



ANÁLISE DA HIDRODINÂMICA AMBIENTAL EM DIFERENTES CENÁRIOS  
DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS VIA MODELAGEM  
COMPUTACIONAL: UM ESTUDO DE CASO DA BAÍA DE GUANABARA

Thales Fonseca Cosendey

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

Orientador: Marco Aurélio dos Santos

Rio de Janeiro  
Março de 2021

ANÁLISE DA HIDRODINÂMICA AMBIENTAL EM DIFERENTES CENÁRIOS  
DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS VIA MODELAGEM  
COMPUTACIONAL: UM ESTUDO DE CASO DA BAÍA DE GUANABARA

Thales Fonseca Cosendey

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

Orientador: Prof. Marco Aurélio dos Santos

Aprovada por: Prof. Marco Aurélio dos Santos

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas

Dr. Teodosio das Neves Milisse Nzualo

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2021

Cosendey, Thales Fonseca

Análise da hidrodinâmica ambiental em diferentes cenários de tratamento de efluentes domésticos via modelagem computacional: Um estudo de caso da Baía de Guanabara /Thales Fonseca Cosendey. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XV, 112 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Santos, Marco Aurélio dos

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 112 – 115.

1. Baía de Guanabara. 2. Modelagem Hidrodinâmica Ambiental. 3. Saneamento. I. Santos, Marco Aurélio dos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

*“There is nothing noble in being superior to your fellow man; true nobility is being superior to your former self.”*

*- Ernest Hemingway*

# Agradecimentos

Agradeço, do fundo do meu coração, a todos que, direta ou indiretamente, foram responsáveis pela conclusão desse estudo e dessa importante etapa na minha vida, em particular aos que aqui seguem:

Aos meus familiares e minha companheira, meu carinho e agradecimento por estarem incondicionalmente ao meu lado, sendo sempre pilares de suporte e conforto em todas as horas.

Ao meu orientador, por dividir todo o conhecimento adquirido por anos de dedicação à ciência e ao desenvolvimento tecnológico da humanidade.

À equipe do Programa de Planejamento energético da COPPE, em particular ao Paulo e à Sandra por todo o suporte no decorrer da minha caminhada.

Aos membros da banca, por me presentarem com a imensa honra e responsabilidade de estarem ao meu lado na conclusão desta fase.

À equipe do Laboratório de Energias Renováveis e Estudos Ambientais (LEREA) pelos anos que passamos juntos e pelos aprendizados divididos.

Aos pesquisadores do Projeto Baías do Brasil, sem os quais a conclusão deste trabalho jamais seria possível, e por dividir o ideal de que o real valor do conhecimento se percebe quando o mesmo é distribuído à todos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e à Universidade Federal do Rio de Janeiro, por mesmo com os severos cortes orçamentários, vêm sempre buscando da melhor forma possível, o desenvolvimento científico tão importante para o país.

À todos, minha gratidão...

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

ANÁLISE DA HIDRODINÂMICA AMBIENTAL EM DIFERENTES CENÁRIOS  
DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS VIA MODELAGEM  
COMPUTACIONAL: UM ESTUDO DE CASO DA BAÍA DE GUANABARA

Thales Fonseca Cosendey

Março/2021

Orientador: Marco Aurélio dos Santos

Programa: Planejamento Energético

Sistemas estuarinos são dotados de uma notória complexidade devido à interação entre suas variáveis hidrodinâmicas, ambientais e antrópicas. O aprofundamento da compreensão dessas diversas interações se torna vital na elaboração de planos concretos objetivando a garantia de um ambiente economicamente ativo, socialmente justo e ambientalmente sustentável. O presente estudo tem por objetivo aprofundar o entendimento das relações entre o ambiente estuarino da baía de Guanabara com a população residindo em sua área de drenagem, particularmente com os impactos causados pela carência de um sistema sanitário suficientemente estabelecido. Para tal, foi confeccionado um modelo hidrodinâmico e ambiental da baía de Guanabara, analisando os impactos causados pela ausência de um sistema de tratamento de efluentes domésticos adequado, buscando-se iluminar as principais fontes de poluentes no sistema além de analisar a variação da qualidade das águas do interior do sistema ao incrementar gradativamente a cobertura do sistema de esgotamento sanitário existente. O modelo elaborado por esse estudo obteve êxito em representar adequadamente a distribuição de parâmetros comumente relacionados com a descarga de matéria orgânica no estuário sendo eles: Demanda Bioquímica de Oxigênio, Nitrogênio e Fósforo, quando compara-se ao reportado pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Além disso pôde-se identificar as principais regiões responsáveis por essa poluição: A região Oeste/Noroeste e Leste da Baía verificando-se uma redução da ordem de 70% para DBO e 50% para os demais componentes nas águas do interior da baía ao se adotar um padrão aceitável de cobertura e tratamento de efluentes domésticos nessas regiões.

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

ENVIRONMENTAL AND HYDRODYNAMIC ANALYSIS IN DIFFERENT  
LEVELS OF WASTEWATER TREATMENT SYSTEM QUALITY VIA  
COMPUTATIONAL MODELLING. A CASE STUDY OF THE GUANABARA  
BAY.

Thales Fonseca Cosendey

March/2021

Advisor: Marco Aurélio dos Santos

Department: Energy Planning

Estuarine systems are notoriously complex due to its interaction between their hydrodynamic, environmental and anthropogenic variables, such is the case of Guanabara bay. The better understanding of these several interactions is vital during the elaboration of concrete plans aiming the assurance of an economically active, socially just and environmentally sustainable system. The goal of this work is to deepen the understanding of the relationships between the Guanabara bay's estuarine system and the population residing inside its drainage area, particularly within the impacts caused by the lack of a sufficiently established sanitary system. To this end, a hydrodynamic and environmental model of the Guanabara Bay was made, analysing the impacts caused by the absence of an adequate domestic wastewater treatment system, seeking to illuminate the main sources of pollutants in the system. In addition, the overall quality of the wastewater treatment system was gradually increased and its impacts on the bay's water quality was assessed. The developed model was successful in adequately representing the distribution of pollutants related to the discharge of organic matter in the estuary, namely: Biochemical Oxygen Demand (BOD), Nitrogen and Phosphorus, when compared to reports issued by the State Institute of Environment (INEA). In addition, it was possible to identify the main regions responsible for this pollution: The West / Northwest region and East of the Bay, with a reduction of 70% for BOD and 50% for the other components upon adopting an acceptable quality and coverage of its sewage system.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	3
<b>2 Fundamentação Teórica</b>	<b>4</b>
2.1 Baía de Guanabara . . . . .	4
2.1.1 Descrição da Área de Estudo . . . . .	4
2.1.2 Gestão Ambiental na Baía de Guanabara . . . . .	8
2.2 Qualidade da Água: Parâmetros e Legislações Pertinentes . . . . .	9
2.2.1 Parâmetros Relevantes no Monitoramento da Qualidade da Água . . . . .	10
2.2.2 Legislações Pertinentes . . . . .	12
2.3 Modelagem Hidrodinâmica . . . . .	14
2.3.1 Considerações Sobre Modelagem Hidrodinâmica . . . . .	14
2.3.2 Estudos Realizados na Região . . . . .	15
<b>3 Método Proposto</b>	<b>24</b>
3.1 Modelo Hidrodinâmico Computacional . . . . .	24
3.2 Modelo Digital do Terreno . . . . .	24
3.2.1 Definição do Domínio de Interesse . . . . .	25
3.2.2 Malha de Discretização . . . . .	26
3.2.3 Batimetria . . . . .	27
3.2.4 Rugosidade . . . . .	28
3.3 Modelo Hidrodinâmico . . . . .	29
3.3.1 Marés . . . . .	34
3.3.2 Correntes costeiras longitudinais – Nível Médio Diferencial (NVD) . . . . .	37
3.3.3 Ventos . . . . .	38

3.3.4	Rios . . . . .	39
3.4	Modelo de Transporte Euleriano Advectivo-Difusivo (MTEAD) . . . . .	41
3.4.1	Taxa de Renovação (TR) . . . . .	42
3.4.2	Idade da Água (IA) . . . . .	43
3.5	Modelo de Qualidade da Água (MQA) . . . . .	44
3.5.1	Salinidade & Temperatura . . . . .	45
3.5.2	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) & Oxigênio Dissolvido (OD) . . . . .	45
3.5.3	Ciclo do Nitrogênio . . . . .	46
3.5.4	Ciclo do Fósforo . . . . .	48
3.5.5	Condições de Contorno . . . . .	49
3.6	Cenários de Modelagem . . . . .	52
3.6.1	Modelo hidrodinâmico . . . . .	52
3.6.2	Modelo de Qualidade da Água . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>55</b>
4.1	Modelo Hidrodinâmico . . . . .	55
4.1.1	Calibração e Validação . . . . .	55
4.1.2	Resultados . . . . .	57
4.2	Modelo de Tempos Característicos . . . . .	66
4.2.1	Taxa de Renovação . . . . .	66
4.2.2	Idade da Água . . . . .	67
4.3	Modelo de Qualidade da Água . . . . .	68
4.3.1	Salinidade . . . . .	68
4.3.2	Demanda Bioquímica de Oxigênio . . . . .	72
4.3.3	Nitrogênio . . . . .	75
4.3.4	Fósforo . . . . .	78
4.4	Cenários . . . . .	79
4.4.1	Cenário I . . . . .	79
4.4.2	Cenário II . . . . .	86
4.4.3	Cenário III . . . . .	93
4.4.4	Cenário IV . . . . .	100
4.5	Análise de Investimentos . . . . .	107
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>109</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>111</b>

# Lista de Figuras

2.1	Dimensões aproximadas da baía de Guanabara . . . . .	5
2.2	Principais municípios pertencentes à RHBG . . . . .	5
2.3	Principais rios e sub-bacias pertencentes à BG . . . . .	6
2.4	Evolução da DBO ao longo do tempo . . . . .	11
2.5	Diagrama do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental . . . . .	16
3.1	Tela Inicial do Software SisBaHiA . . . . .	25
3.2	Mapa base da Baía de Guanabara e domínio do modelo. . . . .	26
3.3	Malha de discretização utilizada . . . . .	27
3.4	Batimetria da Baía de Guanabara . . . . .	28
3.5	Amplitude da rugosidade equivalente de fundo da Baía de Guanabara	30
3.6	Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência e, $U_i$ , é a velocidade promediada na vertical	31
3.7	Séries temporais de maré meteorológica, astronômica (acima) e to- tal (abaixo) consideradas na fronteira aberta da modelagem hidro- dinâmica para o mês de janeiro de 2018, com cotas relativas ao nível médio de maré. . . . .	37
3.8	Série temporal de velocidades longitudinais utilizada na geração de um nível médio diferencial (NVD) pelo modelo . . . . .	38
3.9	Localização das 7 estações de ventos utilizadas no modelo . . . . .	39
3.10	Mapa Base da região de interesse com destaque para os rios incorpo- rados no modelo . . . . .	40
3.11	Condição inicial imposta ao modelo de transporte Euleriano . . . . .	43
3.12	Condição inicial de Salinidade utilizada no Modelo Hidrodinâmico . . . . .	45
3.13	Localização e nomenclatura adotada das estações de monitoramento da qualidade da água pelo INEA . . . . .	50
3.14	Localização de algumas das fontes inseridas . . . . .	52
3.15	Cenários de modelagem utilizados no presente estudo, o cenário IV representará a soma dos três representados na figura . . . . .	53

4.1	Estações utilizadas por Rosman et al., 2018 durante validação dos resultados do modelo hidrodinâmico . . . . .	56
4.2	Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante uma Preamar de Sigígia na baía de Guanabara . . . . .	58
4.3	Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante uma Baixa-mar de Sigígia na baía de Guanabara . . . . .	59
4.4	Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante a MME de Sigígia na baía de Guanabara . . . . .	60
4.5	Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante a MMV de Quadratura na baía de Guanabara . . . . .	61
4.6	Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante uma Preamar de Quadratura na baía de Guanabara . . . . .	62
4.7	Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante uma Baixa-mar de Quadratura na baía de Guanabara . . . . .	63
4.8	Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante a MME de Quadratura na baía de Guanabara . . . . .	64
4.9	Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante a MMV de Quadratura na baía de Guanabara . . . . .	65
4.10	Distribuição das taxas de renovação (TR) por, respectivamente, 15, 30, 60 e 90 dias . . . . .	67
4.11	Distribuição da Idade da Água em dias no interior da BG . . . . .	68
4.12	Localização e nomenclatura adotada por Bérghamo (2006) das estações utilizadas para calibração dos padrões de salinidade . . . . .	69
4.13	Localização e nomenclatura adotada por Santos (2015) das estações e regiões utilizadas para calibração dos padrões de salinidade . . . . .	70
4.14	Padrão de salinidade médio (ups) obtido durante a simulação . . . . .	72
4.15	Estações de monitoramento de qualidade de água no interior da BG, a nomenclatura adotada na imagem condiz com a utilizada pelo INEA . . . . .	73
4.16	Comparação entre os resultados médios reportados pelo Inea, e valores obtidos durante a simulação para Demanda Bioquímica de Oxigênio . . . . .	74
4.17	Variação estacial dos resultados da concentração de matéria orgânica medida em DBO (mg/L) obtidos na simulação, com destaque para as isolinhas de 5 & 10 mg/L . . . . .	75
4.18	Comparação entre os resultados médios reportados pelo Inea, e valores obtidos durante a simulação para Nitrogênio Inorgânico Total (NIT) . . . . .	76
4.19	Variação estacial dos resultados da concentração de Nitrogênio Amniacal (mg/L) obtidos na simulação, com destaque para as isolinhas de 0,4 & 0,7 mg/L . . . . .	77

4.20	Variação estacial dos resultados da concentração de Nitrato (mg/L) obtidos na simulação, com destaque para as isolinhas de 0,4 & 0,7 mg/L	77
4.21	Comparação entre os resultados médios reportados pelo Inea, e valores obtidos durante a simulação para Fósforo Total (mg/L)	78
4.22	Variação estacial dos resultados da concentração de Fósforo Total (mg/L) obtidos na simulação	79
4.23	Resultado das concentrações de DBO para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário I	80
4.24	Resultado das concentrações de Amônia para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário I	81
4.25	Resultado das concentrações de Nitrato para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário I	82
4.26	Resultado das concentrações de PT para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário I	83
4.27	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para DBO, relativo ao cenário I	84
4.28	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Amônia, relativo ao cenário I	84
4.29	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Nitrato, relativo ao cenário I	85
4.30	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para PT, relativo ao cenário I	85
4.31	Resultado das concentrações de DBO para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário II	87
4.32	Resultado das concentrações de Amônia para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário II	88
4.33	Resultado das concentrações de Nitrato para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário II	89
4.34	Resultado das concentrações de PT para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário II	90

4.35	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para DBO, relativo ao cenário II . . . . .	91
4.36	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Amônia, relativo ao cenário II . . . . .	91
4.37	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Nitrato, relativo ao cenário II . . . . .	92
4.38	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para PT, relativo ao cenário II . . . . .	92
4.39	Resultado das concentrações de DBO para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário III . . . . .	94
4.40	Resultado das concentrações de Amônia para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário III . . . . .	95
4.41	Resultado das concentrações de Nitrato para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário III . . . . .	96
4.42	Resultado das concentrações de PT para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário III . . . . .	97
4.43	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para DBO, relativo ao cenário III . . . . .	98
4.44	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Amônia, relativo ao cenário III . . . . .	98
4.45	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Nitrato, relativo ao cenário III . . . . .	99
4.46	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para PT, relativo ao cenário III . . . . .	99
4.47	Resultado das concentrações de DBO para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário IV . . . . .	101
4.48	Resultado das concentrações de Amônia para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário IV . . . . .	102
4.49	Resultado das concentrações de Nitrato para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário IV . . . . .	103

4.50	Resultado das concentrações de PT para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário IV . . . . .	104
4.51	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para DBO, relativo ao cenário IV . . . . .	105
4.52	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Amônia, relativo ao cenário IV . . . . .	105
4.53	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Nitrato, relativo ao cenário IV . . . . .	106
4.54	Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para PT, relativo ao cenário IV . . . . .	106
4.55	Montante de investimento necessário até 2035 em saneamento por município da RHBG . . . . .	108

# Lista de Tabelas

2.1	Índice de coleta e tratamento de esgoto por município da bacia hidrográfica da baía de Guanabara . . . . .	7
2.2	Objetivos específicos do Projeto . . . . .	9
2.3	Objetivos específicos do Projeto Pra-Baía . . . . .	9
2.4	Classificação de estado trófico segundo o fósforo . . . . .	12
2.5	Destinação do uso da água segundo a classificação da CONAMA 357/05	13
2.6	Concentração de poluentes segundo classificação CONAMA 357/05 .	14
2.7	Trabalhos de modelagem hidrodinâmico realizados na BG . . . . .	17
3.1	Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, $\epsilon$ , sem efeitos de ondas . . . . .	29
3.2	Tabela de constantes harmônicas, calibradas para a fronteira aberta do domínio de modelagem, a partir das constantes da estação Porto do Rio de Janeiro (Ilha Fiscal), e seus respectivos valores de período, amplitude e fase. . . . .	36
3.3	Valores de vazões de verão utilizados por Andrade (2018), Porto & Ponte (2018), pelo projeto Baías do Brasil e valor escolhido pós calibração . . . . .	41
3.4	Constituintes, unidades e símbolos utilizados pelo MQA . . . . .	44
3.5	Valores mediados obtidos através dos dados de medições do Inea, nos anos de 2014 a 2018, para cada fronteira de entrada de rio. . . . .	51
3.6	Percentual de remoção de poluentes de acordo com sistema de tratamento utilizado . . . . .	53
3.7	Cenários utilizados . . . . .	54
4.1	Comparação entre resultados hidrodinâmicos de Rosman et al., 2018 e o presente estudo . . . . .	57
4.2	Comparação entre valores de salinidade (ups) reportados por Bérghamo (2006) e resultados obtidos na simulação . . . . .	70
4.3	Comparação entre valores de salinidade (ups) reportados por Santos (2015) e resultados obtidos na simulação . . . . .	71

# Capítulo 1

## Introdução

A constituição brasileira de 1988 declara no seu artigo 225: “Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”.

A Baía de Guanabara encontra-se encravada na segunda maior região metropolitana do país, e apresenta um conjunto histórico de problemas relacionados à degradação ambiental de suas águas, principalmente devido à falta de uma rede de esgotamento sanitário adequada. Atualmente seus corpos hídricos encontram-se em situação de degradação ambiental extrema, levando à graves impactos socioeconômicos atingindo, principalmente, parcelas mais vulneráveis da população residente. (COSTA, 2015)

Historicamente a falta de saneamento básico sempre foi presente no contexto fluminense, ainda no final do século XVIII e início do XIX existem relatos correlacionando o ambiente insalubre da então capital, devido à precariedade de uma rede de esgotamento adequada, à propagação de doenças e problemas de saúde públicas. (CARVALHO, 1996)

Porém, mais de um século depois, por volta da década de 1950, foi quando na região da bacia hidrográfica da baía de Guanabara teve início o seu processo de degradação ambiental mais acentuado. Segunda Costa (2015) tal processo coincidiu com o contexto de desenvolvimento urbano-industrial da região.

Foram nessas décadas quando os principais aterros da cidade foram realizados, que alteraram drasticamente os padrões hidrodinâmicos e de renovação das águas de seu entorno. Acompanhados de uma expansão acentuada do setor industrial, majoritariamente representado por indústrias farmacêuticas e petroquímicas, além do explosivo crescimento e adensamento populacional observado na época.

Foram nesses anos quando a poluição urbano-industrial foi gradativamente transformando as águas das praias do interior da baía impróprias para banho, os mangues e áreas verdes se tornaram cada vez mais escassos e ocorreram alterações radicais

na fauna e flora local. (BRITTO, 2003)

Somente com o final do século XX e início do século XXI houve significantes esforços para atenuar o problema de qualidade das águas da baía. Durante a década de 1990 ocorreu a elaboração do “Programa de Despoluição da Baía de Guanabara” (PDBG), com financiamento do Banco Mundial e do Japan Bank for International Cooperation (JIBIC). Apresentado como um dos maiores conjuntos de obras de saneamento no Estado do Rio de Janeiro, o objetivo do programa era de recuperar os ecossistemas ainda presentes na região e melhorar a qualidade das águas do interior da baía e dos rios que nela desagüam.

Infelizmente é um consenso hoje que esse programa teve uma efetividade extremamente insignificante, principalmente ao analisar sob o viés do volume de recursos externos utilizados versus a efetiva melhora da qualidade ambiental da baía. (COSTA, 2015)

Devido ao fracasso do PDBG, houve em 2013, por consequência também das pressões referentes aos megaeventos que seriam sediados na cidade do Rio de Janeiro nos anos seguintes, uma reestruturação das ações de despoluição da Baía de Guanabara. Foi criado o “Pacto pelo Saneamento”, plano que contemplava o sucessor do PDBG, o “Programa de Saneamento dos Municípios do Entorno da Baía de Guanabara” (PSAM), ao todo o programa contava com um aporte de cerca de R\$6 bilhões, destes, R\$ 1,3 bilhões seriam relativos ao PSAM. Uma das metas do programa seria de incrementar o tratamento de esgoto na região de 40% para 60% até 2016, em 2018 esse percentual foi de 46% na capital. (FÉRES, 2014; ITB, 2019)

## 1.1 Motivação

Em vista do grave estado de degradação do ecossistema da baía de Guanabara, ações objetivando o incremento de sua qualidade devem ser estimuladas. Para tal, deve-se compreender as complexas relações existentes nesse ambiente. Sistemas estuarinos são conhecidos pelo elevado grau de complexidade de seus parâmetros, o que dificulta a compreensão e elaboração de planos e metas efetivas em seus ambientes.

Uma ferramenta que pode auxiliar em uma melhor compreensão de sistemas como a baía de Guanabara é a modelagem hidrodinâmica computacional. Esses modelos são ferramentas capazes de permitir uma visão integrada das diferentes dinâmicas dos processos presentes em corpos d’água de diferentes complexidades. (ANDRADE, 2018)

É possível, portanto, identificar diversos estudos abordando o conceito de modelagem ambiental no estuário da Baía de Guanabara, Rosman, 2018; Kauffman, 2009; Andrade, 2018; Lima, 2006 são só alguns destes. Contudo, o presente estudo objetiva, primeiramente, através de uma busca na literatura de dados de parâmetros

ambientais, analisar a possibilidade de uma calibração dos modelos de qualidade da água obtidos, além de incorporar uma metodologia de cenários de cobertura de uma rede de saneamento básico que em grande parte inexistente na região abordada.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho visa a elaboração de um modelo computacional representativo da baía de Guanabara, e sua hidrodinâmica, e, de posse desse modelo, estudar seu comportamento em diferentes cenários de qualidade de tratamento de efluentes domésticos nos municípios de seu entorno. São objetivos específicos desse trabalho:

- Elaborar um modelo de circulação hidrodinâmica incorporando variáveis meteorológicas, oceanográficas e hidrológicas representativo da baía de Guanabara.
- Analisar as dinâmicas de tempos característicos da Baía de Guanabara, incorporando conceitos de Taxa de Renovação e Idade da Água através de modelos de transportes Eulerianos.
- Analisar o comportamento da dispersão de potenciais poluentes relacionados com a descarga de matéria orgânica em corpos d'água; são eles: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Oxigênio Dissolvido (OD), fósforo e nitrogênio.
- Realizar uma análise comparativa desses componentes em diferentes cenários de cobertura do sistema de tratamento de efluentes domésticos.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo foram abordados conceitos fundamentais para descrição e definição do tema estudado. Foi definida e caracterizada a área de estudo, apresentando um breve contexto histórico e retrato atual de sua qualidade ambiental. Serão pontuados conceitos e parâmetros relevantes aos estudos de qualidade ambiental além de marcos regulatórios específicos. Além de uma introdução aos modelos hidrodinâmicos computacionais e suas aplicações na área de estudo.

### 2.1 Baía de Guanabara

Neste subcapítulo apresenta-se brevemente características geográficas da baía de Guanabara, assim como um panorama de seu estado ambiental e um breve contexto histórico de suas ações de despoluição.

#### 2.1.1 Descrição da Área de Estudo

A baía de Guanabara encontra-se na parte central do litoral do estado do Rio de Janeiro, entre as longitudes de 43<sup>o</sup>00'00" e 43<sup>o</sup>20'00" W, e latitudes 22<sup>o</sup>40'00" e 23<sup>o</sup>05'00" S. O estuário possui cerca de 346 km<sup>2</sup> de área, incluindo 59 km<sup>2</sup> espalhadas entre mais de 70 ilhas. Com um perímetro de cerca de 150 km, largura máxima de 28 km, e uma distância norte-sul máxima de cerca de 31 km, conforme pode ser visualizado na figura 2.1 abaixo.(LIMA, 2006)

Segundo à resolução 107/2013 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERHI, 2013) a área de drenagem da região da bacia hidrográfica da baía de Guanabara engloba 17 municípios, sendo 11 integralmente pertencentes à região (Niterói, São Gonçalo, Itaboraí, Tanguá, Guapimirim, Magé, Duque de Caxias, Belford Roxo, Mesquita, São João de Meriti, Nilópolis;); e 6 municípios parcialmente integrados à região de drenagem (Maricá, Rio Bonito, Cachoeira de Macacu, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro e Petrópolis). Esses municípios somam uma população de



Figura 2.1: Dimensões aproximadas da baía de Guanabara  
 Fonte: Google Earth Pro. Imagem: LandSat / Copernicus Julho de 2020

cerca de 11,7 milhões de habitantes segundo último censo do IBGE de 2010; a figura 2.2 representa uma imagem referente à essa zona de drenagem.



Figura 2.2: Principais municípios pertencentes à RHBG



Tabela 2.1: Índice de coleta e tratamento de esgoto por município da bacia hidrográfica da baía de Guanabara

Município	População (Hab.)	Operador	Índice de Coleta de Esgoto (%)	Índice de Tratamento de Esgoto (%)
Belford Roxo	469.332	CEDAE	38.0	44.2
Cachoeiras de Macacu	54.273	CEDAE/AMAE	61.8	0.0
Duque de Caxias	855.048	CEDAE	41.1	19.9
Guapimirim	51.483	FSSG	0.0	0.0
Itaboraí	218.008	CEDAE	44.1	5.9
Magé	227.322	CEDAE	39.2	0.0
Maricá	127.461	CEDAE	0.0	0.0
Mesquita	168.376	CEDAE	0.0	0.0
Nilópolis	157.425	CEDAE	29.5	60.6
Niterói	487.562	CAN	100.0	100.0
Nova Iguaçu	796.257	CEDAE	36.2	4.0
Petrópolis	295.917	CAI	100.0	80.5
Rio Bonito	55.551	CEDAE/PMRB	87.2	0.0
Rio de Janeiro	6.320.446	CEDAE/FABZO	58.6	73.2
São Gonçalo	999.728	CEDAE	37.3	27.8
São João de Meriti	458.676	CEDAE	0.0	0.0
Tanguá	30.732	CEDAE	39.0	0.0
Total	11.773.597		41.9	24.5

## 2.1.2 Gestão Ambiental na Baía de Guanabara

Os primeiros estudos envolvendo a qualidade da água no estuário ocorreram por volta da década de 1940, quando a degradação ambiental da baía foi se tornando cada vez mais intensa. Em 1991 a Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA) elaborou um estudo intitulado “Qualidade das águas do estado do Rio de Janeiro”, onde foi realizado um levantamento histórico de padrões de qualidade da bacia, cujos primeiros inputs datam de 1968. O estudo concluiu que àquela época, e em parte até os dias atuais, as regiões de maior degradação ambiental encontram-se na parte oeste da baía de Guanabara, próximo à região interior da ilha do Governador e ilha do Fundão, devido ao grande descarte de matéria orgânica e assoreamento nos canais da região. (KAUFFMAN, 2009)

Também no começo da década de 1990 houve o início da elaboração do Programa de despoluição da Baía de Guanabara (PDBG), com um aporte de cerca de US\$ 800 milhões. A filosofia do programa compreendia iniciar os processos de recuperação e preservação da qualidade ambiental da região, e definiu como uma de suas prioridades a construção e implementação de uma rede de coleta e tratamento primário de esgoto.

O programa foi lançado em 1994 com planos para sua finalização no ano de 2000, porém os constantes atrasos significaram que o projeto só findaria no ano de 2006. O plano de despoluição que, inicialmente, apresentava cunho social, melhorando a qualidade de vida da população afetada mediante a implementação de uma rede de coleta e tratamento de esgoto, tornou-se simplesmente um conjunto de obras de construção de volumosas estações de tratamento primário de rejeitos com uso de tecnologias convencionais, que levaram à uma baixíssima eficácia do projeto sob o viés de melhoria da qualidade ambiental da baía. (LIMA, 2006)

Outro relevante estudo referente à qualidade ambiental da Baía de Guanabara foi concluído em 2003, intitulado “The Study on Management and Improvement of the Environmental Conditions of Guanabara Bay in Rio de Janeiro, the Federative Republic of Brazil”. Tal estudo representou uma cooperação técnica entre o Governo brasileiro e japonês através do Japan International Cooperations Agency (JICA), e contando com a Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano (SEMA-DUR) e a Companhia Estadual de Água e Esgoto (CEDAE). O estudo teve como objetivos específicos revisar os planos anteriores de despoluição da Baía e elaborar alternativas e soluções técnicas e econômicas para recuperação das condições sanitárias e ambiental da região. Os principais objetivos relativos à qualidade da água apontados por esse estudo podem ser observados na tabela 2.2, a seguir. (JICA, 2002)

Por fim, uma das ações mais recentes no âmbito de melhora da qualidade ambi-

Tabela 2.2: Objetivos específicos do Projeto

Objetivo	Descrição	Prazo
Curto Prazo	Remoção das condições desagradáveis da Baía DBO inferior à 10 mg/l em todas as estações de monitoramento	2010
Médio Prazo	DBO inferior à 5 mg/l em todas as estações de monitoramento com exceção das regiões oestes da Baía	2020
Longo Prazo	Classificação DZ105 para qualidade da água	Não Especificado

Fonte: Adaptado de JICA (2002)

ental na BG foi realizada em 2016 em parceria com a consultoria KCI-Technologies, esse estudo apresentou o programa intitulado de Pra-Baía: Plano de Recuperação Ambiental da Baía de Guanabara, que previa a revitalização do sistema estuarino, promovendo melhorias sanitárias e de qualidade de vida para a população afetada, além disso o estudo contemplava a elaboração de um boletim de qualidade ambiental da baía, com a apresentação da concentração de poluentes em diversas estações de medição espalhadas no interior da BG, esse boletim será usado posteriormente na validação do modelo apresentado, abaixo é apresentada uma tabla com alguns dos objetivos do projeto relevantes ao presente estudo. (KCI-Technologies, 2016)

Tabela 2.3: Objetivos específicos do Projeto Pra-Baía

Meta	Ampliação da rede de coleta de esgoto	Redução da carga de DBO nos lançamentos de efluentes das ETEs para os rios e baía
Curto Prazo	Conectar 60% da população à rede de coleta	Reportar publicamente o fluxo de esgotos e a carga de poluentes de todas as ETES Reduzir carga de DBO em 50% (sendo 85% de remoção de DBO desde 60% de esgoto)
Médio Prazo	Conectar 80% da população à rede de coleta	Reduzir carga de DBO em 68%
Longo Prazo	Conectar 95% da população à rede de coleta	Reduzir carga de DBO em 85%

Fonte: Adaptado de KCI-Technologies (2016)

## 2.2 Qualidade da Água: Parâmetros e Legislações Pertinentes

Neste subcapítulo será abordado, de forma introdutória, os parâmetros relevantes comumente utilizados na caracterização da saúde ambiental de um corpo d'água, assim como os principais marcos regulatórios que serão utilizados no estudo.

## 2.2.1 Parâmetros Relevantes no Monitoramento da Qualidade da Água

### Oxigênio Dissolvido (OD)

Um dos componentes fundamentais para a análise da saúde ambiental de corpos hídricos é a quantidade de oxigênio dissolvido em suas águas, usualmente mensurado em mg/L. A saturação de oxigênio dissolvido em águas varia de acordo com parâmetros como a temperatura, salinidade, altura da coluna d'água e pressão.

Uma das consequências da eutrofização de corpos d'água é a redução da concentração de oxigênio disponível em suas águas. A condição de hipóxia (Oxigênio Dissolvido  $< 2$  mg/L) é um dos sintomas de uma elevada taxa de eutrofização, essa condição acarreta a mortalidade de organismos naturais ao ambiente, alterando suas cadeias tróficas e ciclos biogeoquímicos (Yin, Lin e Ke, 2004). Essa condição, quando causada por atividades antrópicas, é o resultado de um aumento na descarga de matéria orgânica biodegradável (usualmente com origem no esgoto doméstico) além do limite de autodepuração do ambiente. Quando esse limite é ultrapassado, o consumo de oxigênio necessário para depuração da matéria orgânica ultrapassa a capacidade de produção pelos organismos fotossintéticos, alterando o equilíbrio do sistema. (Valente et al, 1997)

### Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A DBO representa uma medida indireta da quantidade de matéria orgânica biodegradável presente na água, usualmente esse dado é apresentado em mg/L. Ela é definida como a quantidade de oxigênio consumida por organismos aeróbios para estabilizar a matéria orgânica presente na amostra, portanto existe uma forte relação entre a DBO e o OD. Usualmente utiliza-se o termo DBO<sub>5</sub>, que significa a quantidade de oxigênio consumida após 5 dias pelos organismos aeróbios da amostra.

O valor de DBO<sub>5</sub> é utilizado como padrão para a determinação dessa matéria orgânica, sendo realizado a 20°C. Após os primeiros 5 dias, observa-se uma diminuição na taxa de consumo de oxigênio na amostra, após esse período, outras formas de consumo de matéria orgânica, geralmente sob organismos anaeróbios começam a se mostrar presentes, o que impacta nos resultados do experimento. A seguir é apresentado um gráfico da variação da DBO ao longo do tempo. (VON SPERLING, 2005)

### Nitrogênio

Nitrogênio representa um dos nutrientes fundamentais para o crescimento de algas e microrganismos em corpos d'água. Usualmente pode-se encontrá-lo sob a

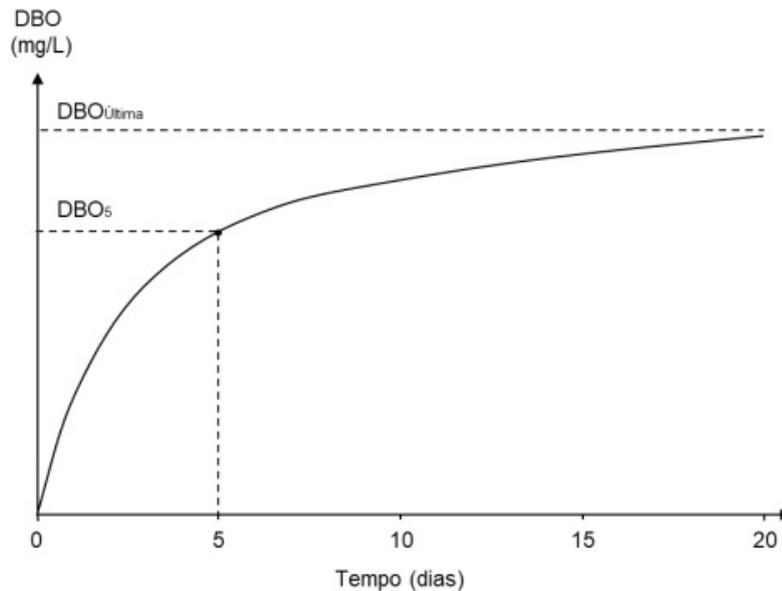


Figura 2.4: Evolução da DBO ao longo do tempo  
 Fonte: Von Sperling, 2005

forma atômica ( $N_2$ ), amônia ( $NH_4$ ), nitrito ( $NO_2^-$ ), nitrato ( $NO_3^-$ ) e em diversas formas orgânicas, como compostos de aminoácidos, aminas, proteínas dentre outros. (JAFPE, 1992)

Aportes externos desse nutriente, geralmente por consequências antrópicas como efluentes industriais e esgotamentos domésticos, acarretam a proliferação exacerbada de algas e cianobactérias, comumente definido como “bloom de algas”. As consequências vão além, alterando drasticamente as características da fauna e flora local e gerando condições assépticas e perdas econômicas devido à inutilização do capital natural do ecossistema. (SMITH; TILMAN; NEKOLA, 1999)

### Fósforo

Contrária às inúmeras formas possíveis de encontrarmos o nitrogênio em ambientes aquáticos, o fósforo é majoritariamente encontrado sob a forma de ortofosfato ( $PO_4^{3-}$ ) normalmente responsável por mais de 90% do aporte de fósforo em ambientes aquáticos, sendo o restante assimilado à moléculas orgânicas. Assim como o nitrogênio, o fósforo também é um importante nutriente para a proliferação de algas e bactérias, sendo um dos grandes responsáveis pela eutrofização de corpos d’água.

