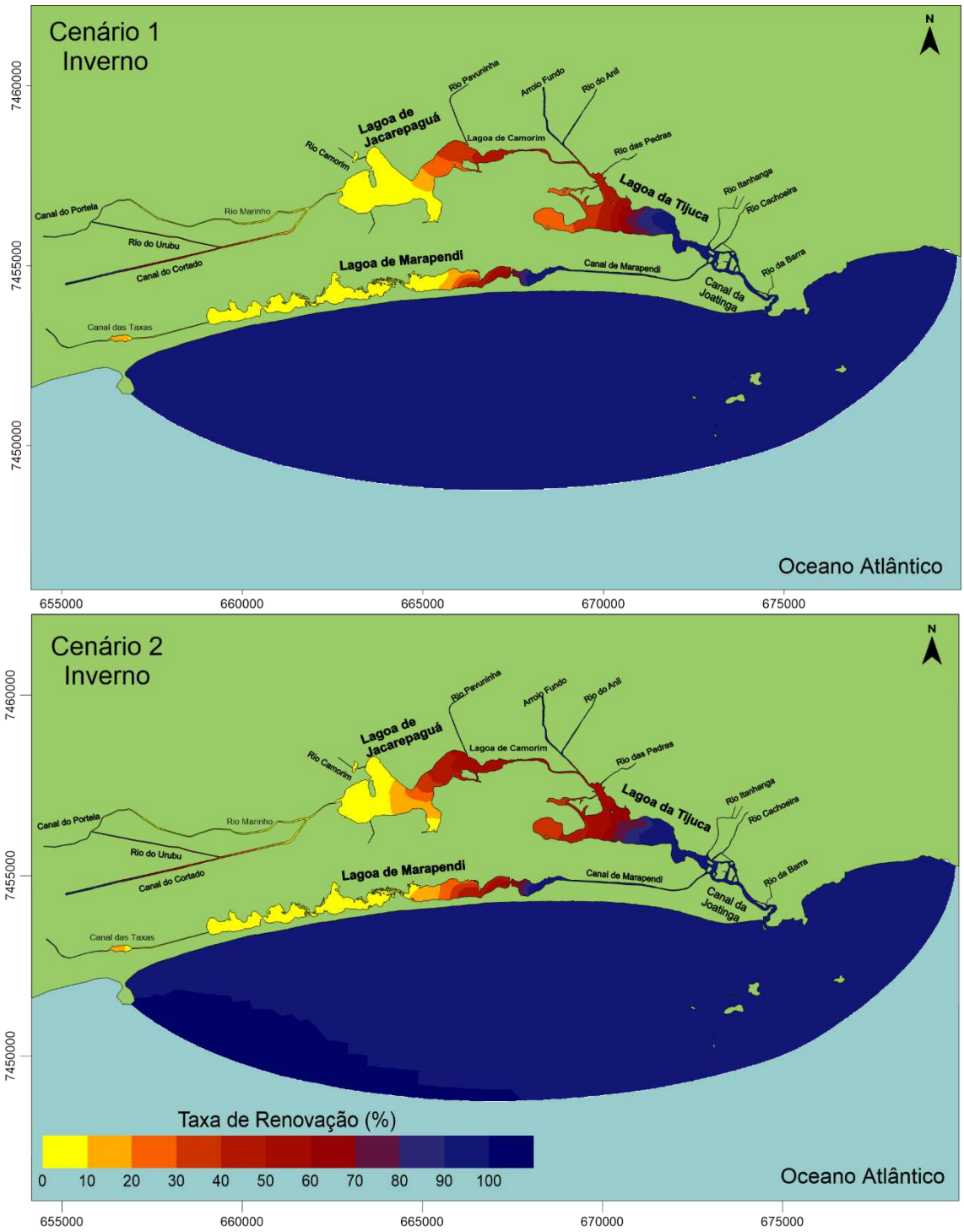


Figura 105. Taxa de renovação após 15 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2.

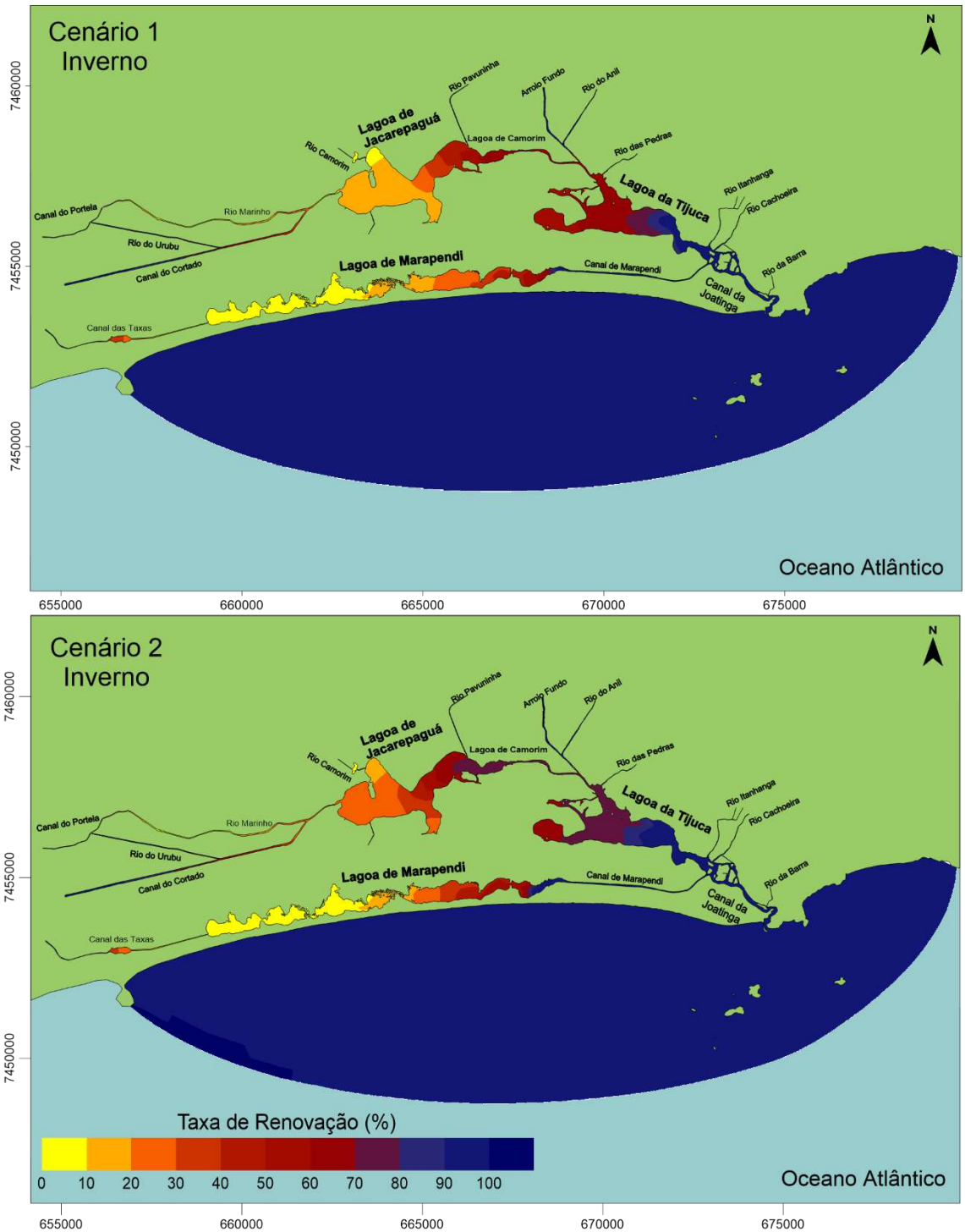


Figura 106. Taxa de renovação após 30 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2.

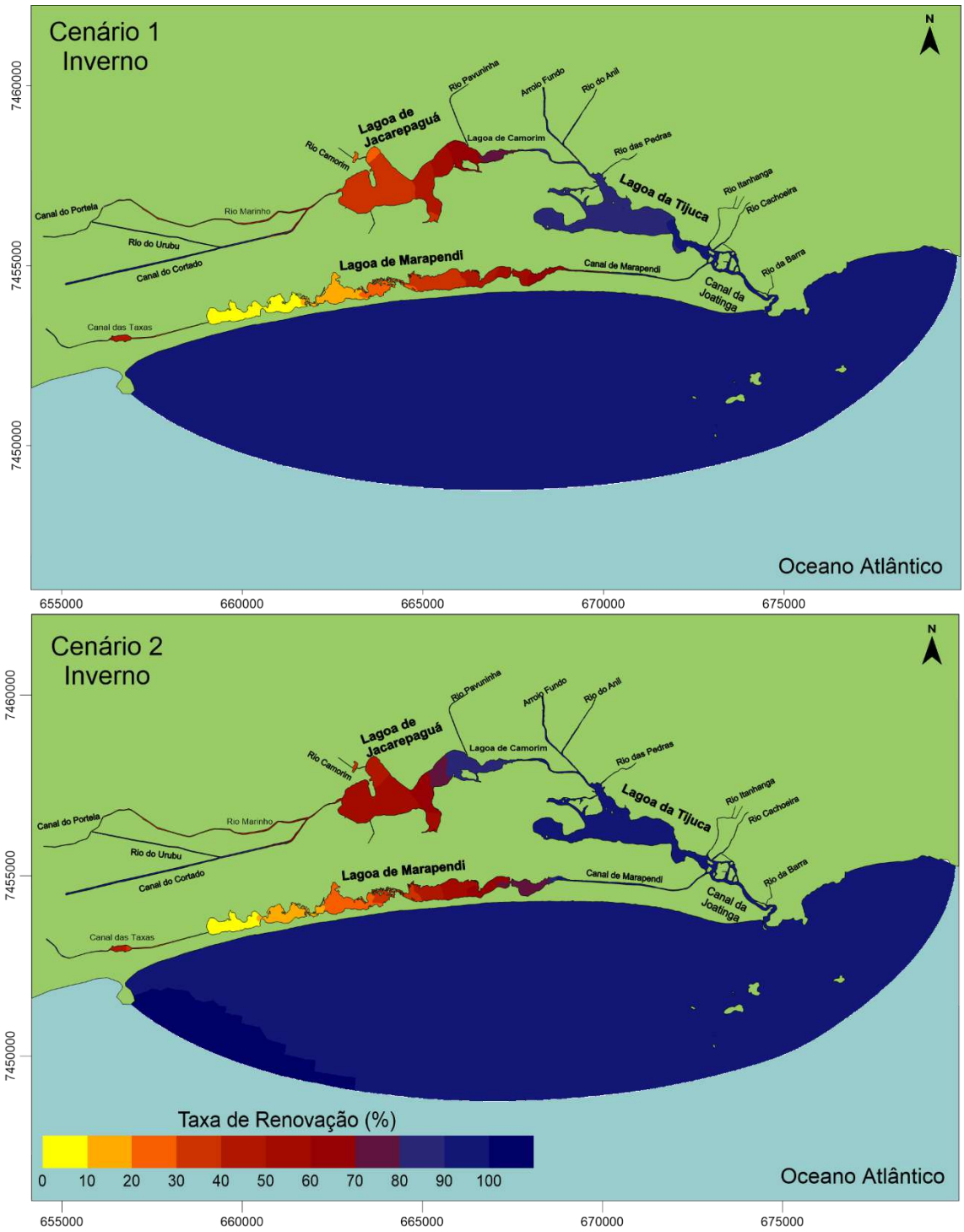


Figura 107. Taxa de renovação após 60 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2.

