



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA BAÍA DA GUANABARA NA QUALIDADE DA ÁGUA DAS PRAIAS OCEÂNICAS ADJACENTES ATRAVÉS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Bernardo Vianna Zurli Machado

Renan Marcelo Leal Campos Fonseca da Silva

Projeto de graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro
Agosto de 2010

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA BAÍA DA GUANABARA NA QUALIDADE DA ÁGUA
DAS PRAIAS OCEÂNICAS ADJACENTES ATRAVÉS DA MODELAGEM
COMPUTACIONAL

Bernardo Vianna Zurli Machado
Renan Marcelo Leal Campos Fonseca da Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinado por:

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph. D.

Prof. Iene Christie Figueiredo, D.Sc.

Prof. Jorge Prodanoff, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
Agosto de 2010

MACHADO, BERNARDO VIANNA ZURLI e DA SILVA,
RENAN MARCELO LEAL CAMPOS FONSECA

Análise da Influência da Baía da Guanabara na
Qualidade da Água das Praias Oceânicas Adjacentes através
da Modelagem Computacional / Bernardo Vianna Zurli
Machado e Renan Marcelo Leal Campos Fonseca da Silva –
Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2010.

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

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Projeto de Graduação – UFRJ / POLI / Curso de
Engenharia Ambiental, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 108-111.

1. Modelagem Ambiental; 2. Baía de Guanabara; 3.
Modelo de Qualidade de Água; 4. Circulação Hidrodinâmica

I. Paulo Cesar Colonna Rosman; II. Universidade Federal
do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Ambiental; III. Análise
da Influência da Baía da Guanabara na Qualidade da Água
das Praias Oceânicas Adjacentes através da Modelagem
Computacional.

*“A melhor forma de prever o futuro é
criá-lo.”*

Peter Drucker.

Agradecimentos – Bernardo Vianna Zurli Machado

Dedico esse projeto a todas as pessoas que fizeram, fazem e farão parte de minha vida. Às que fizeram e fazem, todos contribuíram, em maior ou menor grau, ao caminho da vida que me levou a esse projeto, culminando na minha graduação. Às que farão, não quero deixar de homenageá-las por um mero descompasso cronológico. Infelizmente, as páginas e a memória não me permitem nomear todas e por isso não vou me perder na árdua, porém vã, tarefa de agradecer quem já sabe do meu agradecimento. Perco, no entanto, uma boa oportunidade de citar os que não sabem de minha gratidão.

Contudo, reservo-me o direito de citar nominalmente meus pais, Ricardo Zurli Machado e Maria Cristina Vianna Machado, sabendo que fosse esse trabalho um estudo hidrodinâmico, um poema, uma parede ou ainda que não fosse, ficariam igualmente orgulhosos.

Bernardo Vianna Zurli Machado

Agradecimentos – Renan Marcelo Leal Campos Fonseca da Silva

Meus Agradecimentos,

Agradeço a Deus, pela crescente importância que vem assumindo em minha vida.

Agradeço a meu pai Severino, maior idealizador de minha faculdade, e à minha mãe Lúcia simplesmente por existir.

Agradeço ao meu irmão Ramon pela convivência durante toda a minha vida, e à minha família, fundamental em todos os momentos.

Agradeço a todos os amigos, em especial os que fiz ao longo destes anos de graduação, sem os quais minha vida não faria sentido.

Agradeço a todos os mestres de minha vida, em especial os que me acompanharam mais de perto, como o orientador Paulo Rosman, Helói, Maria Helena, Isaac e Iene.

Agradeço à França, por ter me acolhido durante um ano maravilhoso de minha vida, em especial à Ecole Centrale Marseille e à COPRAMEX.

Agradeço a toda a equipe do AECO, que muito me entusiasmou e me auxiliou neste projeto de fim de curso.

Renan Marcelo Leal Campos Fonseca da Silva

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Análise da Influência da Baía da Guanabara na Qualidade da Água das Praias
Oceânicas adjacentes através da Modelagem Computacional.

Bernardo Vianna Zurli Machado
Renan Marcelo Leal Campos Fonseca da Silva

Agosto/2010

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Curso: Engenharia Ambiental

As praias oceânicas da região metropolitana do Rio de Janeiro, apesar de fundamentais para o lazer da população local, muito frequentemente não atendem à condição de banho definida pela legislação pertinente, a resolução CONAMA 274. Especula-se que, pelas significativas cargas de poluição observadas na Baía de Guanabara, a qualidade de água dessas praias seja influenciada pela baía. De forma a avaliar a magnitude dessa influência, utilizou-se a modelagem computacional através do SisBaHiA®, programa desenvolvido pela COPPE voltado para a modelagem hidrodinâmica. Inicialmente foi realizado o estudo hidrodinâmico a fim de se conhecer o padrão de circulação das águas. Dois cenários foram estudados: o primeiro característico de entradas de ventos usuais e o segundo com ventos típicos de frente fria, ambos sob a influência da maré. A partir do modelo hidrodinâmico, foram realizados três tipos de simulação: um estudo de troca de massas d'água da baía com o mar para saber se a água das praias possui grandes contribuições de massa da baía; derramamentos de óleo no interior da baía para avaliar a probabilidade de esse vazamento alcançar as praias oceânicas; e contribuições de coliformes a partir dos rios afluentes à baía para verificar se a baía contribui com cargas significativas às praias oceânicas. Após as simulações verificou-se que a Baía de Guanabara não influencia acentuadamente a qualidade e a condição de balneabilidade das águas das praias oceânicas da Grande Rio.