O fosforo pode ser usado como um dos indicadores na definição do índice de estado trófico de um ambiente aquático, juntamente com a clorofila e turbidez (profundidade de Secci). Abaixo é apresentado as faixas do Índice de Estado Trófico (IET) conforme proposto por Lamparelli, 2004.

Tabela 2.4: Classificação de estado trófico segundo o fósforo

Categoria de Estado Trófico	Rios	Reservatórios
	Fósforo total ( $\mu g/L$ )	Fósforo total ( $\mu g/L$ )
Ultraoligotrófico	$P \leq 13$	$P \leq 8$
Oligotrófico	$13 < P \leq 35$	$8 < P \leq 19$
Mesotrófico	$35 < P \leq 137$	$19 < P \leq 52$
Eutrófico	$137 < P \leq 296$	$52 < P \leq 120$
Supertrófico	$296 < P \leq 640$	$120 < P \leq 233$
Hipereutrófico	$P > 640$	$P > 233$

Fonte: Lamparelli, 2004.

## 2.2.2 Legislações Pertinentes

A resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação de corpos d'água fornecendo diretrizes e parâmetros para seu enquadramento. A legislação classifica um corpo d'água segundo sua salinidade (doce, salobra e salina), além de enquadrá-los segundo o seu uso, em cinco diferentes classes (especial, classe 1, 2, 3 e 4). Abaixo encontra-se uma tabela com os usos previstos segundo seu enquadramento.

Tabela 2.5: Destinação do uso da água segundo a classificação da CONAMA 357/05

	Águas Doces	Águas Salobras	Águas Salinas
Classe Especial	Abastecimento para consumo humano com desinfecção	Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral	Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral
Classe 1	Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas	Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas	Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas
	Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral		
Classe 1	Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado		Recreação de contato primário
	Proteção das comunidades aquáticas	Recreação de contato primário	Proteção das comunidades aquáticas
	Recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho	Proteção das comunidades aquáticas	Aqüicultura e à atividade de pesca
Classe 1	Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película	Aqüicultura e à atividade de pesca	Abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado
	Proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas		Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película, e à irrigação de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto
Classe 2	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional		
	Proteção das comunidades aquáticas		
Classe 2	Recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho	Pesca amadora	Pesca amadora
	Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto	Recreação de contato secundário	Recreação de contato secundário
Classe 2	Aqüicultura e à atividade de pesca		
	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado		
Classe 3	Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras	Navegação	Navegação
	Pesca amadora	Harmonia paisagística	Harmonia paisagística
Classe 3	Recreação de contato secundário		
	Dessedentação de animais		
Classe 4	Navegação	-	-
	Harmonia paisagística		

Além da classificação anteriormente definida, a CONAMA 357/05 ainda dispõe sobre as concentrações máximas de poluentes que podem estar presentes nessas águas. Na tabela 2.6 a seguir pode-se observar os limites para as classes 1, 2 e 3 para os poluentes relevantes ao estudo.

Tabela 2.6: Concentração de poluentes segundo classificação CONAMA 357/05

Águas Doces				
Parâmetro	Classe1	Classe 2	Classe 3	
DBO (mg/L)	3	5	10	
OD (mg/L)	6	5	4	
Fósforo Total (mg/L)	0,02	0,03	0,05	
Nitrato (mg/L)	10	10	10	
Nitrito (mg/L)	1	1	1	
Nitrogênio Amoniacal* (mg/L)	3,7	3,7	13,3	
Águas Salobras				
Parâmetro	Classe1	Classe 2	Classe 3	
COT** (mg/L)	3	5	10	
OD (mg/L)	5	4	3	
Fósforo Total (mg/L)	0,124	0,186	-	
Nitrato (mg/L)	0,4	0,7	-	
Nitrito (mg/L)	0,07	0,2	-	
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	0,4	0,7	-	
Águas Salinas				
Parâmetro	Classe1	Classe 2	Classe 3	
COT** (mg/L)	3	5	10	
OD (mg/L)	6	5	4	
Fósforo Total (mg/L)	0,062	0,093	-	
Nitrato (mg/L)	0,4	0,7	-	
Nitrito (mg/L)	0,07	0,2	-	
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	0,4	0,7	-	

\* Para pH <7,5

\*\* Carbono Orgânico Total

## 2.3 Modelagem Hidrodinâmica

Neste subcapítulo foram abordados conceitos básicos envolvendo ferramentas de modelagem hidrodinâmica, suas características e atributos principais. Além, apresentou-se e discutiu-se trabalhos realizados anteriormente relevantes ao presente estudo.

### 2.3.1 Considerações Sobre Modelagem Hidrodinâmica

Modelos de hidrodinâmica ambiental são ferramentas indispensáveis na gestão e elucidação de questões de interesse envolvendo o planejamento de ações em corpos

d'água naturais. Usualmente, permitem analisar dinâmicas de processos referentes a: Circulação hidrodinâmica, qualidade de águas e processos sedimentológicos. (ROSMAN, 2018)

As formas usuais nas quais esses modelos podem auxiliar a tomada de decisão dividem-se em dois grupos principais, são eles:

- **Em análises de diagnósticos**, onde o modelo permite otimizar custos de monitoramento e integrar espacialmente informações usualmente obtidas de forma pontual; estender o conhecimento em regiões onde o monitoramento não é realizado de forma satisfatoriamente ampla; e auxiliar na compreensão e interpretação dos processos dinâmicos que ocorrem simultaneamente nos ambientes.
- **Em análises de prognóstico**, onde os modelos permitem prever situações, simulando diferentes cenários de possíveis perturbações aos sistemas; alimentar processos de licenciamentos ambientais, mapeando áreas de riscos e definir possíveis contaminantes; auxiliar na definição de Planos de Emergência de cenários hipotéticos, além de Planos de Mitigações dentre outros.

Ressalta-se que, mesmo os modelos sendo ferramentas extremamente úteis no auxílio à tomada de decisões, os mesmos são apenas ferramentas de suporte, e seu uso de forma inadequada podem levar a graves consequências. Por isso, é essencial que o usuário tenha os conhecimentos necessários para interpretar os resultados obtidos, e que esteja de posse de um modelo quanto melhor calibrado e validado quanto possível. A seguir pode-se observar um diagrama sintetizado das etapas a serem seguidas em uma modelagem computacional (Figura 2.5).

A calibração/validação de um modelo é a etapa na qual o modelador se utiliza de dados medidos *in loco* para refinar os parâmetros do modelo, e então obter o melhor grau de realismo possível. Obviamente, essa etapa é fortemente limitada pela abundância de dados de monitoramento disponíveis nos locais de estudo.

### 2.3.2 Estudos Realizados na Região

Devido à sua grande relevância, a baía de Guanabara foi foco de diversos estudos acerca de suas características hidrodinâmicas e ambientais, muitos deles utilizando como ferramenta de apoio, softwares de modelagem hidrodinâmicas como o SisBaHiA, Delft, Mike, dentre outros. A tabela 2.7 a seguir apresenta um resumo dos principais trabalhos científicos que abordaram esse aspecto da Baía de Guanabara nas últimas décadas. Deste modo, o presente estudo pretende auxiliar no entendimento das complexas relações ambientais que resultam no sistema estuarino da baía de Guanabara. Este trabalho, portanto, possui o objetivo de aprofundar o

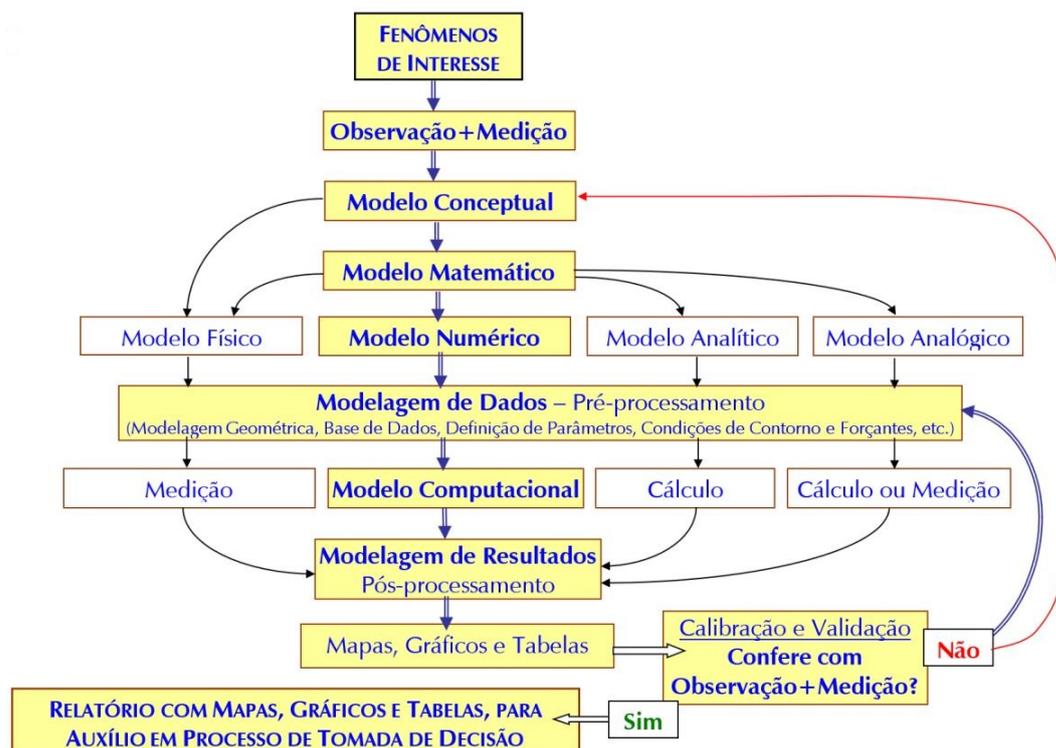


Figura 2.5: Diagrama do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental  
 Fonte: Rosman, 2020

conhecimento das fontes e formas de disseminação dos poluentes mais ativos no sistema, com suas origens na carência de investimentos do setor de saneamento, além, foram realizadas simulações de cenários elevando a cobertura do serviço em regiões críticas da baía, analisando a resposta do sistema assim como os investimentos a serem realizados de forma a atingir os objetivos de cada cenário.

Tabela 2.7: Trabalhos de modelagem hidrodinâmico realizados na BG

Referência	Características do Trabalho	Objetivo(s)	Principais Resultados
(ANDRADE, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHia</li> <li>- Modelo Hidrodinâmico e circulação promediado na vertical (2DH)</li> <li>- Modelo de Transporte Euleriano</li> <li>- Modelo de Qualidade da Água</li> <li>- Simulação de cenários de Verão (Dez/2016) e Inverno (Jun/2016)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simular e validar modelo hidrodinâmico sem e com inclusão de gradiente de pressão baroclínica</li> <li>- Estudar tempos hidráulico característicos</li> <li>- Simular parâmetros de qualidade da água como DBO, OD, Fósforo e Nitrogênio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Observaram-se regiões da BG com idade da água superior a 105 dias em cenários de inverno</li> <li>- Regiões a Oeste da BG apresentam piores condições de degradação ambiental</li> <li>- Concentrações de OD tendendo a zero e DBO superiores a 10 mg/L foram reproduzidas nas regiões mais afetadas</li> </ul>
(PONTE; PORTO, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA)</li> <li>- Modelo hidrodinâmico e circulação promediado na vertical (2DH);</li> <li>- Análises de Taxa de Renovação e Idade da Água no Modelo de Transporte Euleriano;</li> <li>- Simulação de cenários de verão (Dez/2015 e Jan, Fev/2016) e inverno (Jun, Jul, Ago /2016)</li> </ul>	<p>Estudar a Taxa de Renovação e a Idade da Água do sistema estuarino da Baía de Guanabara</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Após 90 dias, a água da BG não se encontra totalmente renovada;</li> <li>- Existem massas de água com Idade de até 110 dias, à leste da Ilha do Governador;</li> <li>- Diferenças mais relevantes na região ao fundo da baía devido a sazonalidade das vazões fluviais;</li> <li>- Influência de correntes costeiras na renovação das águas na região sul da BG.</li> </ul>
(PEREIRA, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHiA</li> <li>- Modelagem de circulação hidrodinâmica 2DH;</li> <li>- Análises de dispersão de coliformes com modelo de transporte Lagrangeano;</li> <li>- Período analisado foi julho de 2015.</li> </ul>	<p>Estudar o impacto da descarga de efluentes sanitários dos rios sobre a qualidade da água na Baía de Guanabara através de modelagem computacional.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulações dos padrões de corrente no interior da baía de foram satisfatórias;</li> <li>- Avaliação da dispersão de coliformes demonstraram que áreas balneares e de preservação ambiental estão sendo degradadas pelos efluentes que chegam à BG.</li> </ul>

Referência	Características do Trabalho	Objetivo(s)	Principais Resultados
(FEITOSA, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHiA</li> <li>- Modelo de campo próximo NRFIELD</li> <li>- Uso de metodologia computacional probabilística em conjunto;</li> <li>- Modelagem hidrodinâmica;</li> <li>- Modelagem de transporte lagrangeano e decaimento bacteriano.</li> </ul>	<p>Avaliar a probabilidade de condições impróprias de balneabilidade em áreas costeiras adjacentes aos emissários submarinos de esgotos de Ipanema, Barra da Tijuca e Icaraí.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- As concentrações de coliformes fecais são influenciadas pela radiação solar;</li> <li>- Os emissários estudados não comprometem a balneabilidade na região costeira;</li> <li>- A poluição detectada nas praias é indicativa da contaminação pelos sistemas lagunares, rios e canais que possuem qualidade da água degradada.</li> </ul>
(ANDRIONI, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Princeton Ocean Model (POM)</li> <li>- Estudo de variações no nível do mar, e as velocidades horizontais em cenários de eventos extremos, como tsunamis;</li> <li>- Modelo hidrodinâmico de diferenças finitas, configurado em modo barotrópico e calibrado com dados de nível do mar (2010)</li> </ul>	<p>Avaliar a resposta do nível do mar na Baía de Guanabara (BG) a forçantes extremos, em comparação com variações astronômicas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de estudar eventos extremos, quando esses interagem com a hidrodinâmica local podem responder por variações de nível da ordem metros e de velocidades quase o dobro das esperadas;</li> <li>- O estudo desses fenômenos, mesmo que de maneira qualitativa, constitui uma ferramenta capaz de ajudar na tomada de decisões.</li> </ul>
(MOTTA & FARIA, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHiA</li> <li>- Modelagem hidrodinâmica 3D;</li> <li>- Modelagem de transporte lagrangeano de coliformes;</li> <li>- Quatro cenários representativos de verão e inverno, com vazões atuais e finais de projeto para o lançamento dos emissários.</li> </ul>	<p>Analisar a influência dos emissários submarinos Icaraí, Ipanema e Barra da Tijuca na balneabilidade das praias.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Foi verificado que os emissários não são responsáveis por alterações nas condições de balneabilidade das praias, as fontes pontuais costeiras, por sua vez, exercem grande influência.</li> </ul>

Referência	Características do Trabalho	Objetivo(s)	Principais Resultados
(MACHADO & SILVA, 2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHiA</li> <li>- Modelagem hidrodinâmica 3D;</li> <li>- Estudo de trocas de massa d'água da BG com o mar no Modelo de Transporte Euleriano;</li> <li>- Derramamento de óleo no interior da BG e contribuições de coliformes a partir dos rios afluentes à Baía com o Modelo de Transporte Lagrangeano;</li> <li>- Dois cenários de ventos: usuais e típicos de frente fria. Ambos com influência de maré.</li> </ul>	<p>Avaliar a influência das águas da Baía de Guanabara na qualidade da água das praias oceânicas adjacentes à sua embocadura.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificou-se que a BG não possui papel determinante na qualidade da água das praias oceânicas adjacentes à sua embocadura;</li> <li>- A interação entre as águas das praias e da BG não é muito grande associado ao decaimento natural das substâncias analisadas;</li> <li>- Devido a tendência de movimentos mais acentuados no sentido norte da BG, em derramamentos de óleo, mesmo próximo da embocadura, pequenas concentrações são transportadas para fora da BG.</li> </ul>
(OLIVEIRA, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Delft 3D</li> <li>- Simulação de inverno (02 a 17 de julho de 2000) e verão (25 de janeiro a 13 de fevereiro de 2001)</li> <li>- Adoção de índice Skill para comparação quantitativa de dados simulados com dados medidos</li> </ul>	<p>Estudar as características hidrodinâmicas da Baía de Guanabara (RJ, Brasil) nas estações de inverno e verão austral.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O modelo conseguiu reproduzir nas simulações o padrão de correntes observados experimentalmente na região e a oscilação prevista;</li> <li>- As salinidades simuladas não tiveram concordância com as amostradas, pois foram utilizados valores inicial e de contorno constantes ao longo da grade, e o tempo de simulações não foi suficiente para estabilizar a salinidade em todo o domínio.</li> <li>- O índice matemático Skill utilizado para comparar os dados amostrados in situ com os dados simulados, mostrou ser um bom parâmetro de avaliação quantitativa dos resultados.</li> </ul>

Referência	Características do Trabalho	Objetivo(s)	Principais Resultados
(KAUFMANN, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHiA</li> <li>- Modelo hidrodinâmico 2DH;</li> <li>- Modelo de transporte lagrangeano e de qualidade da água com ciclos de OD e DBO;</li> <li>- Três cenários: atual (2009), projetado com dragagem, projetado com dragagem e cinturão de contenção de efluentes no Canal do Fundão.</li> </ul>	Estudar os efeitos na circulação hidrodinâmica e qualidade de água no Canal do Fundão após o projeto de revitalização previsto.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Foi possível atestar a eficiência da obra quanto aos aspectos de melhoria da circulação hidrodinâmica, eliminação da tendência de assoreamento do Canal e redução do grau de poluição no canal e regiões adjacentes.</li> </ul>
(LIMA, 2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MIKE 21</li> <li>- Teoria Geral dos Sistemas</li> <li>- Modelo de Qualidade da Água</li> <li>- Cenários de até 90% de redução de poluentes como DBO, Fósforo e Nitrogênio</li> </ul>	Utilizar o modelo de qualidade da água da BG como suporte para tomada de decisões referentes ao setor de Saneamento na Região Metropolitana do rio de Janeiro	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Foi possível atestar verificar a verossimilhança do modelo elaborado</li> <li>- Para objetivos de curto prazo com redução da concentração de 10 mg/L de DBO em toda a baía deve-se priorizar os investimentos nas sub-bacias do Pavuna-Meriti, Sarapuú e Bangu</li> <li>- Mesmo com redução de 90% da DBO nos rios da região oeste, o objetivo de concentração de DBO máxima de 5 mg/L não seria alcançado</li> </ul>
(MALTA, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHiA</li> <li>- Modelo hidrodinâmico 2DH e 3D;</li> <li>- Análise das séries temporais das correntes de maré.</li> </ul>	Estudar as correntes de maré atuantes no Complexo Estuarino da Baía de Guanabara, Rio de Janeiro	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Padrões de circulação hidrodinâmica foram bem caracterizados;</li> <li>- Resultados obtidos não foram satisfatórios, devido a erros na calibração do modelo e qualidade dos dados medidos utilizados;</li> <li>- A metodologia apresentada é adequada, mas precisa de melhorias;</li> <li>- A aplicação dos modelos 2DH e 3D permitiu diversas análises comparativas.</li> </ul>

Referência	Características do Trabalho	Objetivo(s)	Principais Resultados
(SAMPAIO, 2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHiA</li> <li>- Modelagem computacional com modelo hidrodinâmico 2DH e 3D;</li> <li>- Modelo de transporte lagrangeano.</li> </ul>	Estudar a circulação hidrodinâmica 3D e troca de massas d'água do sistema estuarino Baía de Guanabara – RJ.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Padrões de circulação hidrodinâmica e trocas de massas d'água na Baía de Guanabara foram bem caracterizadas através dos modelos implementados;</li> <li>- Analisando-se apenas resultados promediados na vertical (2DH) torna-se difícil destacar a influência dos ventos, usual ou de frente fria;</li> <li>- A atuação do vento é mais sensível nos locais mais rasos;</li> <li>- Ocorrência de ventos locais, usuais ou de frente fria, não altera significativamente a elevação dos níveis d'água em comparação com situação de calmaria;</li> <li>- Nítida a dominância das correntes paralelas à costa fora da BG na trajetória de partículas.</li> </ul>
(XAVIER, 1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHiA</li> <li>- Modelo hidrodinâmico 2DH;</li> <li>- Modelo lagrangeano de transporte partículas, sob diferentes condições meteoceanográficas;</li> <li>- Simulações de hidrodinâmica não consideraram o efeito do vento.</li> </ul>	Verificar qualitativamente como o poluente se desloca nesta região da Baía, e quando esse recircula através do canal de tomada d'água da refinaria.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O modelo reproduz de forma satisfatória os principais mecanismos da circulação dentro da BG;</li> <li>- Observado o aspecto estagnante das águas do fundo da Baía, onde as velocidades são extremamente baixas tanto em situações de sizígia como de quadratura.</li> </ul>

Referência	Características do Trabalho	Objetivo(s)	Principais Resultados
(CUNHA, 1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelos Auto Regressivos Média Móvel (ARMA)</li> <li>- Modelagem estocástica às variáveis hidrológicas.</li> </ul>	<p>Avaliar a dependência entre os processos estocásticos de precipitação média diária e níveis médios diários, a partir de dados da estação da Ilha Fiscal na BG, RJ.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nas análises sob diferentes hipóteses de ocorrência, dependente e independente, os valores máximos anuais indicam que a sazonalidade é um fator importante e deve ser considerado;</li> <li>- Para um mesmo tempo de recorrência, a hipótese de independência pode aumentar os valores de precipitação e nível médio diário do mar em taxas superiores a 100%, o que pode superdimensionar o porte de obras de engenharia;</li> </ul>
(SANTOS, 1995)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHiA, pré-interface</li> <li>- Desenvolvimento de um modelo de trajetória de partículas em corpos de água rasos;</li> <li>- Modelo bidimensional promediado na coluna d'água;</li> <li>- Campo de velocidades usado como dado entrada foi obtido de modelo hidrodinâmico;</li> <li>- O estudo foca no campo afastado do ponto de lançamento.</li> </ul>	<p>Simular o caminhamento de contaminantes em um corpo d'água, lançados por um emissário subaquático.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O modelo de trajetória constitui importante ferramenta para o projeto de um emissário subaquático de poluentes em um corpo de água raso;</li> <li>- O esgoto não pode ser usado como traçador, pois seu tempo de vida é curto e devido à presença de grande quantidade de esgoto na água de outras fontes pontuais e difusas.</li> </ul>

Referência	Características do Trabalho	Objetivo(s)	Principais Resultados
(VILELA, 1992)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SisBaHiA, pré-interface</li> <li>- Técnica numérica de elementos finitos, aliada a um método em diferenças finitas;</li> <li>- Modelo bidimensional promediado na coluna d'água;</li> <li>- Aplicação com diferentes situações: circulação induzida pela maré, por maré e vento simultaneamente;</li> <li>- Período de simulação de quatro dias;</li> <li>- Calculado o transporte de partículas no interior do estuário para cada situação simulada.</li> </ul>	Utilizar um modelo numérico de circulação em corpos d'água rasos para a investigação dos efeitos do vento na hidrodinâmica da Baía de Guanabara-R.J.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Na primeira etapa dos trabalhos o modelo de circulação a ser utilizado não era estável na BG, a malha tinha apenas elementos triangulares;</li> <li>- Com modificações e a malha com elementos quadriláteros irregulares a simulação teve bons resultados;</li> <li>- É importante a inclusão de ventos nas equações para o cálculo do escoamento na Baía, principalmente quando o interesse é ver o destino de poluentes.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Andrade, 2018

# Capítulo 3

## Método Proposto

Este capítulo se propõe a apresentar a metodologia escolhida em cada etapa do processo de desenvolvimento do presente estudo. Abordará aspectos teóricos e conceitos de modelagens hidrodinâmicas e de qualidade da água, apresentará os cenários de modelagem além do significado e origem de todos os dados utilizados durante o estudo. Os subcapítulos desta seção seguem a ordem usualmente utilizada na confecção desse tipo de modelo.

### 3.1 Modelo Hidrodinâmico Computacional

Este estudo se utilizou da ferramenta denominada Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA) (Figura 3.1), que representa um conjunto de sistemas de modelagem computacional registrado pela Fundação COPPETEC, órgão responsável por gerir convênios e contratos de pesquisa vinculados ao Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Foram utilizados os seguintes módulos do programa: Modelo Hidrodinâmico, Modelo Euleriano e Modelo de Qualidade da Água, cujos domínios de modelagem representam o sistema estuarino da Baía de Guanabara.

### 3.2 Modelo Digital do Terreno

A primeira etapa na elaboração de um modelo hidrodinâmico ambiental utilizando o SisBaHiA agrupa-se na modelagem digital do terreno. Essa etapa engloba a definição da área de estudo, a construção de uma malha de elementos finitos que retrata a geometria do ambiente e a definição dos dados de batimetria e rugosidade de fundo do ambiente. Todos os dados referentes a essa seção foram incorporados do Projeto Baías do Brasil (ROSMAN et al., 2018).



Figura 3.1: Tela Inicial do Software SisBaHiA

### 3.2.1 Definição do Domínio de Interesse

A definição do domínio de interesse é a primeira etapa na elaboração de um modelo hidrodinâmico, essa etapa representa a definição dos limites utilizados no modelo, sejam eles fechados (contornos terrestres) ou abertos (limites de rios e mares).

Os contornos terrestres indicam as margens de baías ou lagos, seções de rios ou canais e margens de ilhas que estão dentro do domínio de modelagem. Já o contorno de água delimita o domínio de modelagem não prescrito pelo contorno físico e.g. o caso de entrada de baías e estuários, além de limites de rios (Rosman et al., 2018). A figura 3.2 a seguir representa o mapa base utilizado no programa, com o domínio de modelagem indicado em branco.



Figura 3.2: Mapa base da Baía de Guanabara e domínio do modelo.  
 Fonte: Rosman et al., 2018

### 3.2.2 Malha de Discretização

De posse do domínio de interesse do modelo é possível, através do SisBaHiA, confeccionar uma malha de elementos finitos quadrangulares biquadráticos e triangulares. A discretização espacial representada na figura 3.3 é a mesma utilizada no projeto Baías do Brasil <<http://www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br/>> e é composta por 1412 elementos finitos, destes, 1367 são quadráticos e 45 triangulares, agregando um total de 6356 nós de cálculo. A figura também apresenta um conjunto de informações da malha, como área do modelo, volume de água e profundidade média.

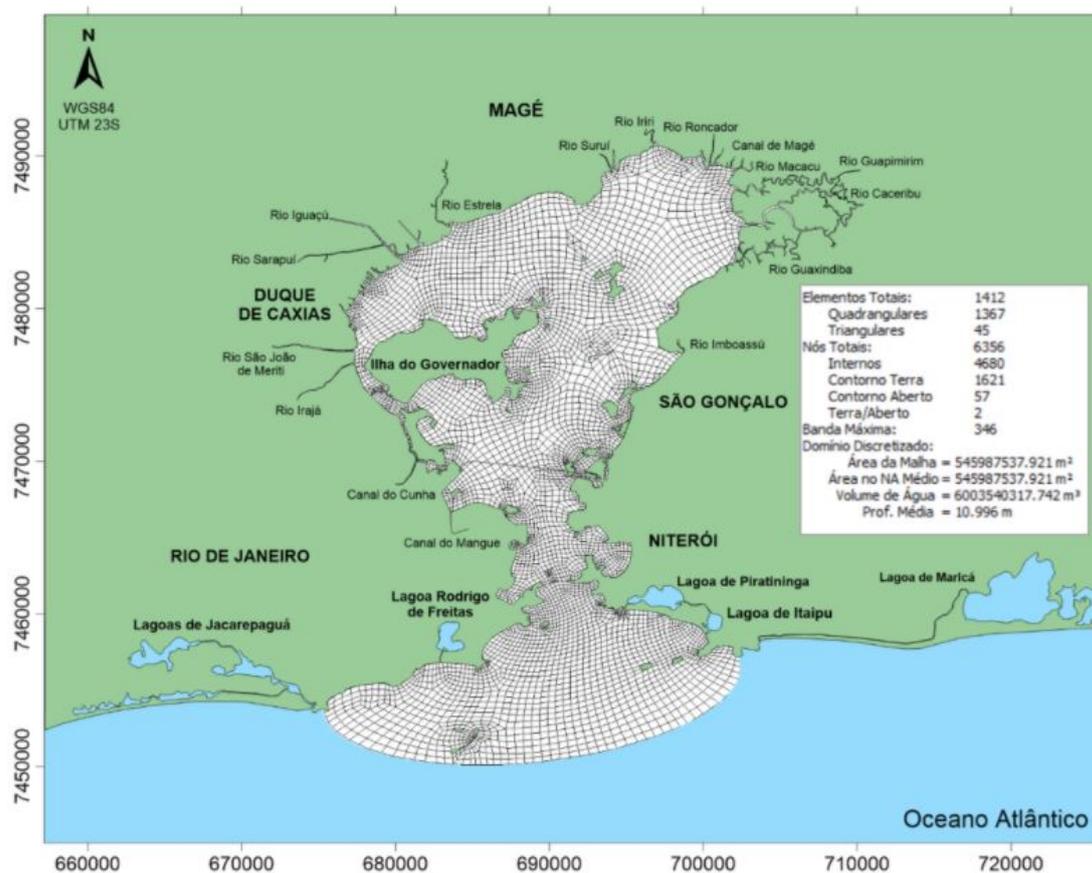


Figura 3.3: Malha de discretização utilizada

Fonte: Rosman et al., 2018

### 3.2.3 Batimetria

Os dados batimétricos utilizados no modelo foram obtidos através das cartas náuticas da DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. Especificamente, o projeto utilizou as seguintes cartas: Baía de Guanabara n<sup>o</sup> 1501 (escala 1:50.000), Barra do Rio de Janeiro no 1511 (escala 1:20.000) e Porto do Rio de Janeiro no 1512 (escala 1:20.000), todas editadas e atualizadas pela DHN. Esses dados foram interpolados via Kriging através do próprio software. A figura 3.4 apresenta os resultados dessa interpolação.

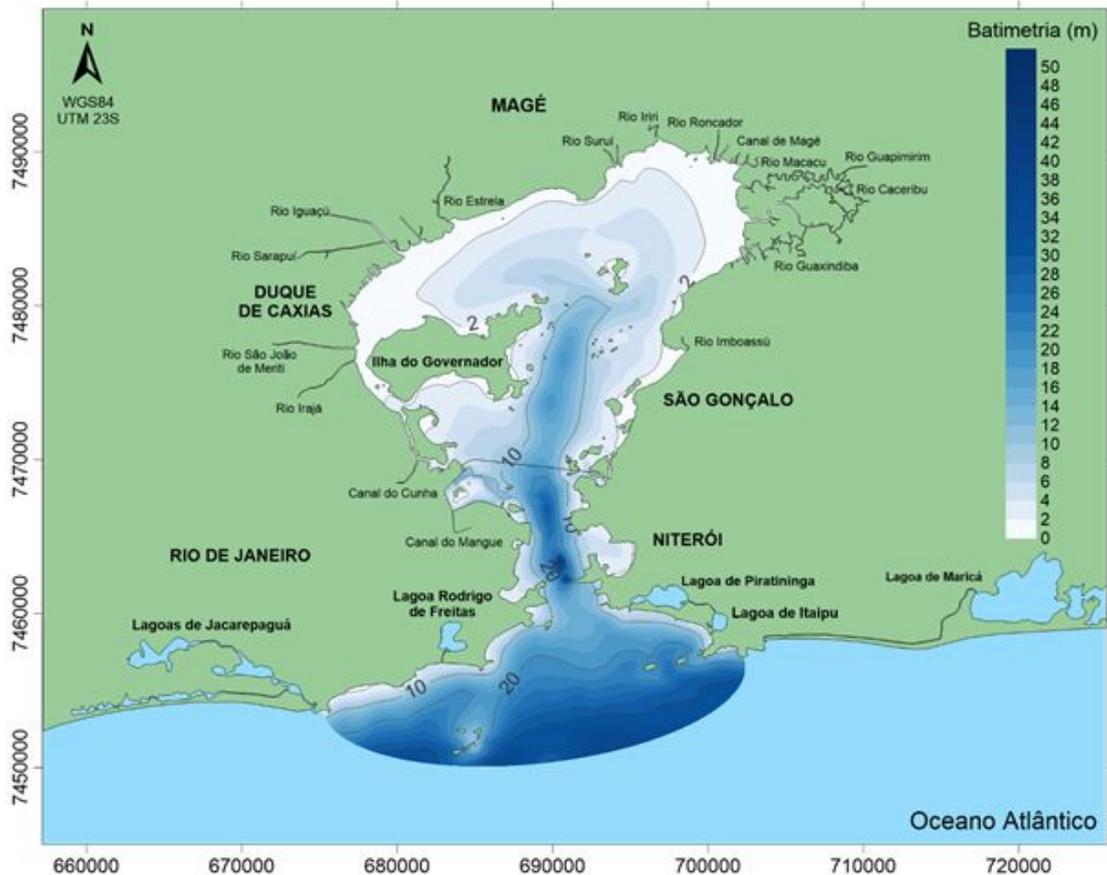


Figura 3.4: Batimetria da Baía de Guanabara

Fonte: Rosman et al., 2018

### 3.2.4 Rugosidade

Uma importante força governante do escoamento utilizada no modelo relaciona-se com o módulo da tensão de fundo. Estas podem ser determinadas através do coeficiente de Chézy, que por sua vez dependem da rugosidade equivalente ( $\epsilon$ ) e do tipo de material no fundo. Na ausência de dados de campo, usualmente utilizam-se valores derivados de ABBOT & BASCO (1989) para amplitudes de rugosidade equivalente. Uma tabela derivada desse estudo pode ser encontrada no referencial teórico do SisBaHiA e é apresentada abaixo.

Por fim, baseou-se as informações das tipologias de sedimentos de fundo do estudo de Amador (2012), que caracterizou os tipos de sedimentos de fundo segundo suas granulometrias. Ao norte da Baía de Guanabara são encontradas regiões nas quais predomina-se a presença de argilas e siltes; na região central até sua embocadura há predominância de areias finas e fora da baía encontram-se fundos compostos por areias grossas (Rosman et al., 2018). A figura 3.5 a seguir apresenta a inter-

Tabela 3.1: Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo,  $\epsilon$ , sem efeitos de ondas

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

Valores menores para fundos muito lisos e maiores para fundos muito rugosos podem ser adotados.

Tabela adaptada de Abbot e Basco (1989).

Fonte: Rosman, 2020

polação de Kriging dos dados obtidos por Amador (2012).

### 3.3 Modelo Hidrodinâmico

O SisBaHiA trabalha com modelos de circulação hidrodinâmica otimizados para corpos d'água naturais, tanto 3D quanto 2DH (onde as variáveis estudadas são promediadas na coluna d'água). O modelo foi concebido para ótima representação de escoamentos em domínios naturais de geometria complexa, significando que os processos de calibração são minimizados devido à fatores como: discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformações, permitindo ótimo mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas, campos de vento e atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência multi-escala baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES). (ROSMAN, 2020)

O modelo 2DH utilizado no presente estudo soluciona as equações de conservação da quantidade de movimento e da continuidade, onde se considera a condição de incompressibilidade do meio. As incógnitas representam as médias verticais das velocidades de escoamento dos fluídos nas direções  $x$  e  $y$ , ou seja,  $U(x,y,t)$  e  $V(x,y,t)$ ; além da elevação da superfície livre da coluna d'água,  $z = \zeta(x, y, t)$ .