33

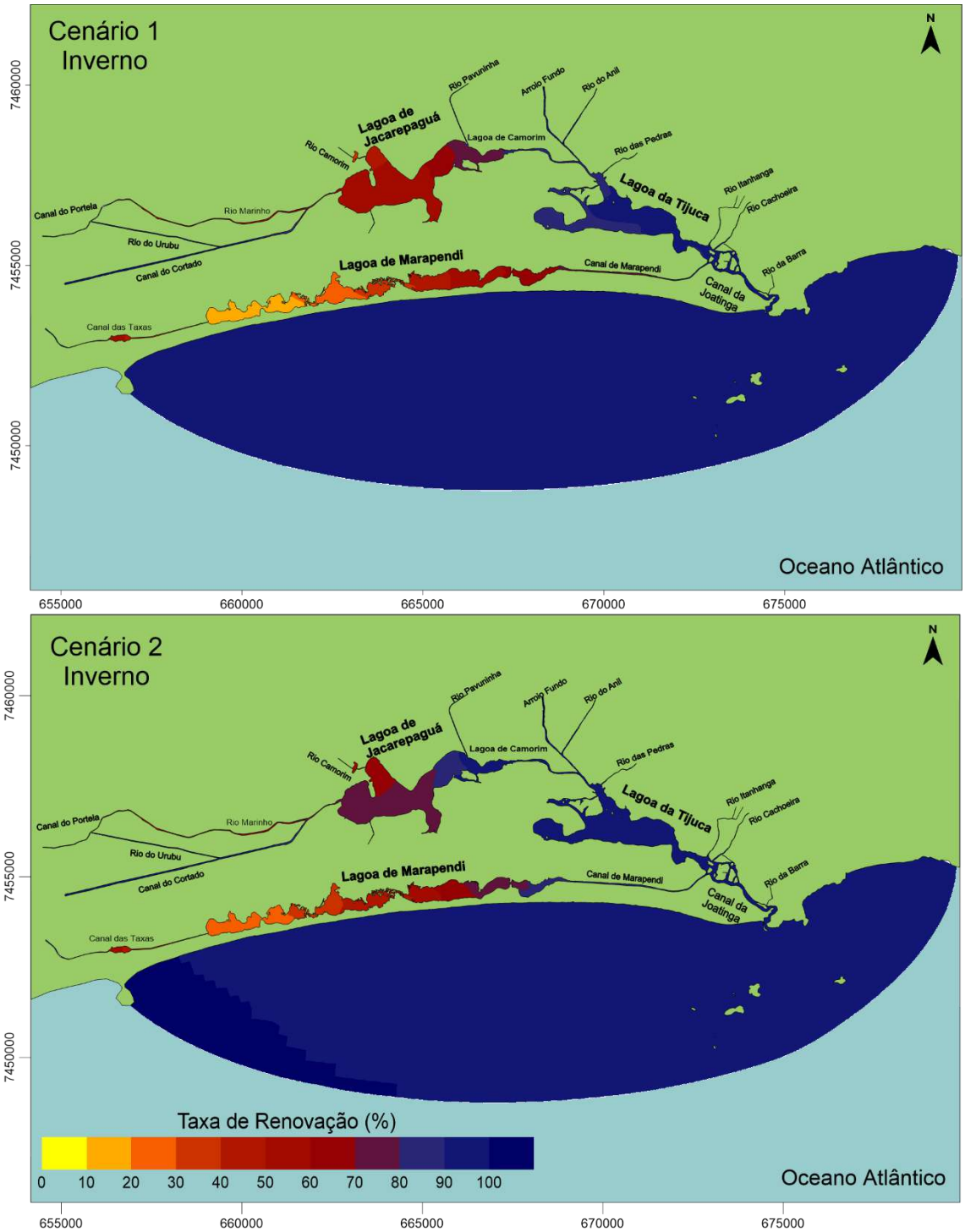


Figura 108. Taxa de renovação após 90 dias de simulação do mês de julho para os cenários 1 e 2.

As séries temporais de renovação das águas no inverno mostraram resultados mais significativos nas porcentagens finais da taxa de renovação em cada lagoa, para os cenários 1 e 2, indicadas na Figura 109 que no verão. A estação na lagoa da Tijuca 1 resultou em uma renovação 10% maior no C2 e a lagoa da Tijuca 2, um aumento de 6%.

Depois de 3 meses de simulação em julho, o canal de Camorim é renovado em 96.15% no C1 e 86.46% no C2, um aumento efetivo que também foi sentido na lagoa de Jacarepaguá, no qual está ligado. No C1 há a renovação de 94.7% e no C2 de 77.67% para a estação na lagoa de Jacarepaguá 1 e na estação lagoa de Jacarepaguá 2 este aumento chegou a quase 20%.

A estação Marapendi 1 renovou 65.52% no C1 e no C2 quase 20% a mais, enquanto que em sua última porção o aumento foi de aproximadamente 10%. As renovações foram significativamente melhores nas simulações de julho comparadas a janeiro, o que era de se esperar diante dos resultados dos prismas de maré. Nos casos de janeiro as renovações aumentam mais que 10% em Marapendi 1, enquanto que nas demais lagoas as taxas não passam de 8%.

Para ambos os cenários de verão e inverno a maré meteorológica tem um efeito na renovação das águas do sistema lagunar muito mais forte que as astronômicas. O sinal meteorológico faz com que a maré suba por mais de dias, diferente da astronômica que tem ciclos diários. E é nesse período que as marés conseguem chegar nas lagoas da Tijuca e nas de Marapendi de forma mais significativa. No C2, a saída destas águas tende a ser maior que no de C1 em períodos onde há o rebaixamento da maré, favorecendo a renovação.

É interessante notar que as lagoas mais distantes da embocadura como as de Jacarepaguá, Marapendi 3, 4 e 5, são cada vez menos influenciadas pela entrada das marés tanto no inverno quanto no verão, mesmo que as vazões fluviais maiores. Sua renovação começa depois de trinta dias de simulação para ambos cenários, sendo que neste a influência delas renova 10-15% no C2 contra 5-10% no C1.

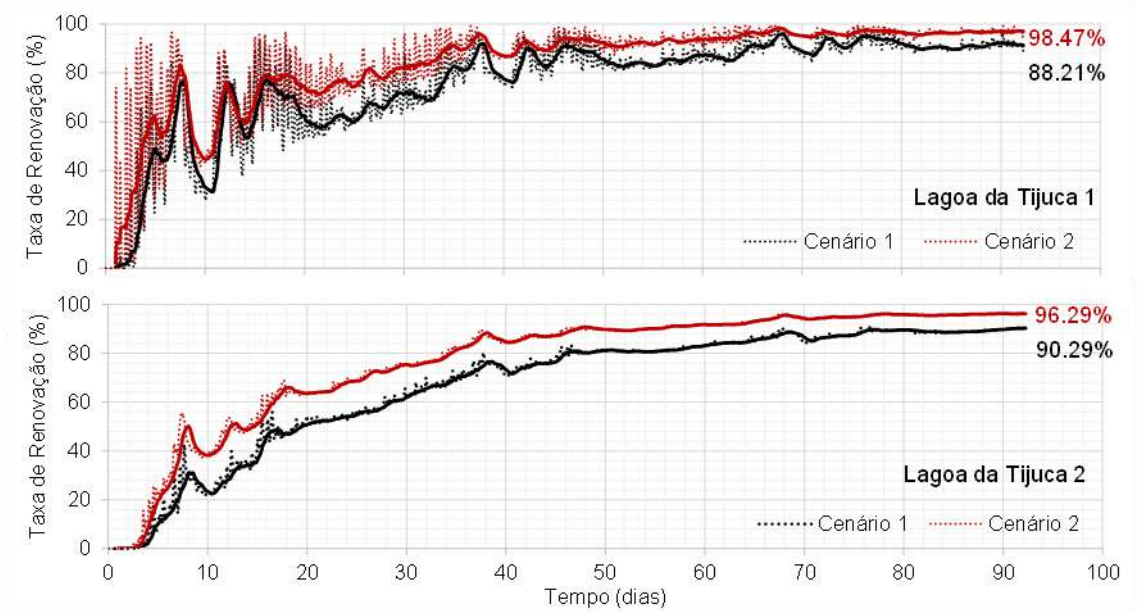


Figura 109. Séries temporais da taxa de renovação nas estações da lagoa da Tijuca durante o mês de julho para os cenários 1 e 2.

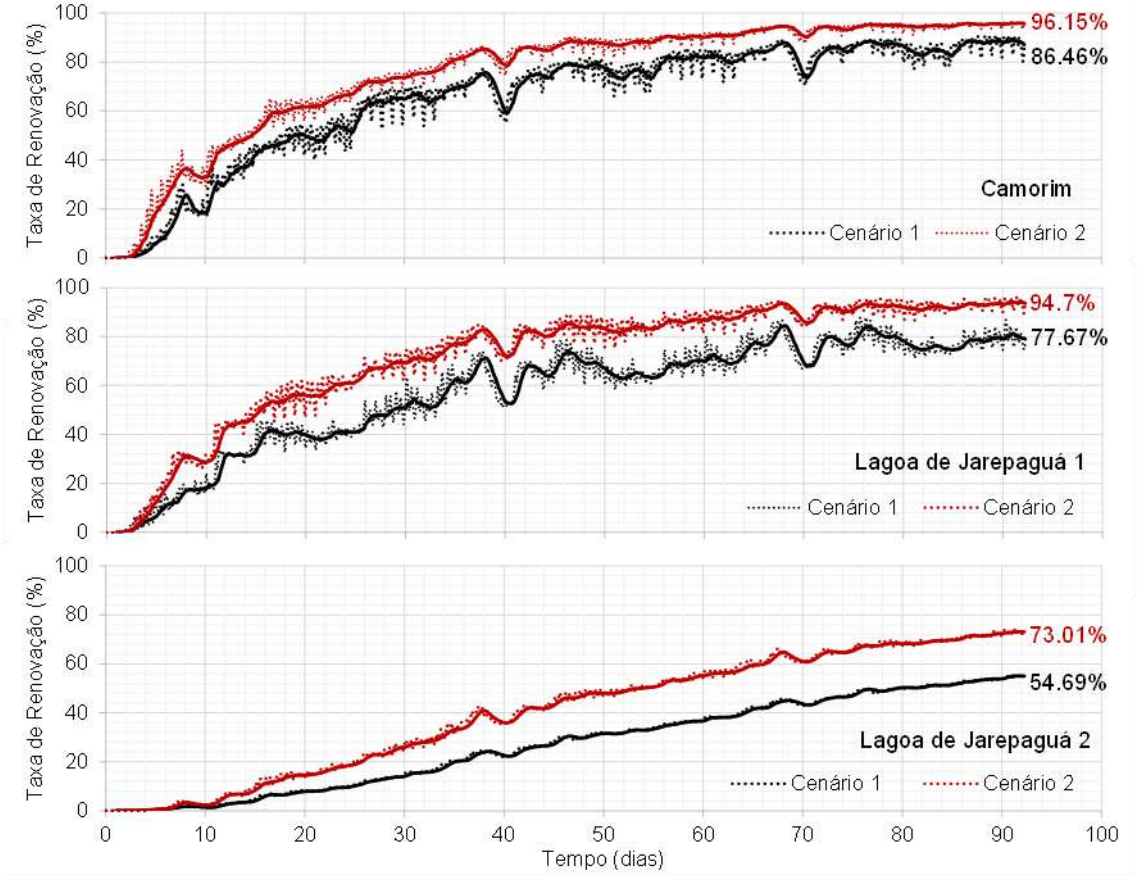


Figura 110. Séries temporais da taxa de renovação nas estações da lagoa de Jacarepaguá durante o mês de julho para os cenários 1 e 2.