Palavras chave: Modelagem Ambiental; Baía de Guanabara; Qualidade de Água; Circulação Hidrodinâmica; Modelo Lagrangeano.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Engineer.

Analysis of the Guanabara Bay Influence on the Water Quality of the Adjacent Oceanic Beaches by Using Computer Modeling

Bernardo Vianna Zurli Machado
Renan Marcelo Leal Campos Fonseca da Silva

August/2010

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman

Course: Environmental Engineering

The oceanic beaches of Rio de Janeiro's metropolitan area, although fundamental for the local population's leisure, frequently don't satisfy the recreational bathing regulation, CONAMA 274. It is said that, due to the high levels of pollution observed on the Guanabara bay, the beaches' water quality is influenced by the bay's pollution. In order to evaluate the magnitude of this influence, computational modeling through SisBaHiA®, a software developed by COPPE specifically for hydrodynamic modeling, was used. A hydrodynamic study was initially carried out to understand the currents involved. Two scenarios were studied: one with typical winds and another with cold front winds, both under tidal influence. Using the hydrodynamic model's results, three different simulations were made: a water mass interaction study to know if the oceanic beaches' water receives significant amounts of water from the bay; oil spills inside the bay to evaluate the probability of these spills reaching the oceanic beaches; and coliform discharges from the bay's affluent rivers to check if they contribute with significant levels of pollution to the oceanic beaches. After the simulations, the study concluded that the Guanabara Bay doesn't influence the water quality of Rio de Janeiro's oceanic beaches in a very accentuated way.

Keywords: Environmental Modeling; Guanabara Bay; Water Quality; Hydrodynamics Circulation; Lagrangian Modeling.

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos	1
3	Área de Estudo	2
3.1	Baía de Guanabara	2
3.2	Praias Oceânicas	4
3.3	Legislação Pertinente	5
4	Metodologia	7
4.1	Modelagem Computacional e o SisBaHiA®.....	8
4.2	Modelo de Circulação Hidrodinâmica	9
4.2.1	Equações Governantes	10
4.2.2	Condições de Contorno	11
4.2.3	Condições Iniciais.....	11
4.3	Modelo de Transporte Euleriano.....	11
4.3.1	Equações Governantes	12
4.3.2	Condições Iniciais e de Contorno	12
4.4	Modelo de Transporte Lagrangeano.....	13
4.4.1	Equações Governantes	13
4.4.2	Condições Iniciais e de Contorno	14
5	Estudo de Circulação Hidrodinâmica	14
5.1	Dados de Implementação do Modelo	15
5.1.1	Contornos do Modelo	15
5.1.2	Malha	15
5.1.3	Batimetria	18
5.1.4	Rugosidade	19
5.1.5	Massa Específica	20
5.1.6	Maré	21
5.1.7	Rios	23
5.1.8	Vento	26
5.2	Condições de Contorno.....	26
5.3	Condições Iniciais	29

5.4	Resultados e Análise.....	29
6	Estudo de Troca de Massas d'Água.....	47
6.1	Dados de Implementação do Modelo	47
6.1.1	Caso 1	47
6.1.2	Caso 2.....	47
6.2	Resultados e Análise.....	48
6.2.1	Caso 1	48
6.2.2	Caso 2.....	57
7	Colimetria.....	64
7.1	Dados de Implementação do Modelo	64
7.2	Resultados e Análise.....	65
8	Vazamentos de Óleo	74
8.1	Dados de Implementação do Modelo	76
8.2	Resultados e Análise.....	79
9	Conclusões.....	92
10	Referências Bibliográficas.....	93

Lista de Figuras

Figura 1: Vista de satélite da Baía de Guanabara.....	3
Figura 2: Principais praias oceânicas adjacentes à Baía de Guanabara.....	4
Figura 3: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH).....	10
Figura 4: Carta náutica da Baía de Guanabara de 2009. Escala de 1:50.000.....	16
Figura 5: Malha de discretização do domínio modelado..	17
Figura 6: Batimetria utilizada no modelo, com indicação das isolinhas da profundidade do fundo do domínio modelado.....	18
Figura 7: Tipos de fundo da Baía de Guanabara	20
Figura 8: Ciclo de maré gerada pelo modelo hidrodinâmico para um período de 30 dias.....	23
Figura 9: Mapa com a localização dos rios utilizados no modelo hidrodinâmico.	25
Figura 10: Gráfico da série temporal de ventos de outubro de 2000 fornecida ao modelo como dados de entrada.....	27
Figura 11: Gráfico da série temporal de ventos de maio de 2000 fornecida ao modelo como dados de entrada..	28
Figura 12: Estações de registro dos resultados gerados pelo modelo hidrodinâmico .	30
Figura 13: Cenário de Ventos Usuais - A linha vermelha indica a variação ao longo do tempo da elevação da Estação 2. A linha preta mostra a média móvel a cada dois ciclos de maré.....	31
Figura 14: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria – A linha vermelha indica a variação ao longo do tempo da elevação da Estação 2. A linha preta mostra a média móvel a cada dois ciclos de maré.	32
Figura 15: Cenário de Ventos Usuais – Variação da elevação da Estação 2 ao longo de aproximadamente 2 dias, durante a segunda sizígia da simulação.....	33
Figura 16: Cenário de Ventos Usuais - Variação da elevação de 5 estações de registro ao longo de um período de 3 h, durante a segunda sizígia.	34
Figura 17: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria- Variação da elevação de 5 estações de registro ao longo de um período de 3 h, durante a segunda sizígia.	35
Figura 18: Linha auxiliar que liga o extremo norte ao extremo sul do domínio de estudo.....	36
Figura 19: Cenário de Ventos Usuais - Variação da elevação ao longo da linha auxiliar, que vai do norte ao sul do domínio de estudo.....	37
Figura 20: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Variação da elevação ao longo da linha auxiliar, que vai do norte ao sul do domínio de estudo.....	38
Figura 21: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de preamar na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade.....	39
Figura 22: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de maior maré vazante na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade.	40
Figura 23: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de baixamar na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade.....	41