A figura 3.6 exemplifica um corte vertical de um corpo hídrico, onde as coorde-

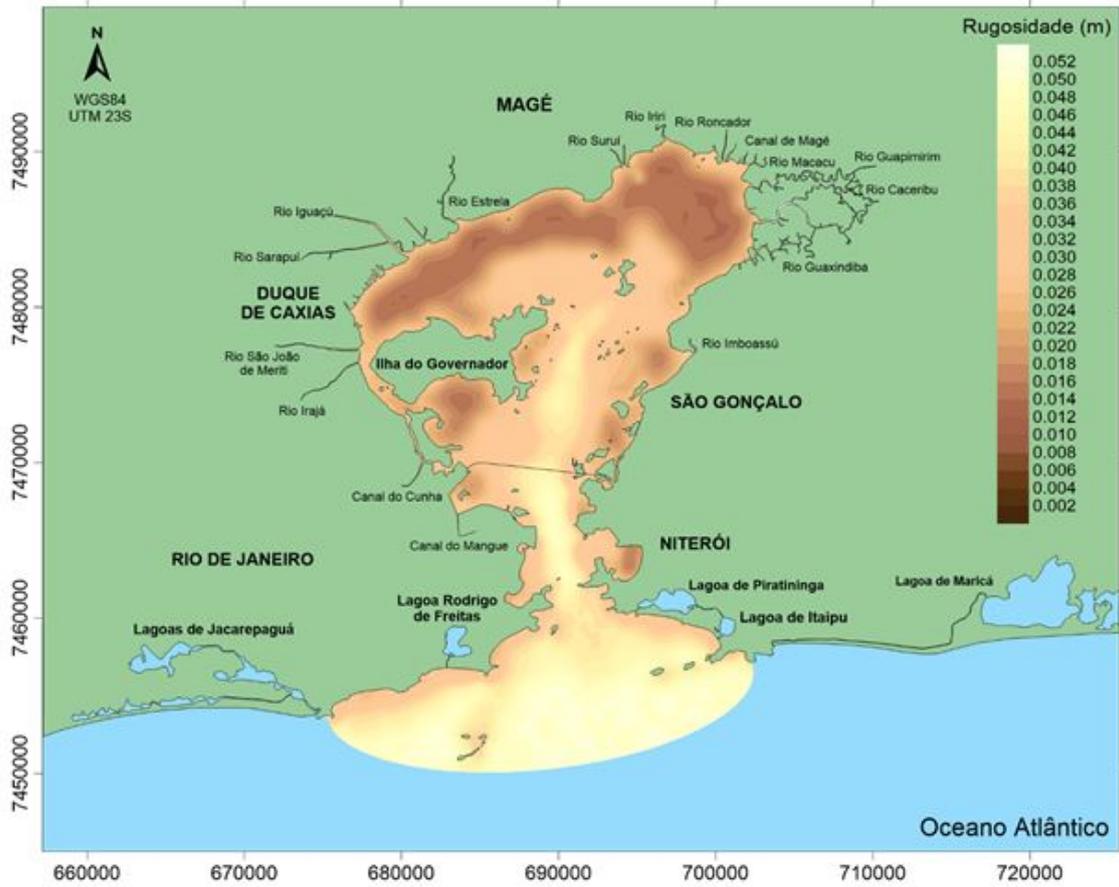


Figura 3.5: Amplitude da rugosidade equivalente de fundo da Baía de Guanabara  
 Fonte: Rosman et al., 2018

nadas e velocidades horizontais são representadas  $(x, y) \equiv (x_1, x_2)$  e  $(u, v) \equiv (u_1, u_2)$  utilizando o índice  $i = 1, 2$ .

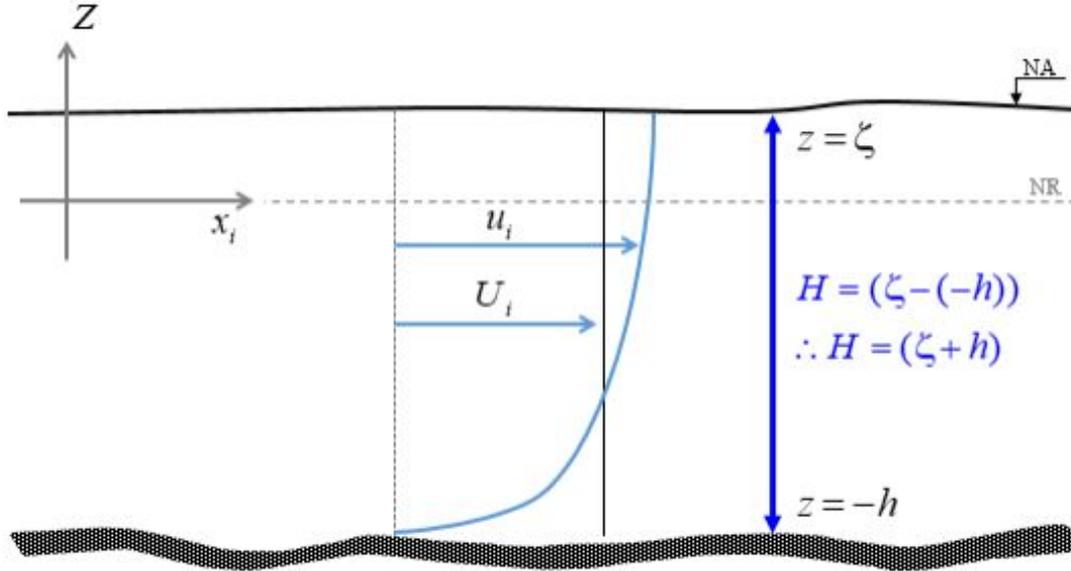


Figura 3.6: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência e,  $U_i$ , é a velocidade promediada na vertical

Fonte: Rosman, 2020

A fim de determinar essas incógnitas o modelo soluciona as três equações indicadas abaixo, são elas: equação da continuidade integrada na vertical, onde se considera batimetria fixa durante o período de simulação (3.1), e equações de quantidade de movimento integradas na vertical, nas direções x (3.2) e y (3.3).

- Equação da continuidade do volume, ou imposição da condição de incompressibilidade da água, em um modelo 2DH:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \Sigma q \quad (3.1)$$

onde:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} &= \text{Variação da coluna d'água no tempo.} \\ \frac{\partial UH}{\partial x} &= \text{Variação da vazão através da coluna d'água na direção x.} \\ \frac{\partial VH}{\partial y} &= \text{Variação da vazão através da coluna d'água na direção y.} \end{aligned}$$

$$\Sigma q = q_p + q_E + q_{Ia} + q_{Ie} = \text{Representa os fluxos de precipitação } (q_p), \text{ evaporação } (q_e), \text{ infiltração afluyente } (q_{ia}) \text{ e efluente } (q_{ie}), \text{ por unidade de área.}$$

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

$$\begin{aligned}
\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\frac{\hat{\rho}}{\rho_0})}{\partial x} \\
&+ \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial[H\hat{\tau}_{xx}]}{\partial x} + \frac{\partial[H\hat{\tau}_{xy}]}{\partial y} \right) \\
&+ \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E) - \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\
&+ 2\Phi \text{sen}\Theta V - \frac{U}{H} \Sigma q
\end{aligned} \tag{3.2}$$

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

$$\begin{aligned}
\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\frac{\hat{\rho}}{\rho_0})}{\partial y} \\
&+ \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial[H\hat{\tau}_{xy}]}{\partial x} + \frac{\partial[H\hat{\tau}_{yy}]}{\partial y} \right) \\
&+ \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B - \tau_y^E) - \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \\
&- 2\Phi \text{sen}\Theta U - \frac{V}{H} \Sigma q
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Onde:

$\frac{\partial U}{\partial t}$	<p>Representa a aceleração local do escoamento 2DH, i.e., em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento média na vertical por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.</p>
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y}$	<p>Representa a aceleração advectiva do escoamento 2DH, i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos advectivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.</p>
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	<p>Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo.</p>
$-g \frac{H}{2} \frac{\partial (\frac{\hat{\rho}}{\rho_0})}{\partial x}$	<p>Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido às diferenças de densidade <math>\frac{\hat{\rho}}{\rho_0}</math> da água na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força o escoamento de lugares com maior densidade para locais com menor a densidade.</p>
$\frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial [H \hat{\tau}_{xx}]}{\partial x} + \frac{\partial [H \hat{\tau}_{xy}]}{\partial y} \right)$	<p>Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento, i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Por exemplo, esses termos são responsáveis pela geração de vórtices horizontais em zonas de recirculação.</p>
$\frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right)$	<p>Representa o efeito das tensões de radiação devido a ondas de curto período capazes de gerar correntes litorâneas. Tais termos só tem efeito relevante quando as ondas estão em águas relativamente rasas, e.g., quando a profundidade local é inferior a 10% do comprimento da onda.</p>
$-2\Phi \text{sen}\Theta V$	<p>Representa a aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, i.e., em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos como a Baía de Guanabara, por exemplo.</p>

$\frac{1}{\rho_0 H}(\tau_x^S)$	Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento; se estiver oposto, irá retardar o escoamento.
$\frac{1}{\rho_0 H}(-\tau_x^B)$	Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.
$\frac{1}{\rho_0 H}(-\tau_x^E)$	Representa a tensão de atrito devido a efeito de estruturas inseridas no campo de escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.
$-\frac{V}{H}\Sigma q$	Representa efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área.

Fonte: Adaptado de Rosman (2020)

A seguir apresentam-se os dados ambientais necessários para a realização da modelagem hidrodinâmica da baía, assim como suas origens. Para o presente estudo foram incorporados dados de marés, correntes costeiras, ventos e vazões dos principais afluentes.

### 3.3.1 Marés

A área de estudo, por representar um ambiente estuarino, possui grande influência de padrões de marés na sua hidrodinâmica. Um ciclo de maré possui três pontos característicos, são eles: preamar, que representa o ponto de máxima amplitude; baixa-mar, que representa o ponto de mínima amplitude e o repondo de maré, onde as correntes oceânicas derivadas da maré se aproximam de zero. Além desses pontos característicos, vale ressaltar dois pontos de grande importância hidrodinâmica que ocorrem no decorrer de um período lunar, são eles: Marés de sizígia, onde ocorre o alinhamento entre o Sol, Terra e Lua, representando o máximo de amplitude de maré observada em um período lunar; e marés de quadratura, quando o Sol, a Terra e a Lua encontram-se em um ângulo de 90°, esse ponto representa o mínimo de amplitude de marés observadas durante o período lunar.

Além das marés astronômicas apresentadas acima, naturalmente ocorrem marés meteorológicas, que representam uma sobre-elevação dos níveis do mar, usualmente relacionados com variáveis meteorológicas, como tempestade e frentes frias.

As marés astronômicas podem ser modeladas pelo SisBaHiA através de suas

constantes harmônicas das marés, esses dados são disponibilizados pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) e são obtidos através de dados medidos na Ilha Fiscal (RJ). Esses dados, porém, não devem ser automaticamente incorporados no modelo, pois se faz necessária uma calibração de suas constantes, essa calibração foi realizada pelo projeto Baías do Brasil (2018) e é representada na tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2: Tabela de constantes harmônicas, calibradas para a fronteira aberta do domínio de modelagem, a partir das constantes da estação Porto do Rio de Janeiro (Ilha Fiscal), e seus respectivos valores de período, amplitude e fase.

Constante	Periodo (s)	Amplitude (m)	Fase (grau)
Sa	31556955.92	0.0723	26.59
Ssa	15778463.36	0.0430	160.98
Mm	2380713.36	0.0211	92.29
MSf	1275721.42	0.0266	200.05
Mf	1180292.34	0.0229	267.78
Q1	96726.08	0.0306	101.56
O1	92949.630	0.1087	130.77
P1	86637.20	0.0213	183.47
K1	86164.09	0.0623	192.85
J1	83154.51	0.0007	192.17
OO1	80301.86	0.0045	353.46
2N2	46459.34	0.0129	224.04
mu2	46338.32	0.0185	196.11
N2	45570.05	0.0426	211.32
nu2	45453.61	0.0054	200.90
M2	44714.16	0.3405	173.57
L2	43889.83	0.0093	200.44
T2	43259.21	0.0060	197.02
S2	43200.00	0.1881	184.14
K2	43082.04	0.0560	176.45
MO3	30190.69	0.0057	174.79
M3	29809.44	0.0067	325.98
MK3	29437.70	0.0038	271.03
MN4	22569.02	0.0247	207.48
M4	22357.08	0.0529	255.98
SN4	22176.69	0.0021	336.46
MS4	21972.02	0.0262	2.52
MNS2	47258.16	0.0053	172.94
M1	89399.69	0.0091	203.71

Fonte: Rosman, 2018

Já as marés meteorológicas são extraídas através de dados médios diários disponibilizadas pelo Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). Os dados podem ser extraídos através do SisBaHiA utilizando a ferramenta “Extraí Informações do HYCOM” para a localização 43,12° O e 23,04° S. A seguir pode-se observar de forma

gráfica acima, as marés astronômicas (Laranja) e meteorológicas (azul), e abaixo, sua soma, a maré resultante.

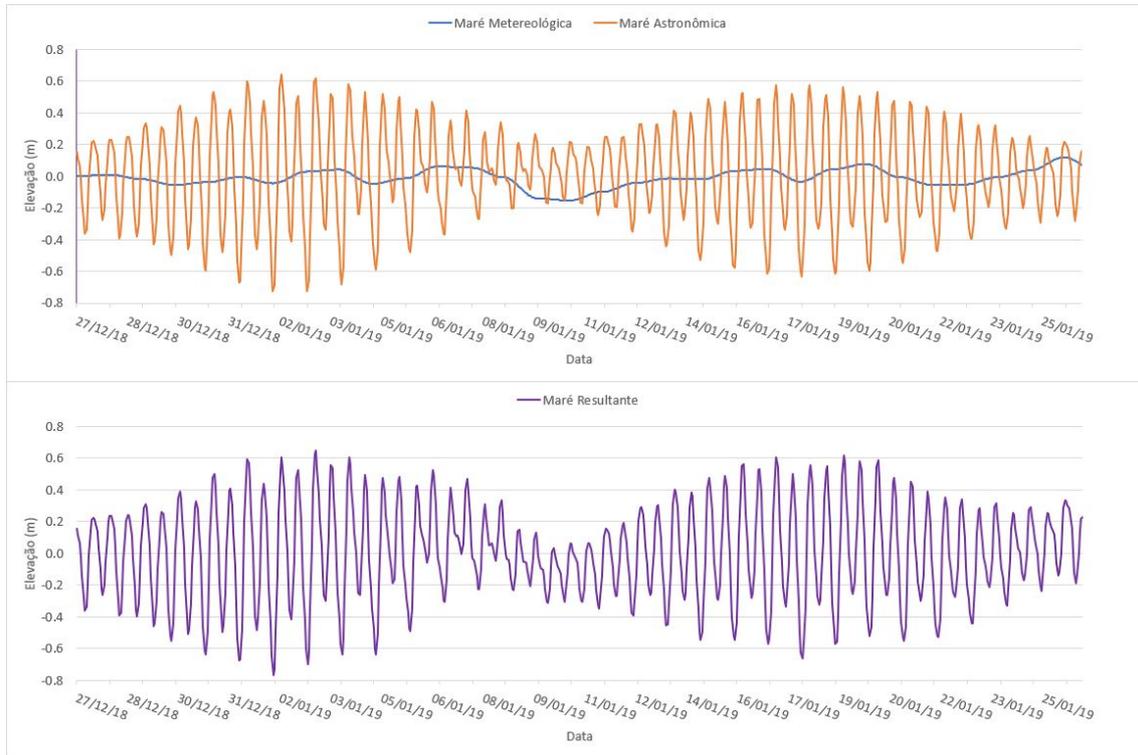


Figura 3.7: Séries temporais de maré meteorológica, astronômica (acima) e total (abaixo) consideradas na fronteira aberta da modelagem hidrodinâmica para o mês de janeiro de 2018, com cotas relativas ao nível médio de maré.

### 3.3.2 Correntes costeiras longitudinais – Nível Médio Diferencial (NVD)

Existem na região oceânica próxima à baía de Guanabara, correntes costeiras longitudinais no sentido Leste-Oeste, essas correntes são fundamentais nas renovações das águas no interior da baía pois criam um padrão de circulação hidrodinâmica onde as águas marítimas adentram a baía preferencialmente por um lado e as águas do interior são removidas preferencialmente por outro.

Para isso foi utilizada uma ferramenta do SisBaHiA denominada Nível Médio Diferencial (NVD). Essa ferramenta consiste em introduzir uma força no sentido longitudinal, através de uma diferença de nível baseada em dados de velocidade extraídos do HYCOM. A figura 3.8 a seguir representa a série temporal utilizada no Gerador de Nível Médio Diferencial (GNMD).

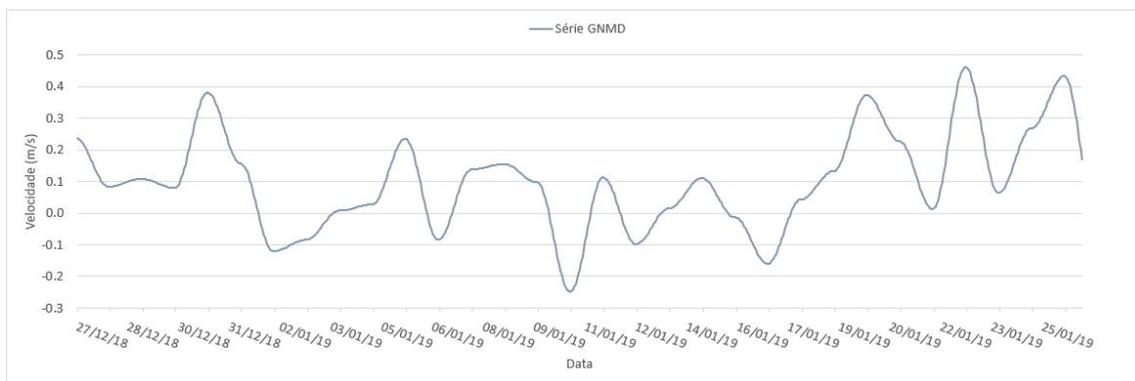


Figura 3.8: Série temporal de velocidades longitudinais utilizada na geração de um nível médio diferencial (NVD) pelo modelo

### 3.3.3 Ventos

A tensão de atrito superficial em decorrência do deslocamento de massas de ar incidentes no domínio de modelagem é calculado pelo SisBaHiA através de uma série histórica de direção e intensidade. No presente estudo foram utilizadas 7 estações de medição de ventos espalhadas na área do espelho d'água da baía, o modelo então interpola os resultados dessas estações em cada nó da malha apresentada anteriormente. A figura 3.9 a seguir apresenta os pontos onde foram introduzidas estações de medição de ventos.



Figura 3.9: Localização das 7 estações de ventos utilizadas no modelo

Os dados referentes à direção de intencidade dos ventos foram extraídos da plataforma do European Community Medium scale Weather Forecast (ECMWF) que apresentam dados de reanálise disponibilizados no site <<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>>.

### 3.3.4 Rios

A última variável ambiental introduzida nesse estudo representa as vazões dos principais afluentes que compõem a zona de drenagem da bacia hidrográfico da baía de Guanabara. No presente estudo foram incorporados os 22 principais afluentes da bacia, são eles: Rio Imboacú, rio Guaxindiba, Rio Caceribú, rio Guapi-Macacu, canal de Magé, rio Roncador, rio Iriri, rio Suruí, rio Estrela, rio da Bota, rio Iguaçu, rio Capivari, rio Pilar, rio Sarapuí, rio São João de Meriti, rio Irajá, rio Dom Carlos, canal do Cunha, cana da Vila do João, canal do Mangue e canal da Penha. Todos esses rios são destacados na figura 3.10 a seguir.



Figura 3.10: Mapa Base da região de interesse com destaque para os rios incorporados no modelo

Para determinar as vazões dos afluentes foi realizada uma busca bibliográfica nos três principais estudos de modelagem ambiental da baía de Guanabara, foram utilizados os valores de Andrade, (2018), Porto & Ponte (2018) além dos valores usados pelo Projeto Baías do Brasil (2018). Esses dados de vazão foram, então, calibrados de acordo com a tabela 3.3 a seguir.

Tabela 3.3: Valores de vazões de verão utilizados por Andrade (2018), Porto & Ponte (2018), pelo projeto Baías do Brasil e valor escolhido pós calibração

Rio	Vazão Andrade(2018) (m/s)	Vazão Porto & Ponte (2018) (m/s)	Vazão Baías do Brasil (m/s)	Vazão Usada (m/s)
Rio Imboacú	7.98	0.81	7.2	7.59
Rio Guaxindiba	1.385	4.66	0.38	0.88
Rio Caceribú	36.88	17.26	66.7	51.79
Rio Guaraí	2.745	0	0	1.37
Rio Guapi-Macacu	51.095	26.83	117.66	84.37
Canal de Magé	2.695	0.44	0.95	1.82
Rio Roncador	9.62	2.45	15.73	12.67
Rio Iriri	3.01	0.42	0.95	1.98
Rio Suruí	7.85	1.8	8.34	8.09
Rio Estrela	14.505	9.36	72.95	72.95
Rio da Bota + Rio Iguacu + Cativari + Pilar	24.88	25.5	81.67	81.67
Rio Sarapuí	8.63	16.5	60.07	60.07
Rio São João de Meriti	8.7	21.24	45.48	27.09
Rio Irajá	1.39	4.9	5.68	5.68
Rio Dom Carlos + Canal do Cunha + Canal da Vila do João	4.95	13.14	16.86	16.86
Canal do Mangue	3.57	6.3	9.66	9.66
Canal da Penha	1.035	0		1.03
Total	190.92	151.61	510.28	445.6

### 3.4 Modelo de Transporte Euleriano Advectivo-Difusivo (MTEAD)

Os Modelos de Transporte Euleriano Advectivo-Difusivo (MTEAD) foram utilizados neste estudo para análises de padrões de qualidade de água. São eles: Salinidade & temperatura, idade da água & taxa de renovação, OD & DBO, nitrogênio

e fósforo. O modelo utiliza equações de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas de produção e consumo de cada componente listado acima. A equação 3.4 a seguir exemplifica um constituinte genérico calculado pelo modelo.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial y} = & -\frac{C}{H}(q_p - q_e) + \frac{(C_{Ia} - C)}{H}q_{Ia} + \Sigma R \\
+ \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left( H \left[ D_{xx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x} + H \left[ D_{xy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial y} + H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right| \frac{\partial C}{\partial t} \right) \\
+ \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left( H \left[ D_{yx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x} + H \left[ D_{yy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial y} + H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \frac{\partial C}{\partial t} \right)
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Onde:

- $C =$  Concentração da substância de interesse;
- $q_P, q_E, q_{Ia} =$  Valores dados de vazões de precipitação, evaporação e infiltração, respectivamente, por unidade de área, e.g.  $[m^3/s/m^2]$ ;
- $D_{ij} =$  Termo que representa os coeficientes de difusão e dispersão horizontal;
- $\lambda_k = \alpha_k \Delta x_k =$  Escalas de largura de filtragem local na dimensão  $x_k$  e  $\alpha_k$  são parâmetros e calibração. O valor de  $\alpha_k$  calibra a quantidade de dispersão e difusão fornecida pelos termos de filtragem;

Além dos constituintes naturais que serão posteriormente utilizadas no Modelo de Qualidade de Água (MQA), o MTEAD é utilizado nos cálculos de Taxa de Renovação (TR) e Idade da Água (IA), que são parâmetros usualmente conectados com as condições ambientais de um sistema hidrodinâmico.

### 3.4.1 Taxa de Renovação (TR)

Na concepção do modelo de taxa de renovação, cria-se um constituinte neutro ou conservativo, isto é, uma substância fictícia que não sofre reações cinéticas e sem velocidade de sedimentação/ressuspensão. No instante  $T_0$ , toda a região de interesse é delimitada como tendo uma concentração dessa “substância” igual a zero, ademais, as regiões além da região de interesse e todas as águas que entram no sistema, sejam pelas fronteiras abertas ou por afluente, são consideradas como tendo uma concentração da substância igual a 100. Conforme o modelo caminha no tempo, a mistura dessas águas formam regiões com a concentração dessa substância tendendo a 100, ou seja, conforme o modelo caminha, as águas do interior da região de interesse possuem uma taxa de renovação crescente e tendendo a 100%. A figura 3.11 a seguir apresenta o instante  $T_0$  do modelo utilizado neste estudo.

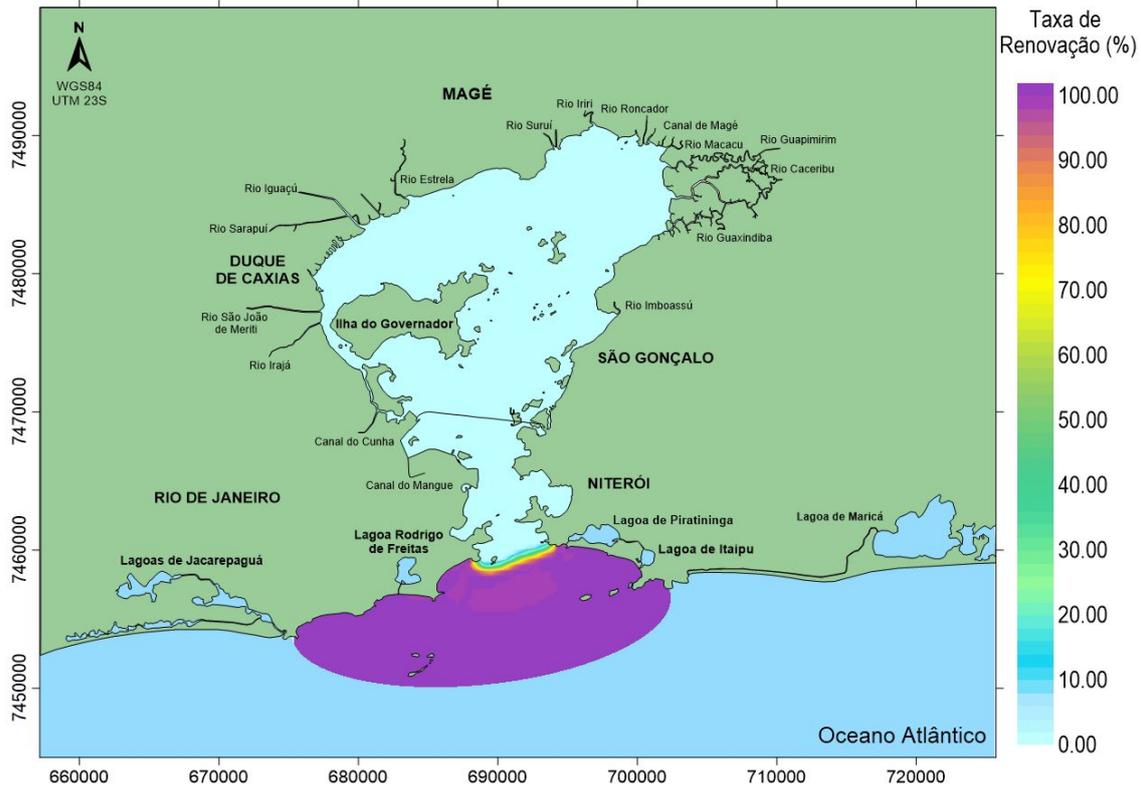


Figura 3.11: Condição inicial imposta ao modelo de transporte Euleriano

### 3.4.2 Idade da Água (IA)

Nos cálculos apresentados pelo modelo, a idade da água é definida a partir do tempo de decaimento de uma substância marcadora passiva fictícia. Para tal, cria-se um substância marcadora com reação cinética de decaimento de primeira ordem, com taxa constante  $K_d > 0$ , sem outros efeitos que alterem sua concentração (sedimentação/ressuspensão). Para representar esse cálculo, introduz-se a um volume de controle, uma concentração dessa substância conhecida  $C_0$ . Sendo a cinética de decaimento também conhecida, a concentração dessa substância no tempo pode ser representada como  $C(t)$  conforme equação 3.5 a seguir, a condição inicial do modelo é delimitada de modo similar ao exposto anteriormente.

$$\frac{dC}{dt} = -K_d C, \text{ com solução analítica de: } C(t) = C_0 \exp(-K_d t) \longrightarrow t = \frac{-\ln(C/C_0)}{K_d} \quad (3.5)$$

### 3.5 Modelo de Qualidade da Água (MQA)

Os modelos para qualidade da água utilizados neste estudo seguem as equações genéricas exemplificadas pelo MTEAD. Os constituintes do MQA podem ser classificados de acordo com o seu comportamento (ativo ou passivo) e quanto à sua reatividade com o meio (conservativo ou não-conservativo), conforme explanado abaixo (Referência Técnica do SisBaHiA, 2020).

- Quanto ao comportamento:
  - Ativo: quando os gradientes da grandeza geram forças relevantes para o movimento das águas.
  - Passivo: quando os gradientes da grandeza não geram forças relevantes para o movimento das águas.
- Quanto à reatividade com o meio:
  - Reativo ou não-conservativo: quando a substância sofre reações cinéticas de produção ou consumo.
  - Não-reativo ou conservativo: quando a substância não sofre reações cinéticas de produção ou consumo.

O software possui até 11 constituintes pré-definidos, dentre estes, somente a salinidade apresentou comportamento ativo, visto que o gradiente de temperatura no sistema não foi suficiente para alterar os padrões de velocidades. A seguir será apresentada uma tabela com os 9 constituintes utilizados neste estudo, clorofila e zooplâncton não foram utilizados pela ausência de dados medidos in-situ para que seja possível realizar a calibração do modelo.

Tabela 3.4: Constituintes, unidades e símbolos utilizados pelo MQA

Parâmetro	Unidade	Símbolo
Salinidade ups S	ups	S
Temperatura	°C	T
Oxigênio Dissolvido	mgO/l	C6
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mgO/l	C5
Amônia	mgNA/l	C1
Nitrato	mgNI/l	C2
Nitrogênio Orgânico	mgNO/l	C7
Fósforo Inorgânico	mgP/l	C3
Fósforo Orgânico	mgPO/l	C8

Fonte: Adaptado de Rosman (2020)

### 3.5.1 Salinidade & Temperatura

O modelo de Salinidade e temperatura foi rodado previamente afim de se obter os padrões de salinidade iniciais, visto que na baía de Guanabara, devido à interação entre águas salinas, salobras e doces, a salinidade influencia na densidade do fluido, variando de acordo com sua concentração, isto é, possui comportamento ativo. Para tal, o modelo foi rodado previamente por um período suficientemente grande para que se atinja o equilíbrio das concentrações. A figura 3.12 a seguir apresenta a condição inicial de salinidade utilizada pelo MH.

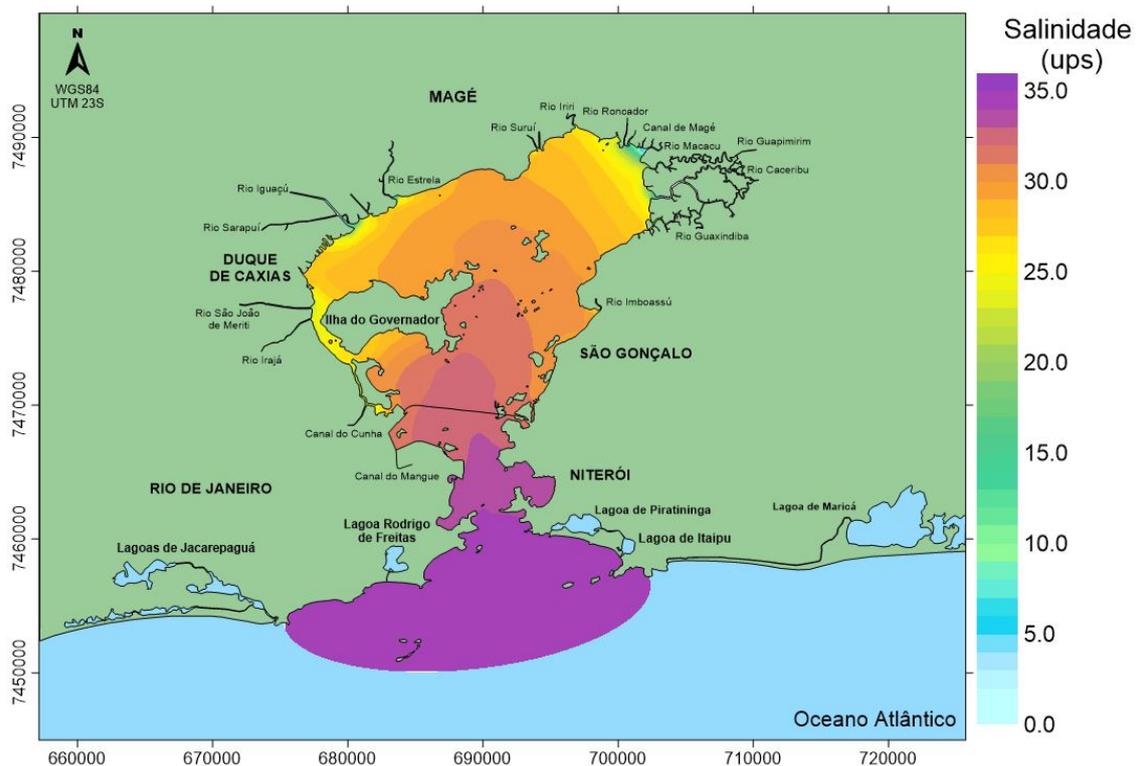


Figura 3.12: Condição inicial de Salinidade utilizada no Modelo Hidrodinâmico

Após a delimitação da condição inicial de salinidade, foi desenvolvido outro modelo hidrodinâmico, porém, desta vez, com variação baroclínica do meio de acordo com a salinidade, rodando de forma acoplada ao modelo hidrodinâmico.

### 3.5.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) & Oxigênio Dissolvido (OD)

Devido a íntima relação entre esses componentes, as concentrações de demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido são calculadas conjuntamente pelo Sis-BaHiA. Suas equações governantes estão representadas abaixo, assim como os principais parâmetros de calibração utilizados para o cálculo. (Rosman, 2020)

- Equação cinética para modelo de DBO

$$\begin{aligned} \Sigma R_5 = & \overbrace{-k_D C_5}^{\text{decomp.}} - \overbrace{\frac{v_{s3}(1 - f_{D5})}{H} C_5}^{\text{sedimentação}} + \overbrace{r_{oc} r_{ca} (1 - E_2) k_{gz} C_9}^{\text{detritos de herbivoria}} \\ & + \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_{ea} C_9}_{\text{morte de fitoplânctons}} + \underbrace{r_{oc} k_{ez} C_4}_{\text{morte de zooplânctons}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

- Equação cinética para modelo de OD

$$\begin{aligned} \Sigma R_6 = & \overbrace{k_a (O_s - C_6)}^{\text{reaeração}} - \overbrace{k_D C_5}^{\text{decomp.}} - \overbrace{r_{on} k_{12} C_1}^{\text{nitrificação}} + \overbrace{r_{oc} r_{ca} k_g C_9}^{\text{fotossíntese}} \\ & - \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_{ra} C_9}_{\text{respiração de fitoplâncton}} - \underbrace{r_{oc} k_{rz} C_4}_{\text{respiração de zooplâncton}} - \underbrace{\frac{SOD}{H}}_{\text{sedimento}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Onde:

- $k_d$  = Taxa de decomposição da DBO
- $k_a$  = Coeficiente de reaeração
- $O_s$  = Concentração de saturação do oxigênio
- $r_{on}$  = Razão de oxigênio consumido por unidade de massa de nitrogênio oxidado no processo total de nitrificação
- $k_n$  = Taxa de nitrificação
- $k_g$  = Taxa de crescimento do fitoplâncton
- $k_{ra}$  = Taxa de perdas de fitoplâncton devido à respiração e excreção
- $r_{ca}$  = Razão entre carbono e clorofila no fitoplâncton
- $E_z$  = Eficiência de predação do zooplâncton sobre algas
- $k_{gz}$  = Taxa de predação do zooplâncton sobre algas
- $r_{oc}$  = Quantidade de oxigênio consumido na decomposição de um grama de carbono orgânico
- $V_{s3}$  = Velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas
- $f_{D5}$  = Fração da DBO dissolvida
- $H$  = Altura da coluna d'água

### 3.5.3 Ciclo do Nitrogênio

O Nitrogênio pode ser encontrado naturalmente sobre diversas formas, o Sis-BaHiA utiliza modelos considerando a amônia (NH<sub>4</sub>), nitrito (NO<sub>2</sub>), nitrato (NO<sub>3</sub>), nitrogênio componente de fito e zooplânctons, nitrogênio orgânico dissolvido e particulado. Os processos cinéticos modelados para cada equação são:

- Para o nitrogênio orgânico: decaimento, mineralização e deposição.

- Para o nitrato: nitrificação, crescimento e desnitrificação.
- Para a biomassa de fitoplâncton: crescimento, decaimento e sedimentação.
- Para a amônia: mineralização, decaimento, crescimento e nitrificação.