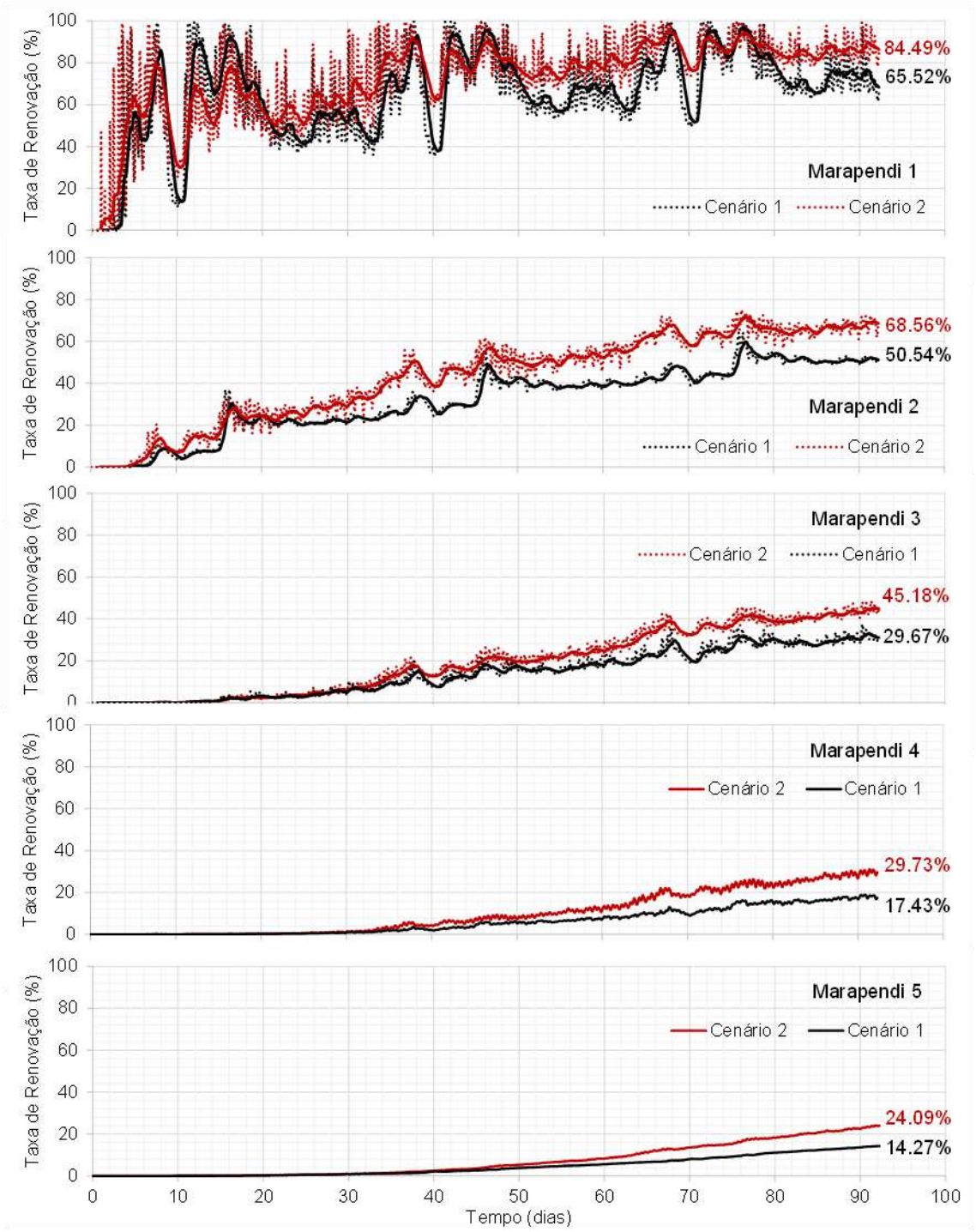


Figura 111. Séries temporais da taxa de renovação nas estações das lagoas de Marapendi durante o mês de julho para os cenários 1 e 2.

6.4. Balneabilidade das Praias

Os resultados das análises do modelo lagrangeano estão expostos através de imagens com isolinhas de concentração e ocorrências de passagem de pluma. Sendo assim, é possível ter uma noção espaço-temporal do comportamento das águas oriundas do SLJ. A ocorrência de passagem da pluma mostra por onde as águas que saem das lagoas vão e com que frequência elas passam pelo domínio.

A análise da porcentagem de ocorrência de pluma foi calculada para as concentrações acima da concentração limite definida pelo CONAMA 274, expostas na 3.1.1 na Tabela 2. A resolução define que concentrações maiores que 1000NMP/100mL de coliformes termotolerantes classificam as águas como impróprias para banho. Essa probabilidade foi aplicada para o período da noite e para o período de dia, quando a população faz o uso da praia, conforme os horários propostos na Tabela 15.

Tabela 15. Horários propostos para o cálculo da ocorrência de passagem de pluma com concentrações acima de 1000NMP/100mL.

	Dia	**Noite**
Verão	6h-19h	20h-5h
Inverno	6h-17h	18h-5h

Os mapas da Figura 112 a Figura 115 mostram os resultados das quatro situações para os cenários 1 e 2. Em todos os cenários o guia-correntes prolongado beneficia as praias adjacentes ao canal da Joatinga pois a ocorrência de concentrações consideradas impróprias para banho fica mais restrita a região da embocadura e até mais para a região oceânica do que não região costeira.

Além disso, com o aumento do volume de entrada de águas nas lagoas há maior diluição da concentração dos indicadores, o que limita as maiores concentrações em sofrer advecção para leste e oeste pois os coliformes sofrem decaimento antes que sejam transportados em grandes concentrações.

As plumas são maiores e aparecem com mais frequência no domínio durante o inverno quando comparadas as de verão. Como decaimento das bactérias ocorre principalmente pela radiação solar, no inverno elas persistem mais nas águas pois nesta estação a intensidade de radiação é menor comparado ao verão, como explicado na seção 3.1.3 sobre as temperaturas na região.

As plumas no C1 possuem maior extensão longitudinal a linha de costa em relação ao C2. Contudo, no C2 esta extensão é maior no sentido transversal a costa e acabam chegando em menos de 10% do tempo nas ilhas presentes no domínio.

O redirecionamento da saída das águas no C2 devido ao prolongamento do guia-correntes não faz com que maiores concentrações de coliformes termotolerantes ocorram com maior frequência na região leste do domínio em ambas estações, que pode ser explicado pela maior diluição que o indicador sofre com o aumento da vazão no canal da Joatinga. As concentrações próximas a praia de São Conrado diminuem de 20% de ocorrência para 2% (Figura 113). No inverno apenas as águas não se afastam tanto da costa quanto no C1 e a ocorrência de concentrações mantém-se parecida nesta região (Figura 115).

No cenário de dia durante o verão (Figura 112), a porcentagem de ocorrência de plumas com concentração acima de 1000 NMP/100mL na praia da Barra diminui cerca de 10% no C2 comparado ao C1. Durante a noite o C2 apresentou a mesma melhora, inclusive para a região leste, na praia de São Conrado (Figura 113). O alcance da pluma se estendeu para a direção dos oceanos e a melhora nas praias é considerável. A região mais próxima à embocadura não apresenta melhorias quanto a ocorrência de concentrações acima do limite. Em todos os cenários a ocorrência de passagem fica em torno de 90%.

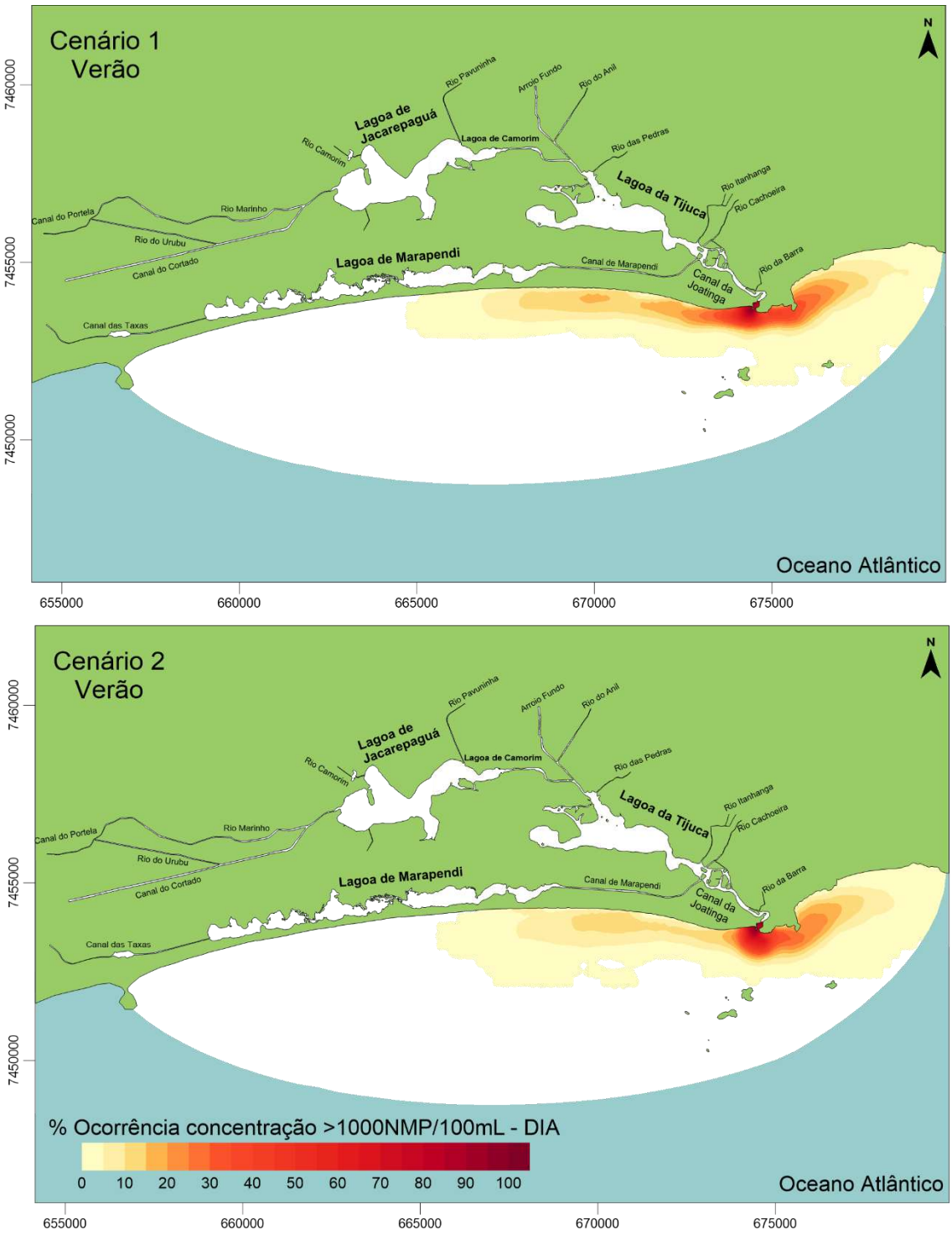


Figura 112. Porcentagem de ocorrência de passagem da pluma com concentrações de coliformes termotolerantes maiores que a limite definida pelo CONAMA, 1000 NMP/100mL, durante toda a simulação de verão para o período de 6h às 19h para os cenários 1 e 2.