Figura 24: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de maior maré enchente na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade.	42
Figura 25: Cenário de Ventos Usuais - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de preamar na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade.	43
Figura 26: Cenário de Entrada de Ventos Usuais - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de maior maré vazante na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade.	44
Figura 27: Cenário de Ventos Usuais - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de baixamar na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade.	45
Figura 28: Cenário de Ventos Usuais - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de maior maré enchente na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade.	46
Figura 29: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 hora após o início da simulação.	49
Figura 30: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 dia após o início da simulação.	50
Figura 31: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 semana após o início da simulação.	51
Figura 32: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 mês após o início da simulação.	52
Figura 33: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 hora após o início da simulação.	53
Figura 34: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 dia após o início da simulação.	54
Figura 35: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 semana após o início da simulação.	55
Figura 36: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 mês após o início da simulação.	56
Figura 37: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 mês após o início da simulação.	58
Figura 38: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 3 meses após o início da simulação.	59
Figura 39: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 6 meses após o início da simulação.	60
Figura 40: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 mês após o início da simulação.	61
Figura 41: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 3 meses após o início da simulação.	62
Figura 42: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 6 meses após o início da simulação.	63
Figura 43: Variação do T90 de coliformes em função radiação solar, representada pela hora do dia.	65
Figura 44: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes.	66

Figura 45: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes..	66
Figura 46: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, um dia e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes..	67
Figura 47: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, um dia e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes.....	67
Figura 48: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, uma semana e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes..	68
Figura 49: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, uma semana e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes..	68
Figura 50: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, um mês e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes..	69
Figura 51: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, um mês e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes.....	69
Figura 52: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes..	70
Figura 53: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes.....	70
Figura 54: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, 1 dia e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes..	71
Figura 55: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, 1 dia e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes..	71
Figura 56: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, uma semana e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes.....	72
Figura 57: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, uma semana e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes..	72
Figura 58: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, um mês e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes.....	73
Figura 59: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, um mês e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes..	73
Figura 60: Pontos nos quais foram simulados os vazamentos de óleo	75
Figura 61: Curva de evaporação extraída do software ADIOS2 para um vazamento ocorrido às 00:00 h do dia 1 de outubro.....	77
Figura 62: Classificação da costa a partir de imagens do Google Earth.....	78
Figura 63: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Navio 1 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l..	80

Figura 64: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Navio 1 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l.....	81
Figura 65: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Navio 2 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l..	82
Figura 66: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Navio 2 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l.....	83
Figura 67: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Duto - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l..	84
Figura 68: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Duto - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l.....	85
Figura 69: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Navio 1 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l..	86
Figura 70: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Navio 1 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.....	87
Figura 71: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Navio 2 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.	88
Figura 72: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Navio 2 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.....	89
Figura 73: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Duto - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.	90
Figura 74: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Duto - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.....	91
Figura 75: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Duto - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.....	92

Lista de Tabelas

Tabela 1: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica do Porto do Rio de Janeiro - RJ, Baía de Guanabara, listadas pela significância da amplitude.....	22
Tabela 2: Rios e vazões utilizados no modelo hidrodinâmico.	24
Tabela 3: Dados da Estação AIRJ - INFRAERO.....	26
Tabela 4: Identificação das estações de registro dos resultados do modelo hidrodinâmico	29
Tabela 5: Dados considerados no vazamento de óleo por dutos na Ilha d'Água.....	78
Tabela 6: Dados considerados no vazamento de óleo na boca da baía.	79
Tabela 7: Dados considerados no vazamento de óleo na entrada da baía.	79

1 Introdução

Os municípios do Rio de Janeiro e Niterói delimitam os limites oceânicos da área estuarina da Baía de Guanabara. Ambos estão inseridos na chamada região metropolitana do Rio de Janeiro (ou Grande Rio), metrópole com mais de onze milhões de habitantes, de acordo com contagem de 2007 do IBGE.

As praias da Grande Rio são frequentadas em massa pela população e possuem fundamental importância para a economia local. Estimativas da Polícia Militar do Rio de Janeiro sugerem que em alguns finais de semana dois milhões de pessoas visitam as praias da região. Em apenas um final de semana de maior frequência, esse valor chega a 10 milhões. Trata-se de uma das formas de lazer mais realizadas pelos moradores. De acordo com o Sebrae (SEBRAE, 2007), aproximadamente 80 milhões de reais circulam mensalmente em suas praias. Seu atrativo turístico também não pode ser negligenciado, o Rio de Janeiro é um dos principais destinos turísticos do Brasil, sendo as praias da zona sul da cidade um dos destinos mais frequentados pelos visitantes.