Os processos cinéticos referentes ao ciclo do nitrogênio estão representados nas equações abaixo (Rosman, 2020):

- Nitrogênio Orgânico

$$\begin{aligned}
\Sigma R_7 = & - \overbrace{k_{71} C_7}^{\text{amonificação}} - \overbrace{\frac{V_{S3}(1-f_7)}{H} C_7}^{\text{sedimentação}} + \overbrace{r_{na}(1-E_z)k_{gz} C_9 C_4}^{\text{detritos de predação}} + \overbrace{r_{na} k_{ra} f_{on} C_9}^{\text{excr. de fitoplâncton}} \\
& + \underbrace{\frac{r_{na}}{r_{ca}} k_{rz} f_{on} C_4}_{\text{excr. de zooplâncton}} + \underbrace{\frac{r_{na}}{k_{ea}} f_{on} C_9}_{\text{morte de fitoplâncton}} + \underbrace{\frac{r_{na}}{r_{ca}} k_{ez} f_{on} C_4}_{\text{morte de zooplâncton}}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

- Amônia ou Nitrogênio Amoniacal

$$\begin{aligned}
\Sigma R_1 = & \overbrace{r_{na} k_{ra} (1 - f_{on} C_9)}^{\text{resp. de fitoplâncton}} + \overbrace{\frac{r_{na}}{r_{ca}} k_{rz} (1 - f_{on} C_4)}^{\text{resp. de zooplâncton}} + \overbrace{r_{na} k_{ea} (1 - f_{on} C_9)}^{\text{morte de fitoplâncton}} + \\
& \underbrace{\frac{r_{na}}{r_{ca}} k_{ez} f_{on} C_4}_{\text{morte de zooplâncton}} - \underbrace{\frac{C_1}{(k_{am} + C_1)} r_{na} f_{uN} k_g C_9}_{\text{crescimento de fitoplâncton}} + \underbrace{k_{71} C_7}_{\text{amonificação}} - \underbrace{k_{12} C_1}_{\text{nitrificação}}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

- Nitrato

$$\Sigma R_2 = \overbrace{r_{12} C_1}^{\text{nitrificação}} - \overbrace{k_{2D} C_2}^{\text{desnitrificação}} - \overbrace{\left(1 - \frac{C_1}{(k_{am} + C_1)}\right) r_{na} f_{uN} k_g C_9}^{\text{crescimento de fitoplânctons}} \tag{3.10}$$

Onde:

$r_{ca}$	=	Razão entre carbono e clorofila ( $mgC/\mu gChla$ )
$r_{na}$	=	Razão entre nitrogênio e clorofila ( $mgN/\mu gChla$ )
$E_z$	=	Eficiência de predação do zooplâncton sobre algas
$k_{gz}$	=	Taxa de predação do zooplâncton sobre algas ( $m^3/gCdia$ )
$k_{71}$	=	Taxa de amonificação do nitrogênio orgânico (/dia)
$V_{S3}$	=	Velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas (m/dia)
$f_7$	=	Fração de nitrogênio orgânico dissolvido na coluna d'água
$k_{ra}$	=	Taxa de perdas devido à respiração e excreção
$f_{on}$	=	Fração da respiração e excreção do fitoplâncton e do zooplâncton reciclada para nitrogênio orgânico
$k_g$	=	Taxa de crescimento do fitoplâncton
$k_{12}$	=	Taxa de nitrificação
$k_{rz}$	=	Taxa de perdas do zooplâncton por respiração e excreção
$k_{am}$	=	Constante de meia saturação para preferência de amônia
$k_{2D}$	=	Taxa de desnitrificação
$k_{NO_3}$	=	Constante de meia saturação para desnitrificação
$k_{ez}$	=	Taxa de mortalidade não predatória do zooplâncton
$k_{ea}$	=	Taxa de mortalidade não predatória do fitoplâncton
$f_{uN}$	=	Função de limitação do consumo de nitrogênio
$H$	=	Altura da coluna de água

### 3.5.4 Ciclo do Fósforo

Analogamente ao nitrogênio, o fósforo possui duas principais formas de ser mensurado em ambientes aquáticos, como fosfato reativo ou fósforo total. O fosfato reativo, ou ortofostato, é a principal forma de fosfato absorvido pelo fitoplâncton. O fósforo inorgânico utilizado no modelo refere-se ao fósforo reativo, enquanto a parcela orgânica do fósforo é determinada pela diferença entre fosfato total e fosfato reativo, composta principalmente por fosfato orgânico dissolvido e fosfato particulado. A seguir são apresentadas as principais equações cinéticas referentes ao ciclo do fósforo. (Rosman, 2020)

- Fósforo Orgânico

$$\begin{aligned}
 \Sigma R_8 = & \underbrace{r_{pa} K_{ra} f_{op} C_9}_{\text{excr. de algas}} + \underbrace{\frac{r_{pa}}{r_{ca}} K_{rz} f_{op} C_4}_{\text{excr. de zooplânctons}} + \underbrace{r_{pa} K_{ea} f_{op} C_9}_{\text{morte de algas}} + \underbrace{\frac{r_{pa}}{r_{ca}} K_{ez} f_{op} C_4}_{\text{morte de zooplânctons}} \\
 & + \underbrace{k_{pa}(1 - E_z) K_{gz} C_9 C_4}_{\text{detritos de predação}} - \underbrace{K_{83} C_8}_{\text{mineralização}} - \underbrace{\frac{V_{S3}(1 - f_{D8})}{H} C_8}_{\text{sedimentação}}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

- Fósforo Inorgânico

$$\begin{aligned}
 \Sigma R_3 = & \overbrace{r_{pa}k_{ra}(1-f_{op})C_9}^{\text{resp. de fitoplâncton}} + \overbrace{\frac{r_{pa}}{r_{ca}}k_{rz}(1-f_{op})C_4}^{\text{resp. de zooplânctons}} + \overbrace{r_{pa}k_{ea}(1-f_{op})C_9}^{\text{morte de fitoplânctons}} \\
 & + \underbrace{\frac{r_{pa}}{r_{ca}}k_{ez}(1-f_{op})C_4}_{\text{morte de zooplânctons}} - \underbrace{r_{pa}f_{uP}k_gC_9}_{\text{cresc. de fitoplânctons}} + \underbrace{K_{83}C_8}_{\text{mineralização}} - \underbrace{\frac{\nu_{fr}}{H}C_3}_{\text{precipitação}}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Onde:

- $r_{ca}$  = Razão entre carbono e clorofila no fitoplâncton
- $r_{pa}$  = Razão entre fósforo e clorofila no fitoplâncton
- $E_Z$  = Eficiência de herbivoria
- $k_{gz}$  = Taxa de herbivoria
- $k_{83}$  = Taxa de mineralização do fosfato não-reativo
- $\nu_{s3}$  = Velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas
- $f_{D8}$  = Fração de fósforo orgânico dissolvido na coluna d'água
- $k_{ra}$  = Taxa de perdas de fitoplâncton devido à respiração e excreção
- $f_{op}$  = Fração da respiração e excreção do fitoplâncton e do zooplâncton reciclada para fosfato não-reativo
- $k_g$  = Taxa de crescimento do fitoplâncton
- $k_{rz}$  = Taxa de perdas do zooplâncton por respiração e excreção
- $V_{fr}$  = Velocidade de precipitação do fosfato reativo
- $f_{uP}$  = Função de limitação do consumo do fósforo
- $H$  = Altura da coluna de água

### 3.5.5 Condições de Contorno

Os dados ambientais utilizados foram extraídos das estações de monitoramento da qualidade da água de rios da bacia hidrográfica da baía de Guanabara. Foram coletados dados referentes aos meses de dezembro e janeiro de 2014 até 2018, esses dados podem ser encontrados em :<<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Monitoramento/Qualidadedaagua/aguasInteriores/Qualificaodeguas/RHV-BaiadeGuanabara1/index.htm&lang=#/ConsultaosDados>>. A figura 3.13 a seguir possui a localização das estações de monitoramento utilizadas.

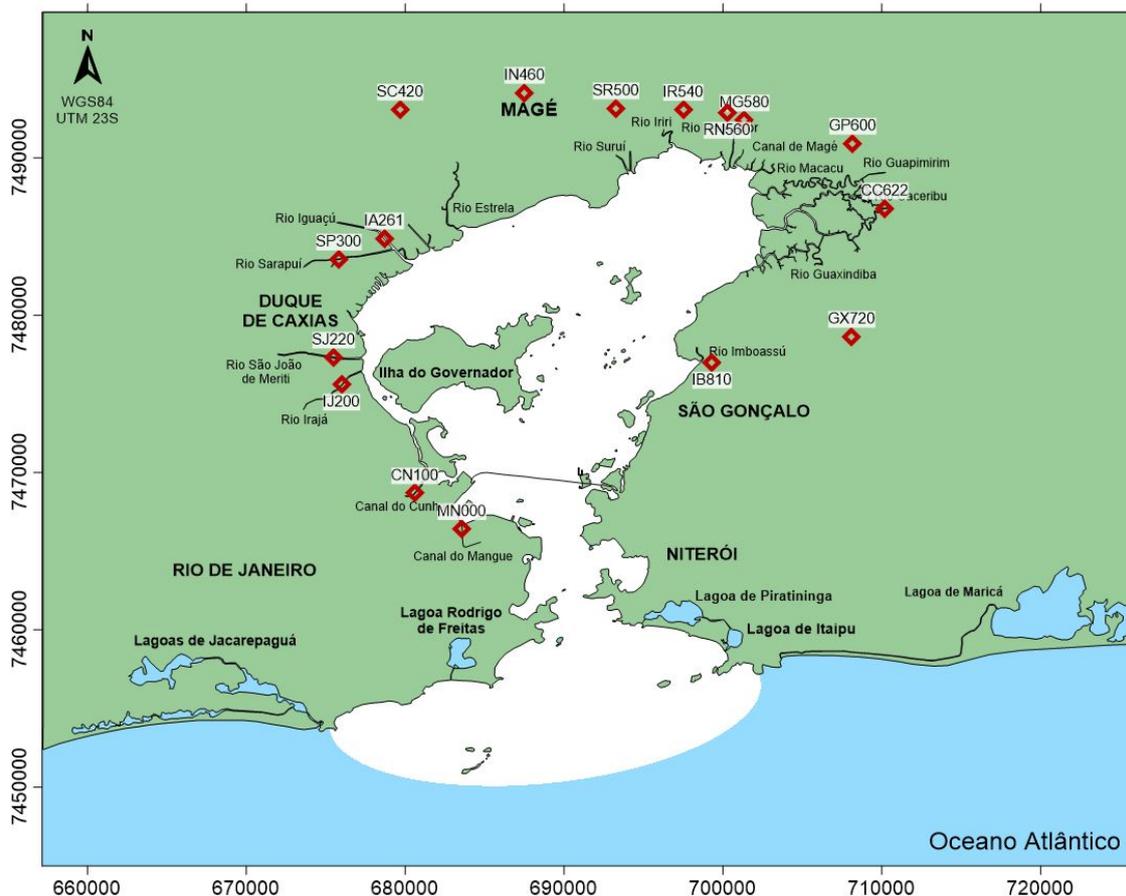


Figura 3.13: Localização e nomenclatura adotada das estações de monitoramento da qualidade da água pelo INEA

Observa-se que algumas estações se encontram à uma distância considerável do início da malha utilizada pelo modelo, sofrendo influências de fontes a jusante da estação, portanto, os valores definidos pelo INEA foram passíveis de alterações posteriores durante o processo de calibração (os dados foram transportados para o limite do modelo, sendo realizado as calibrações necessárias de seus valores). Ademais, os dados disponíveis para fósforo e nitrogênio são mensurados apenas como totais para fósforo e nitrato para nitrogênio, sendo utilizado uma proporção para fósforo de 80% P-orgânico e 20% P-inorgânico; e para nitrogênio de 60% N-orgânico, 30% N-Amônia e 10% N-Nitrato (Jaffe, 1992; Von Sperling 2005). A tabela 3.5 a seguir possui os valores das medianas dos dados disponíveis extraídos para cada estação.

Tabela 3.5: Valores mediados obtidos através dos dados de medições do Inea, nos anos de 2014 a 2018, para cada fronteira de entrada de rio.

Rio	Estação	DBO (mg/l)	Fósforo total (mg/l)	Nitrato (mg/l)	OD (mg/l)	Temp. da água (°C)
Rio Imboaçu	IB810	26	1.37	0.015	0	24.5
Rio Guaxindiba	GX720	22	2.015	0.02	0.7	24
Rio Caceribú	CC622	10	0.47	0.06	1.6	26
Rio Guaraí						
Rio Guapi- Macacu	GP600	8	0.1	0.12	4.6	26
Canal de Magé	MG580	36	1.765	0.01	0	25
Rio Roncador	RN560	2.4	0.07	0.35	6.2	24
Rio Iriri	IR540	8	0.3	0.04	1.4	24
Rio Suruí	SR500	4	0.12	0.24	2.2	24
Rio Estrela	IN460	4	0.15	0.54	4	24
	SC420	12	0.16	0.04	2	24
Rio da Bota + Rio Iguaçu + Capivari + Pilar	IA261	8	0.42	0.66	5.2	24
Rio Sarapuú	SP300	26	2.1	0.015	0	26.5
Rio São João de Meriti	SJ220	32	1.855	0.01	0	26
Rio Irajá	IJ220	32	1.55	0.02	0	26
Rio Dom Carlos + Canal do Cu- nha + Canal da Vila do João	CN100	32	1.5	0.01	0	25
Canal do Man- gue	MN000	32	1.27	0.01	0	25

Para além do exposto anteriormente, vale destacar que houve dificuldade de se obter dados de vazão e qualidade das águas dos afluentes da região leste da baía, principalmente nos limites do município de São Gonçalo, que, notoriamente possui condições bastante precárias de qualidade do sistema de tratamento de efluentes, podendo influenciar negativamente na qualidade da água do interior da baía de Guanabara. Essa dificuldade decorreu da ausência de dados disponibilizados pelo INEA e na bibliografia em geral, para esses, e alguns outros semelhantes em regiões como a Ilha do Governador e Praia de Mauá, foram considerado emissões do tipo

fonte com concentração obtida por meio de calibração em pontos apresentados posteriormente:



Figura 3.14: Localização de algumas das fontes inseridas

Fonte: Google Earth Pro. Imagem: LandSat / Copernicus Julho de 2020

## 3.6 Cenários de Modelagem

### 3.6.1 Modelo hidrodinâmico

Para o modelo hidrodinâmico, foi escolhido um cenário composto por um período lunar com início e fim em pontos de preamar de quadratura, onde as velocidades das correntes no interior da baía são mínimas, esses pontos foram escolhidos para evitar que ao iniciar o modelo, as velocidades encontradas sofram grandes alterações, o que pode levar a falhas nos cálculos. As datas precisas utilizadas foram as seguintes:

- Início: 26 de dezembro de 2017 às 23:00 horas
- Fim: 26 de janeiro de 2018 às 13:00 horas

### 3.6.2 Modelo de Qualidade da Água

Para os cenários de qualidade de tratamento, foram escolhidos as principais sub-bacias responsáveis pelo aporte de matéria orgânica, são elas: as sub-bacias pertencentes a parte oeste da baía em grande parte representada pela zona Norte e Central do Rio de Janeiro e em menor parte os municípios de Duque de Caxias, São João de Meriti e Nilópolis (cenário I); as sub-bacias da região norte-noroeste da baía representada pelos municípios da baixada fluminense (cenário II); e por fim a região Leste em grande parte representada pelo município de São Gonçalo (cenário III). A figura 3.15 a seguir apresenta as sub-bacias utilizadas em cada cenário, o último cenário representa a soma de todas as sub-bacias apresentadas anteriormente (cenário IV = I + II + III).

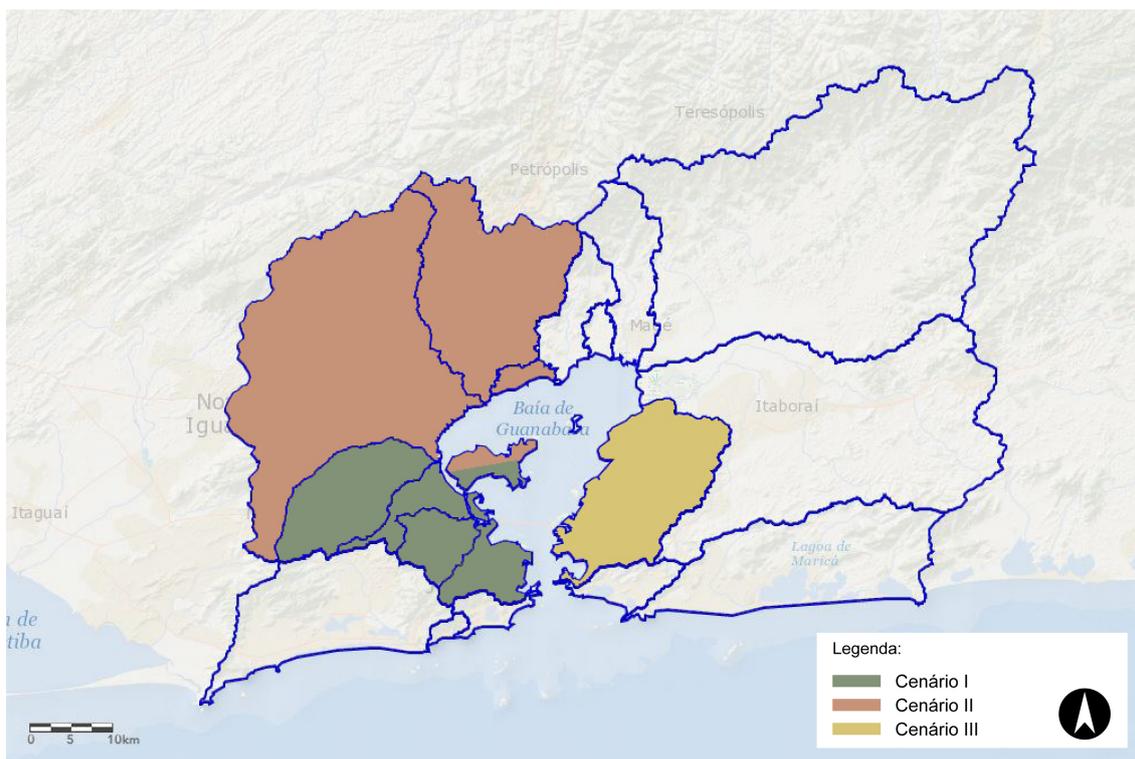


Figura 3.15: Cenários de modelagem utilizados no presente estudo, o cenário IV representará a soma dos três representados na figura

A fim de se determinar as faixas de redução de poluentes relacionados com o esgotamento sanitário nos rios foi feito um levantamento bibliográfico das faixas de remoção de poluentes de acordo com o tipo de tratamento utilizado. Von Sperling 2005 apresenta uma comparação das faixas esperadas de remoção conforme condensado na tabela 3.6 abaixo.

Tabela 3.6: Percentual de remoção de poluentes de acordo com sistema de tratamento utilizado

Constituinte	FS+FA <sup>1</sup>	LF <sup>2</sup>	LAN+LF <sup>3</sup>	LA <sup>4</sup>	UASB <sup>5</sup>	UASB+PÓS <sup>6</sup>
DBO (%)	80-85	75-85	75-85	85-97	60-75	75-93
NT (%)	<60	<60	<60	<60	<60	30-65
PT (%)	<35	<35	<35	<35	<35	35-85

- Onde:
- (1) Fossa séptica seguida de filtro anaeróbio
  - (2) Lagoas facultativas
  - (3) Lagoas anaeróbias seguidas de lagoas facultativas
  - (4) Lodo Ativado
  - (5) Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB)
  - (6) UASB + Pós-tratamento

Fonte: Adaptado de Von Sperling 2005

Para o presente estudo será utilizado um processo típico de tratamento via UASB + Pós-tratamento para remoção de nutrientes, onde as respectivas taxas de remoção para DBO, nitrogênio e fósforo serão: 90%, 60% e 70%. Além disso, para cada cenário a variação da cobertura de esgoto tratado será, entre 30% e 80% de cobertura, não será considerado 100% pois deve-se considerar o percentual de poluição que incide sobre o estuário oriunda de indústrias e outros setores não incluídos nesta análise, além da pequena rede de tratamento de efluentes preexistente na região. A tabela 3.7 abaixo resume os cenários utilizados.

Tabela 3.7: Cenários utilizados

Cenário	Percentual de Cobertura		
	30%	60%	80%
Cenário I	Ia	Ib	Ic
Cenário II	IIa	IIb	IIc
Cenário III	IIIa	IIIb	IIIc
Cenário IV (I+II+III)	IVa	IVb	IVc

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

Neste capítulo apresenta-se os resultados das simulações computacionais realizadas, assim como a interpretação e discussão dos mesmos. Serão apresentados, em ordem, os resultados referentes ao modelo hidrodinâmico, modelo de taxa de renovação e idade da água, salinidade e por fim o modelo de qualidade da água com os cenários abordados.

### 4.1 Modelo Hidrodinâmico

#### 4.1.1 Calibração e Validação

O modelo hidrodinâmico foi calibrado utilizando-se os valores reportados pelo modelo desenvolvido por Rosman et al., 2018. Para tal foram extraídos dos modelos valores máximos e mínimos de elevação da coluna d'água e módulo da velocidade em estações presentes no modelo por ele desenvolvido. A figura 4.1 a seguir apresenta a localização das estações utilizadas na comparação.



Figura 4.1: Estações utilizadas por Rosman et al., 2018 durante validação dos resultados do modelo hidrodinâmico

Na tabela 4.1 a seguir é possível verificar que os valores reportados por Rosman et. al. (2018) e pelo presente estudo encontram-se extremamente próximos, o que valida os resultados hidrodinâmicos reportados a seguir.

Tabela 4.1: Comparação entre resultados hidrodinâmicos de Rosman et al., 2018 e o presente estudo

Estação	Rosman et al. 2018				Presente estudo			
	Elevação		Mód. Velocidade		Elevação		Mód. Velocidade	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Canal BG	-0.12	1.16	1.55E-03	1.12	-0.11	1.34	2.09E-03	1.22
Canal do Fundão	-0.18	1.24	2.51E-04	0.12	-0.16	1.48	4.79E-04	0.14
Eixo Pivô	-0.12	1.14	2.29E-04	0.22	-0.12	1.31	2.19E-03	0.19
Enseada Botafogo	-0.13	1.17	1.30E-04	0.02	-0.12	1.34	6.76E-05	0.07
Entrada Baía Exterior	-0.13	1.15	1.61E-03	0.50	-0.12	1.33	1.09E-03	0.58
Fronteira Aberta	-0.11	1.13	4.32E-04	0.22	-0.12	1.30	3.03E-04	0.21
Galeão	-0.20	1.29	1.67E-03	0.22	-0.19	1.53	1.53E-03	0.23
Ilha Tavares	-0.18	1.25	5.87E-04	0.16	-0.16	1.48	1.03E-03	0.20
Mar Leste	-0.11	1.13	6.82E-04	0.23	-0.12	1.30	7.22E-04	0.12
Mar Oeste	-0.12	1.13	3.76E-04	0.11	-0.12	1.30	2.05E-04	0.10
Marina da Glória	-0.13	1.18	5.90E-06	0.01	-0.12	1.36	3.19E-05	0.02
Nordeste BG	-0.24	1.31	9.38E-05	0.15	-0.21	1.55	5.01E-04	0.16
Noroeste BG	-0.26	1.32	1.44E-04	0.09	-0.22	1.56	2.42E-04	0.09
Norte BG	-0.22	1.30	9.23E-05	0.20	-0.20	1.54	1.94E-03	0.21
Paquetá Leste	-0.22	1.29	6.50E-04	0.42	-0.20	1.53	2.50E-03	0.45
Paquetá Oeste	-0.21	1.28	2.16E-03	0.46	-0.18	1.52	3.64E-03	0.50
Ponte Rio-Niterói	-0.15	1.21	2.57E-03	0.58	-0.14	1.42	2.93E-03	0.65
Porto do Rio de Janeiro	-0.15	1.21	8.35E-05	0.04	-0.15	1.44	4.70E-04	0.05
Praia de São Francisco	-0.13	1.18	1.95E-04	0.04	-0.13	1.37	1.54E-04	0.08

## 4.1.2 Resultados

Os resultados hidrodinâmicos apresentados a seguir são referentes ao modelo hidrodinâmico acoplado ao modelo de transporte de salinidade, devido as alterações nos padrões barotrópicos referentes ao gradiente da concentração deste constituinte no sistema. Para exemplificar os resultados obtidos foram escolhidos tempos característicos de um ciclo de maré, sendo eles: Preamar, baixa-mar e pontos intermediários denominados meia maré vazante e meia maré enchente, que representam os valores máximos das velocidades das correntes observadas no local tanto em marés de sizígia quanto para marés de quadratura.

## Maré de Sizígia

- Preamar

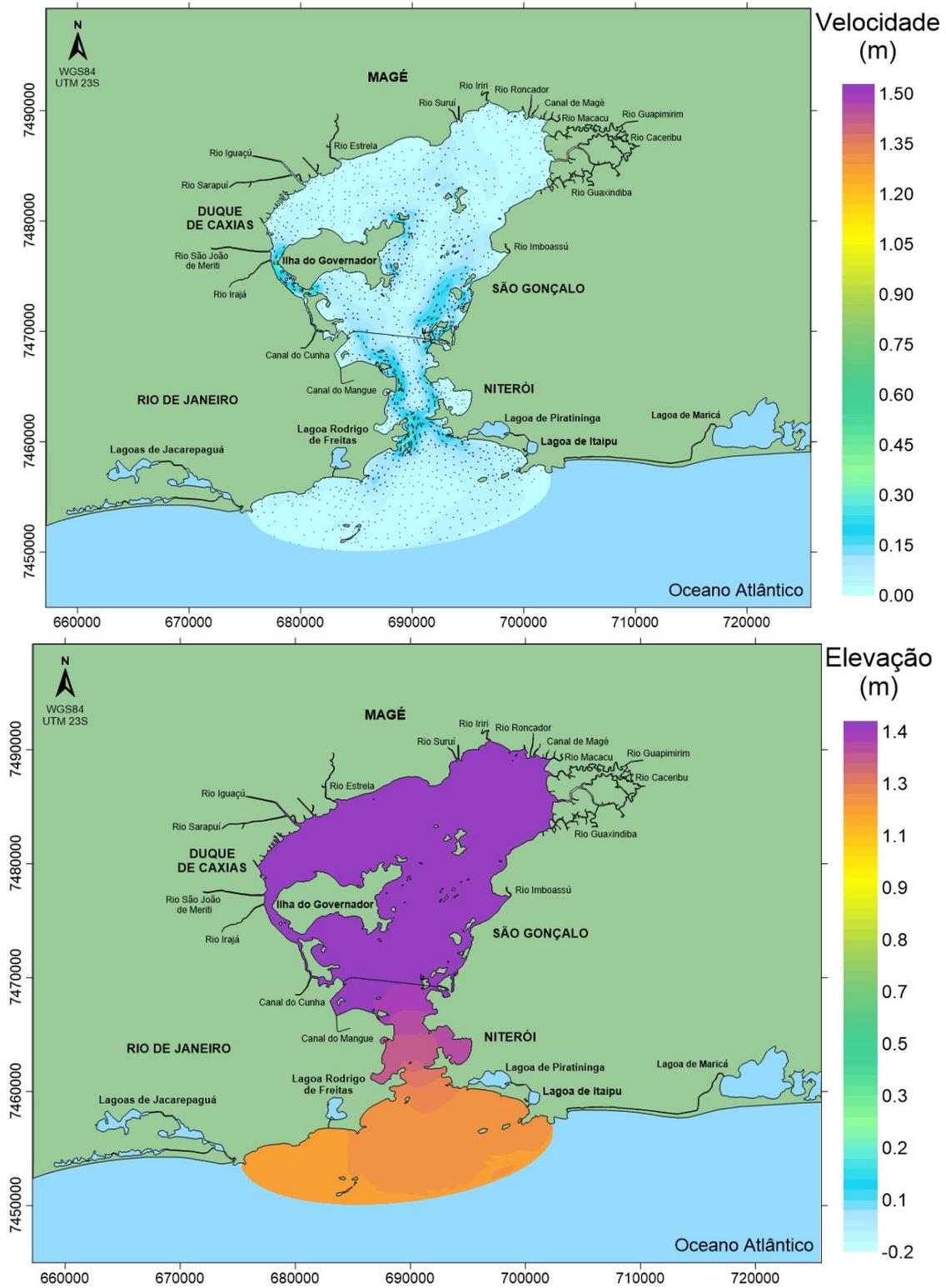


Figura 4.2: Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante uma Preamar de Sizígia na baía de Guanabara

• Baixa-mar

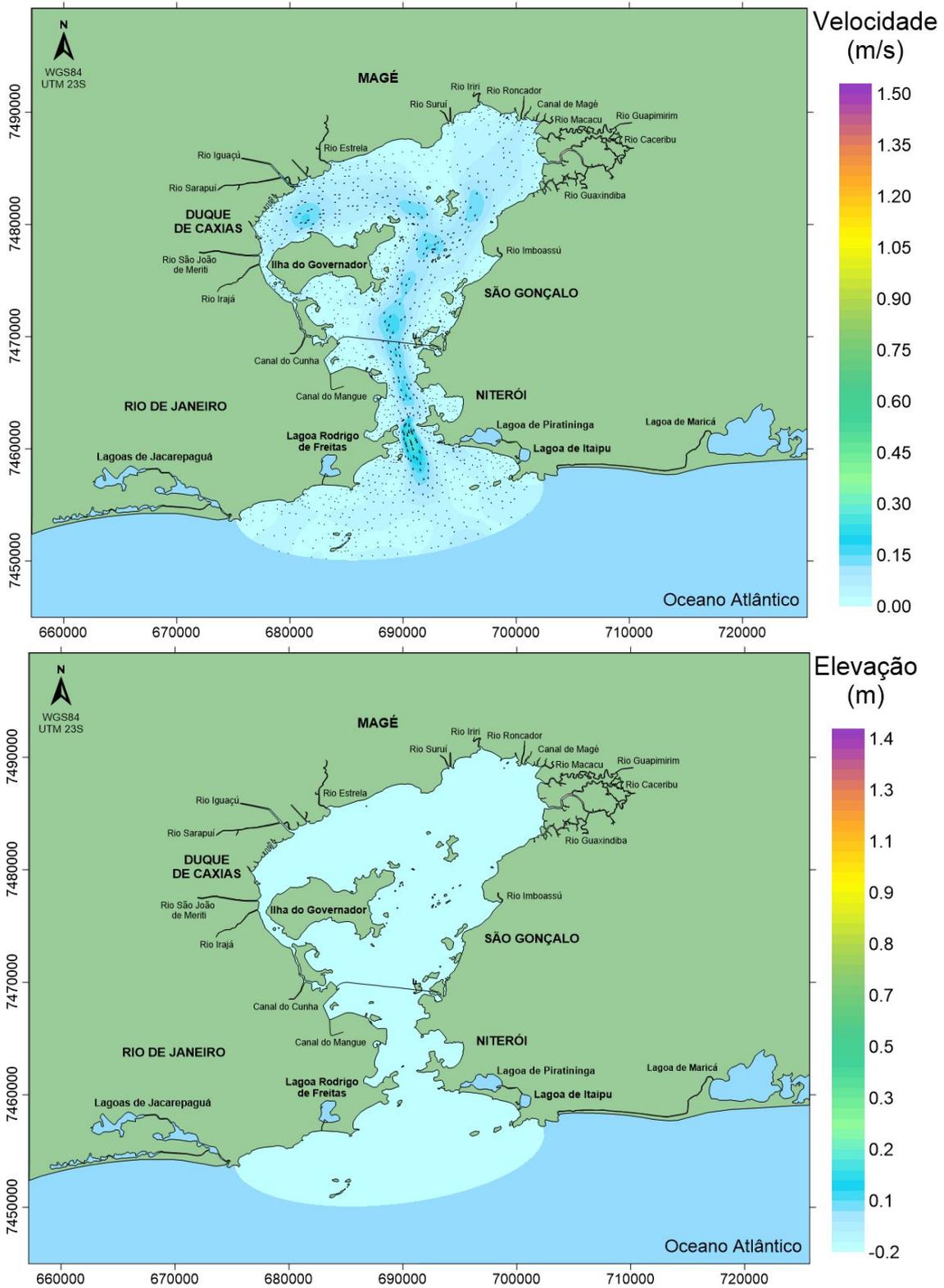


Figura 4.3: Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante uma Baixa-mar de Sigígia na baía de Guanabara

- Meia Maré Enchente (MME)

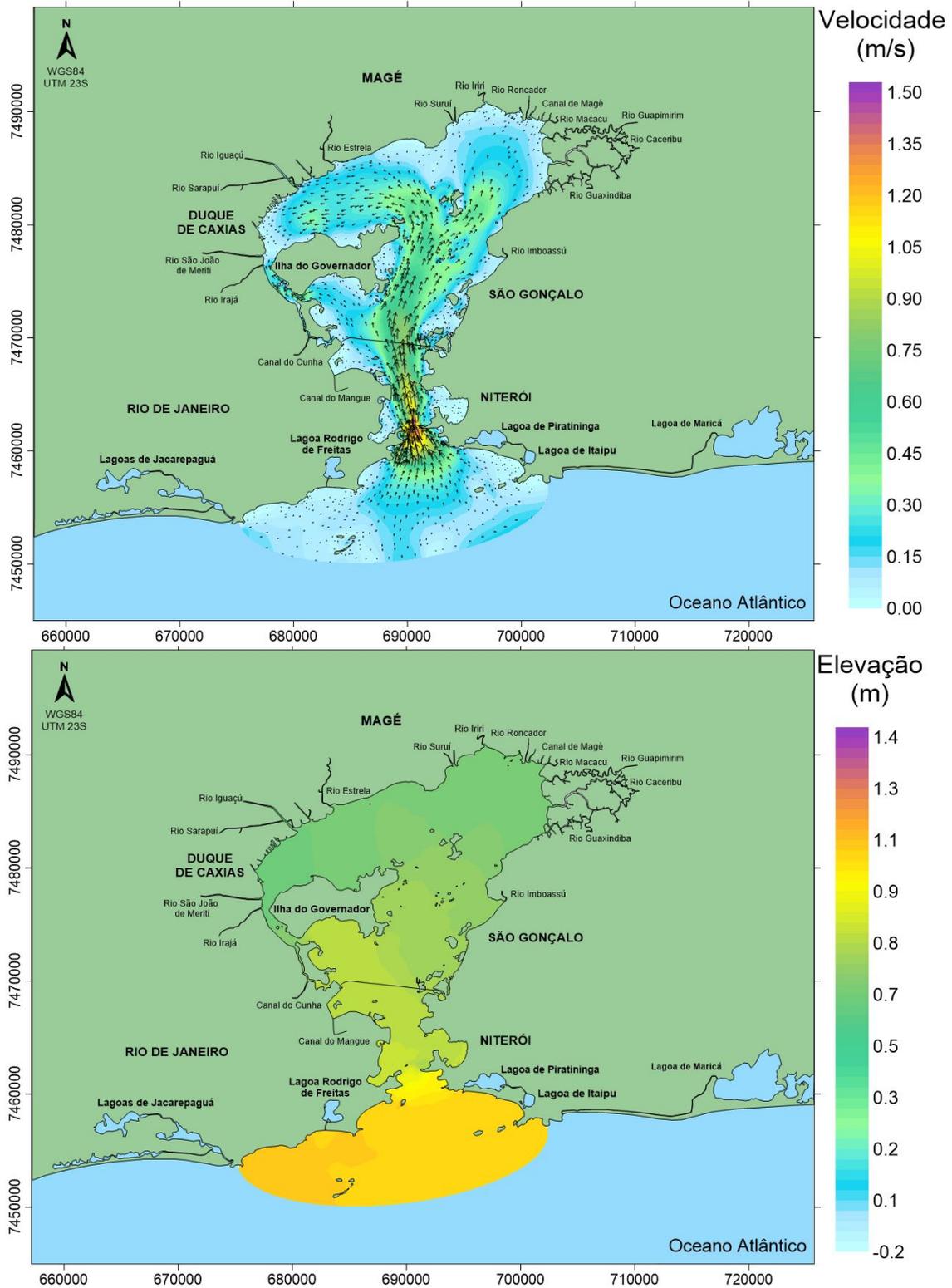


Figura 4.4: Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante a MME de Sigígia na baía de Guanabara

• Meia Maré Vazante (MMV)