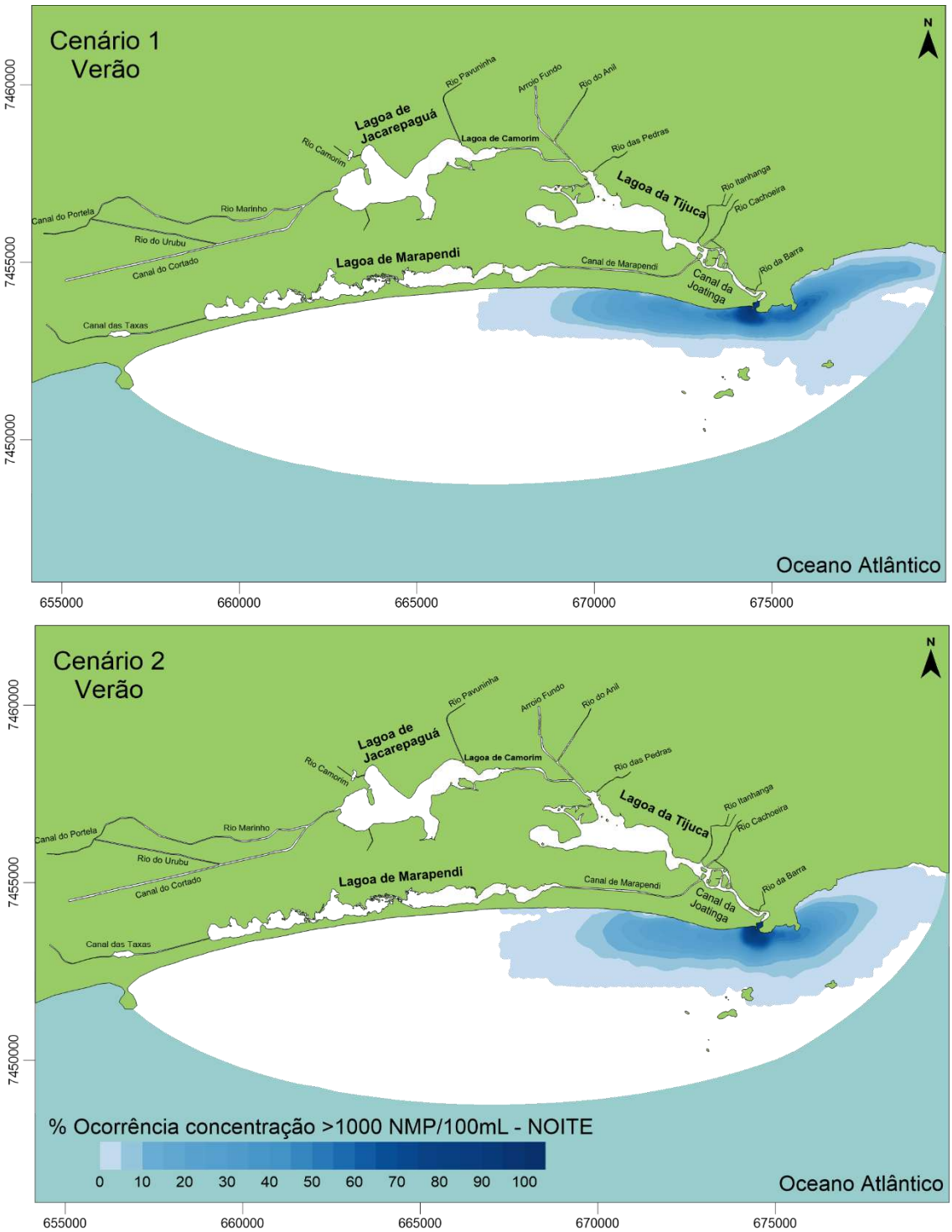


Figura 113. Porcentagem de ocorrência de passagem da pluma com concentrações de coliformes termotolerantes maiores que a limite definida pelo CONAMA, 1000 NMP/100mL, durante toda a simulação de verão para o período de 20h às 5h para os cenários 1 e 2.

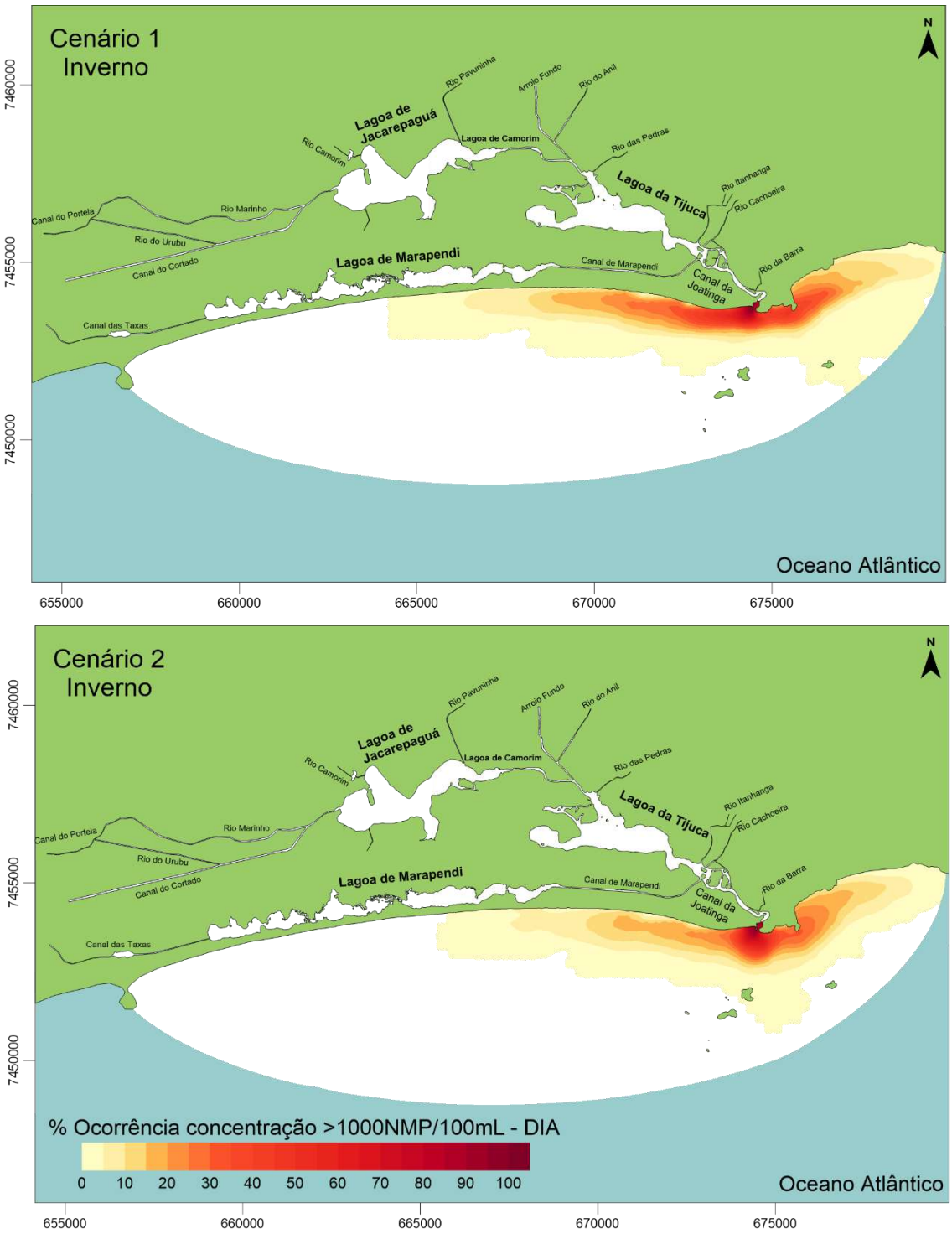


Figura 114. Porcentagem de ocorrência de passagem da pluma com concentrações de coliformes termotolerantes maiores que a limite definida pelo CONAMA, 1000 NMP/100mL, durante toda a simulação de inverno para o período de 6h às 17h para os cenários 1 e 2.

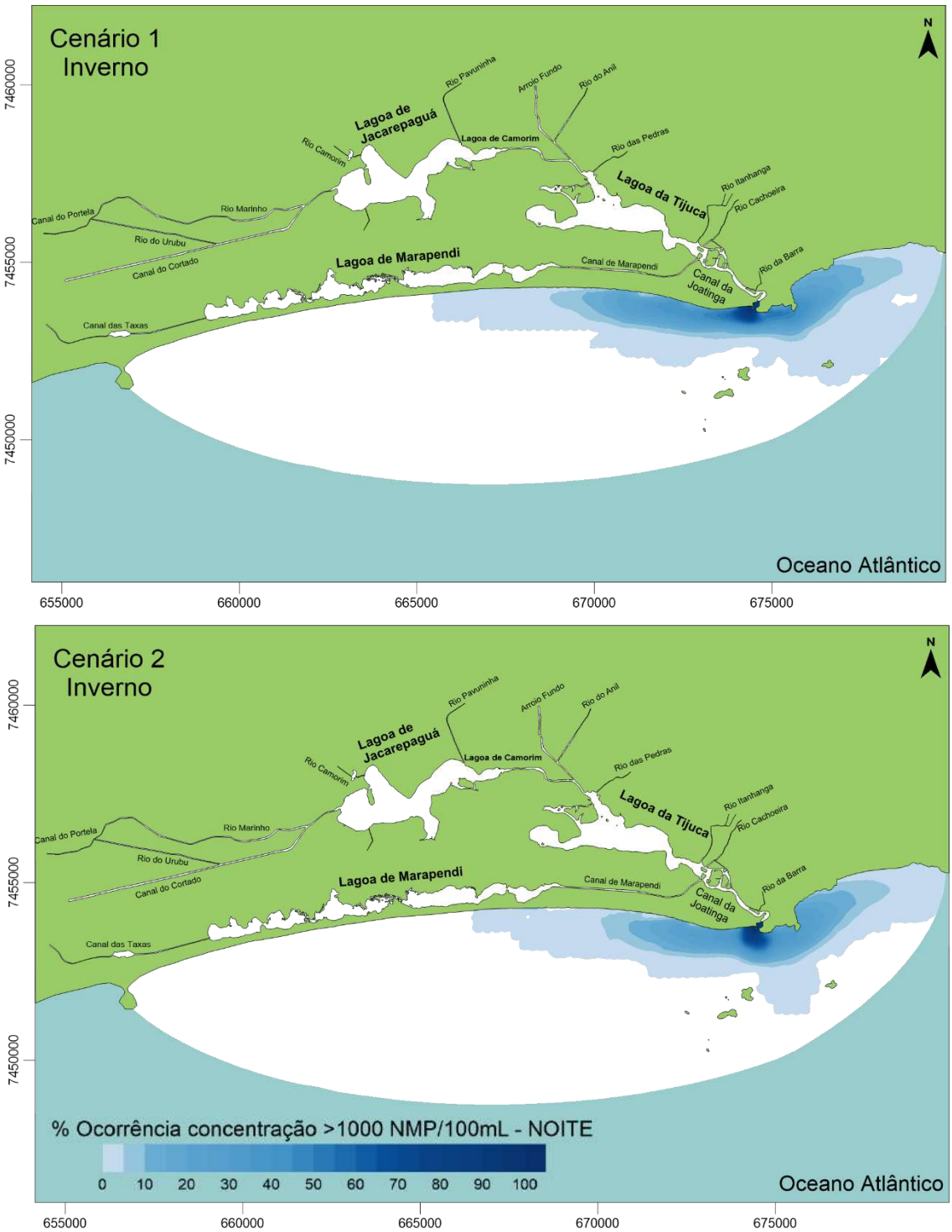


Figura 115. Porcentagem de ocorrência de passagem da pluma com concentrações de coliformes termotolerantes maiores que a limite definida pelo CONAMA, 1000 NMP/100mL, durante toda a simulação de inverno para o período de 18h às 5h para os cenários 1 e 2.