No entanto, em diversas ocasiões, a qualidade da água não satisfaz a condição de balneabilidade definida pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) através da resolução 274/2000. Desde 1996, o litoral do Município do Rio de Janeiro vem sendo monitorado através do Programa de Monitoramento da Qualidade da Água dos Ecossistemas Costeiros Urbanos do Município do Rio de Janeiro. Este programa analisa a água de praias arenosas, oceânicas e abrigadas e a partir das análises efetuadas nas amostras coletadas, é elaborado um boletim de balneabilidade das praias, divulgado diariamente. Devido à verificação da ocorrência de não-atendimento ao padrão de balneabilidade, uma quantidade significativa da população é exposta a possíveis contaminações biológicas.

Tendo em vista que 7,3% dos moradores da metrópole julgam a qualidade da água como o item que mais influencia a escolha da praia a ser frequentada (SOUZA & LAGE, 2008), a balneabilidade das praias não é relevante somente do ponto de vista sanitário, sua relevância sócio-econômica não deve ser negligenciada.

2 Objetivos

O intuito do presente trabalho é avaliar a dimensão da influência das águas da Baía de Guanabara na qualidade da água das praias oceânicas que a cercam. Para tal,

esse estudo visa a fornecer subsídios para essa análise através da simulação, usando a modelagem computacional, de três principais cenários.

O primeiro cenário é um estudo de troca de massas d'água, de modo a avaliar até que ponto as águas da baía chegam até as praias exteriores e com que velocidade ocorre essa troca. Essa situação é relevante para que se saiba, em volume, qual a contribuição da baía às praias exteriores.

No segundo cenário avalia-se a possibilidade da contribuição de cargas de coliformes, por parte dos rios da baía, a essas praias. Como a poluição dos rios da baía, e da baía como um todo, é um tema recorrente, uma análise desse tipo é importante para verificar se a poluição por coliformes nas praias oceânicas pode ser fruto da contribuição dos rios da baía.

Finalmente, no último cenário estuda-se a hipótese de ocorrência de vazamentos de óleo no interior da baía para checar se possíveis derrames alcançariam as praias externas, influenciando assim a qualidade de suas águas.

A simulação desses três cenários deve servir de base para formular uma conclusão embasada a respeito da influência das águas da baía nas praias oceânicas.

3 Área de Estudo

3.1 Baía de Guanabara

A Baía de Guanabara é o maior sistema estuarino do estado do Rio de Janeiro. Sua bacia está localizada entre os paralelos de 22°24' e 22°57' de latitude sul e os meridianos de 42°33' e 43°19' W. A Região Hidrográfica na qual está inserida possui uma área continental de cerca de 4 mil km², abrangendo 16 municípios e uma população de mais de 8 milhões de habitantes. Apesar de sua superfície ser equivalente a menos de 60% da área do estado do Rio de Janeiro, nela está concentrada quase 60% de toda a população do estado.

Na região hidrográfica encontram-se diversos tipos de ocupação humana, desde áreas urbanas a rurais, e ainda ecossistemas associados, primitivos, como a Mata Atlântica, os manguezais, os brejos, os pontões, os costões rochosos, as ilhas, as enseadas, as falésias, as praias, as dunas e as lagunas (ANISIO, 2006).

A baía possui um espelho d'água com aproximadamente 381 km² de área, comportando um volume de água de 3×10⁹ m³, circundando um perímetro de 131 km (SEMADS, 2001). Essa área, no entanto, já foi maior. Devido aos inúmeros aterros

realizados com o intuito de criar novas áreas de urbanização, a baía sofreu uma redução de 30% de sua área, ao longo dos anos (SAMPAIO, 2003).

As principais bacias da região são as dos rios Guapi/Macacu, Caceribu, Iguaçu/Sarapuí, Estrela/Inhomirim/Saracuruna, Guaxindiba/Alcântara, Meriti/Acari, Canal da Cunha, Canal do Manguê, Bomba, Imbuçu, Suruí, Roncador, Magé e Iriri.



Figura 2: Vista de satélite da Baía de Guanabara.

Fonte: SAMPAIO, 2003.

Os 16 municípios inseridos ao menos parcialmente na bacia são: Duque de Caxias; Mesquita; São João de Meriti; Belford Roxo; Nilópolis; São Gonçalo; Magé; Guapimirim; Itaboraí; Tanguá; Rio de Janeiro; Niterói; Nova Iguaçu; Cachoeiras de Macacu; Rio Bonito e Petrópolis. Os municípios de Rio de Janeiro, Duque de Caxias, Magé, Guapimirim, Itaboraí, São Gonçalo e Niterói possuem limites na margem da baía (SAMPAIO, 2003).

Atualmente, considerando o seu limite mais interno, há cerca de 38 praias na baía, das quais a maioria é considerada imprópria para banho (SAMPAIO, 2003).

3.2 Praias Oceânicas

As cidades do Rio de Janeiro e Niterói possuem cerca de cinquenta praias oceânicas, muitas das quais próximas à desembocadura da baía, cuja largura oscila de cerca de 2 a 8 quilômetros.

Dentre as praias oceânicas que podem ser consideradas de maneira grosseira como pertencentes à área de influência da Baía de Guanabara pode-se citar, no município do Rio de Janeiro: praia do Arpoador; praia do Diabo; praia de Copacabana; praia de Ipanema; praia do Leblon; e praia do Leme. No município de Niterói, incluem-se a praia de Fora, Imbuí, Piratininga, Sossego, Camboinhas e Itaipu.