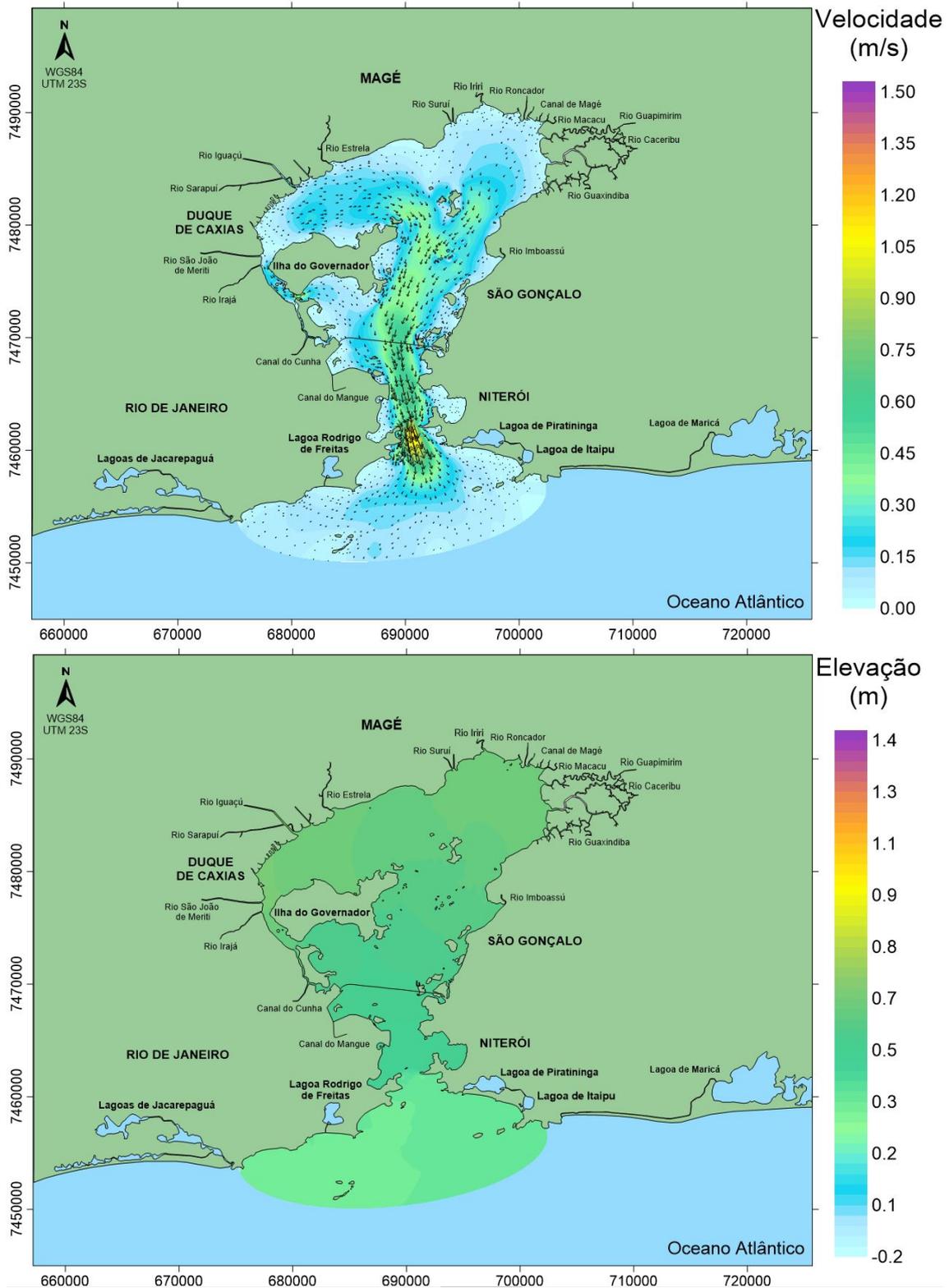


Figura 4.5: Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante a MMV de Quadratura na baía de Guanabara

## Maré de Quadratura

- Preamar

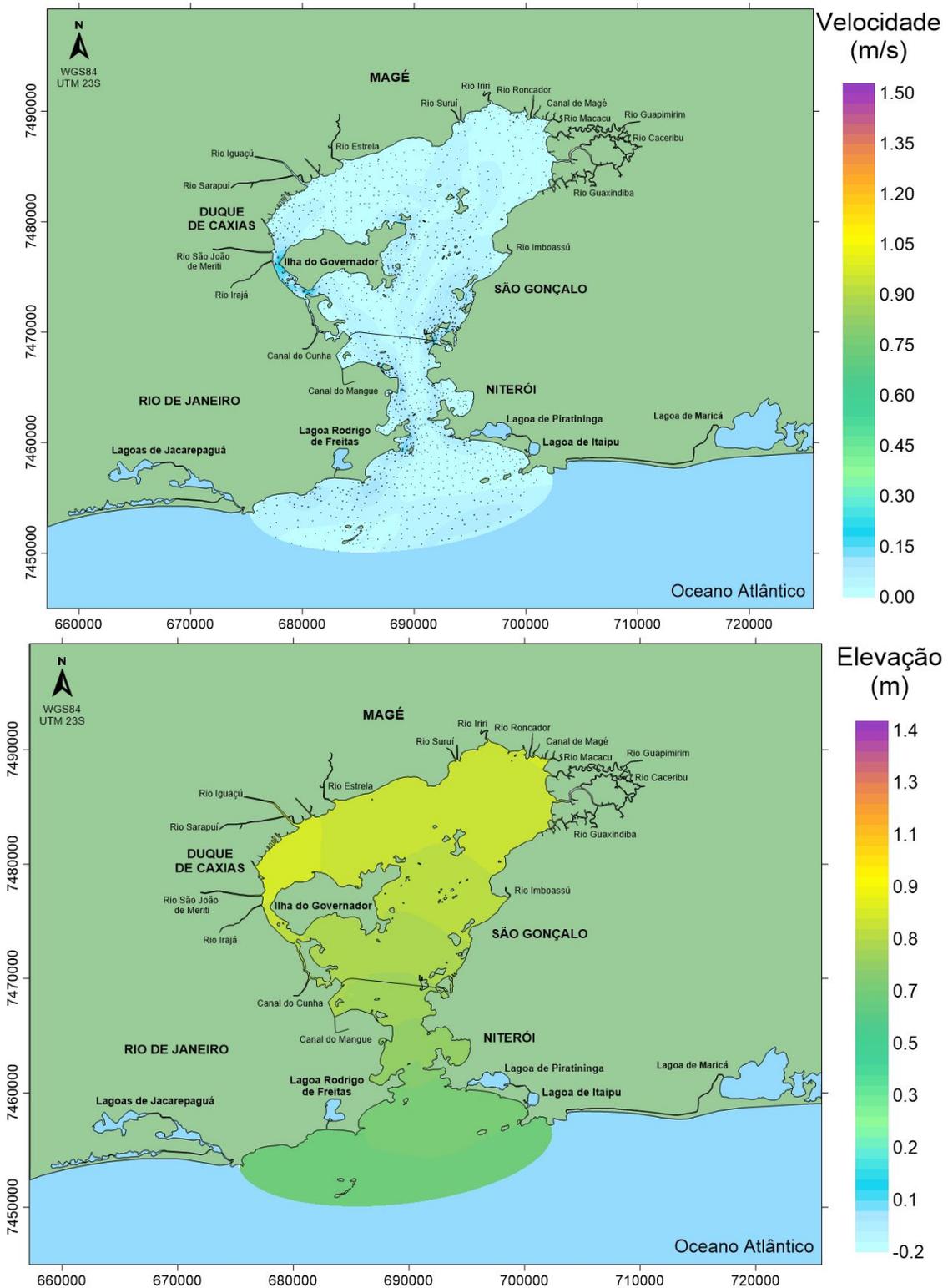


Figura 4.6: Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante uma Preamar de Quadratura na baía de Guanabara

• Baixa-mar

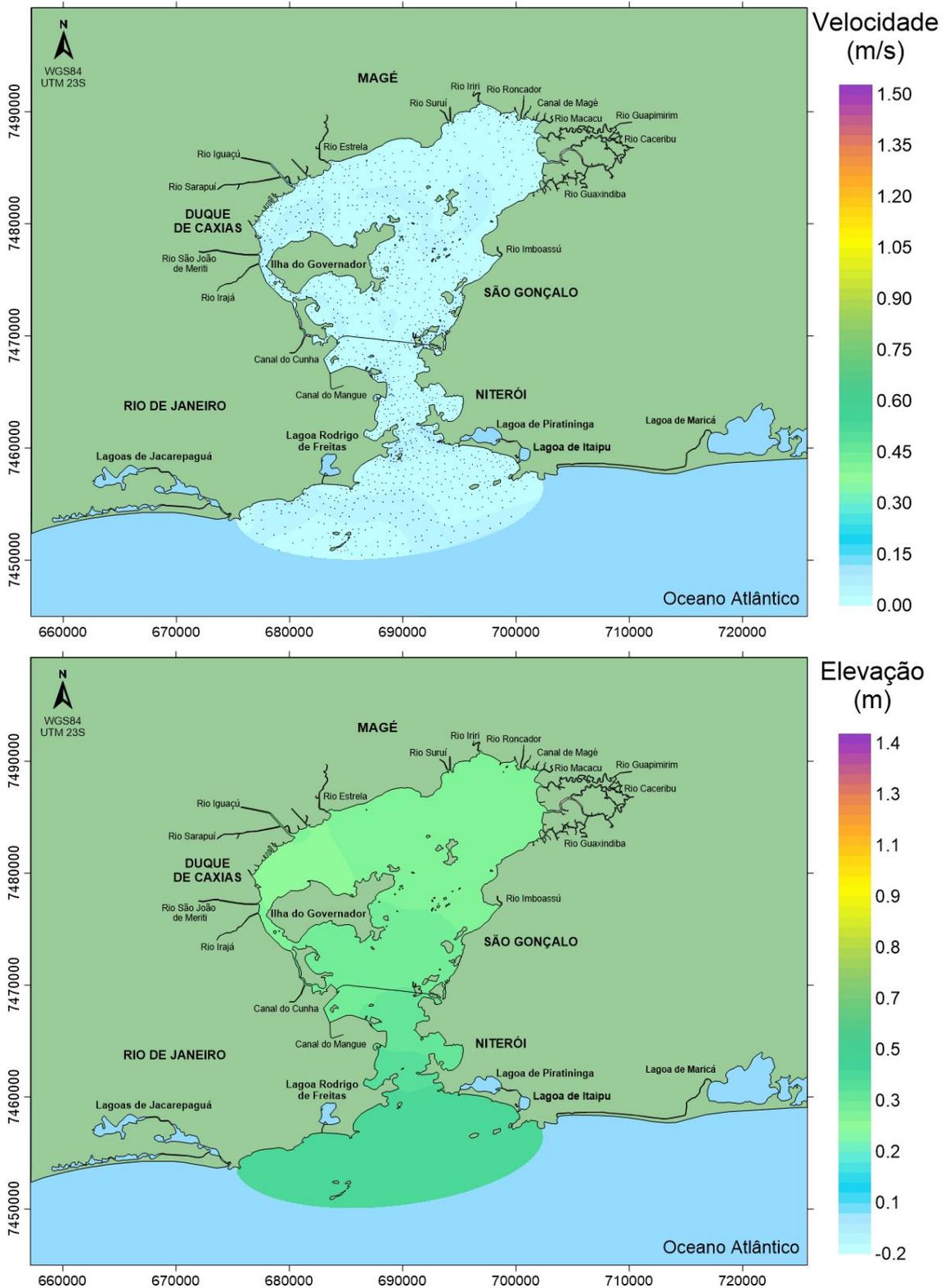


Figura 4.7: Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante uma Baixa-mar de Quadratura na baía de Guanabara

- Meia Maré Enchente (MME)

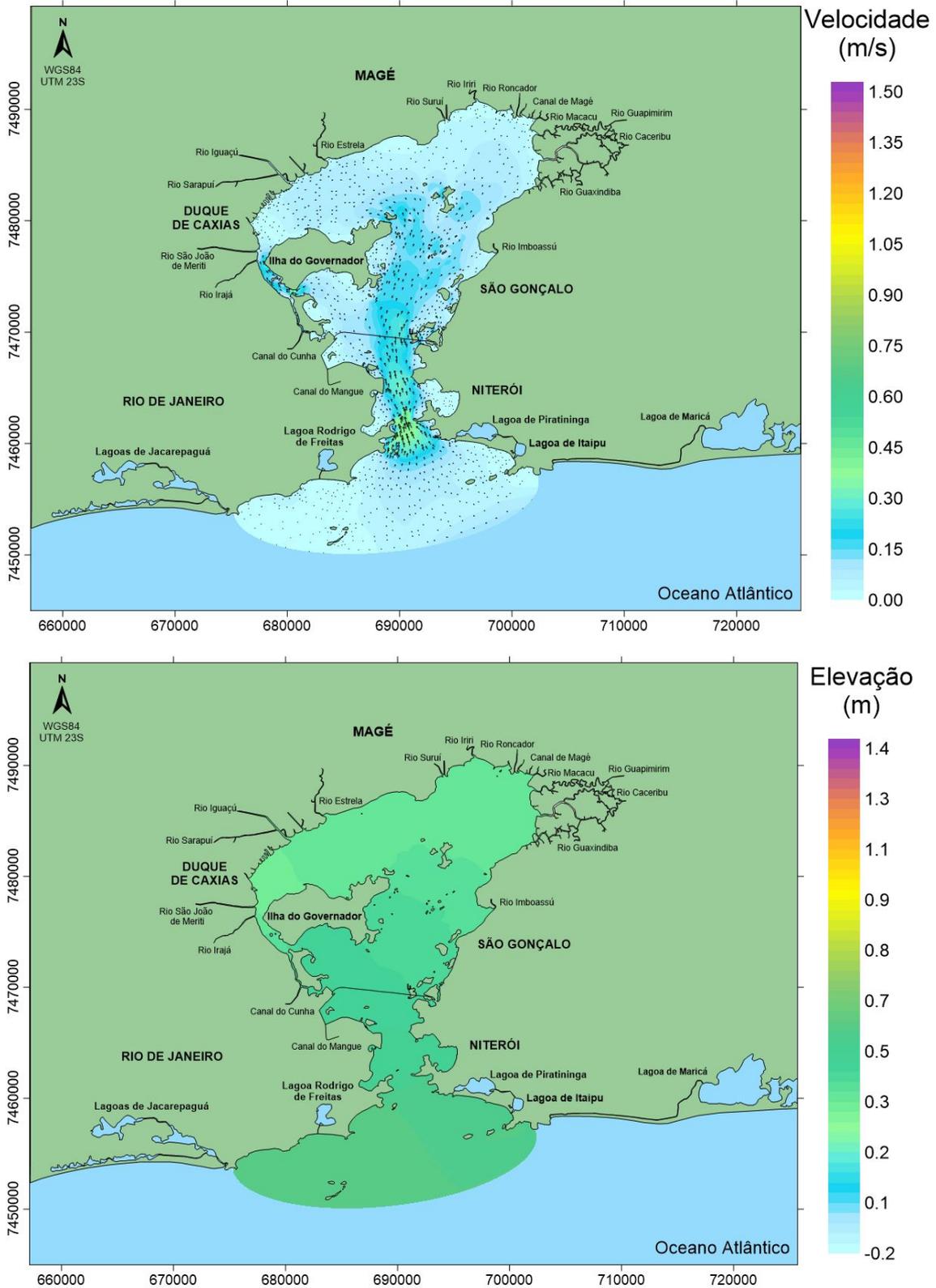


Figura 4.8: Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante a MME de Quadratura na baía de Guanabara

- Meia Maré Vazante (MMV)

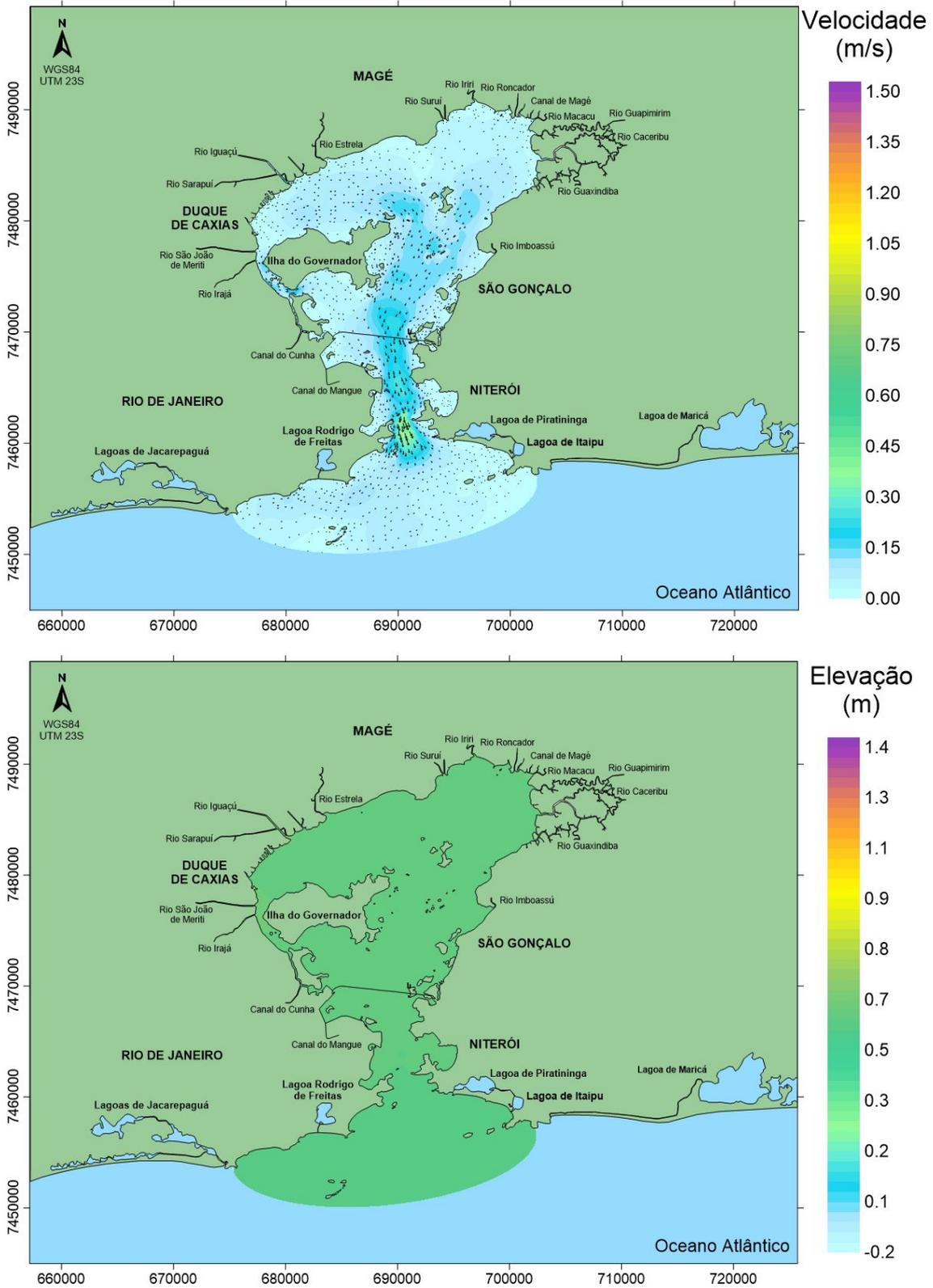


Figura 4.9: Distribuição das correntes (acima) e elevações (abaixo) durante a MMV de Quadratura na baía de Guanabara

De acordo com os resultados do modelo, pôde-se observar, durante uma maré de sizígia, velocidades de aproximadamente 1,2 m/s na região da embocadura do canal durante os períodos de meia maré e elevações variando de 1,4 m na Preamar a -0,2 m na baixa-mar (utilizando o NR de 0,69 do projeto); analogamente, durante uma maré de quadratura, as velocidades reportadas foram de cerca de 0,5 m/s durante as meias marés e elevações variando de 0,8 a 0,3 metros durante respectivamente a premar e a baixa-mar. Todos os resultados encontram-se de acordo com o reportado por Andrade, 2018; Porto & Ponte, 2018; Rosman et. al. 2018.

## **4.2 Modelo de Tempos Característicos**

### **4.2.1 Taxa de Renovação**

O modelo de taxas de renovação da baía de Guanabara foi simulado por um período de 90 dias, os resultados desses modelos podem ser observados na figura 4.10 a seguir, durante o período simulado houve renovação próxima de 100% na grande maioria da baía, porém, as regiões com maior estagnação obtiveram valores inferiores devido à suas características de circulação hidrodinâmica.

A renovação da baía ocorre principalmente devido á interação entre a baía e o oceano, e, em menor escala, devido aos rios de maior vazão, como o Guapi-Macacu na região nordeste e o rio Iguaçu na região Noroeste. Os mapas mostram que as regiões com maior tempo de renovação, ou seja, com águas mais estagnadas encontram-se principalmente no interior da baía, além da região da marina da glória e enseada de Icaraí.

Vale destacar que o modelo de taxas de renovação não leva em consideração padrões de qualidade de água, portanto, deve-se considerar que uma água “nova” não necessariamente apresenta bons padrões de qualidade, fato que se comprova principalmente na região noroeste da baía, onde as renovações ocorrem através de rios com elevado grau de eutrofização.

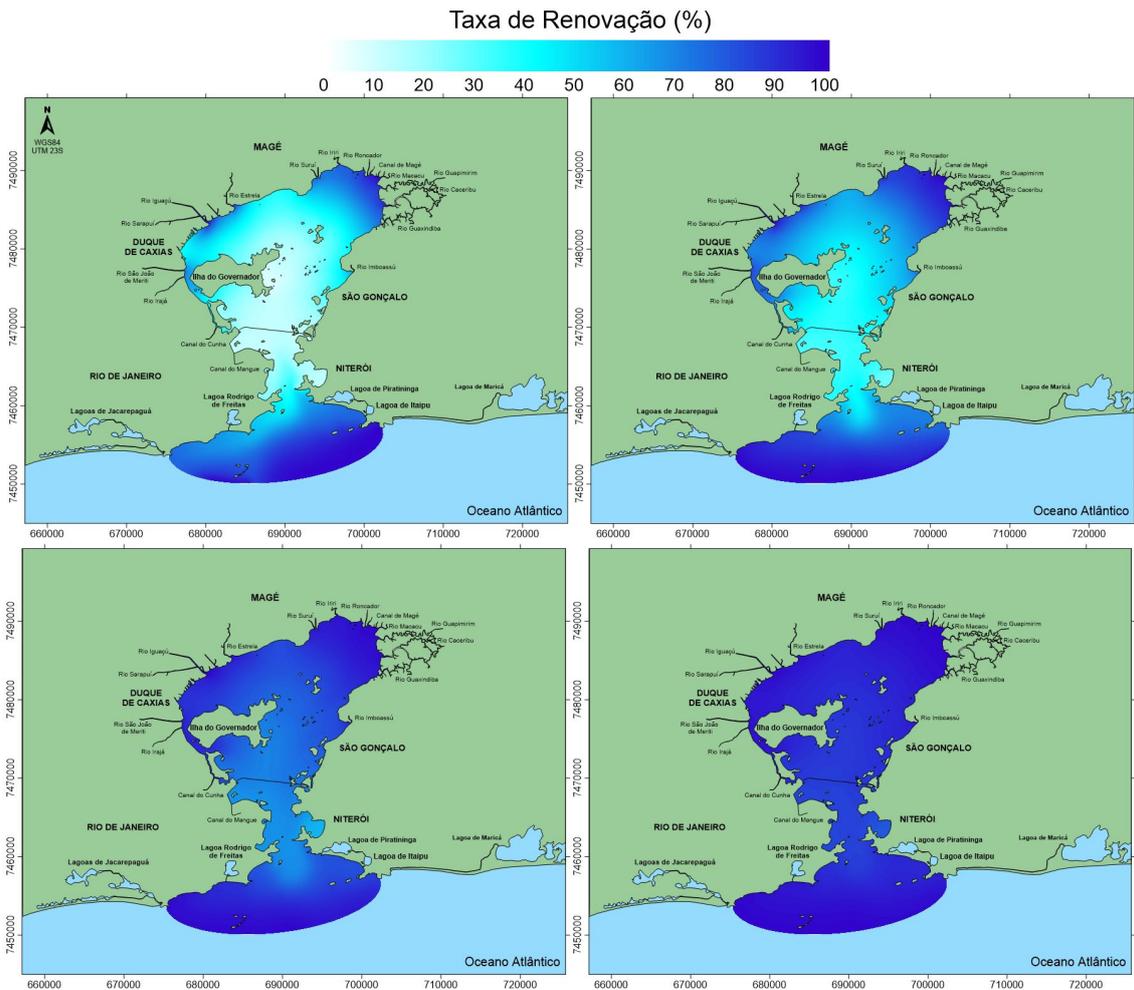


Figura 4.10: Distribuição das taxas de renovação (TR) por, respectivamente, 15, 30, 60 e 90 dias

## 4.2.2 Idade da Água

O modelo de idade da água foi simulado por um período de 100 dias, onde se atestou a estabilidade dos resultados por um período adequado. Devido ao fato dos valores observados para IA variarem de acordo com o período de maré (marés de sizígia possuem IAs inferiores devido a maior taxa de circulação quando comparados a marés de quadratura) foi computada a média dos valores por um período de 30 dias. Os resultados da média estão exemplificados na figura 4.11 abaixo.

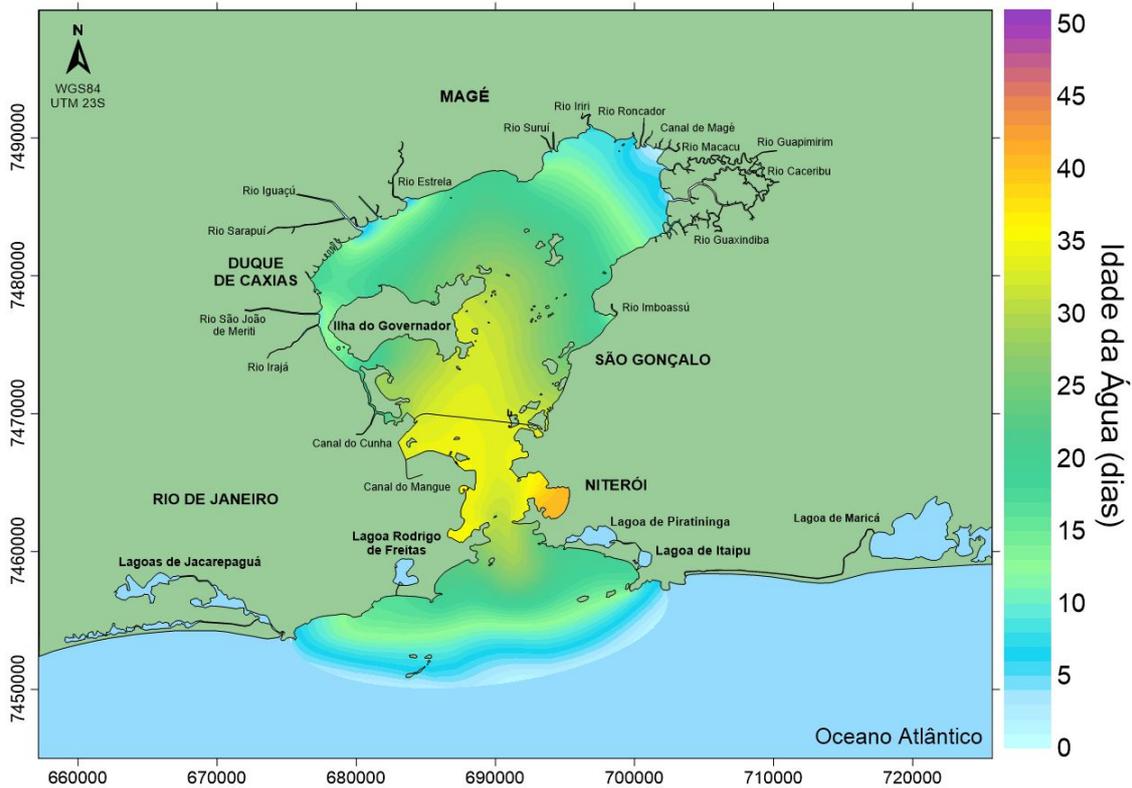


Figura 4.11: Distribuição da Idade da Água em dias no interior da BG

Os pontos onde foram observados as menores taxas de renovação na simulação anterior (região central da BG, marina da Glória e enseada de Icaraí) apresentaram também as maiores IAs, variando entre 30 e 40 dias, enquanto o restante da BG apresentou valores entre 10 e 30 dias.

## 4.3 Modelo de Qualidade da Água

Esta sessão apresenta os resultados dos modelos de qualidade da água, respectivamente apresentará os dados obtidos na simulação dos modelos de salinidade, demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido, nitrogênio e fósforo para o cenário atual da qualidade da água na BG.

### 4.3.1 Salinidade

O modelo de salinidade é fundamental na representação da circulação hidrodinâmica em ambientes estuarino, pois, por um lado ele representa um indicador indireto da proporção entre águas salgadas e doces no ambiente, o que ajuda na validação das vazões de afluentes e marés no modelo, e por outro lado, representa

um constituinte barotrópico do sistema, que altera os padrões de circulação devido ao seu gradiente de concentração.

### Calibração & Validação

A calibração dos resultados de salinidade foi realizada utilizando-se principalmente dois estudos, Bérghamo (2006) e Santos (2015). Que mensuraram a salinidade no interior da BG e disponibilizaram o resultado através de valores mínimos e máximos observados. As estações utilizadas por Bérghamo estão representadas na figura 4.12 abaixo.

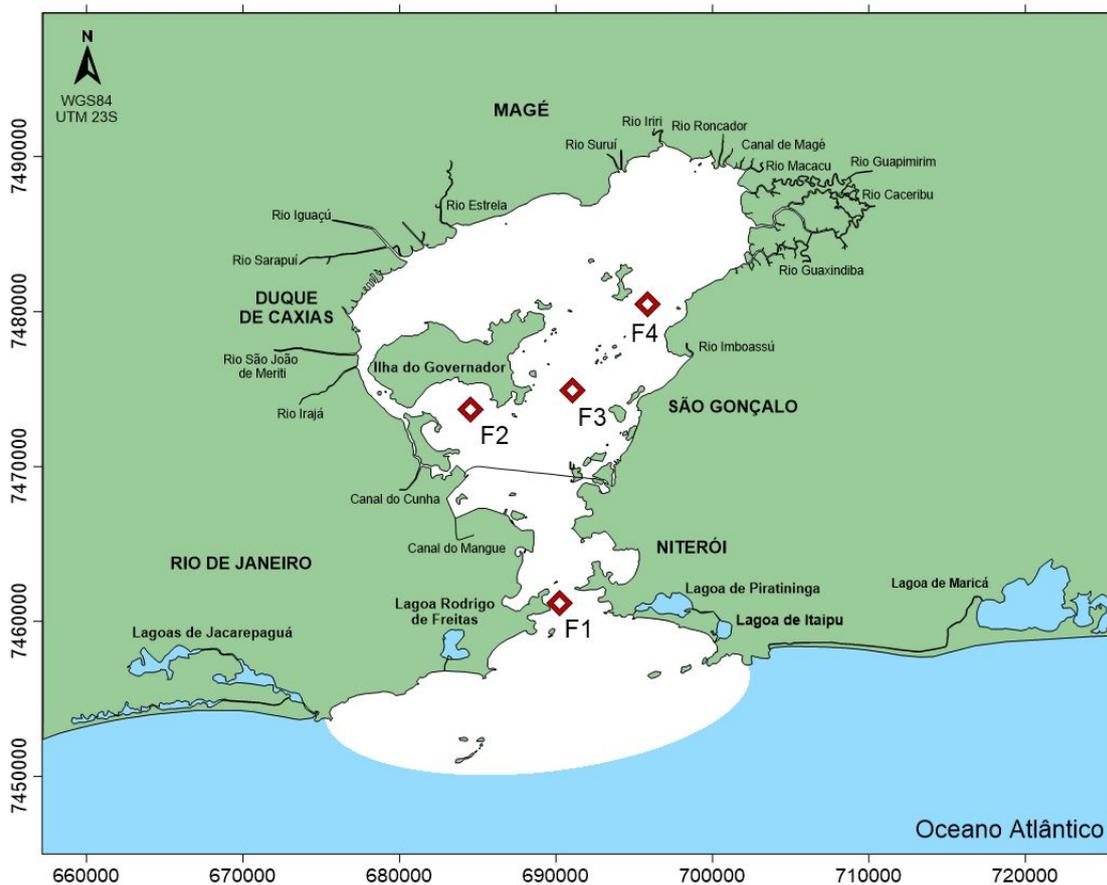


Figura 4.12: Localização e nomenclatura adotada por Bérghamo (2006) das estações utilizadas para calibração dos padrões de salinidade

Já Santos (2015) representou seus resultados segregando-os em regiões de características semelhantes em relação ao perfil de salinidade, essas regiões e as estações utilizadas estão representados na figura 4.13 a seguir.

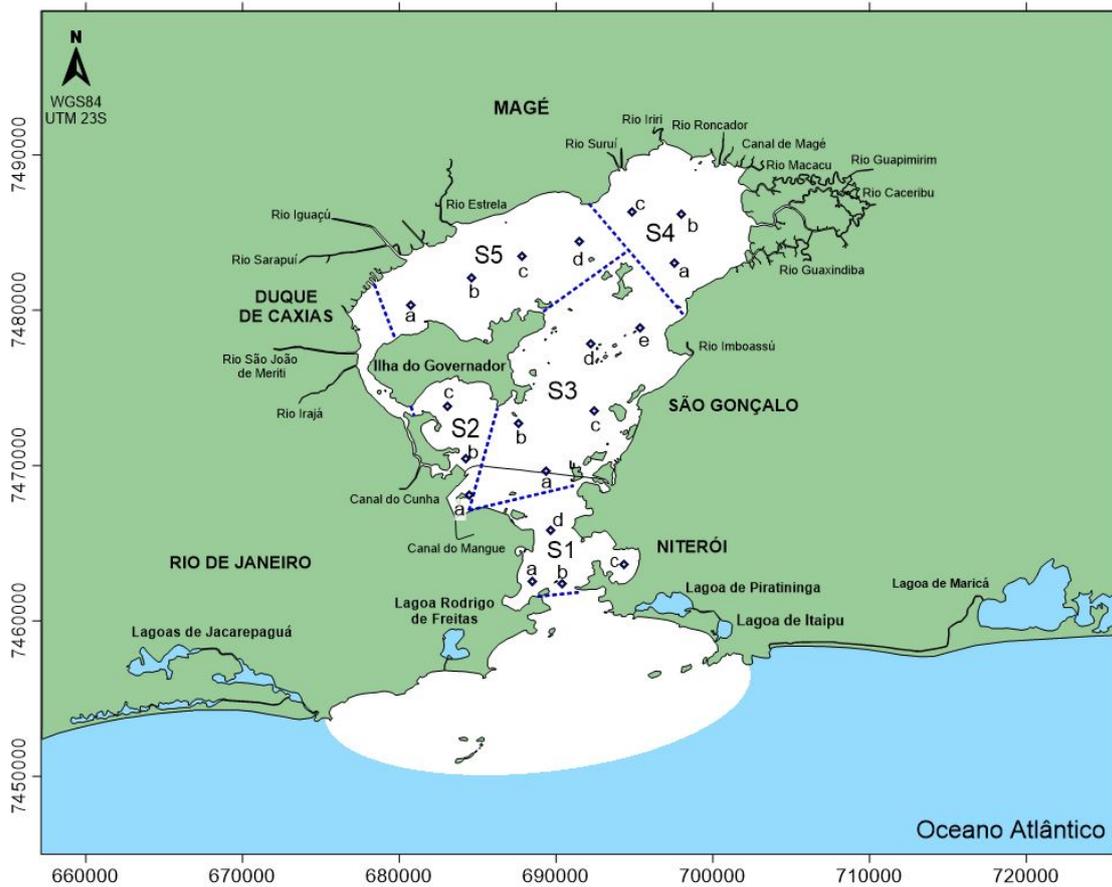


Figura 4.13: Localização e nomenclatura adotada por Santos (2015) das estações e regiões utilizadas para calibração dos padrões de salinidade

Os dois estudos representam um total de 23 pontos de calibração, cujos resultados podem ser verificados na tabela 4.2 para Bérghamo (2006) e 4.3 para Santos (2015). Verifica-se então que os padrões de salinidade observados empiricamente encontram-se de acordo com os resultados da simulação realizada.

Tabela 4.2: Comparação entre valores de salinidade (ups) reportados por Bérghamo (2006) e resultados obtidos na simulação

Estação	Bérghamo (2006)		Presente Estudo	
	MIN	MAX	MIN	MAX
F1	33.00	35.50	32.82	34.39
F2	29.00	34.30	28.59	31.07
F3	30.00	34.50	30.91	32.23
F4	27.00	33.00	28.93	30.54

Tabela 4.3: Comparação entre valores de salinidade (ups) reportados por Santos (2015) e resultados obtidos na simulação

Região	Santos (2015)		Presente Estudo		
	MIN	MAX	Ponto	MIN	MAX
S1	28.85	34.67	a	32.94	33.75
			b	32.57	34.15
			c	33.12	33.31
			d	32.05	34.00
S2	20.00	33.50	a	30.62	32.06
			b	30.51	31.73
			c	26.21	29.78
S3	22.39	33.51	a	31.50	33.42
			b	31.45	32.31
			c	30.63	31.78
			d	30.04	31.41
			e	29.36	30.54
S4	19.90	30.87	a	27.85	29.57
			b	26.84	28.30
			c	28.42	29.13
S5	19.67	32.12	a	27.67	28.89
			b	27.84	29.34
			c	29.07	29.92
			d	29.45	29.97

## Resultados

A média dos padrões de salinidade obtidos durante a simulação realizada estão disponíveis na figura 4.14 a seguir. Pode-se observar a forte influência das forçantes de maré devido aos altos valores de salinidade observados até mesmo no interior da BG. Estes resultados encontram-se de acordo com o apresentado por Rosman et. al. (2018).