Para a análise das concentrações dos contaminantes, foram escolhidos cenários no quais representassem o maior alcance da pluma em momentos de maré vazante. O melhor horário para esta análise é antes do sol nascer, quando há o maior período em que as bactérias persistem no ambiente sem sofrer decaimento devido a radiação solar. Foram escolhidos quatro dias de cada mês e dois para cada sentido das correntes de leste-oeste e com as maiores vazantes de sizígia.

Os mapas da Figura 116 a Figura 123 mostram estas situações, onde cores frias indicam concentrações de coliformes termotolerantes menores que 1000NMP/100mL e, portanto, dentro do limite para uma praia com águas próprias para banho segundo o CONAMA. Cores mais quentes indicam concentrações acima do limite, quando águas são consideráveis impróprias para banho. A linha laranja delimita este limite.

As situações mostradas correspondem as que ocorrem em no máximo 5% do tempo das modelagens, de acordo com os mapas de ocorrência de passagem da pluma. De maneira geral, as plumas de inverno apresentam um alcance maior assim como suas concentrações quando comparadas ao verão. Com a menor radiação solar incidente na região, há o menor decaimento dos coliformes termotolerantes.

No C2 as maiores concentrações ficam mais próximas a embocadura do canal e a pluma que segue em direção às praias da Barra, para oeste, tem menores concentrações e alcance na costa quando comparadas as do C1. A pluma do C2 tem maior alcance em direção ao oceano. O guia-correntes prolongado beneficia as praias da Barra, diminuindo as concentrações de coliformes termotolerantes próximos a praia.

Porém em ambos cenários as concentrações maiores que a limite chegam na praia e possuem uma diferença de alcance de 1 km a mais do C1 em relação ao 2. A pluma da situação da Figura 122 foi a que teve maior alcance nas praias da Barra. A primeira parte delas no C1 teve um alcance menor de quase 1.5 km em relação ao C2. A pluma mais afastada da embocadura, chegou a cerca de 9 km de extensão ao longo da praia, sendo que no C2 chegou com uma pequena parte com concentração perto de 1000NMP/100mL, a uma distância de 8 km.

A situação de maré vazante com correntes para leste mostram que as concentrações das plumas que são carregadas para leste aumentam no C2, com exceção do dia 4 de janeiro (Figura 116). Para o dia 9 de julho, o alcance delas é muito parecido pois é uma vazante de quadratura, quando os prismas apresentaram menores aumentos diante das alterações do C2 (Figura 121).

Já para o dia 19 do mesmo mês o alcance da pluma é maior no C2, e alcança regiões fora do domínio de modelagem (Figura 123). Esta situação representa uma vazante de uma combinação

de maré de sizígia com sobrelevação do nível médio do mar. Uma vez que há uma entrada grande de águas no domínio por mais de dois dias, há o aumento do nível médio das lagoas. Com isso, há uma saída maior ainda delas, como visto nos resultados de elevação. O gráfico da radiação solar da Figura 46 mostra que próximo a hora 458 referente a este dia, as radiações solares foram pequenas para o dia anterior, o que justifica o maior alcance da pluma e maiores concentrações por terem sofrido pouco decaimento.

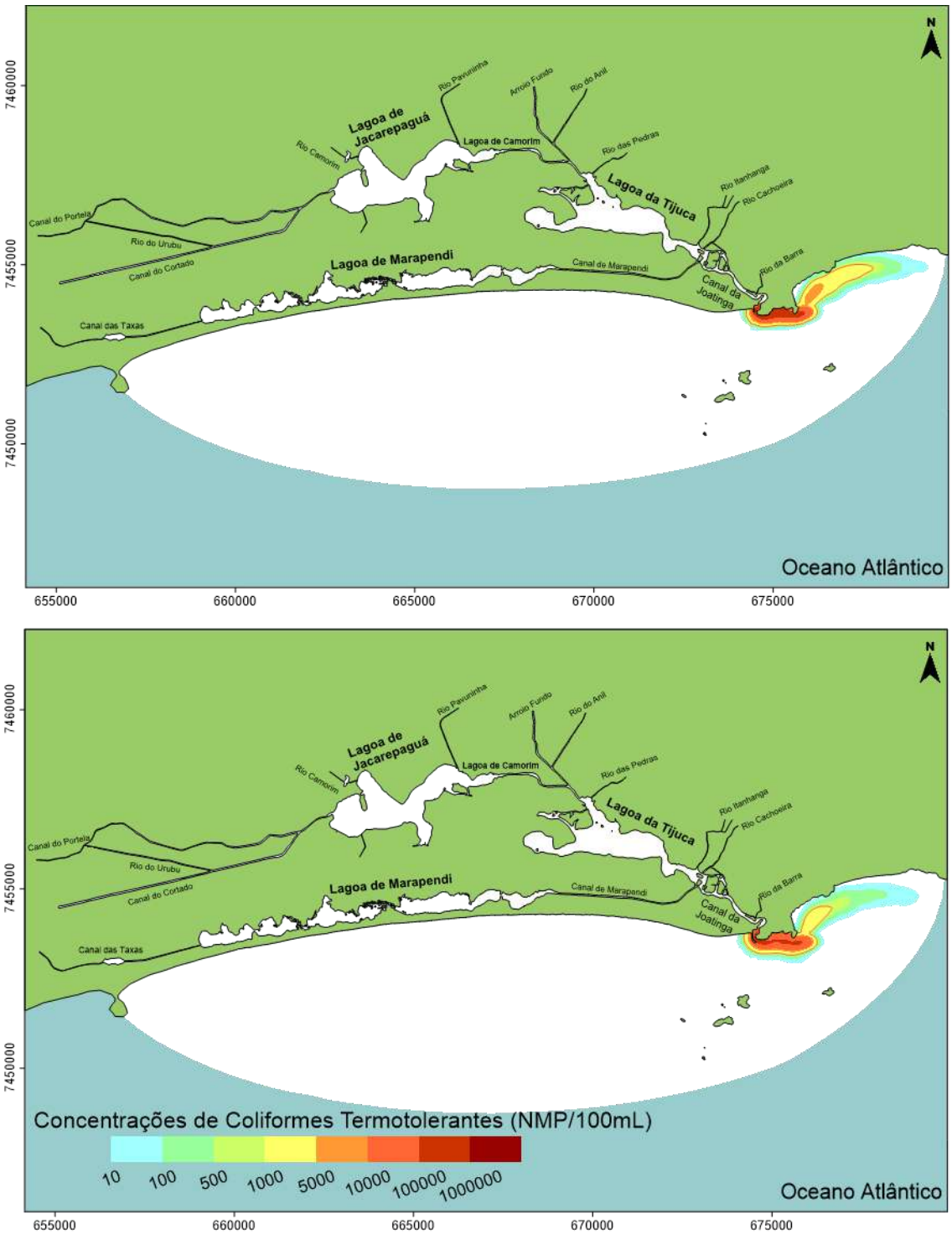


Figura 116. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de baixa-mar com sobrelevação no nível médio do mar e correntes fluindo sentido leste no dia 04/01/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2.

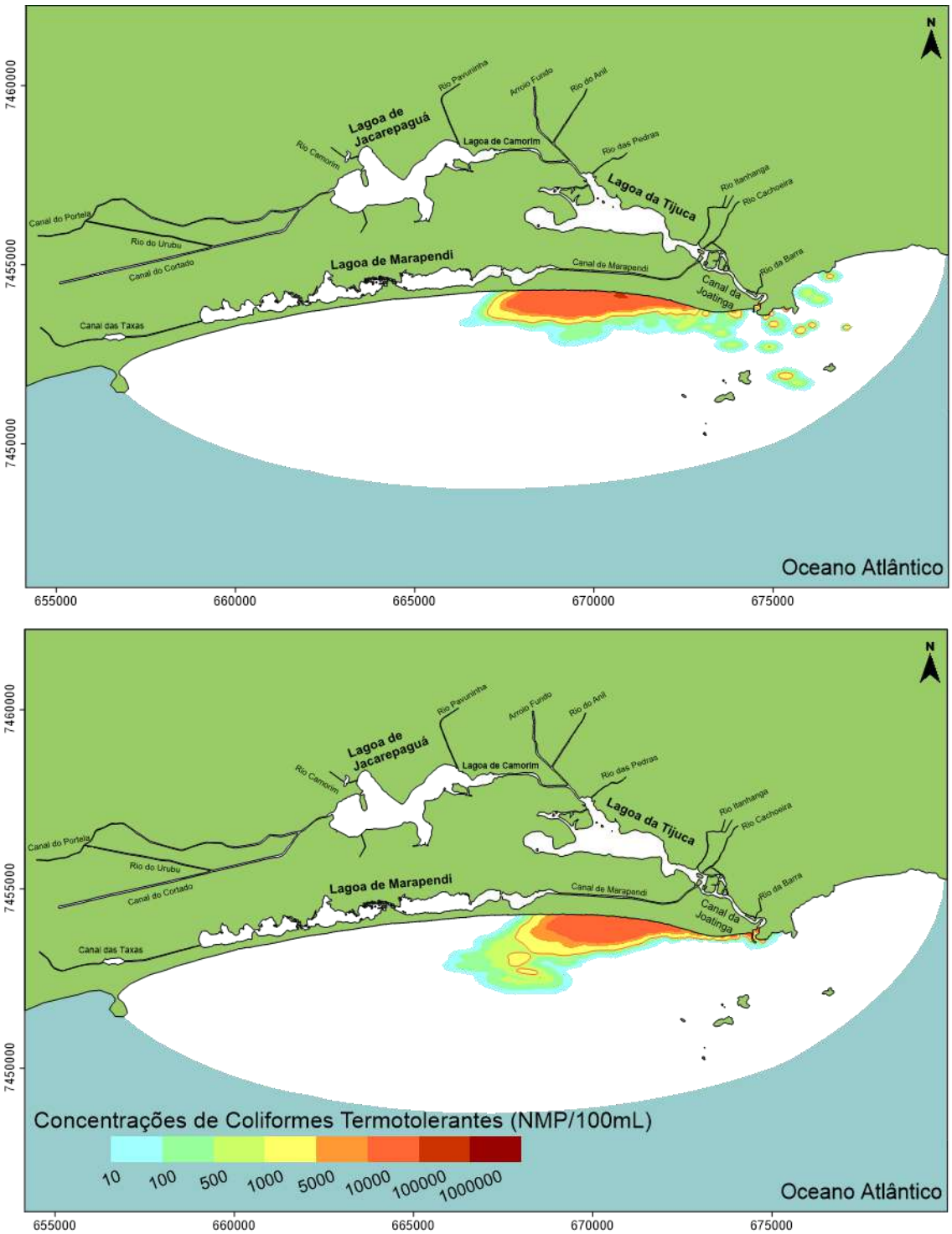


Figura 117. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de maré vazante, com rebaixamento do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido oeste no dia 12/01/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2.