A região englobada por essas praias é altamente urbanizada, o que torna sua relevância sócio-econômica mais significativa que suas características biológicas, pois o principal afetado por uma possível contaminação seria a própria população local.



Figura 3: Principais praias oceânicas adjacentes à Baía de Guanabara

Fonte: Google Earth, 2010

3.3 Legislação Pertinente

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é um órgão consultivo e deliberativo instituído em 1981 pela Lei 6.938, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Dentre as competências do CONAMA, incluem-se “estabelecer normas, critérios e padrões relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente”. Para tal, o órgão deve “deliberar, sob a forma de resoluções, proposições, recomendações e moções, visando ao cumprimento dos objetivos da Política Nacional de Meio Ambiente” (LEI Nº 6.938/1981).

De forma a cumprir com suas competências, o CONAMA publicou, em 2000, sua resolução de número 274, que dispõe sobre o padrão de balneabilidade (recreação de contato primário) de águas doces, salobras e salinas. A resolução classifica as águas em próprias ou impróprias. Caso classificada como próprias, há ainda uma subdivisão em excelente, muito boa e satisfatória, de acordo com os critérios da norma (CONAMA, 2000):

- a) Excelente: quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das cinco semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo, 250 coliformes fecais (termotolerantes) ou 200 *Escherichia coli* ou 25 enterococos por 100 mililitros;
- b) Muito Boa: quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das cinco semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo, 500 coliformes fecais (termotolerantes) ou 400 *Escherichia coli* ou 50 enterococos por 100 mililitros;
- c) Satisfatória: quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das cinco semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo 1.000 coliformes fecais (termotolerantes) ou 800 *Escherichia coli* ou 100 enterococos por 100 mililitros.

Para essa classificação, os padrões referentes aos enterococos aplicam-se somente às águas marinhas. Contudo, não basta atender aos critérios acima para que a água não seja classificada como imprópria. Segundo a resolução, as águas serão consideradas impróprias quando no trecho avaliado for verificada uma das seguintes ocorrências (CONAMA, 2000):

- a) não atendimento aos critérios estabelecidos para as águas próprias;

- b) valor obtido na última amostragem for superior a 2500 coliformes fecais (termotolerantes) ou 2000 *Escherichia coli* ou 400 enterococos por 100 mililitros;
- c) incidência elevada ou anormal, na região, de enfermidades transmissíveis por via hídrica, indicada pelas autoridades sanitárias ;
- d) presença de resíduos ou despejos, sólidos ou líquidos, inclusive esgotos sanitários, óleos, graxas e outras substâncias, capazes de oferecer riscos à saúde ou tornar desagradável a recreação;
- e) pH < 6,0 ou pH > 9,0 (águas doces), à exceção das condições naturais;
- f) floração de algas ou outros organismos, até que se comprove que não oferecem riscos à saúde humana;
- g) outros fatores que contra-indiquem, temporária ou permanentemente, o exercício da recreação de contato primário, como trechos em que ocorram acidentes de médio e grande porte, tais como: derramamento de óleo e extravasamento de esgoto, a ocorrência de toxicidade ou formação de nata decorrente de floração de algas ou outros organismos.

Apesar de ser fundamental para reduzir a exposição de determinados riscos à saúde humana, a resolução 274/2000 não discorre a respeito de valores limitantes para concentrações de óleos e graxas, tornando esse critério subjetivo. Para tal, pode-se recorrer à resolução 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Essa norma define padrões de qualidade de água para corpos d'água doce, salobra e salina de acordo com seu uso. Entende-se assim que determinados usos exigem maior qualidade da água e, portanto, deve-se exigir padrões mais restritivos para estes. Dessa maneira, o uso efetado para cada corpo d'água vai definir a sua "classe", sendo os padrões variáveis de acordo com a "classe". Existem quatro classes definidas para águas salinas, característica das praias oceânicas: classe especial, classe 1, classe 2 e classe 3. De acordo com o artigo Art. 5º, as águas salinas são assim classificadas (CONAMA, 2005):

I - classe especial: águas destinadas:

- a) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e
- b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.

II - classe 1: águas que podem ser destinadas:

a) à recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000;

b) à proteção das comunidades aquáticas; e

c) à aqüicultura e à atividade de pesca.

III - classe 2: águas que podem ser destinadas:

a) à pesca amadora; e

b) à recreação de contato secundário.

IV - classe 3: águas que podem ser destinadas:

a) à navegação; e

b) à harmonia paisagística.

Visto que o objeto de estudo principal do presente trabalho é a avaliação da possibilidade de exposição humana a substâncias nocivas, convém adotar, para os parâmetros de qualidade não contemplados pela resolução 274/2000, os padrões relativos à classe 1, que pode ser destinada à recreação de contato primário. A própria resolução 357/2000 afirma que como padrão de qualidade, para coliformes termotolerante “para o uso de recreação de contato primário deverá ser obedecida a Resolução CONAMA no 274, de 2000” (CONAMA, 2005). Quanto a óleos e graxas, um dos objetivos de modelagem do presente trabalho, a 357/2000 define, para a classe 1, que estes devem ser “virtualmente ausentes”, i.e. “não é perceptível pela visão, olfato ou paladar”.