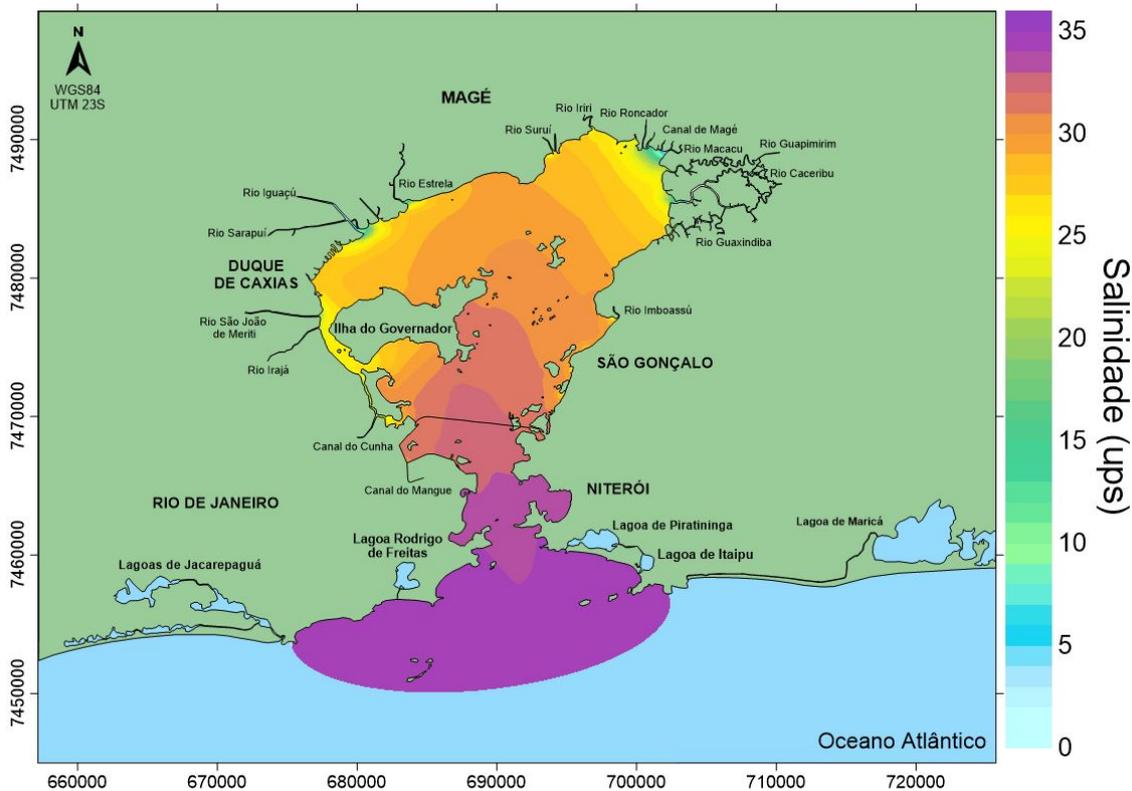


Figura 4.14: Padrão de salinidade médio (ups) obtido durante a simulação

### 4.3.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um dos mais importantes parâmetros de mensuração indireta do aporte de matéria orgânica incidindo sobre um corpo d'água. No caso da baía de Guanabara, grande parte (cerca de 80%) do aporte de matéria orgânica que adentra o sistema tem origem nos efluentes domésticos de esgotamento sanitário, portanto é um parâmetro de enorme importância na avaliação do impacto do setor sobre o estuário.

#### Calibração & Validação

A calibração dos modelos de DBO, nitrogênio e fósforo foi realizada utilizando os dados disponibilizados pelo Boletim de Saúde Ambiental da Baía de Guanabara (disponível em: <<https://ecoreportcard.org/pt/cartoes-relatorios/baia-de-guanabara>>) o boletim emite valores médios medidos diretamente entre os anos de 2013 e 2015 pelo programa de monitoramento do Inea, possuindo um total de 20 pontos espalhados no interior da BG. A figura 4.15 a seguir apresenta a localização de cada um desses pontos de amostragem.

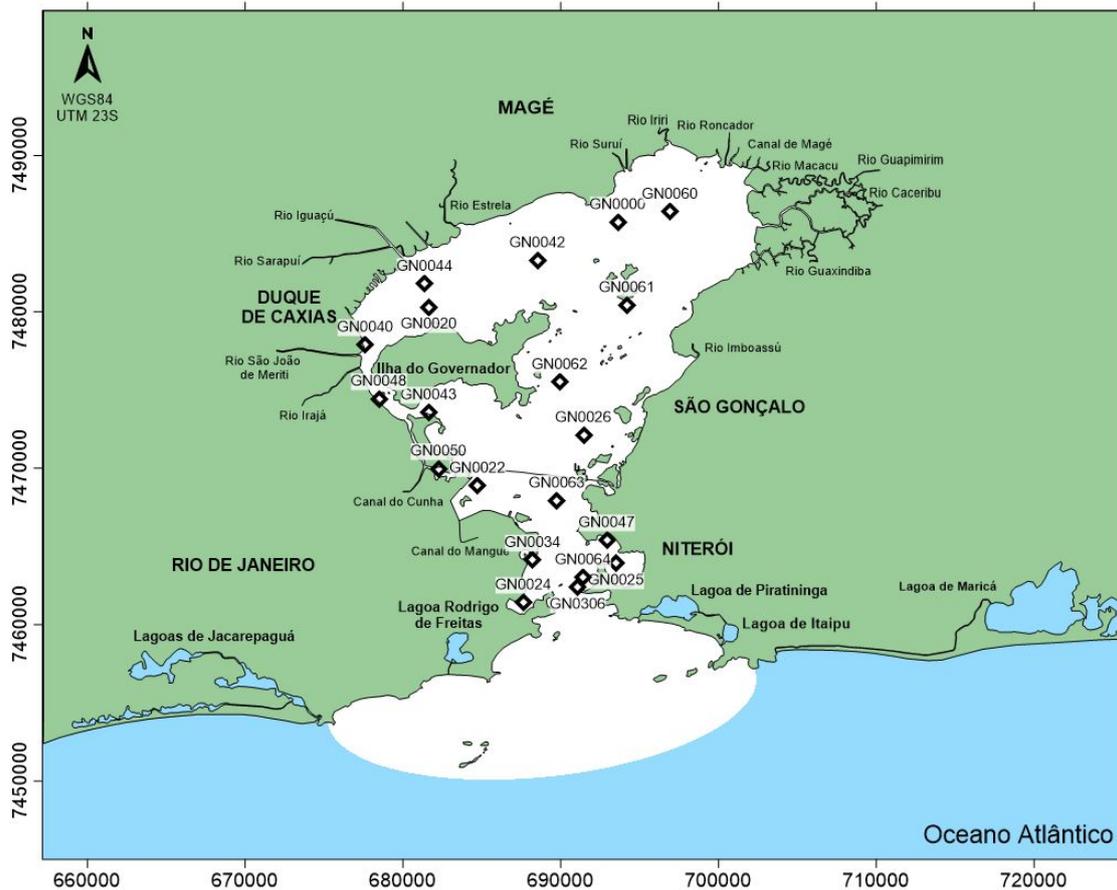


Figura 4.15: Estações de monitoramento de qualidade de água no interior da BG, a nomenclatura adotada na imagem condiz com a utilizada pelo INEA

O comparativo entre os valores médias reportados pelo Inea, e valores estatísticos dos resultados obtidos nas simulações podem ser comparados através da figura 4.16 a seguir. Pôde-se atestar, portanto, que os valores obtidos na modelagem encontram-se próximos ao que usualmente se observa empiricamente nas águas do estuário.

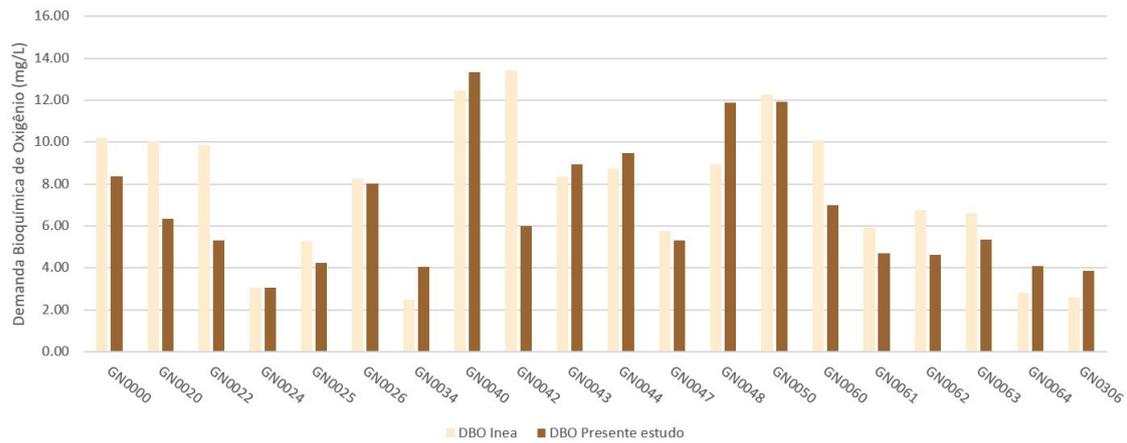


Figura 4.16: Comparação entre os resultados médios reportados pelo Inea, e valores obtidos durante a simulação para Demanda Bioquímica de Oxigênio

## Resultados

As médias dos resultados das simulações para a concentração de matéria orgânica (DBO) estão representadas na figura 4.17 a seguir, destacou-se as isolinhas de concentração de 5 & 10 mg/L para melhor ilustrar os resultados. Verifica-se o elevado grau de matéria orgânica em todo o perímetro da baía, com maior intensidade nas regiões Oeste-Noroeste e Leste, onde notadamente verifica-se elevadas taxas de urbanização com níveis insatisfatórios de saneamento.

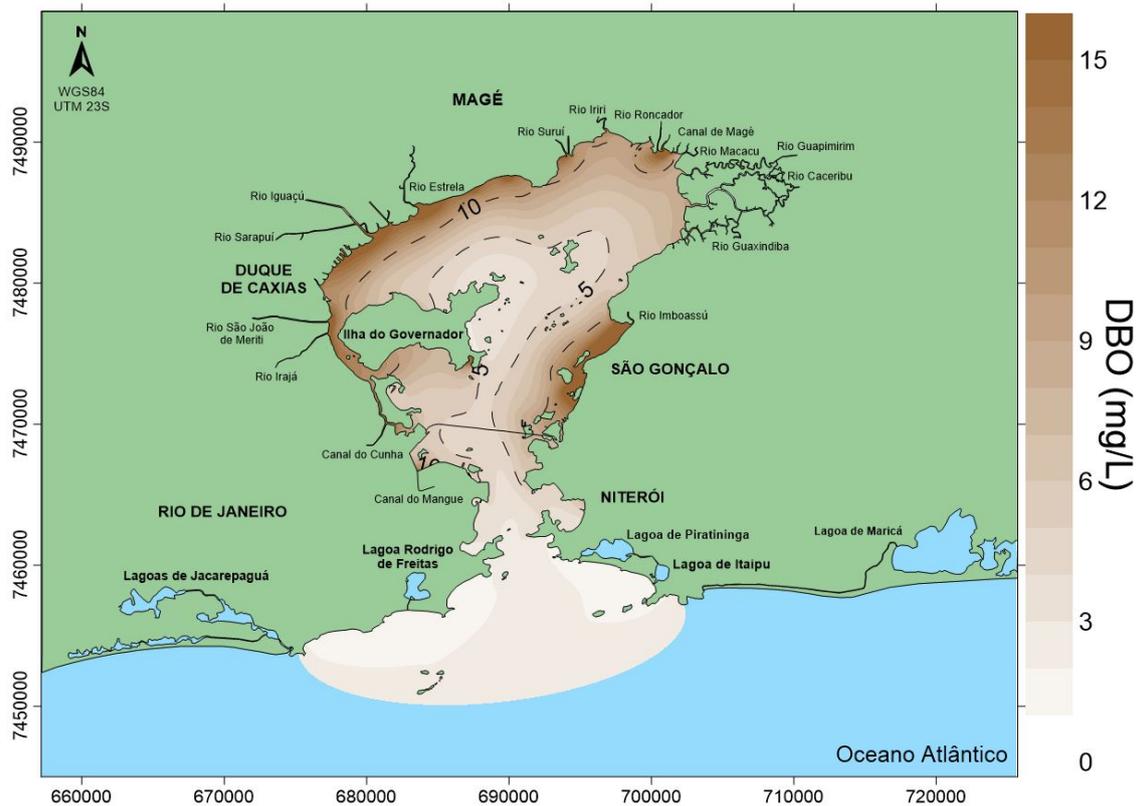


Figura 4.17: Variação estacional dos resultados da concentração de matéria orgânica medida em DBO (mg/L) obtidos na simulação, com destaque para as isolinhas de 5 & 10 mg/L

### 4.3.3 Nitrogênio

O Nitrogênio foi modelado no presente estudo como Nitrogênio Amoniacal, Nitrato e Nitrogênio Orgânico, sendo somente a fração amoniacal e de nitrato versadas pelo CONAMA 357/05.

#### Calibração & Validação

Os resultados da simulação foram calibrados utilizando as mesmas estações do Inea apresentadas anteriormente, que divulgou os dados obtidos sob a forma de Nitrogênio Inorgânico Total (NIT), que representa as formas de Nitrato, Nitrito e Amônia. A seguir é exposto graficamente o comparativo entre os resultados reportados pelo Inea e os valores obtidos pós-calibração para as 20 estações disponíveis, verificando-se a fidelidade dos resultados obtidos pelo modelo.

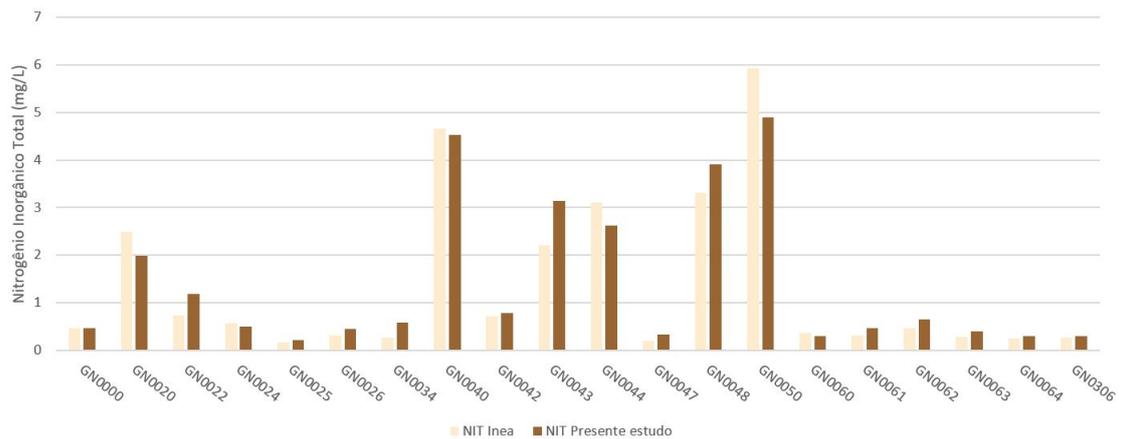


Figura 4.18: Comparação entre os resultados médios reportados pelo Inea, e valores obtidos durante a simulação para Nitrogênio Inorgânico Total (NIT)

## Resultados

O CONAMA 357/05 versa sobre os limites de concentração de Nitrogênio sob a forma de Nitrato e Nitrogênio Amoniacal, e, para águas Salinas e Salobras os limites de classe I e II são respectivamente 0,4 e 0,7 mg/L para ambas as formas. De modo geral a parte Oeste-Noroeste da Baía representou a grande maioria do aporte de Nitrogênio no sistema, com o efeito de seus afluentes sendo observado até o limite da Ilha do Governador. A região interior da ilha do Fundão, principalmente devido ao aporte oriundo do canal do Cunha, apresentou os piores resultados durante a simulação. A figura 4.19 e 4.20 a seguir ilustra os valores médios das concentrações de Nitrogênio Amoniacal e Nitrato, respectivamente.

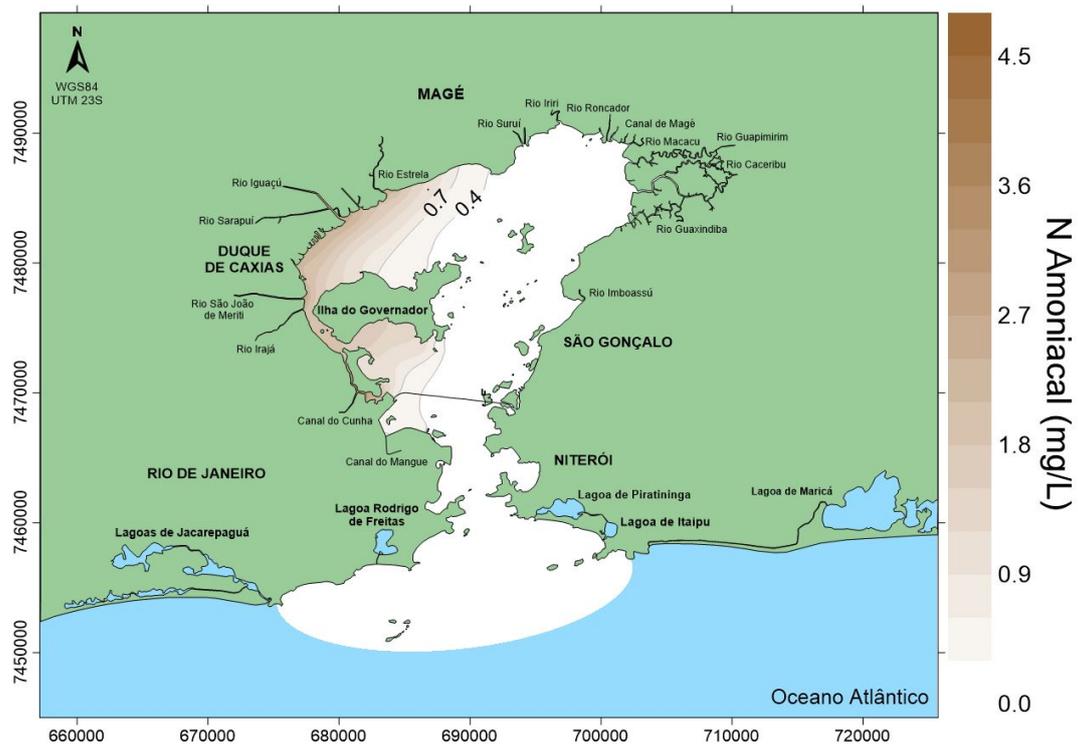


Figura 4.19: Variação estacial dos resultados da concentração de Nitrogênio Amoiacal (mg/L) obtidos na simulação, com destaque para as isolinhas de 0,4 & 0,7 mg/L

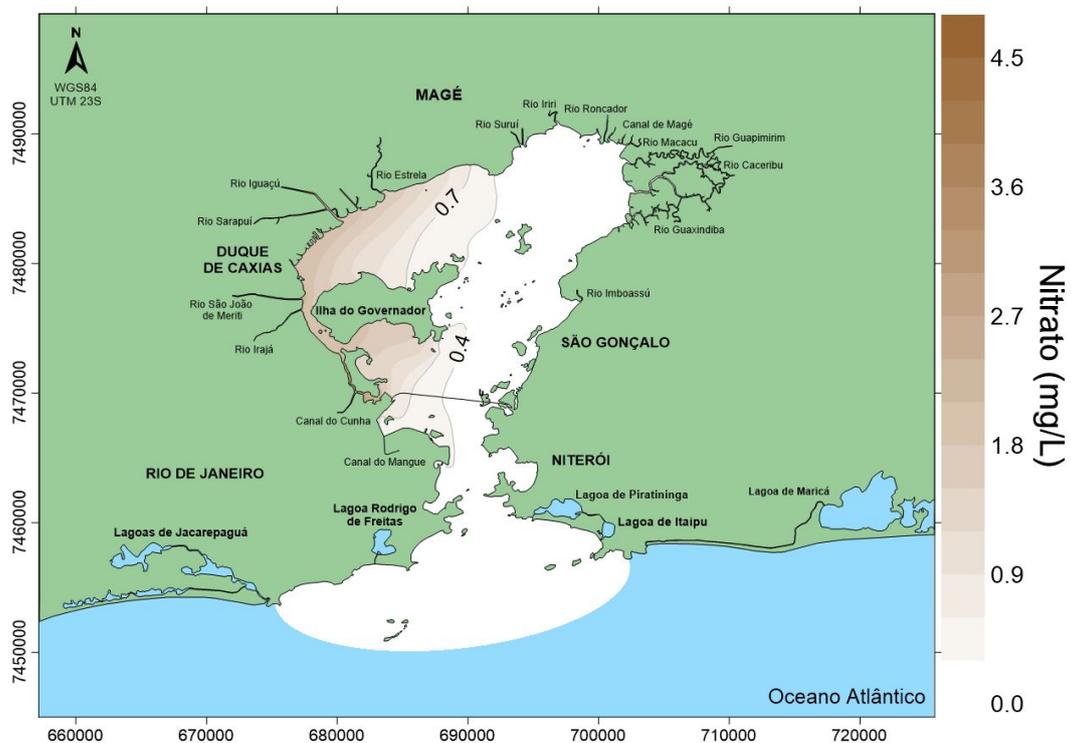


Figura 4.20: Variação estacial dos resultados da concentração de Nitrato (mg/L) obtidos na simulação, com destaque para as isolinhas de 0,4 & 0,7 mg/L

### 4.3.4 Fósforo

O fósforo é um parâmetro de grande importância na análise de qualidade de água em ambientes com histórico de processos de eutrofização avançados, visto que é um dos componentes utilizados na determinação do Índice de Estado Trófico (IET) de um ambiente. Ele foi simulado no presente estudo como fósforo orgânico e inorgânico, sendo seus resultados apresentados sob a forma de fósforo total, que é utilizado nas resoluções e classificações apresentadas.

#### Calibração & Validação

Conforme procedimento adotado para os componentes citados anteriormente, a calibração do fósforo foi realizada utilizando as mesmas estações disponibilizadas pelo Inea, com resultados divulgados sob a forma de fósforo total. Os valores comparativos para cada estação estão apresentados de forma gráfica a seguir, onde é possível assegurar o adequado nível de representatividade do modelo apresentado.

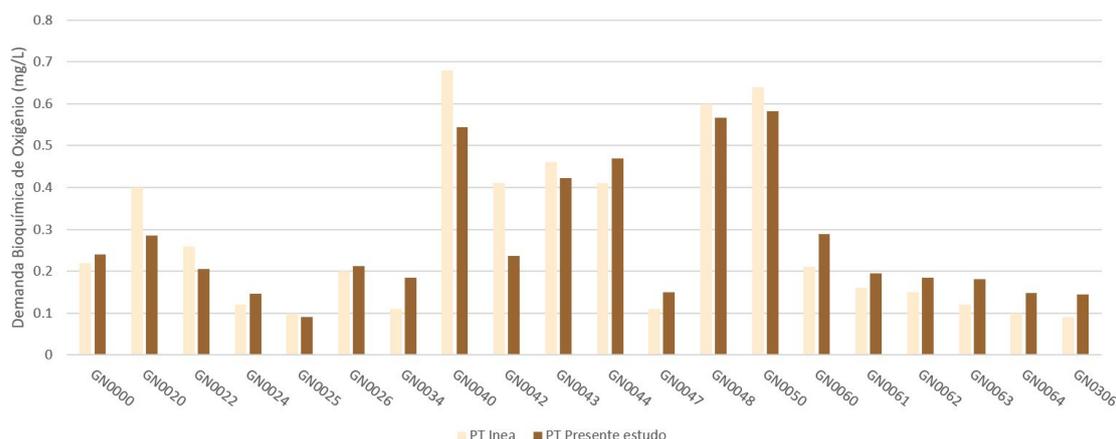


Figura 4.21: Comparação entre os resultados médios reportados pelo Inea, e valores obtidos durante a simulação para Fósforo Total (mg/L)

#### Resultados

Os resultados para fósforo total estão representados como médias referentes ao último período de maré após a estabilização do modelo. Observa-se que o comportamento do fósforo segue o observado para a DBO, sendo mais difundido sobre todo o perímetro do estuário, atesta-se também, áreas mais concentradas na região Oeste-Noroeste da baía, região demonstrada nas simulações como a mais degradada pela ausência de saneamento básico.

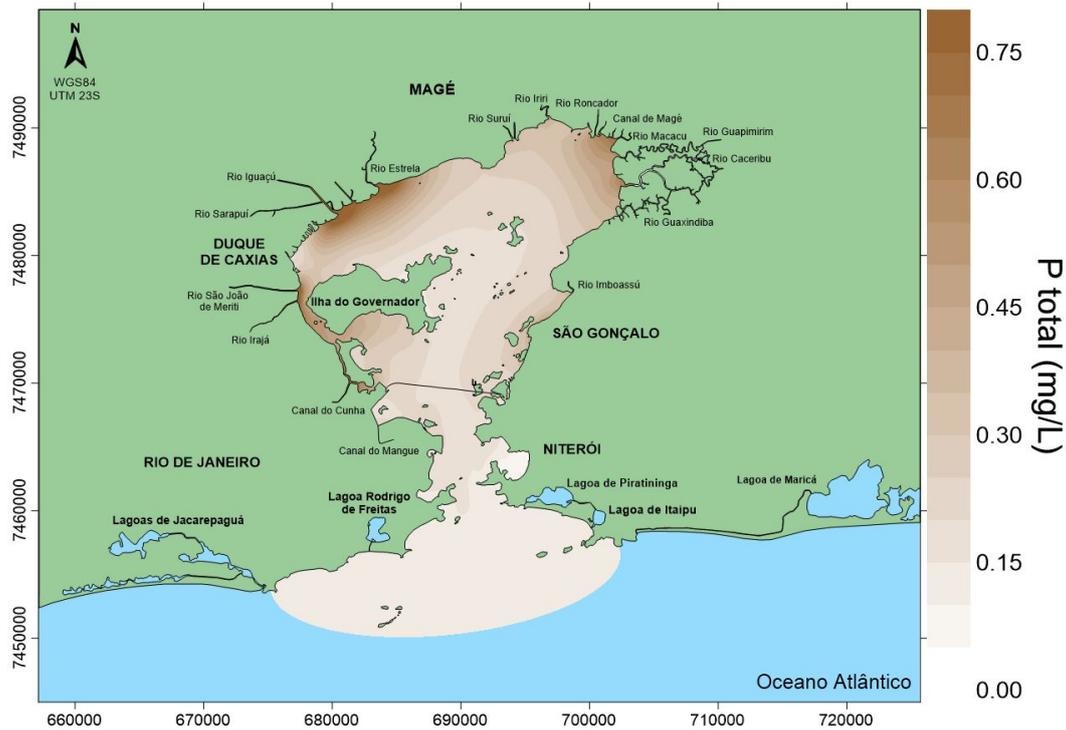


Figura 4.22: Variação estacial dos resultados da concentração de Fósforo Total (mg/L) obtidos na simulação

## 4.4 Cenários

Esta sessão apresentará os resultados dos diferentes cenários de redução de poluentes de acordo com as regiões apresentadas anteriormente. Os resultados estão segregados de acordo com a cobertura do serviço de tratamento de efluentes para cada um dos constituintes analisados (DBO, fósforo total, amônia e nitrato).

### 4.4.1 Cenário I

O primeiro cenário analisado representa os afluentes incorporados pelo setor Oeste da baía de Guanabara, principalmente os rios São João de Meriti, Irajá, canal do Cunha e do Manguê. Os resultados para cada para cada poluente podem ser observados a seguir.

DBO

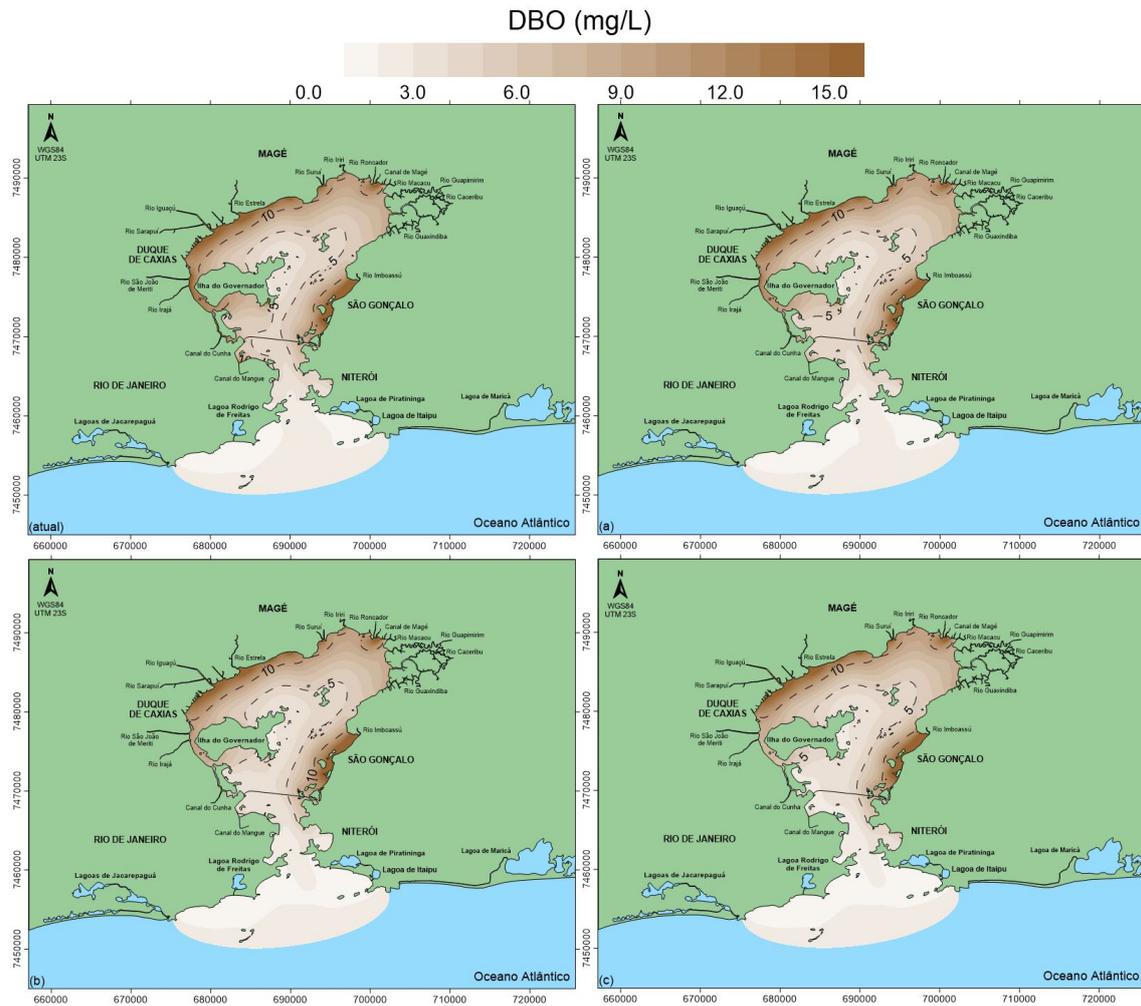


Figura 4.23: Resultado das concentrações de DBO para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário I





## Fósforo Total

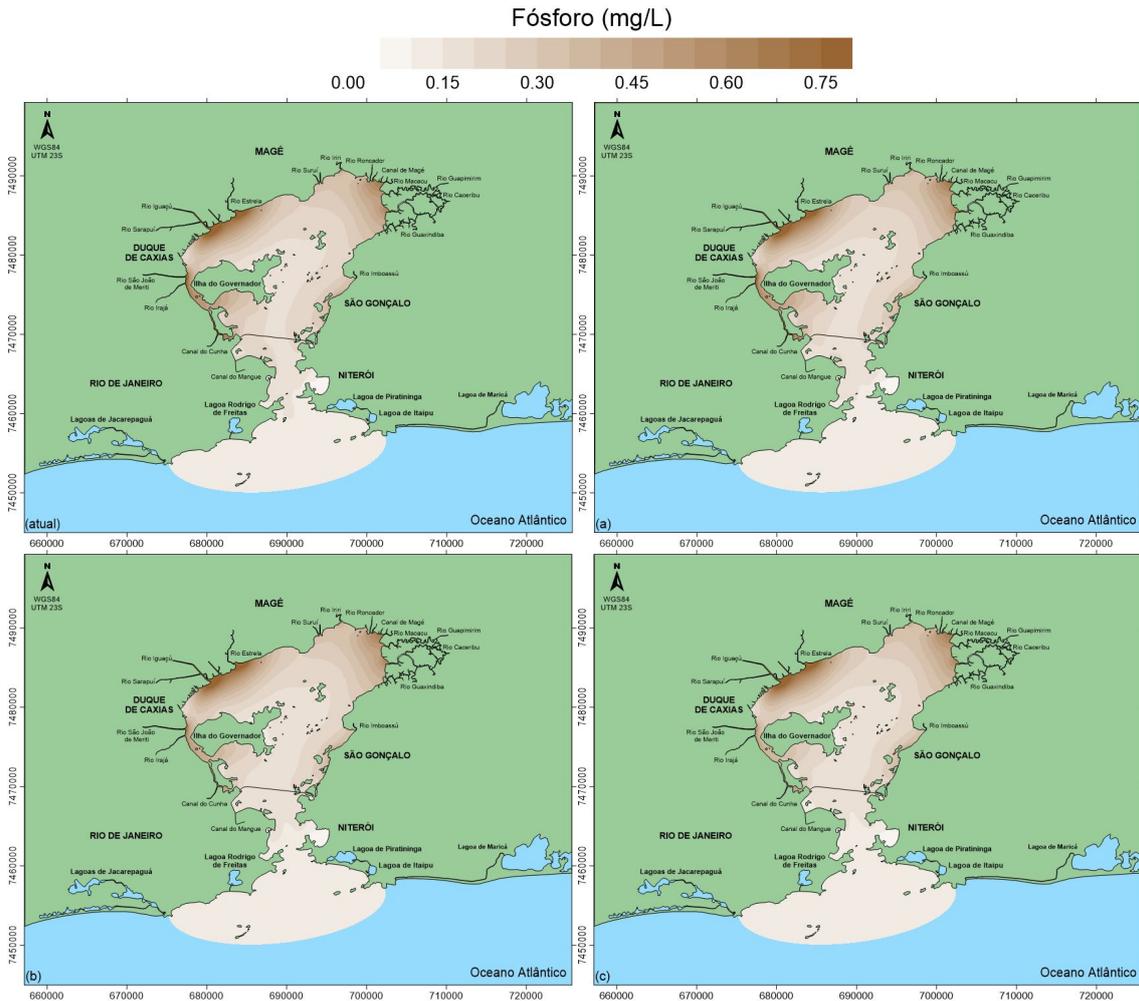


Figura 4.26: Resultado das concentrações de P<sup>T</sup> para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário I

A partir dos resultados do modelo, constatou-se uma redução significativa das concentrações de DBO, principalmente na região interior da ilha do Fundão, região com maior grau de deterioração do estuário. Apesar de menos significativas, as reduções dos outros poluentes foram constatadas, as mesmas ocorreram em menor escala, possivelmente, devido à influência da região Noroeste da baía, que não foi incorporada pelo cenário. Os resultados percentuais de redução comparando o cenário atual com o cenário “c” podem ser observados a seguir.