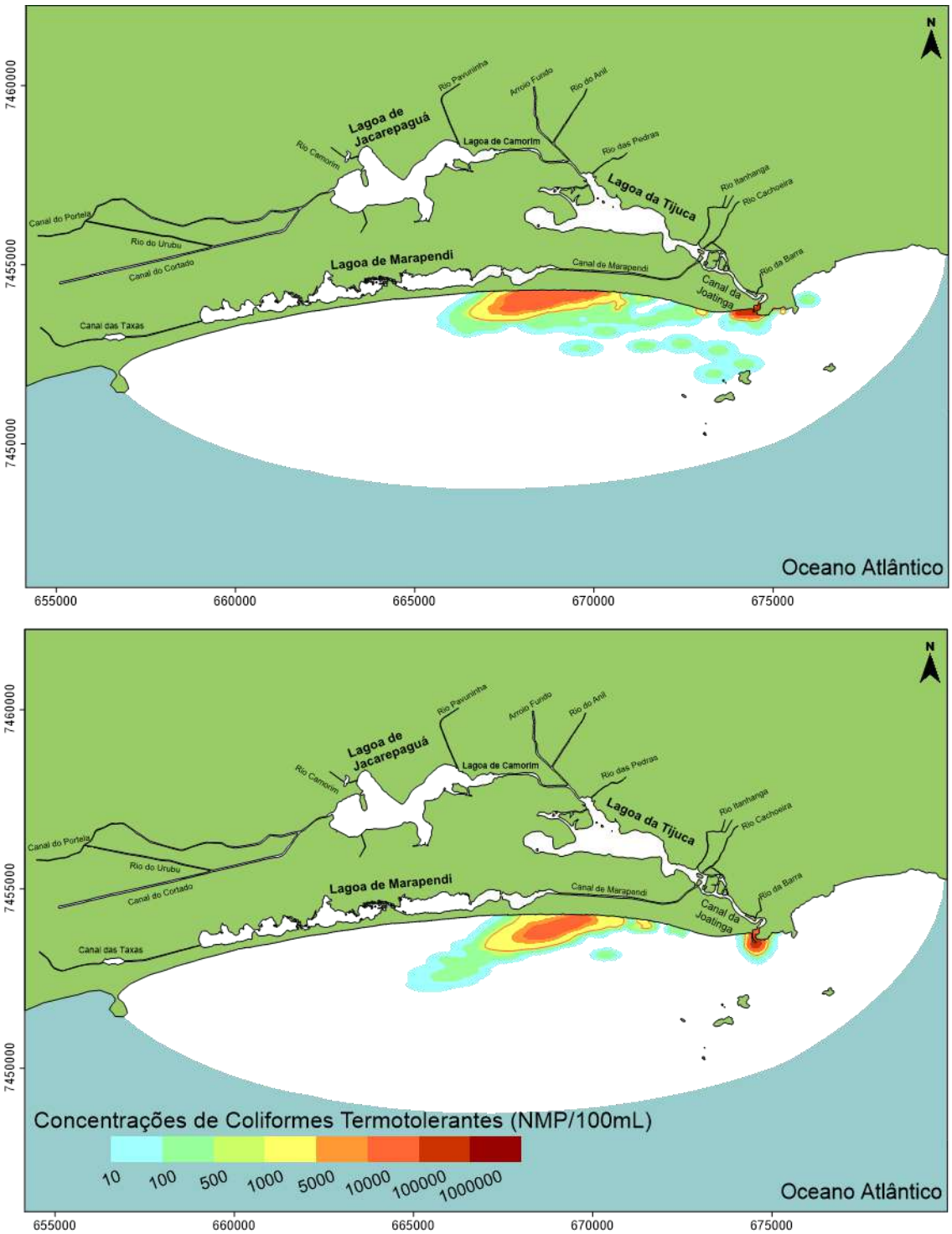


Figura 118. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de maré vazante, com rebaixamento do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido oeste no dia 21/01/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2.

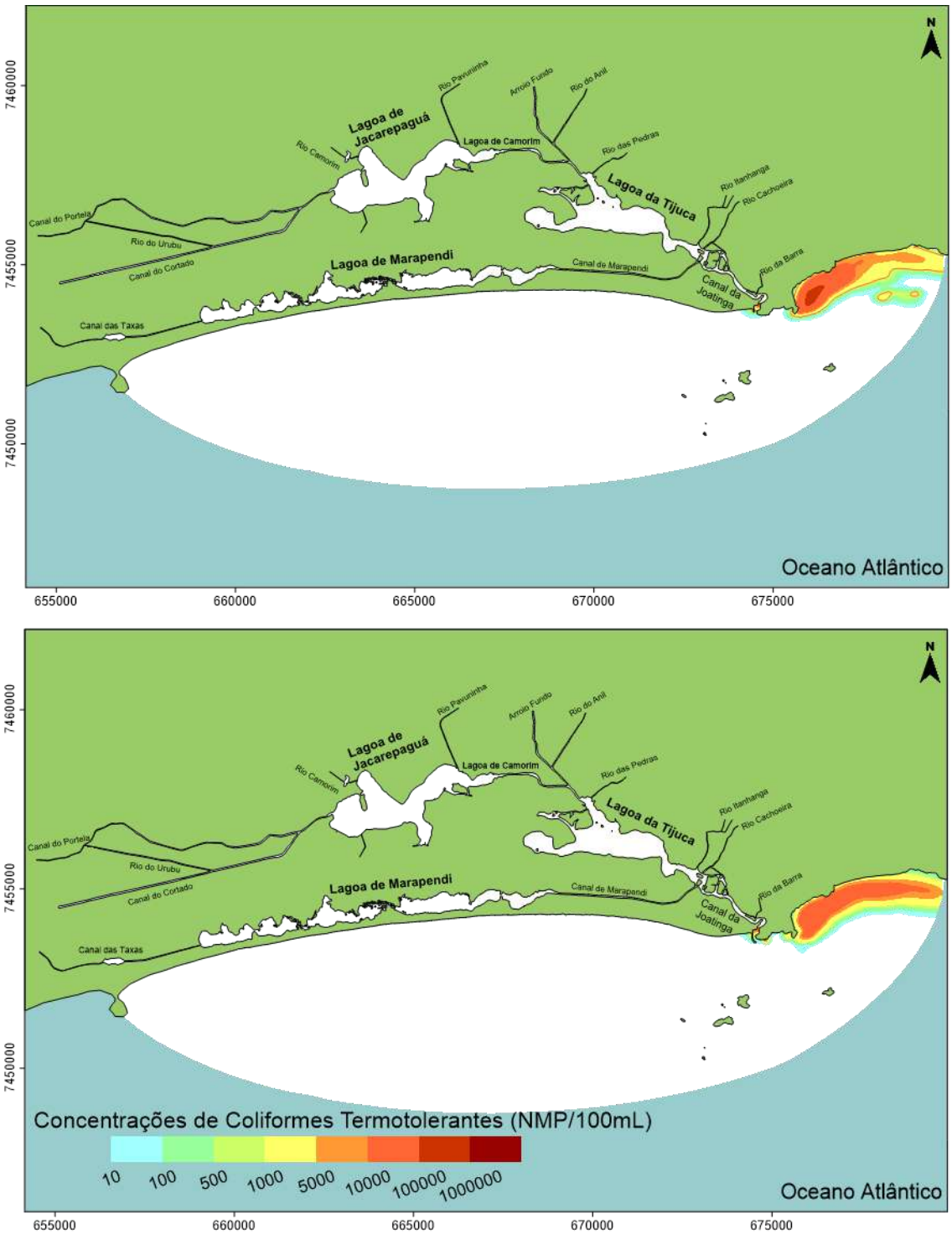


Figura 119. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de início de maré vazante, com sobrelevação do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido leste no dia 27/01/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2.

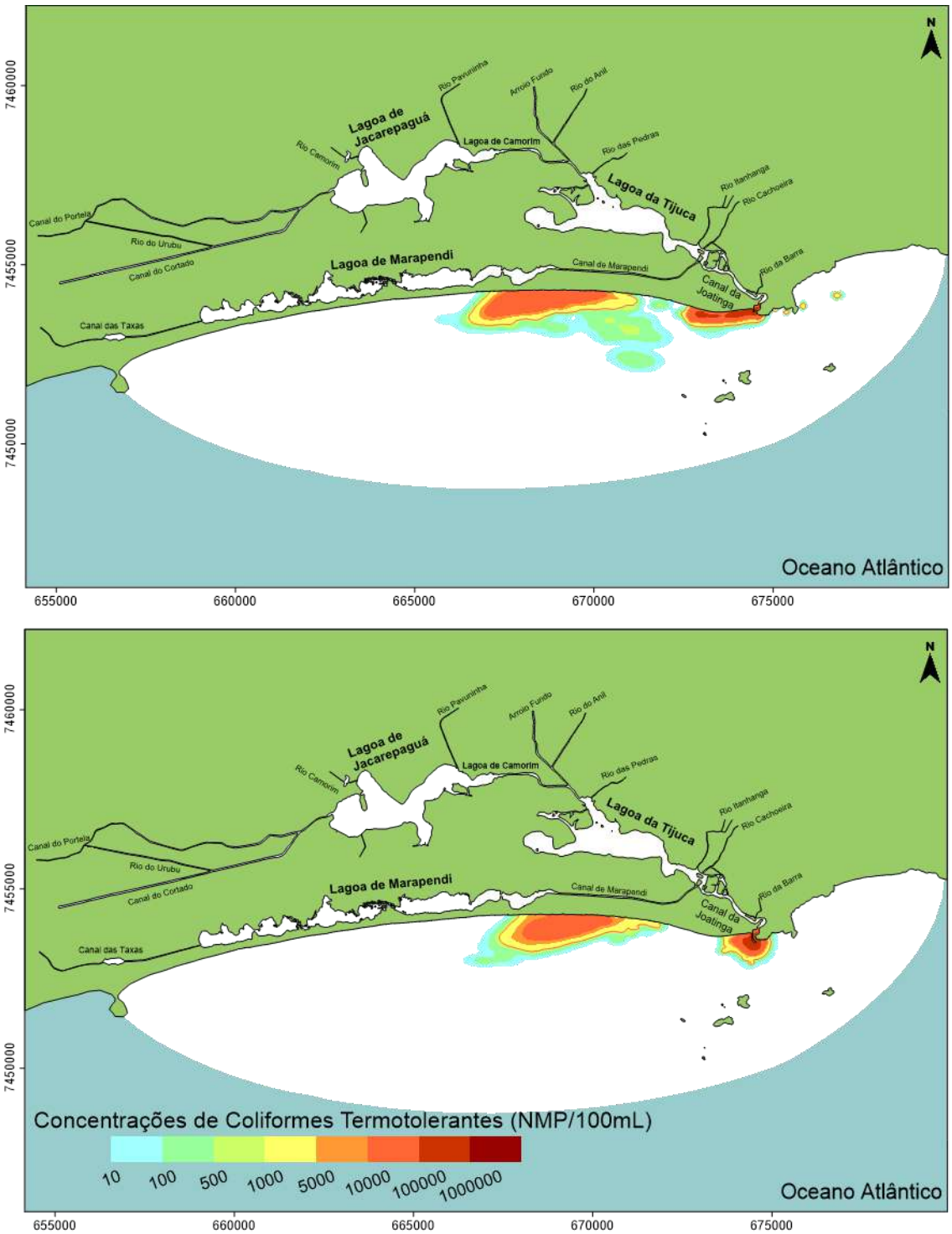


Figura 120. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de final de maré vazante, com rebaixamento do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido oeste no dia 03/07/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2.