De acordo com Rosman (2002), uma concentração mínima de 1 mg/l de óleo, para a modelagem de transporte de manchas de óleo, é um valor adequado para a representação visual de manchas em águas restritas tais como baías, estuários, rios e reservatórios. Essa concentração resulta em uma espessura equivalente da mancha de 0,001 mm. Por ser o critério de “virtualmente ausente” mal definido em termos quantitativos, julgou-se que seria adequado considerar essa espessura como imperceptível à visão, olfato ou paladar.

4 Metodologia

A metodologia empregada consiste fundamentalmente na simulação de cenários com diferentes condições ambientais. Por haver necessidade de análise de uma quantidade massiva de dados, a modelagem computacional mostrou-se muito adequada ao desenvolvimento desse estudo. Mesmo possuindo fundamental

importância para qualquer estudo relativo a corpos d'água naturais, dados ambientais muitas vezes são escassos, havendo somente séries temporais de valores medidos em estações pontuais ao longo da área de interesse. Portanto, é imprescindível, em estudos de grande porte, dispor-se de ferramentas, tal qual a modelagem computacional, que permitam a interpolação e extrapolação desses dados no espaço e no tempo (ROSMAN, 2008).

A modelagem computacional permite (ROSMAN, 2008):

- Em análises de diagnóstico:
 - Otimização de custos de monitoramento e medição integrando-se informações espacialmente dispersas.
 - Estender o conhecimento para regiões nas quais não há medições.
 - Entender processos dinâmicos, ajudando na interpretação de medições feitas em estações pontuais.
- Em análises de prognóstico:
 - Prever situações simulando cenários para estudos e projetos
 - Mapeamento de áreas de risco para licenciamento ambiental, determinação de destinos prováveis de contaminantes, etc.
 - Definição de estratégias de ação em caso de acidentes com derrames de contaminantes, por exemplo, e criação de Planos de Emergência.
 - Elaboração de Planos de Mitigação.
 - Prever evolução de eventos em tempo real.

4.1 Modelagem Computacional e o SisBaHiA®

O processo de modelagem se inicia com a formação do modelo conceptual. Trata-se realmente de uma concepção inicial do fenômeno observado, suas causas e efeitos, ainda que não de maneira profunda. O passo seguinte é a modelagem matemática, a tradução do modelo conceptual em equações e linguagem matemática que serão posteriormente solucionadas (ROSMAN, 1997). Há quatro métodos de resolução do modelo matemático: analítico, analógico, físico ou numérico. Dificilmente as soluções analíticas são aplicáveis ao modelo matemático por considerarem soluções simplificadas a tal ponto que não são adequadas à representação de fenômenos naturais. O mesmo pode-se dizer das soluções analógicas, que são aplicáveis somente a situações muito peculiares de caráter teórico e pouca aplicação prática (DE PAULA, 2009). Modelos físicos baseiam-se na reprodução do fenômeno por

protótipos. Apesar de, por vezes, ser muito adequada para a representação de fenômenos específicos, a utilização de modelos físicos é inviável para a reprodução de fenômenos de grande escala. Por fim, modelos numéricos resolvem o modelo matemático de maneira aproximada, traduzindo variáveis analíticas em variáveis numéricas e realizando uma série de operações e contas.

Ainda que isso resulte no processamento e geração de uma grande quantidade de dados, a resolução da modelagem numérica pode ser compilada e executada através de uma linguagem computacional, etapa a qual se denomina modelagem computacional (ROSMAN, 1997). Através da modelagem computacional a solução numérica tornou-se a mais rápida e confiável, dentre as possíveis soluções (ROSMAN, 2008).

De modo a solucionar os modelos matemáticos complexos envolvidos na modelagem hidráulica e ambiental, convém utilizar ferramentas computacionais especificamente voltados para esse tipo de problema. O SisBaHiA[®] – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ – Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Por se tratar de um sistema utilizado em diversos estudos e projetos contratados à Fundação Coppetec envolvendo modelagem de corpos d'água naturais, optou-se por utilizar o SisBaHiA[®] nesse trabalho.

4.2 Modelo de Circulação Hidrodinâmica

O modelo hidrodinâmico adotado pelo SisBaHiA[®] é uma versão 3D da linhagem FIST (Filtered in Space and Time). Trata-se de um modelo numérico hidrodinâmico, tridimensional, otimizado para corpos d'água naturais (KAUFMANN, 2009). Este modelo numérico é composto pelo princípio da conservação da quantidade de movimento que, em conjunto com a equação da continuidade, uma equação de estado e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado, compõem o modelo matemático fundamental para qualquer corpo de água (DE PAULA, 2009).

O FIST3D utiliza uma eficiente técnica numérica em dois módulos:

- Um módulo promediado na vertical ou bidimensional na horizontal (2DH), através do qual a elevação da superfície livre e velocidades de corrente 2DH promediadas na vertical são calculadas. O cálculo do módulo 2DH é necessário ao 3D e por isso o modelo FIST3D sempre o calcula (ROSMAN, 2008).

- Um módulo 3D que calcula o campo de velocidades a partir do modelo 2DH.

Optou-se por utilizar o módulo 3D nesse trabalho por se tratar de um módulo mais completo, ainda que não fossem plenamente utilizados todos os resultados disponíveis.