## DBO

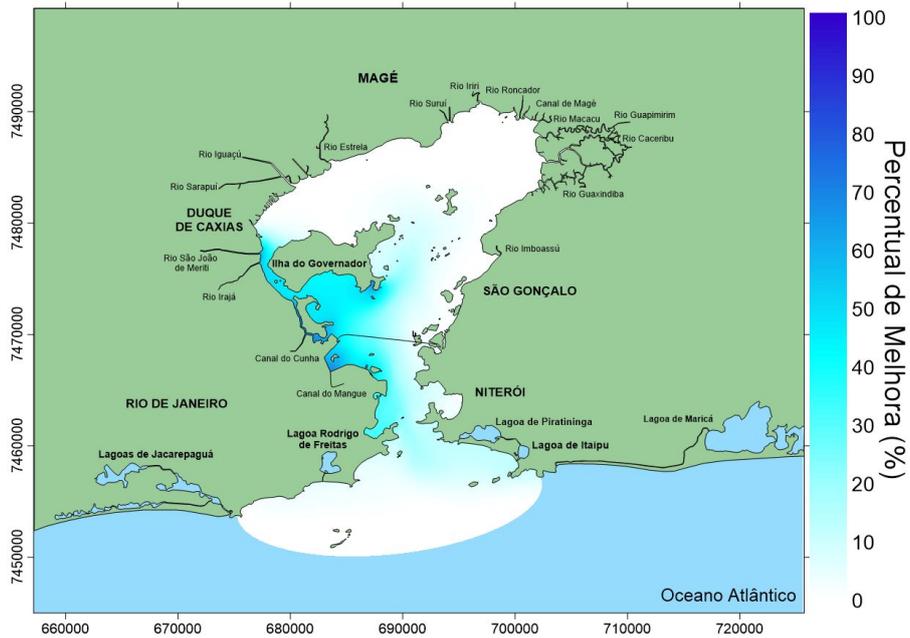


Figura 4.27: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para DBO, relativo ao cenário I

## Amônia

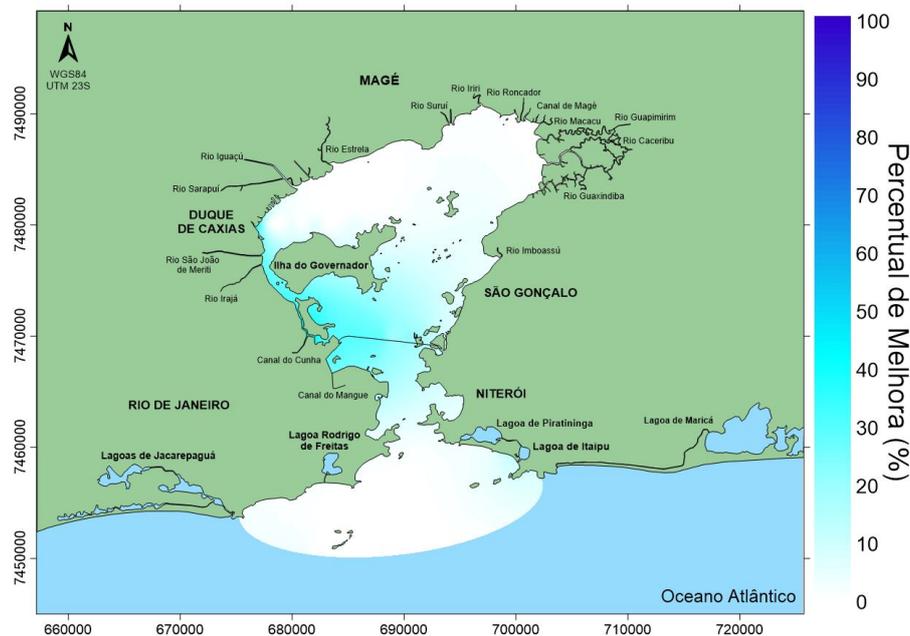


Figura 4.28: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Amônia, relativo ao cenário I

## Nitrato

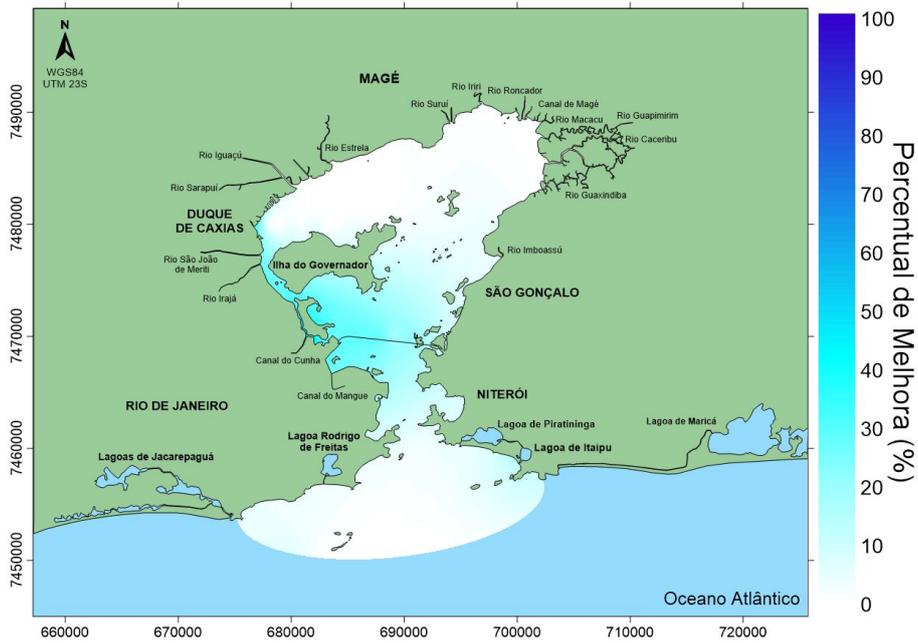


Figura 4.29: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Nitrato, relativo ao cenário I

## Fósforo Total

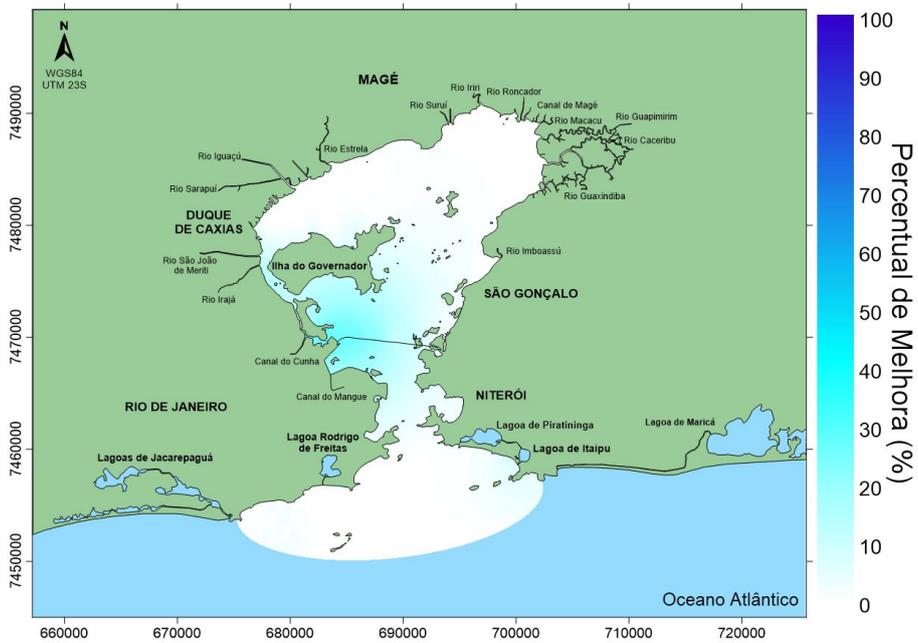


Figura 4.30: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para PT, relativo ao cenário I

Os mapas acima reafirmam os resultados apresentados anteriormente, com relação à região interior da ilha do Fundão houve uma melhora média de 66% em relação ao cenário atual para DBO, 43% para amônia e nitrogênio e 30% para fósforo, resultados semelhantes foram observados na região do porto do Rio de Janeiro. É possível observar também uma melhora geral para DBO em toda a região central da BG, com reduções de mais de 30% na região da marina da Glória e enseada de Botafogo e de cerca de 8% na praia de Icaraí e São Francisco em Niterói.

#### **4.4.2 Cenário II**

O segundo cenário de modelagem representa a melhora progressiva principalmente das bacias dos rios Sarapuí, Iguaçu, e Estrela, além da região norte da ilha do Governador e praia de Mauá. Os resultados para cada um dos constituintes do modelo de qualidade de água podem ser observados nas figuras a seguir.





# Nitrato

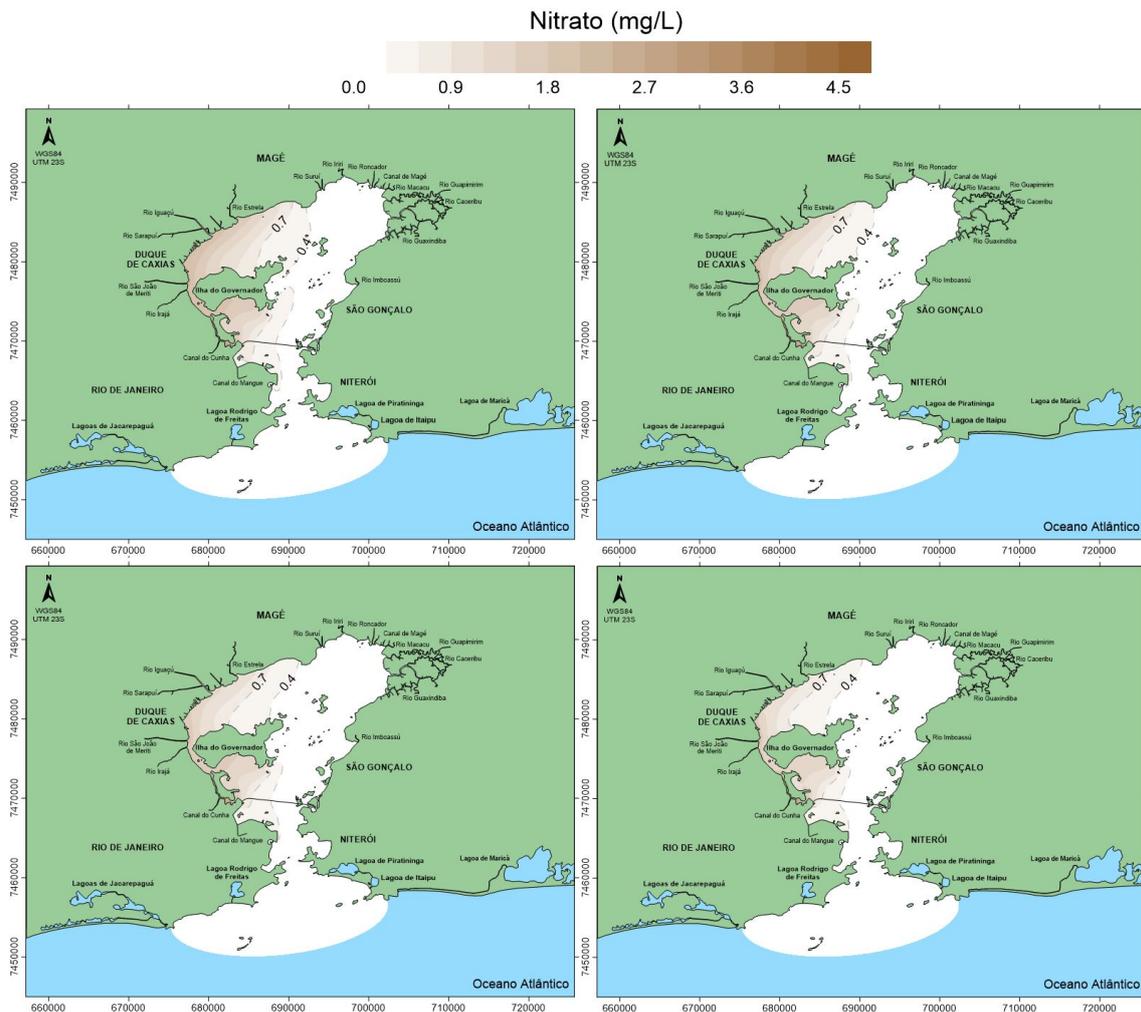


Figura 4.33: Resultado das concentrações de Nitrato para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário II

## Fósforo Total

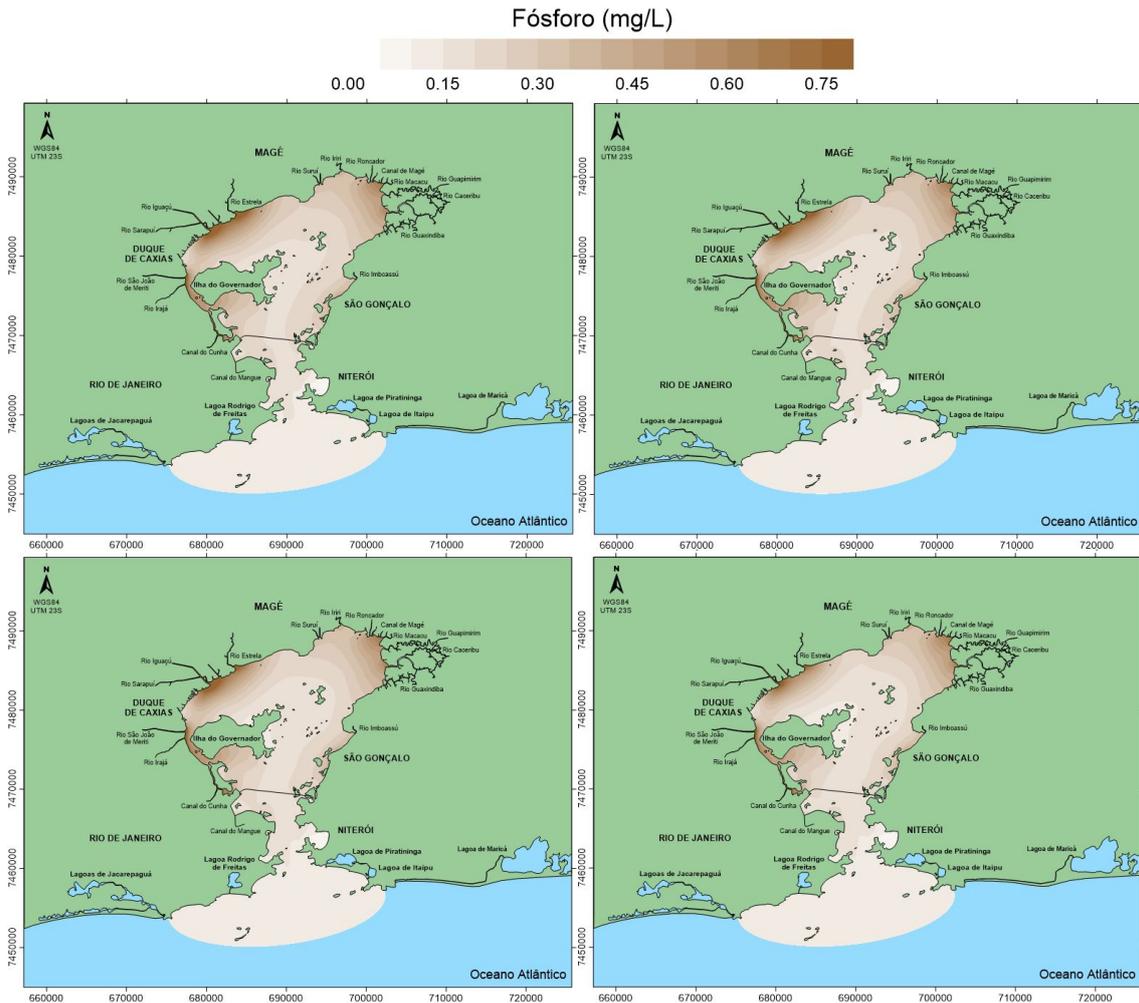


Figura 4.34: Resultado das concentrações de PT para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário II

A partir dos resultados apresentados, visualiza-se uma imensa melhora nos padrões de qualidade de água, principalmente para DBO, em toda a região noroeste da baía, com influências sobre regiões além dos limites da ilha do governador, e uma redução significativa também na região de influência do cenário I. Para os nutrientes essa melhora se deu em menor grau, mesmo no cenário de maior eficiência na remoção dos nutrientes, ainda observa-se regiões com concentrações acima de 1,5 mg/L tanto para amônia, quanto para nitrogênio e 0,5mg/L para fósforo total. A seguir os resultados entre o cenário atual e o de melhor tratamento de efluentes são comparados e apresentados de forma percentual.

## DBO

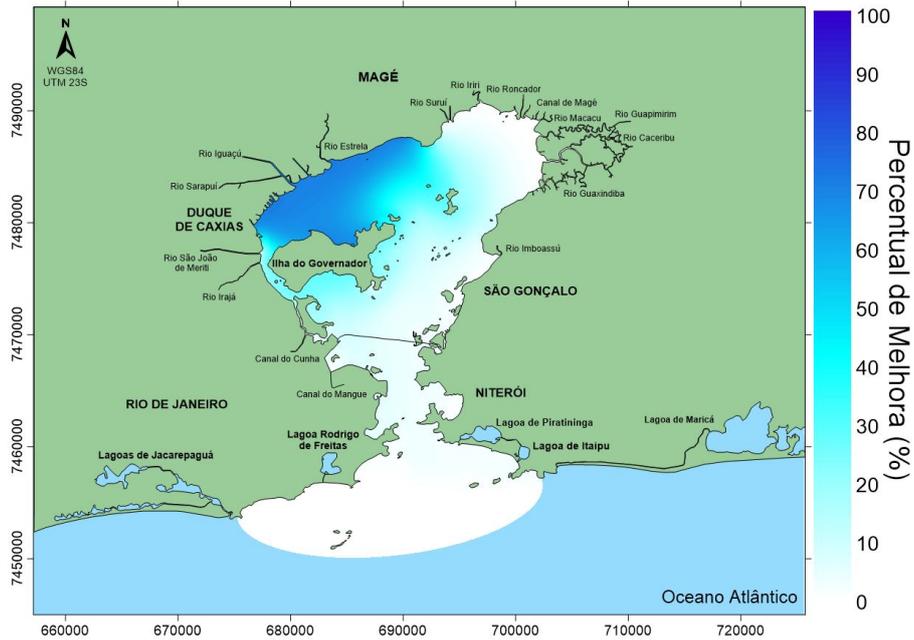


Figura 4.35: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para DBO, relativo ao cenário II

## Amônia

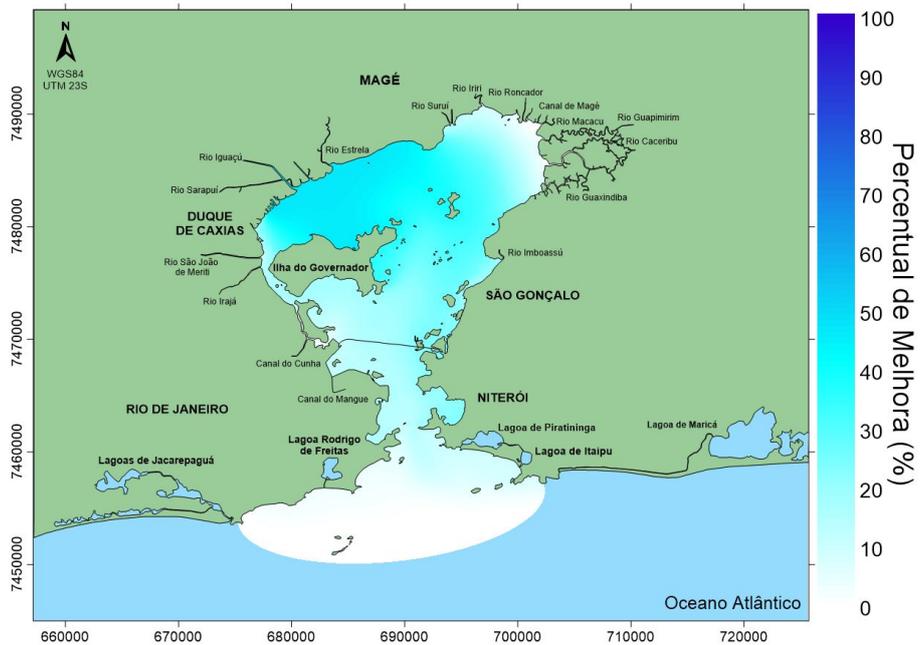


Figura 4.36: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Amônia, relativo ao cenário II

## Nitrato

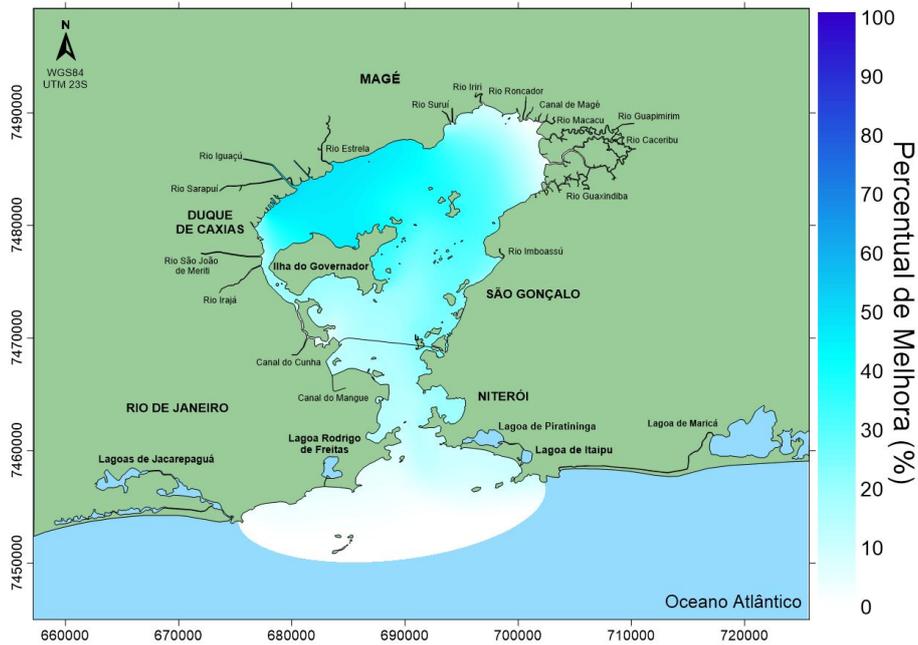


Figura 4.37: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Nitrato, relativo ao cenário II

## Fósforo Total

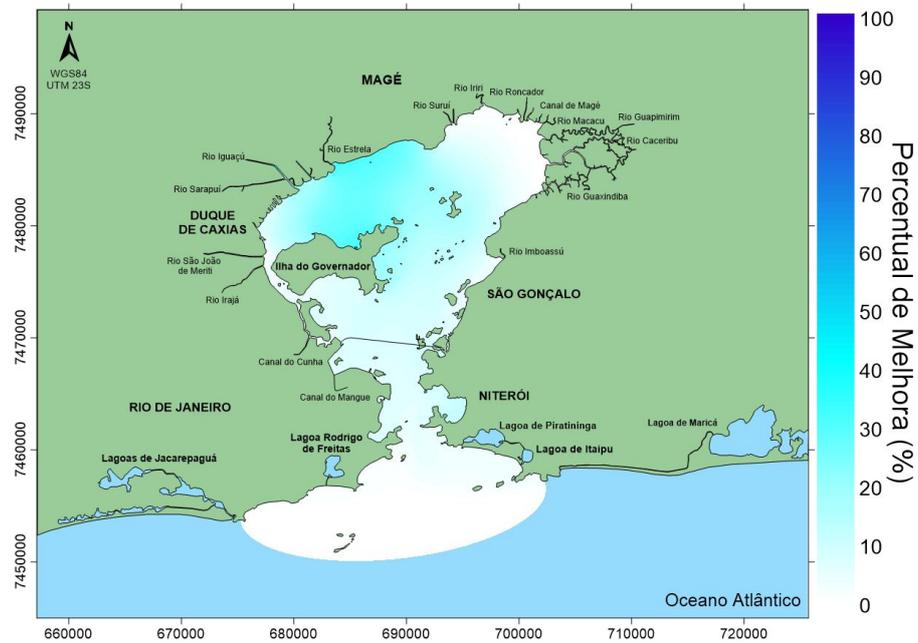


Figura 4.38: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para PT, relativo ao cenário II

Os efeitos da melhora na qualidade da água na região referente ao cenário II podem ser observados na maioria da área da baía, com uma melhora para DBO de cerca de 70% e de 50% para os demais na região diretamente afetada pelos efluentes. Essa melhora se estende ao extremo oposto da baía com melhoras de cerca de 10% a 20% na região de São Gonçalo.

#### **4.4.3 Cenário III**

Já o terceiro cenário apresentado neste estudo referiu-se à redução dos poluentes ligados principalmente ao município de São Gonçalo, onde seus efluentes domésticos são incorporados pela baía principalmente através do rio Imboassú, e alguns canais que desaguam diretamente na baía. As figuras a seguir ilustram os resultados dos cenários “a”, “b” e “c” e cenário atual.



# Amônia

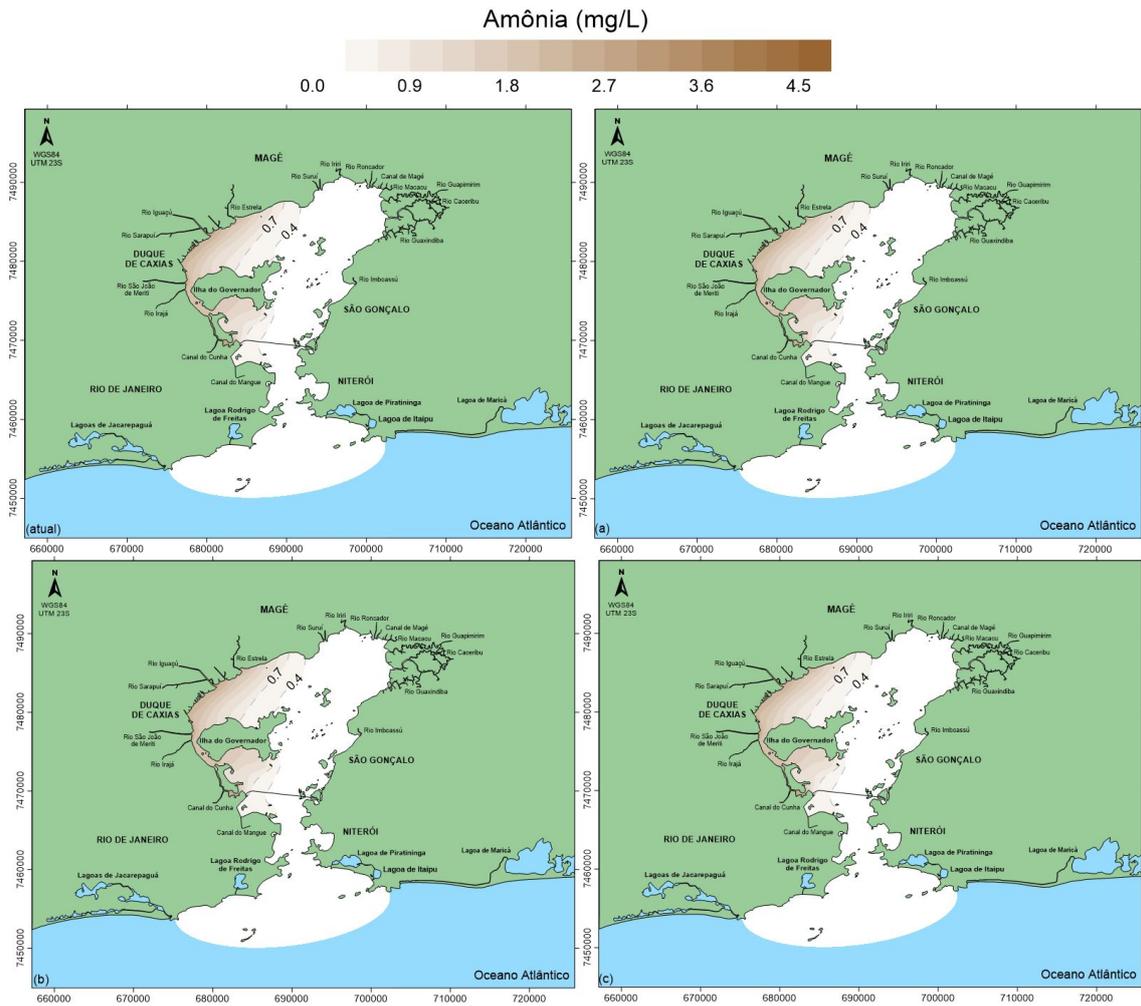


Figura 4.40: Resultado das concentrações de Amônia para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário III

# Nitrato

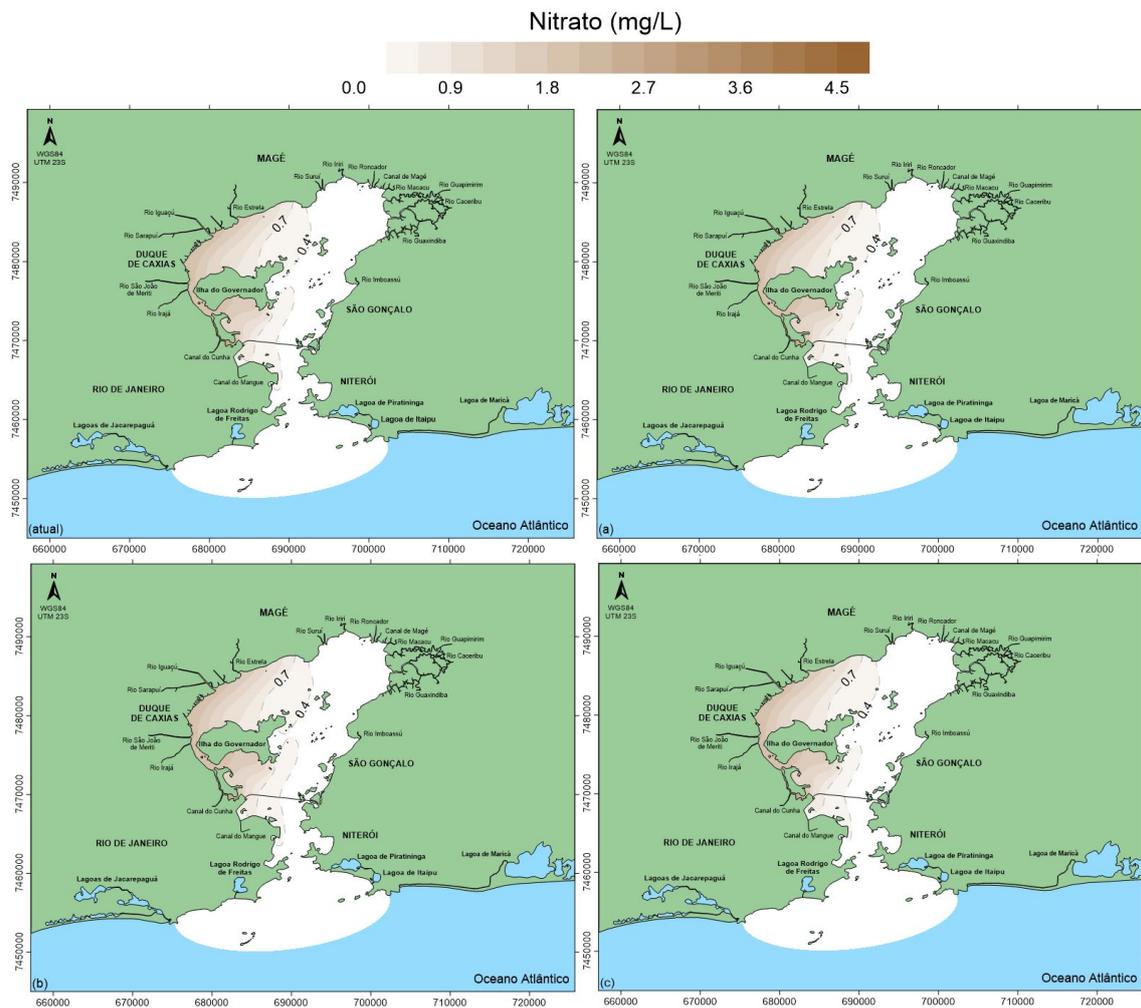


Figura 4.41: Resultado das concentrações de Nitrato para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário III

# Fósforo Total

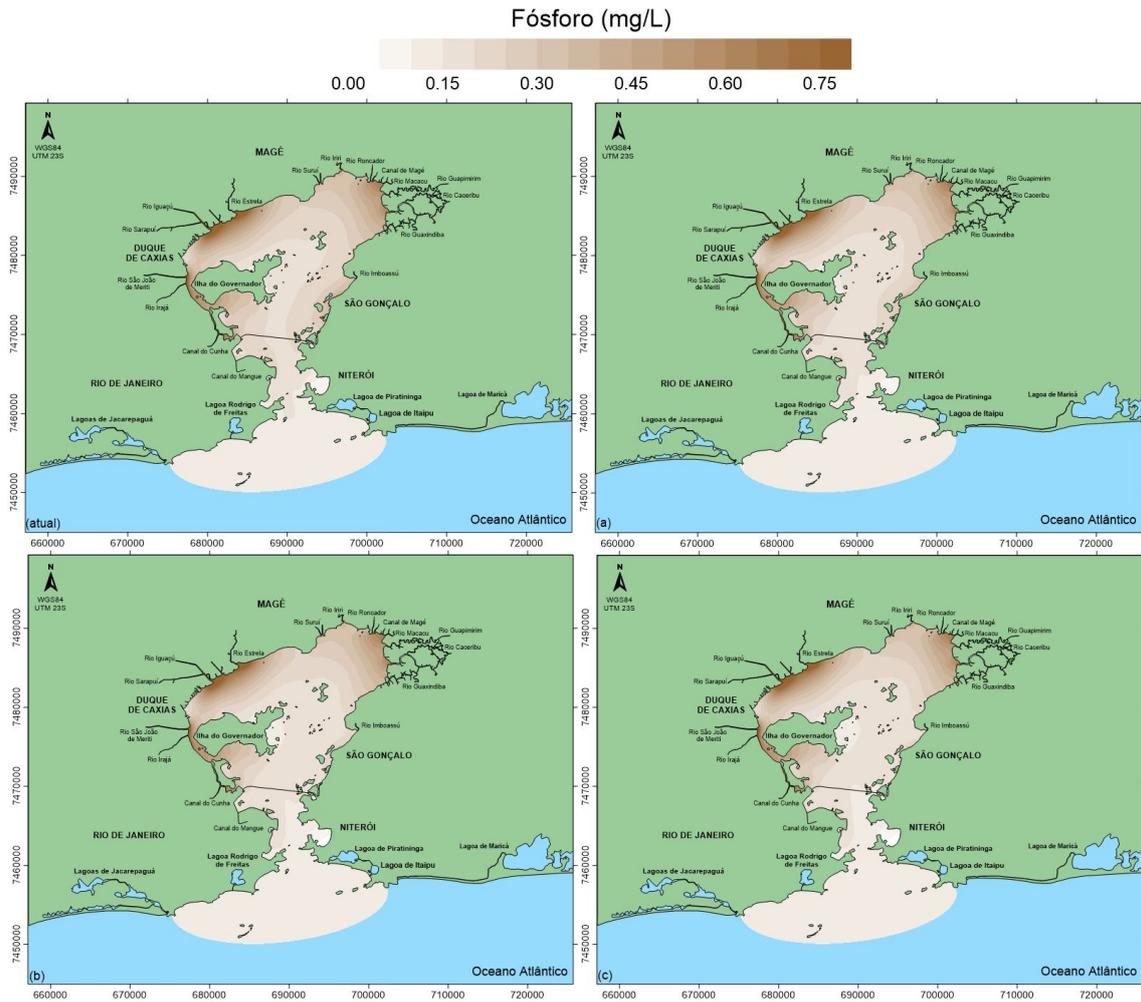


Figura 4.42: Resultado das concentrações de PT para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário III

O modelo mostrou uma melhora significativa em relação às concentrações de matéria orgânica e em menor grau, de fósforo total, para os compostos nitrogenados, as principais fontes localizam-se na região Norte-Noroeste da baía (cenário I e II) e, portanto, não foi observado uma redução expressiva neste cenário. A seguir são apresentados os resultados em formato de percentual de redução da comparação entre cenário atual e cenário “c”.