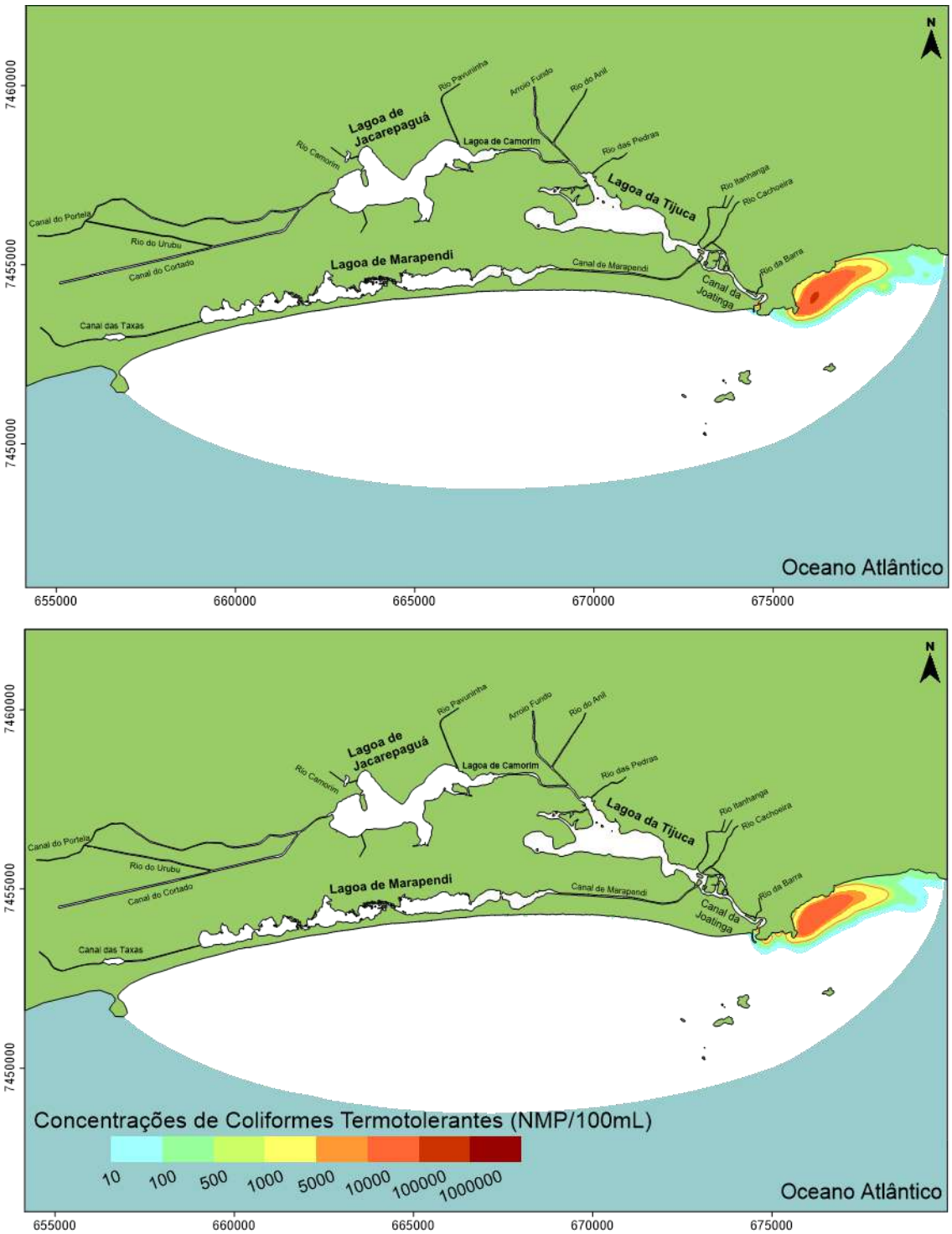


Figura 121. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de maré vazante, com sobrelevação do nível médio do mar durante a quadratura e correntes fluindo no sentido leste no dia 09/07/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2.

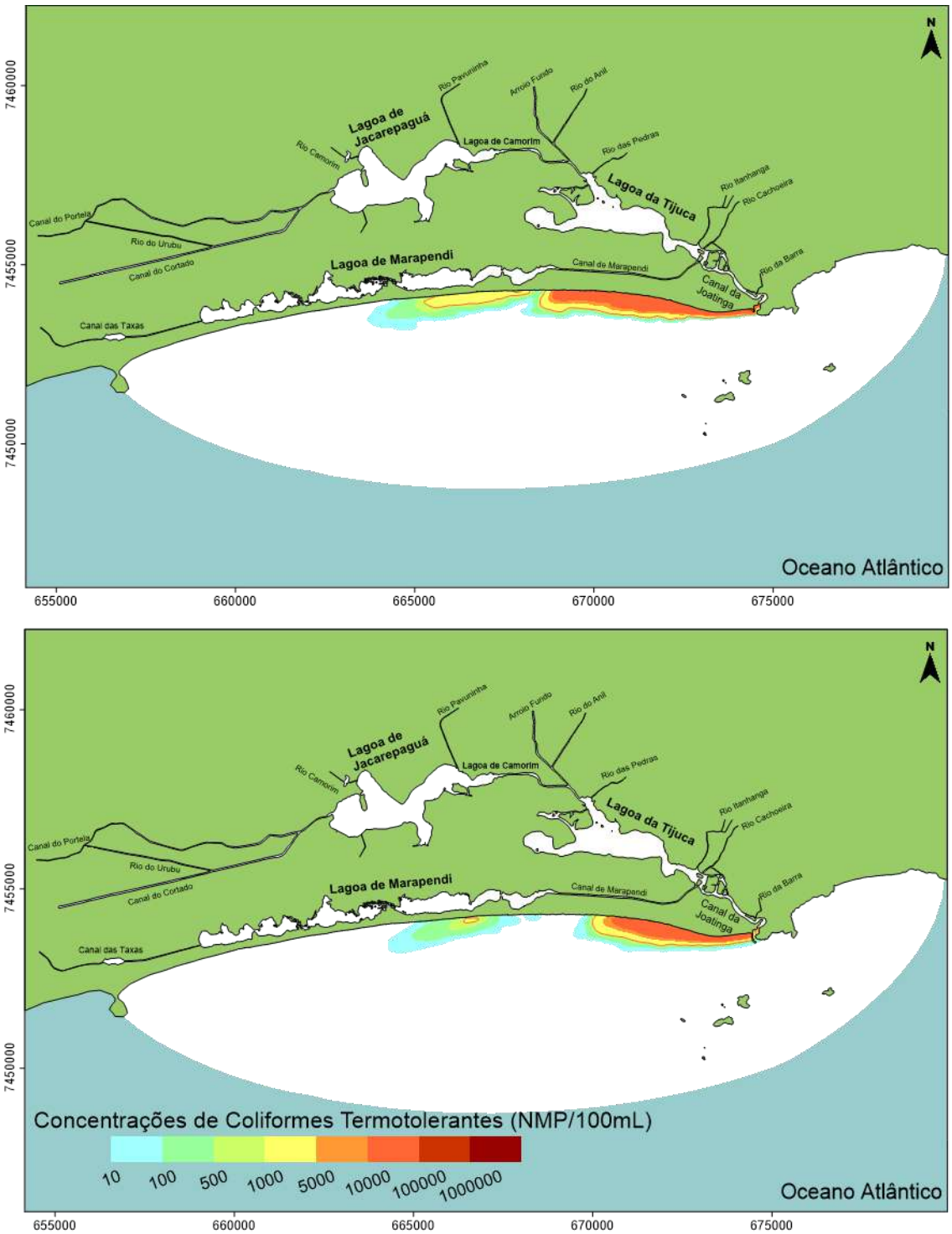


Figura 122. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de preamar, com rebaixamento do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido oeste no dia 11/07/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2.

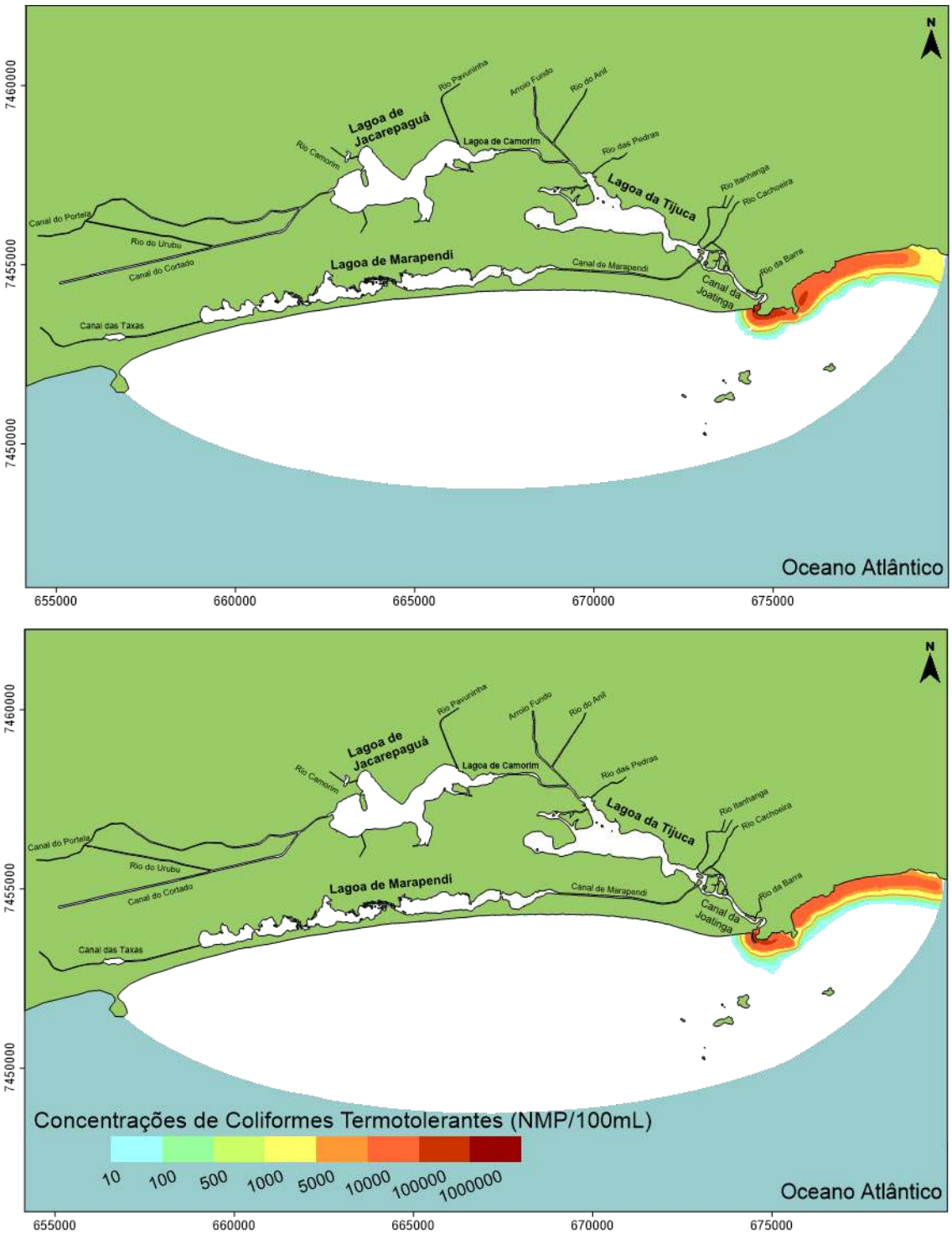


Figura 123. Concentração espacial de coliformes termotolerantes em situação de maré vazante, com sobrelevação do nível médio do mar e correntes fluindo no sentido leste no dia 19/07/2012 às 06h00 para os cenários 1 e 2.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através da modelagem ambiental aplicada o presente trabalho resultou em análises da hidrodinâmica no SLJ e das águas oceânicas adjacentes. As modelagens consideraram forçantes características de marés meteorológicas da região, além de astronômicas, importantes para a representação das correntes paralelas à costa e intrusão de águas no sistema lagunar. As modelagens abrangeram diferenças sazonais de inverno e verão, que apresentam características importantes para a análises de renovação das águas e de transporte de contaminantes.