4.2.1 Equações Governantes

A Figura 4 apresenta o sistema de coordenadas usado pelo SisBaHiA® nos modelos hidrodinâmicos 2DH e 3D (ROSMAN, 2008):

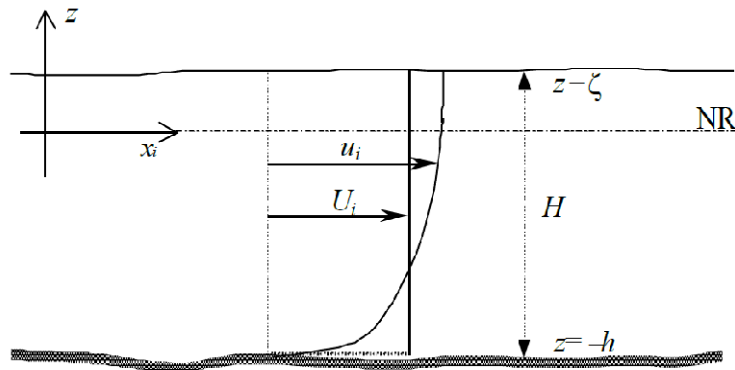


Figura 4: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência. No caso 2DH, U_i , representa a velocidade promediada na vertical.

Na figura, u_i é a componente da velocidade na direção i (x e y) e ζ é a elevação da superfície livre. Tem-se assim, quatro incógnitas a serem calculadas pelo programa. Para tal, é necessário dispor de quatro equações resolvíveis que as envolvam. As equações utilizadas pelo programa encontram-se abaixo (SAMPAIO, 2003):

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

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

Onde:

u , v e w = componentes da velocidade do escoamento nas direções x , y e z , respectivamente.

ζ = elevação da superfície livre;

g = aceleração da gravidade;

ρ = densidade do fluido no local;

ρ_0 = densidade constante de referência;

Φ = velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local

θ = ângulo de latitude

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) + 2 \Phi \operatorname{sen} \theta u$$

- Equação da continuidade (do volume)

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

- Equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical

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

4.2.2 Condições de Contorno

As condições de contorno consideradas podem ser verticais ou horizontais.

As condições de contorno horizontais podem ser de dois tipos: de terra ou abertos. Os contornos de terra caracterizam as margens do corpo d'água no domínio, incluindo afluentes e captações. A fronteira aberta representa o limite do domínio de modelagem, não sendo uma limitação física, mas sim do modelo. Suas condições são caracterizadas pela elevação da superfície livre.

As condições de contorno verticais são a velocidade nula no fundo e a tensão de atrito do vento na superfície livre, calculada a partir das velocidades de vento inseridas.

4.2.3 Condições Iniciais

Para que o programa calcule a variação dos parâmetros analisados, é preciso fornecer primeiramente condições iniciais para que sejam realizadas as interpolações e extrapolações pertinentes. Assim, o modelador deve informar, para o instante inicial de simulação, os valores de elevação da superfície livre ζ e as componentes da velocidade 2DH, u e v , para todos os nós do domínio modelado (SAMPAIO, 2003).

4.3 Modelo de Transporte Euleriano

O transporte euleriano observa a região de estudo como um todo, analisando a interação entre seus constituintes. A modelagem Euleriana observa o movimento através do escoamento das partículas que passam pelo ponto de observação. (ROSMAN, 1997).

O SisBaHiA[®] utiliza um modelo de transporte advectivo-difusivo na simulação da distribuição de substâncias. Este modelo é conhecido como Modelo Euleriano de Transporte Advectivo-Difusivo (MTAD) integrado na vertical, aplicável para escalares passivos e conservativos, ou não-conservativos (ROSMAN, 2008).

4.3.1 Equações Governantes

O transporte euleriano se baseia fundamentalmente na equação de transporte advectivo-difusivo, que é dada por (ROSMAN, 2008 apud DE PAULA, 2009):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(H \left[D_{ij} \delta_{jk} + \frac{A_k^2}{12} \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial k} \right) - \frac{C}{H} (q_p - q_e \pm q_I) + \sum R_{P/C}$$

Onde:

C é a concentração do escalar de interesse;

U_i são as componentes de velocidade na direção x_i promediada na vertical,

q_p , q_e e q_I são valores de vazão por unidade de área ($m^3/m^2.s$) de precipitação, evaporação e infiltração, respectivamente;

$\sum R_{P/C}$ representa as reações cinéticas de produção e consumo do escalar analisado;

H é a altura da coluna d'água;

D_{ij} é o tensor que representa o coeficiente de difusão turbulenta de massa;

δ_{jk} representa o delta de Kronecker e

$A_k = \alpha_k \Delta x_k$ é a largura do filtro na dimensão x_k , sendo α_k um parâmetro de escala

As velocidades são obtidas a partir do modelo hidrodinâmico, enquanto os valores do coeficiente de difusão, o delta de Kronecker e a largura do filtro são dados do programa.

Devido à sua pequena importância relativa, considerando-se a magnitude da vazão promovida pela maré, as parcelas relativas à infiltração, evaporação e precipitação podem ser desprezadas. Também se pode desprezar o termo relativo às reações de produção e consumo quando se trata de constituintes conservativos, como é o caso considerado nesse estudo para a troca de massas d'água.

4.3.2 Condições Iniciais e de Contorno

São novamente duas as condições de contorno relativas ao transporte euleriano.

Freqüentemente, ao longo dos nós do contorno de terra não há uma contribuição de carga do constituinte passivo, sendo portanto definida como nula a alteração, por parte da fronteira de terra, de qualquer aumento ou redução de concentração (ROSMAN, 2008). Essa condição é condizente com estudos de trocas de massas, porém falha para simular contribuições difusas de carga ao longo da costa, por exemplo.