## DBO

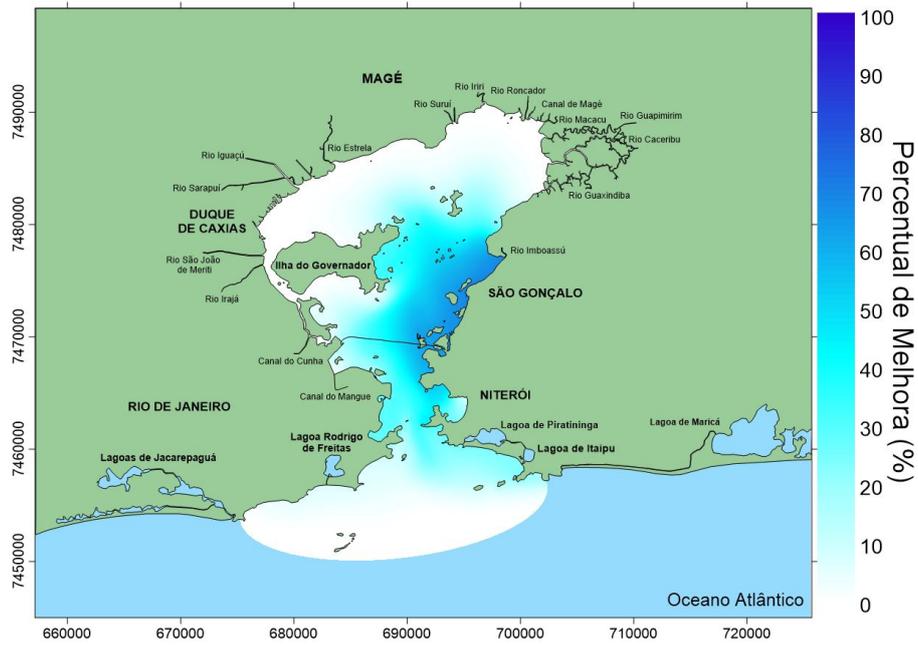


Figura 4.43: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para DBO, relativo ao cenário III

## Amônia

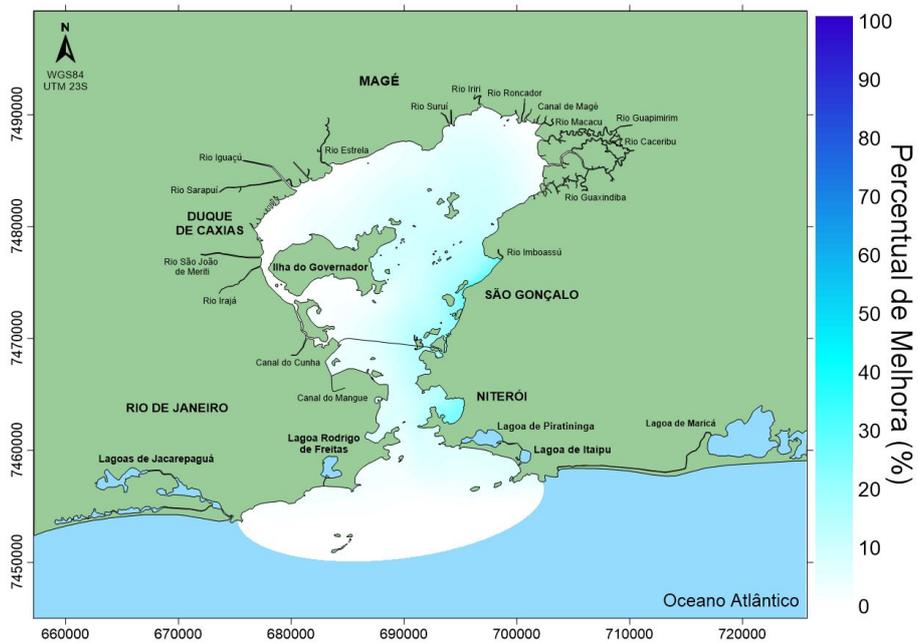


Figura 4.44: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Amônia, relativo ao cenário III

## Nitrato

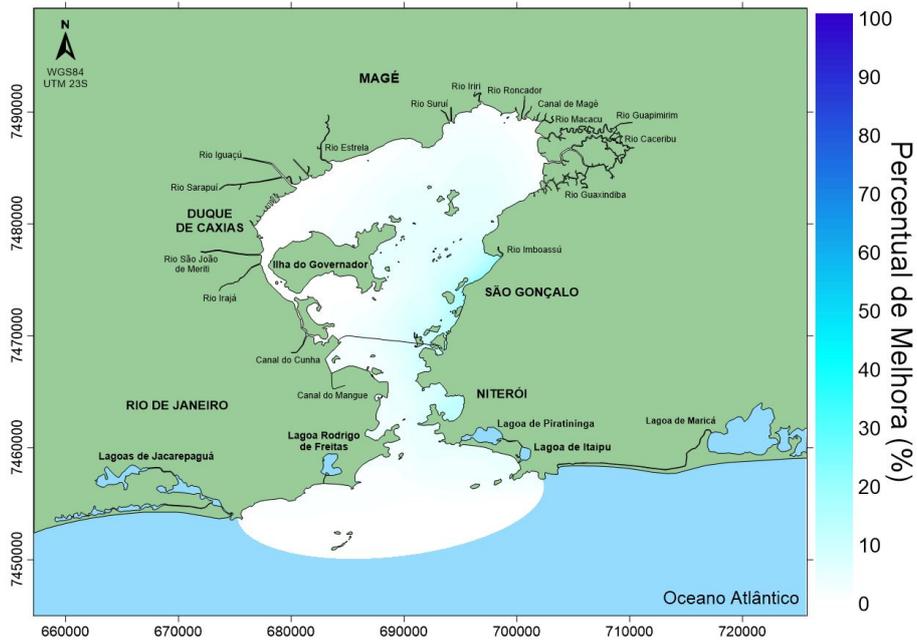


Figura 4.45: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Nitrato, relativo ao cenário III

## Fósforo Total

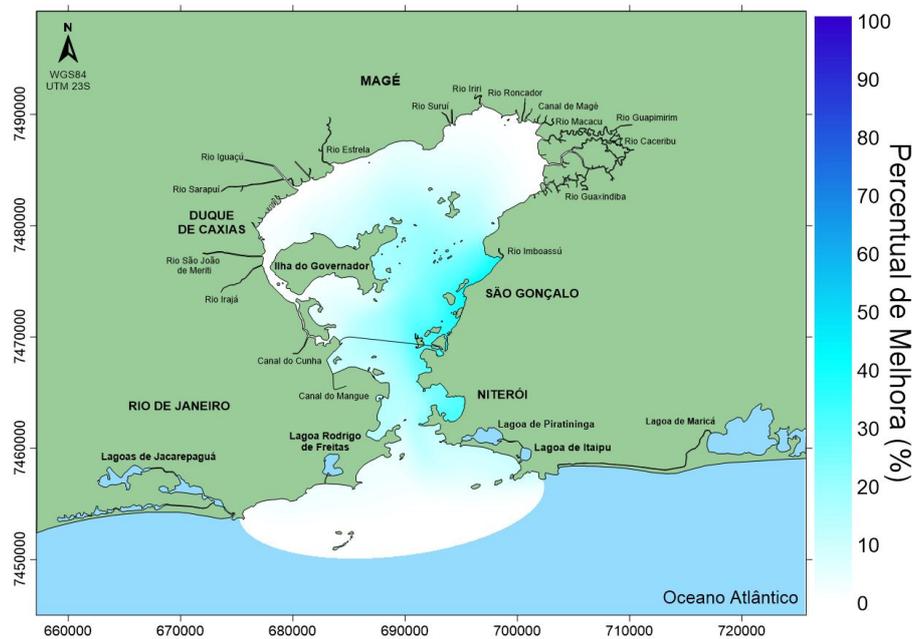


Figura 4.46: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para PT, relativo ao cenário III

A melhora percentual relacionada com a concentração de matéria orgânica deste cenário se mostrou extremamente significativa na qualidade da água geral da baía, observou-se uma redução de cerca de 30% na região da marina da Glória e enseada de Botafogo, praia de Icaraí e São Francisco, além de 20% na região oceânica leste da baía. Para os demais componentes, essa redução foi pouco expressiva com reduções na ordem de 5% a 15% nas regiões informadas anteriormente.

#### **4.4.4 Cenário IV**

O último cenário apresentado neste estudo representa a soma de todos os três anteriormente abordados. Engloba os afluentes da região Oeste, Norte-Noroeste e Leste e inclui a grande maioria das fontes incidentes sobre o estuário. As figuras a seguir apresentam os resultados para cada um dos componentes analisados de acordo com o percentual de cobertura da nova rede de saneamento.





# Nitrato

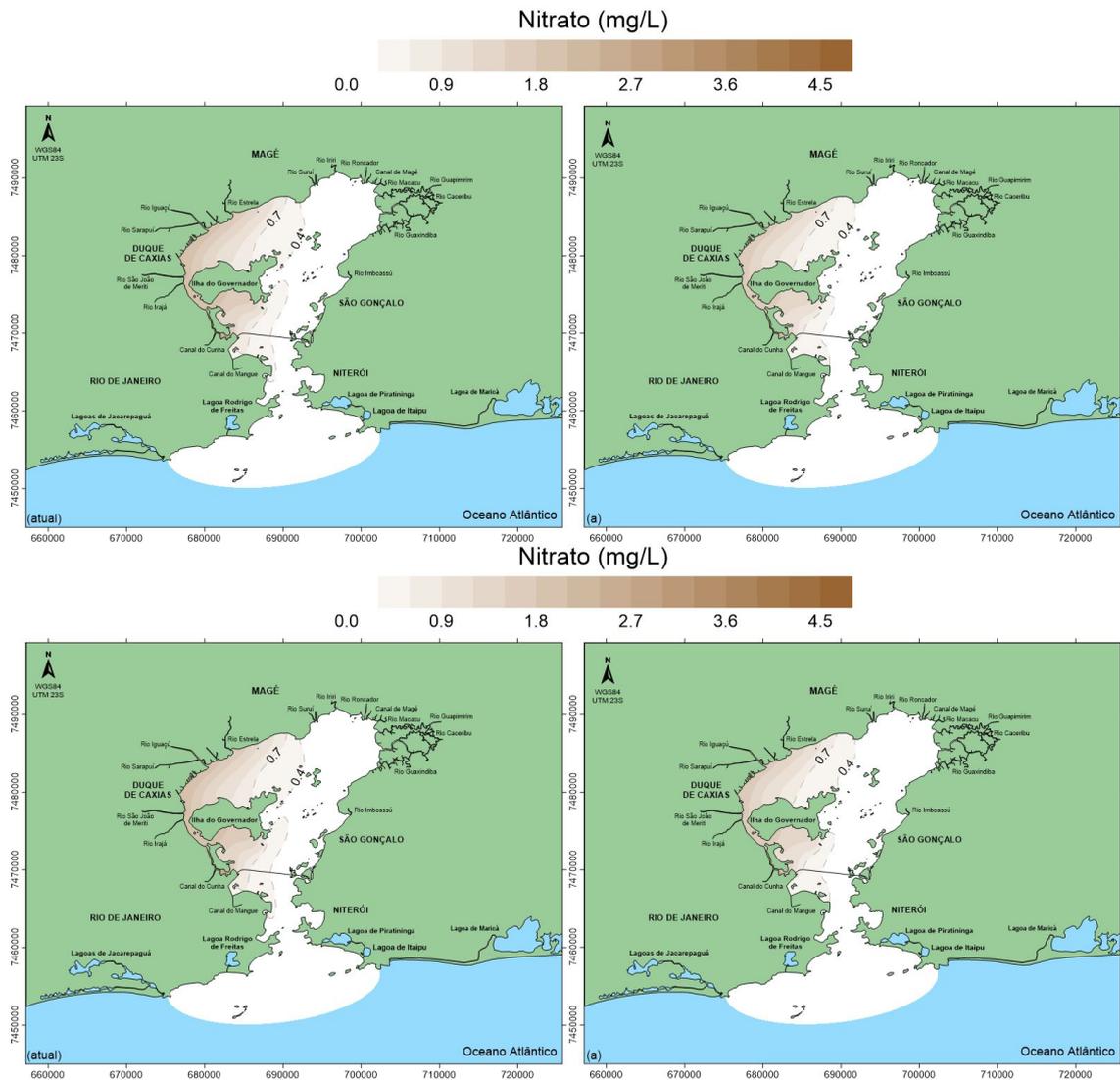


Figura 4.49: Resultado das concentrações de Nitrato para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário IV

## Fósforo Total

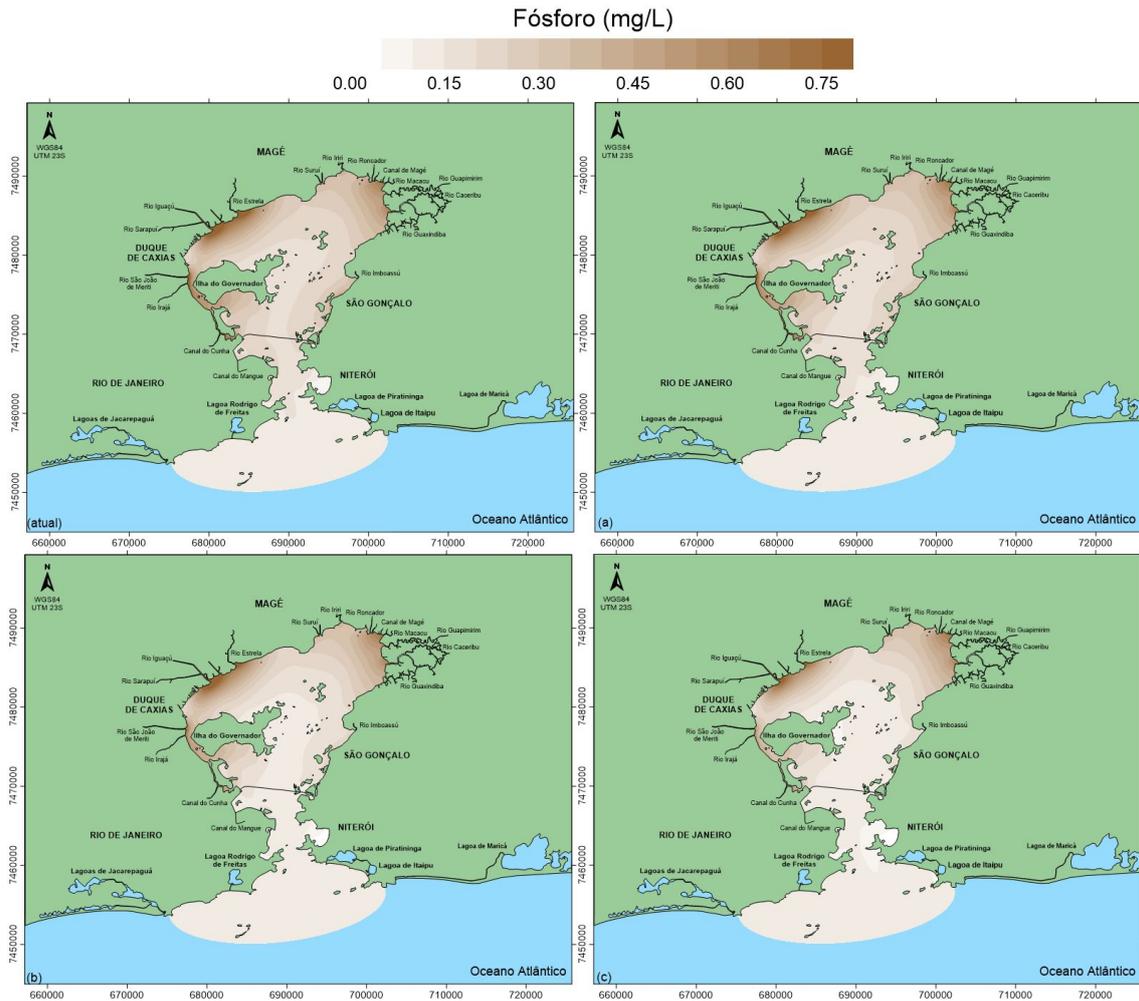


Figura 4.50: Resultado das concentrações de PT para o cenário atual, e de respectivamente 30%, 60% e 80% de cobertura de tratamento referente ao cenário IV

Observa-se que houve uma redução significativa para todos os componentes, em maior grau para a DBO, onde grande parte da baía apresenta concentrações inferiores a 5 mg/L, condizente com a resolução do CONAMA para classe 2. Apesar de uma redução significativa os compostos nitrogenados ainda apresentam valores acima de 1,0 mg/L na região Noroeste da baía, mesmo com maiores níveis de redução dos compostos. O mesmo acontece para o fósforo total na grande maioria da BG com valores acima de 0,1 mg/L.

## DBO

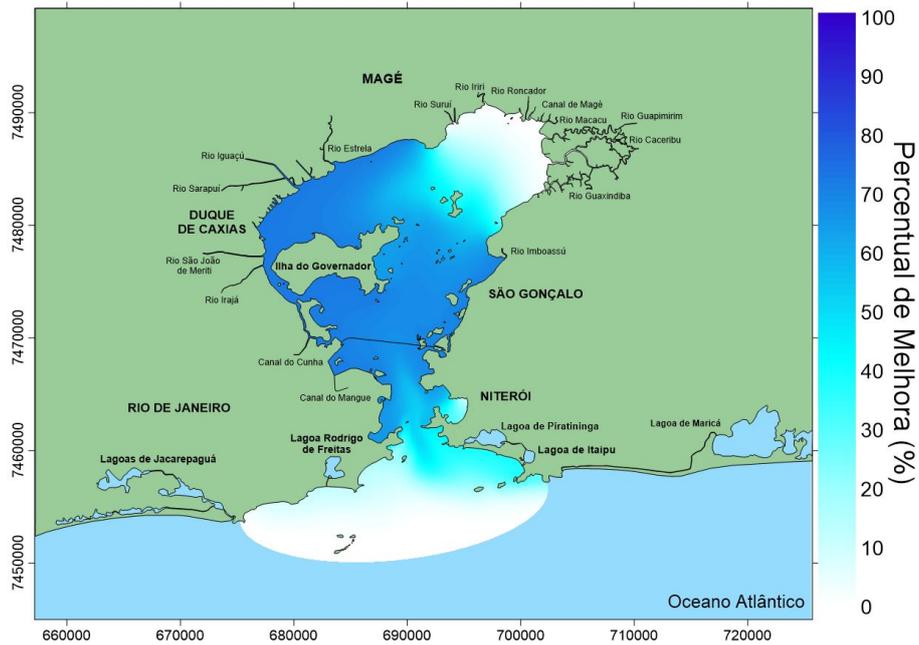


Figura 4.51: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para DBO, relativo ao cenário IV

## Amônia

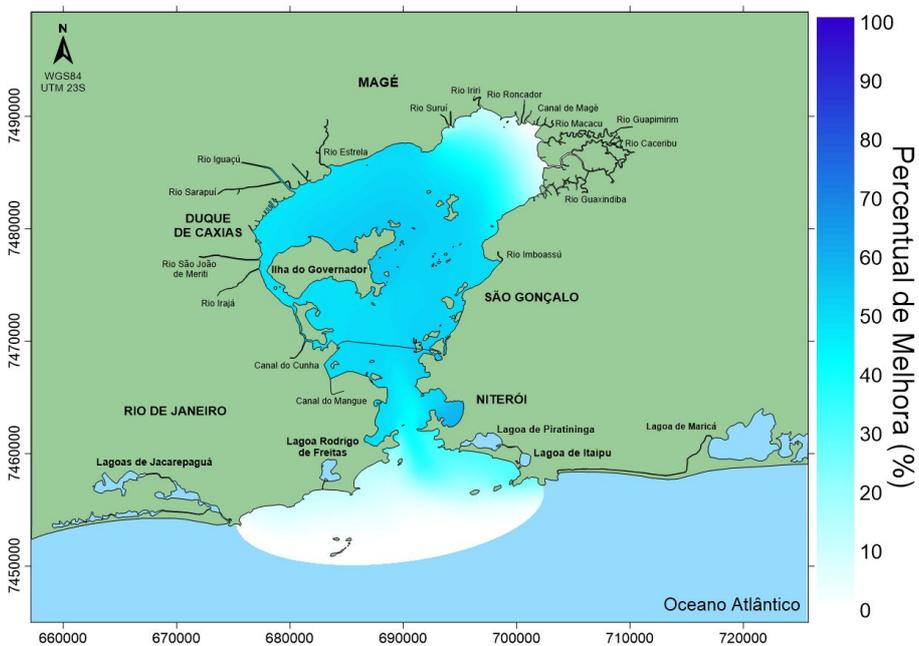


Figura 4.52: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Amônia, relativo ao cenário IV

## Nitrato

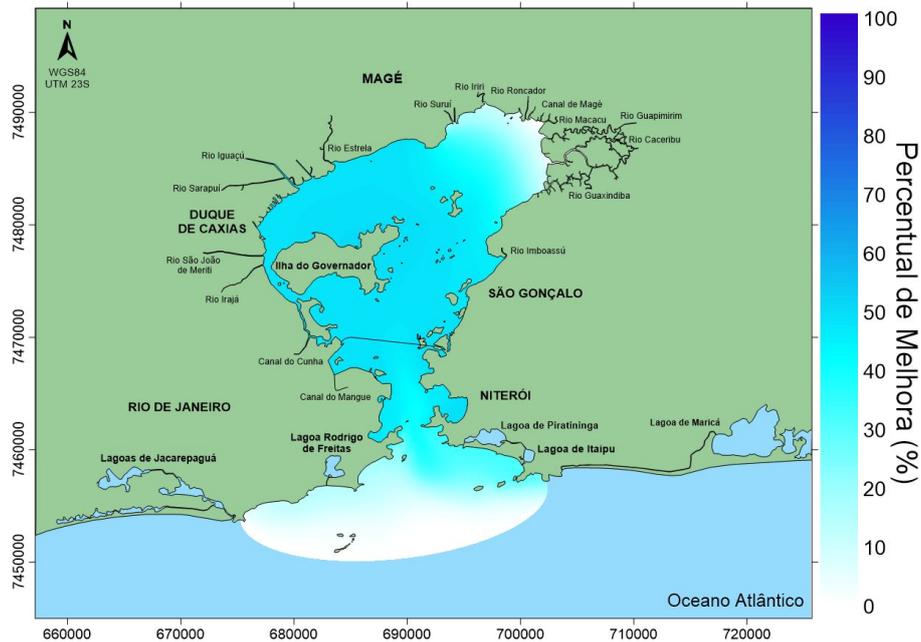


Figura 4.53: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para Nitrato, relativo ao cenário IV

## Fósforo Total

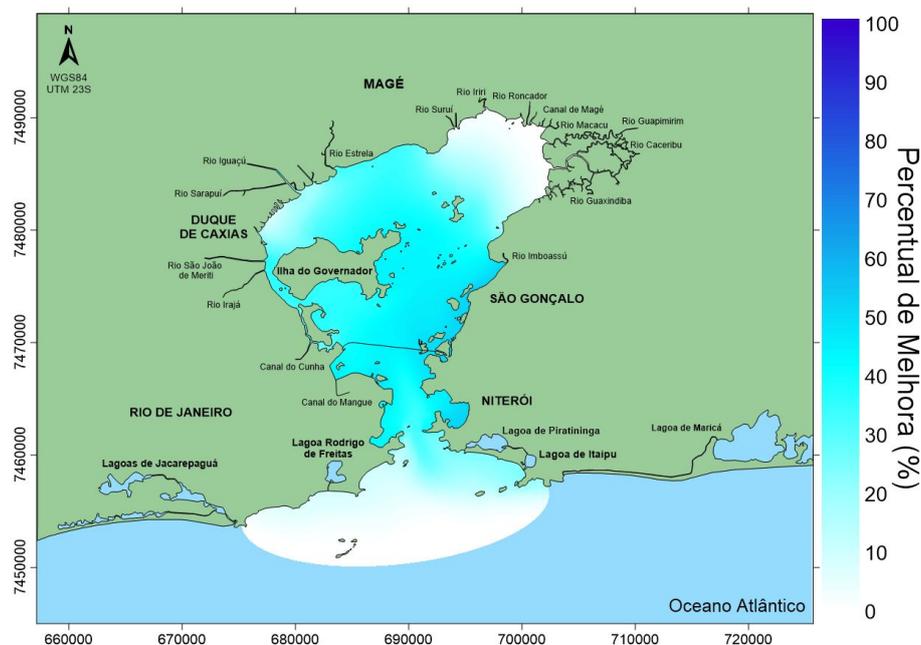


Figura 4.54: Percentual de redução relativo ao cenário atual e cenário "c" (80% de cobertura) para PT, relativo ao cenário IV

Analisando os resultados apresentados anteriormente em forma de percentual de redução de poluente fica mais evidente a melhora significativa da qualidade ambiental do estuário. Para DBO houve uma redução geral acima de 65% em toda a região interior da BG, com impactos significativos em regiões como a marina da Glória, enseada de Botafogo, e praias de Icaraí e São Francisco, os efeitos da melhora foram, inclusive, notados nas praias da região oceânica Leste da Baía, com redução cerca de 35% de redução de matéria orgânica. Para os compostos nitrogenados e fósforo, esses valores ficaram próximos de 50% e 30%.

## 4.5 Análise de Investimentos

Afim de se obter uma melhor compreensão dos investimentos que seriam necessário para se alcançar as melhorias introduzidas nas sessões anteriores, este estudo utilizou-se de dados disponibilizados pelo atlas esgotos disponibilizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) através do site: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/atlas-esgotos>>. As informações são apresentadas em montantes totais de investimentos necessário até o ano de 2035, considerando o crescimento esperado dos municípios e podem ser analisadas na figura a seguir.

### INVESTIMENTOS NECESSÁRIOS POR MUNICÍPIO (MILHÕES DE R\$)

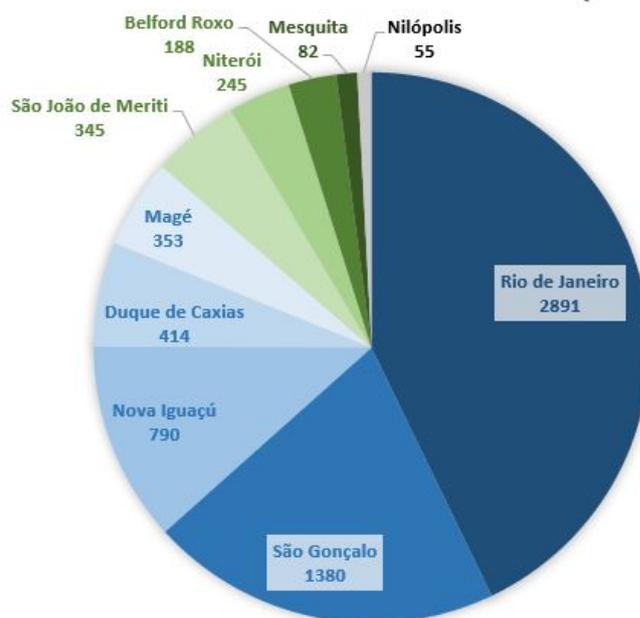


Figura 4.55: Montante de investimento necessário até 2035 em saneamento por município da RHBG

Fonte: Adaptado de ANA (2019)

O custo necessário para todas as regiões analisadas (cenário IV) representa um total de 6.7 bilhões de reais, sendo que a maior parcela refere-se ao município do Rio de Janeiro, o qual somente uma parte de sua área encontra-se analisado pelo cenário I (R\$3,705 bilhões), e uma parcela insignificante pelo cenário II. Os cenários II e III, que representaram as maiores reduções dos poluentes no interior da BG representaram respectivamente 33% (R\$ 2,227 bilhões) e 24% (R\$ 1,625 bilhões) do total dos custos dos cenários utilizados. A título de curiosidade o custo total necessário para todos os municípios pertencentes à RHBG seria de aproximadamente 7,5 bilhões de reais.

# Capítulo 5

## Conclusões

De posse do apresentado anteriormente, é possível atestar que o modelo apresentou comportamento semelhante tanto ao observado empiricamente, quanto ao analisado em diferentes estudos bibliográficos de modelagem computacional, mostrando também a possibilidade de se usar os dados disponibilizados pelo projeto Baías do Brasil para aprofundar a compreensão de sistemas complexos como foi o caso deste estudo.

O modelo hidrodinâmico realizado encontrou velocidades de correntes máximas, em módulo, da ordem de 1,2 m/s, e uma elevação máxima e mínima da coluna d'água de respectivamente 1,4 e -0,2 metros em relação ao datum Imbituba (0,69m acima do nível médio do mar). Observaram-se correntes predominantes na região do canal principal da baía e zonas de estagnação na região noroeste, e de um modo geral verificou-se a verossimilhança do modelo quando comparado ao observado in-situ.

Os modelos de Taxa de Renovação e Idade da Água mostraram as principais entradas de águas no sistema (região nordeste e fronteira oceânica), além de indicarem uma idade máxima de cerca de 40 dias para as águas em um cenário típico de verão. Resultados corroborados por trabalhos que abordaram temas semelhantes.

O modelo representando o cenário atual apresentou concentrações extremamente insalubres e elevadas para matéria orgânica e fósforo em basicamente todo o perímetro da baía, sendo a região Leste, e Norte-Noroeste as mais impactadas pela atividade desse setor. Os compostos nitrogenados tiveram comportamento destoante dos demais, para estes, as concentrações mais elevadas foram observadas em maior grau na parte noroeste do estuário, levantando um questionamento se o setor de saneamento é de fato o principal responsável pela contaminação por esses componentes na baía.

Os cenários abordados tiveram por intuito buscar regiões críticas para os investimentos em saneamento, e seus reflexos sobre a qualidade da água da baía de Guanabara, como esperado, as regiões da baixada Fluminense, o município de São Gonçalo e a capital foram em ordem de relevância, os municípios críticos para rece-

berem esse tipo de investimento.

Os modelos de qualidade da água, mesmo com uma severa carência de dados confiáveis de medição no local, barreira típica na maioria dos trabalhos com esse escopo, obtiveram resultados fidedignos se comparados com os dados apresentados pelo Inea. Recomenda-se, porém, que para próximos trabalhos seja realizada uma medição de campo mais detalhada contemplando regiões críticas que foram apresentadas neste estudo, esse maior detalhamento servirá para corroborar com as hipóteses utilizadas neste estudo da origem das principais fontes de poluentes incidentes sobre o estuário.

Por fim, considerando-se todas as regiões abordadas por esse estudo (cenário IV), pôde-se verificar pelo modelo a melhora extremamente significativa da qualidade da água geral da baía de Guanabara, com reduções da ordem de 70% para matéria orgânica, e 50% para fósforo e compostos nitrogenados, elevando consideravelmente a qualidade da água do sistema e mostrando de forma promissora, que com os investimentos corretos, possibilita-se um retorno de uma fauna e flora equilibrada a uma das regiões mais icônicas do país. Espera-se, portanto, que este estudo sirva de respaldo para futuras análises e ações referentes ao setor de saneamento tanto na baía de Guanabara, quanto em outras diversas regiões que sofrem com as mesmas precariedades.

# Referências Bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7229/1992 – Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos**. Rio de Janeiro, 1992.
- ANDRADE, Verônica Silveira de. **Análise de Hidrodinâmica Ambiental e de Qualidade de Água na Baía de Guanabara via Modelagem Computacional**. 2018. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe/ufRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- ANDRIONI, Léo de Lacerda. **Resposta da Baía de Guanabara a eventos extremos**. Dissertação de Mestrado Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013. 71 p.
- BÉRGAMO, Alessandro Luvizon. **Características hidrográficas, da circulação e dos transportes de volume e sal na Baía de Guanabara (RJ): variações sazonais e moduladas pela maré**. Tese de Doutorado - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2006.
- BRITTO, Ana Lucia. **Implantação de infra-estrutura de saneamento na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: uma avaliação das ações do programa de despoluição da baía de guanabara**. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 63-64, 31 maio 2003. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais (RBEUR). <http://dx.doi.org/10.22296/2317-1529.2003v5n1p63>.
- CARVALHO, A. M. F. M. D. **BAÍA DE GUANABARA: OS ITINERÁRIOS DA MEMÓRIA**. Revista USP, [S. I.], n. 30, p. 156-169, 1996. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i30p156-169. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/25915>. Acesso em: 21 fev. 2020
- CERHI, Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro. **Resolução CERHI-RJ no 107 de 22 de maio de 2013**. Disponível em: [http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mda5/~edisp/inea\\_009662.pdf](http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mda5/~edisp/inea_009662.pdf). Acesso em: 13 jan. 2020.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357 de 17 de maio de 2005**. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em 19 de fev. 2020
- COSTA, Maria Angélica Maciel. **Da lama ao caos: um estuário chamado Baía de Guanabara**. Cad. Metrop., São Paulo, v. 17, n. 33, p. 15-39, Maio 2015 . Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2236-99962015000100015&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2236-99962015000100015&lng=en&nrm=iso). acesso em: 13 jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2015-3301>.
- CUNHA, Maria de Fátima Rodrigues da. **Modelagem Estocástica Conjunta de Precipitação e Nível do Mar na Baía de Guanabara**. Dissertação de Mestrado Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1996.
- FEITOSA, Renato Castiglia. **Ocean outfalls as an alternative to minimizing risks to human and environmental health**. Ciência saúde coletiva, v. 22, n. 6, p. 2037–2048, 2017.

- FÉRES, José. **Em Águas turvas: governança do programa de despoluição da Baía de Guanabara**. Repositório do Conhecimento, IPEA. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/6762>. Acesso em: 13 jan. 2020.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo de 2010**. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 13 jan. 2020.
- ITB, Instituto Trata Brasil. **Ranking do Saneamento 2020**. 2019. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/estudos/estudos-itb/itb/ranking-do-saneamento-2020>. Acesso em: 13 jan. 2020.
- JAFFE, Daniel A.. 12 The Nitrogen Cycle. **International Geophysics**, [s.l.], p. 263-284, 1992.
- JICA. JAPAN INTERNACIONAL COOPERATION AGENCY. **The Study on Management and Improvement of the Environmental Conditions of Guanabara Bay of Rio de Janeiro, The Federative Republic of Brazil**. Rio de Janeiro, Interim Report. 2002.
- JICA. JAPAN INTERNACIONAL COOPERATION AGENCY. **The Study on Management and Improvement of the Environmental Conditions of Guanabara Bay of Rio de Janeiro, The Federative Republic of Brazil**. Rio de Janeiro, Main Report. 2003.
- KAUFMANN, Clarisse Lacerda Gomes. **Estudo Hidrodinâmico e de Qualidade de Água Após Revitalização da Circulação do Canal do Fundão, Baía de Guanabara – RJ**. 2009. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- KCI. PRA-BAÍA: **Plano de Recuperação Ambiental da Baía de Guanabara e sua Bacia Hidrográfica**, 2016. (Programa de Fortalecimento da Governança e da Gestão da Baía de Guanabara Convênio de Cooperação Técnica: ATN/OC-14223-BR SDP No: SQC No 01/2014).
- LAMPARELLI, Marta Condé. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. São Paulo: USP/ Departamento de Ecologia., 2004. 235 f. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2004.
- LIMA, Elizabeth Cristina da Rocha. **Qualidade de Água da Baía de Guanabara e Saneamento: Uma Abordagem Sistêmica**. 2006. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento Energético, Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- MACHADO, Bernardo Vianna Zurlí; SILVA, Renan Marcelo Leal Campos Fonseca de. **Análise da Influência da Baía de Guanabara na Qualidade da Água das Praias Oceânicas Adjacente através de Modelagem Computacional**. Projeto Final de Curso. Engenharia Ambiental., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- MALTA, Fernanda Siqueira. **Estudo de Correntes de Maré do Complexo Estuarino da Baía de Guanabara - RJ**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- MOTTA, Luiza do Amaral Thompson; FARIA, Pedro Ivo Dias de. **Avaliação do Impacto do Lançamento de Poluentes por Emissários Submarinos e Fontes Costeiras Pontuais na Balneabilidade das Praias do Rio de Janeiro e Niterói**. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Ambiental., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- OLIVEIRA, Heline Alves de. **Aplicação do Modelo Numérico Hidrodinâmico Delft3D na Baía de Guanabara**. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharel em Oceanografia., Centro Universitário Monte Serrat, Santos, 2009.

- PEREIRA, Talita Reis Antunes. **Impacto da Descarga de Efluentes Sanitários dos Rios sobre a Qualidade das Águas da Baía de Guanabara**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, 2017.
- PONTE, Laís; PORTO, André Carneiro. **Análise da Taxa de Renovação e Idade da Água do Sistema Estuarino da Baía de Guanabara**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- ROSMAN, Paulo Cesar Colonna. **Referência Técnica do SisBaHiA**. 2020. Disponível em: <[http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V10a.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V10a.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2020.
- ROSMAN, Paulo Cesar Colonna et al. **Projeto Baías do Brasil: Baía de Guanabara (RJ)**. 2018. Disponível em: <http://www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br/>. Acesso em: 15 fev. 2021.
- SAMPAIO, Marcelle. **Estudo de Circulação Hidrodinâmica 3D e Trocas de Massas D'água da Baía de Guanabara - RJ**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- SANTOS, Leila Heizer. **Um modelo para trajetória de partículas em corpos de água rasos: O caso do Emissário de Icaraí - Baía de Guanabara**. Dissertação de Mestrado Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1995.
- SANTOS, Suzan Juliana da Costa. **Determinação do estado trófico a partir da aplicação dos índices O'Boyle e TRIX nos compartimentos da Baía de Guanabara, RJ**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2015.
- SCHEEFFER, M., 2001, **Uma Avaliação do Controle Industrial do Programa de Despoluição da Baía de Guanabara: o caso das 55 indústrias prioritárias**, Dissertação de Mestrado, Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SMITH, V.h.; TILMAN, G.d.; NEKOLA, J.c.. **Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems**. Environmental Pollution, [s.l.], v. 100, n. 1-3, p. 179-196, 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0269-7491\(99\)00091-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0269-7491(99)00091-3).
- SNIS, Sistema Nacional de Informações de Saneamento, **Série histórica de Indicadores e Água e Esgoto**. Disponível em: <http://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em: 13 jan. 2020.
- VALENTE, José Pedro Serra; PADILHA, Pedro Magalhães; SILVA, Assunta Maria Marques. **Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu - SP**. Eclét. Quím., São Paulo, v. 22, p. 49-66, 1997. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-46701997000100005>.
- VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol. 1. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, n. I).
- XAVIER, Andrea Gallo. **Estudo da Circulação Hidrodinâmica e do Transporte de Contaminante no Estuário do Rio Iguaçu – Baía de Guanabara**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

YIN, Kedong; LIN, Zhifeng; KE, Zhiyuan. **Temporal and spatial distribution of dissolved oxygen in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters.** Continental Shelf Research, [s.l.], v. 24, n. 16, p. 1935-1948, out. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2004.06.017>.