Com a dragagem das lagoas e aumento da embocadura do canal da Joatinga houve uma melhora significativa nas trocas de águas do SLJ com o mar e na hidrodinâmica das águas em seu interior. As velocidades nas lagoas da Tijuca e de Jacarepaguá aumentaram cerca de 0.1 m/s no C2 (cenário com obras hidráulicas) comparadas as do C1 (cenário atual).

Foram calculadas as vazões na embocadura, no canal de Marapendi e no de Camorim, principais canais do sistema lagunar. Verificou-se um aumento na vazão da embocadura de mais de 47% no C2 em relação ao C1, que resulta em uma maior troca de águas entre as lagoas e o mar. Foram calculados também os prismas de maré em cada um deles, que mostraram aumentos de cerca de 62% do volume de entrada de águas em todo sistema na quadratura de inverno.

A maior entrada de águas favorecida pelo aumento da embocadura do canal da Joatinga e a menor perda de energia pelo aumento da profundidade resultam numa maior entrada de águas observado em todas as estações das lagoas. Além disso, o tempo de entrada da maré diminuiu, em média, uma hora no C2 em relação ao C1.

Com isso, a amplitude da maré nas lagoas aumentou no C2 em relação ao C1, principalmente nas de vazante. Isto pode ser explicado pela consequente diminuição do nível médio das lagoas, já que houve uma diminuição na perda de carga do escoamento com o aprofundamento dos canais e das lagoas. Aumentando a amplitude da maré no C2 há também a diminuição do amortecimento da amplitude à medida que a maré entra em cada lagoa. Estas chegaram a amortecer 20% comparado as amplitudes do C1 em situações de quadratura.

As análises das taxas de renovação mostraram melhora na renovação das águas das lagoas diante das intervenções propostas no C2, principalmente para o mês de julho. No inverno ocorrem menos precipitações e o aporte de descargas fluviais nas lagoas do complexo é menor, isto permite que haja uma maior intrusão de águas novas através das marés pela embocadura. Contudo, a entrada de águas novas se dá principalmente pelo efeito da maré, sendo a meteorológica responsável por um maior volume de águas que entram e saem comparado ao da astronômica. Isto faz com que

momentos de rebaixamento das marés meteorológicas permitam uma maior troca de as águas do sistema com o mar, favorecendo a renovação.

O guia-correntes prolongado beneficiou a balneabilidade das praias adjacentes ao canal da Joatinga, com exceção em eventos meteorológicos. Além disso, os resultados mostraram que a ocorrência de passagem da pluma com águas impróprias para banho nas praias é menor que ao cenário atual. O alcance das plumas no cenário atual é maior ao longo das praias que no segundo cenário, no entanto, o alcance é maior para a região oceânica. O guia-correntes prolongado afasta as plumas que saem através do canal da Joatinga da região costeira próximas as praias.

As obras hidráulicas consideradas proporcionam uma maior entrada de águas no sistema lagunar fazendo com que ocorra uma maior diluição na concentração dos indicadores. Com isso, tanto no inverno quanto verão, a concentração de coliformes termotolerantes diminui em todas as plumas resultantes do modelo de transporte.

As intervenções propostas para o SLJ neste estudo não solucionam o problema de poluição nas lagoas e nas praias. Estas só seriam eficientes se houvesse também o tratamento de esgoto adequado que atenda toda a população que vive em torno das lagoas. O mais importante para que estas obras sejam de fato efetivas para a recuperação do sistema lagunar é o impedimento de despejo de esgotos domésticos e industriais nas lagoas. Se estes não forem ao menos reduzidos, a poluição continuará sendo transportada por todo meio, inclusive para os oceanos.

Como as plumas ultrapassaram o domínio de modelagem, é recomendado aumentar a área do domínio de modelagem a leste pois as vazantes com eventos meteorológicos apresentaram consequências significativas em ambos cenários. As análises poderiam se estender até as praias depois de São Conrado para verificar se esta pluma de coliformes termotolerantes influencia a balneabilidade de praias mais afastadas a leste do canal da Joatinga.

Para uma melhor acurácia da circulação próxima a costa seria interessante considerar efeitos de ondas para que as correntes litorâneas sejam melhor representadas. O trabalho em questão se preocupou com a análise da dispersão da pluma fora das lagoas modelando principalmente as correntes com direção leste-oeste, muito importantes na circulação de mesoescala da região.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOT, M. B.; BASCO, D. R. **Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers**. United Kingdon: Logan Group, 1989.

BOWDEN, K. **Physical Oceanography in Coastal Waters**. Grã-Bretanha: [s.n.].

CARVALHO, J. L. B. DE. **Modelagem e análise do lançamento de efluentes através de emissários submarinos**. Tese de doutorado submetida ao corpo docente da Coordenação do Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2003.Rio de Janeiro, RJ.

COHIDRO. **Estabilização da Barra do Canal de Sernambetiba e sua Interligação com as Lagoas de Jacarepaguá, Tijuca e Marapendi.** Rio de Janeiro. COHIDRO - Consultoria de Projetos, 2006.

CONAMA. **Resolução CONAMA 274/2000.** Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2000.

CONAMA. **Resolução CONAMA 357/2005.** Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005.

COPPETEC, F. **Modelagem Computacional para suporte ao monitoramento e gestão ambiental da área de influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ**. 2009. Rio de Janeiro, RJ.

ERA-INTERIM. **ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.** Disponível em: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/.>. Acesso em: 5 mar. 2016.

FALCÃO, M. M. **Estudo da Cisculação Hidrodinâmica no Sistema Lagunar de Jacarepaguá**. Tese de doutorado submetida ao corpo docente da Coordenação do Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1995. Rio de Janeiro, RJ.

FEITOSA, R. C. **Modelagem da pluma do Emissário submarino da Barra da Tijuca - RJ com T90 variável**. Tese de doutorado submetida ao corpo docente da Coordenação do Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2003.Rio de Janeiro, RJ.

FEITOSA, R. C. Emissários submarinos de esgotos como alternativa à minimização de riscos à saúde humana e ambiental. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n. 6, p. 2037–2048, 2017.

FEMAR. **Fundação de Estudos do Mar**. Disponível em: <https://fundacaofemar.org.br/portalwordpress/>. Acesso em: 22 fev. 2016.

FILHO, E. M. **Maré meteorológica na costa brasileira**. Tese apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande como requisito para a promoção a professor titular. Novembro, 2016. Rio Grande - RS.

FUNDAÇÃO COPPETEC. PEC7659 - Estudos da Lagoa de Marapendi, RJ. Relatório de Modelagem Global do Complexo Lagunar da Barra da Tijuca, RJ. 2006.

FUNDAÇÃO COPPETEC. **Recuperação Ambiental do Sistema Lagunar de Jacarepaguá - RJ. R3 - Relatório de caracterização hidrodinâmica e intrusão salina com dragagem alternativa**. 2013. Rio de Janeiro, RJ.

GLOBO, J. O. **O GLOBO**. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/rio/praia-da-barra-tem-faixa-de-sete-quilometros-de-poluicao-diz-biologo-21194081>. Acesso em: 12 abr. 2017.

GLOSS. **Global Sea Level Observation**. Disponível em: <http://www.goosbrasil.org/gloss/.>. Acesso em: 13 mar. 2016.

GUERRA, M. J. **Caracterização Espaço Temporal do Ambiente Costeiro na área do Emissário Submarino de Ipanema**. Tese de Doutorado defendida ao programa de pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.

INEA, Instituto Estadual do Meio Ambiente. **Histórico de 2016 dos boletins de balneabilidade de praias**. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/Portal/index.htm>. Acesso em: 17 nov. 2017.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/Portal/index.htm.>. Acesso em: 3 fev. 2017.

MASTERPLAN. Relatório Ambiental Simplificado das Obras de Recuperação Ambiental do Complexo Lagunar de Jacarepaguá. p. 450, 2013.

MIRANDA, L. B. DE. Forma da correlação T-S de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), Brasil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 33, n. 2, p. 105–19, 1985.

NOBLE, R. T.; LEE, I. M.; SCHIFF, K. C. Inactivation of indicator bacteria from various sources of fecal contamination in seawater and freshwater. **Journal of applied microbiology**, v. 96, n. 3, p. 464–472, 1997.

OLIVEIRA, A.; FORTUNATO, A. B.; REGO, J. R. L. Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Óbidos lagoon (Portugal). **Continental Shelf**

Research, v. 26, n. 8, p. 917–942, 2006.

ORTEGA-S, M. et al. Ocean & Coastal Management Efficient dredging strategy in a tidal inlet based on an energetic approach. v. 146, p. 157–169, 2017.

PECLY, J. O. G. **Monitoramento Ambiental do Emissário Submarino de Ipanema usando traçadores e técnicas geoestatísticas**. Tese submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Abril de 2000. Rio de Janeiro, RJ.

PICADO, A.; DIAS, J. M.; FORTUNATO, A. B. Tidal changes in estuarine systems induced by local geomorphologic modifications. **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 17, p. 1854–1864, 2010.

ROSMAN, P. C. C. Ligação lagoa-mar, uma necessidade. **Oecologia Australis**, v. 16, n. 3, p. 651–693, 2012a.

ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA® . **Fundação COPPETEC - COPPE/UFRJ**, p. 1–345, 2015.

SEA. **Secretaria de Estado do Ambienta**. Disponível em: <http://www.rj.gov.br/web/sea>. Acesso em: 22 set. 2015.

SEMAD. **Estudo de Impacto Ambiental para o Projeto e Recuperação Ambiental da Macrobacia de Jacarepaguá**. Rio de Janeiro.

SEMAD. **Enchentes no Estado do Rio de Janeiro - uma Abordagem Geral**. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento, 2001.

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION). Addendum to Guidelines for Safe Recreational Water Environments. v. 1, p. 33, 2009.