Ao longo da fronteira aberta, duas situações são consideradas. Para o efluxo de escalares, simplesmente calcula-se a sua saída de acordo com a equação de transporte advectivo-difusivo. No afluxo de escalares para o domínio de modelagem, o modelo considera um “decaimento” do escalar de acordo com o tempo de transição que é definido pelo modelador. Valores típicos para o tempo de transição variam da ordem de meia a duas horas (ROSMAN, 2008).

4.4 Modelo de Transporte Lagrangeano

Modelos de transporte lagrangeano se baseiam na observação da trajetória de uma partícula, em oposição à observação do movimento como um todo. Esse tipo de modelo é muito adequado para a representação de fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico (ROSMAN, 2008).

Na modelagem lagrangeana para escalares passivos, a incógnita básica não é a concentração, mas a posição de partículas discretas. Tais partículas são “lançadas” na água de acordo com as características da fonte e cada uma delas representa o centro de massa de uma pequena mancha contaminante com uma dada distribuição de concentrações. A soma das manchas geradas por todas as partículas remanescentes ao final da modelagem reproduz a distribuição de concentrações do escalar no meio, que é a incógnita dos modelos convencionais. Assim, através desta técnica as concentrações são calculadas de modo indireto (ROSMAN, 2008).

4.4.1 Equações Governantes

Seguindo a lógica de focar-se na trajetória de uma partícula, as equações físicas referentes ao modelo lagrangeano concernem somente ao cálculo do comportamento de cada partícula individualmente, sendo o resultado posteriormente agrupado de acordo com os objetivos da modelagem.

Nesse modelo, as partículas são dispostas na região fonte aleatoriamente e advectadas pelas correntes computadas através do modelo hidrodinâmico. A posição de qualquer partícula no instante seguinte, P_{n+1} , é determinada através da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior conhecida, P_n (ROSMAN, 2008):

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

onde T.A.D. são termos de alta ordem desprezados. As derivadas temporais de primeira e segunda ordem de P são, respectivamente, a velocidade e a aceleração da partícula, obtidas a partir do campo de velocidades hidrodinâmico resolvível, representado a seguir (ROSMAN, 2008):

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

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

Onde se admite que nas escalas resolvíveis, as velocidades responsáveis pelo transporte advectivo das partículas, $\vec{V}(u, v, w)$ e as velocidades calculadas pelo FIST3D no modelo hidrodinâmico são as mesmas (ROSMAN, 2008).

Há que se considerar, ainda, as velocidades difusivas, que são componentes de pequena escala não capturadas pelo modelo hidrodinâmico. De modo a inserir esse efeito difusivo, ou turbulência, após o cálculo da nova posição da partícula pode-se impor um desvio aleatório, como o que seria causado pelas velocidades difusivas (SAMPAIO, 2003).

4.4.2 Condições Iniciais e de Contorno

Há duas condições de contorno no modelo lagrangeano, uma ao longo dos contornos abertos e outra nos contornos de terra.

A primeira condição é de que uma vez que a partícula sai do domínio modelado, ao atravessar um segmento de contorno, ela é perdida. Essa condição torna o modelo lagrangeano pouco útil para fontes localizadas próximas aos limites de contornos abertos. Caso a fonte esteja suficientemente longe do domínio modelado, ainda que a partícula atravesse o limite de contorno, tal fato não implica em perdas sensíveis para o problema modelado (SAMPAIO, 2003).

Em segundo lugar, pode-se considerar diferentes condições para as fronteiras de terra: 1- a partícula que atinge a fronteira retorna ao meio sem sofrer qualquer perda de massa; 2- a partícula retorna ao meio, mas retém-se parte de sua massa no trecho da fronteira atingido. A retenção de massa depende da definição de um coeficiente de absorção ao longo das fronteiras de terra. Se esses coeficientes não forem definidos, são considerados nulos (ROSMAN, 2008).

5 Estudo de Circulação Hidrodinâmica

O estudo de circulação hidrodinâmica é a primeira parte do trabalho de modelagem. Ele serve de base às simulações dos fenômenos interessantes à compreensão da influência das águas da Baía de Guanabara nas praias oceânicas – a saber, as trocas de massa d'água, o vazamento de óleo e a colimetria, conforme será apresentado.

Para se estudar o padrão de circulação da Baía de Guanabara, foram selecionados dois cenários de simulação: o primeiro cenário considerando os padrões de corrente causados por maré usual, com a influência de ventos usuais e com as vazões médias dos rios, e o segundo cenário considerando os padrões de corrente causados por maré usual, com a influência de ventos característicos de frente fria e com as vazões de estiagem dos rios.

Este capítulo apresenta os dados de implementação do modelo, as condições iniciais e de contorno e finalmente a análise dos resultados obtidos.

5.1 Dados de Implementação do Modelo

Sob a ótica de um problema matemático, os dados de implementação do modelo são os parâmetros necessários à resolução das equações apresentadas na metodologia.

Os dados a serem implementados no modelo incluem as informações relevantes à definição dos contornos e à elaboração da malha de elementos finitos, além da base de dados ambientais – que são a batimetria, o tipo de fundo e rugosidade equivalente, marés, vazões dos rios afluentes à Baía de Guanabara e condições de ventos adotadas.

5.1.1 Contornos do Modelo

A definição dos contornos do modelo teve como base a seguinte fonte:

- Batimetria da Baía de Guanabara: carta náutica DHN, Diretoria de Hidrografia e Navegação, de 2009, 1501, escala de 1:50.000 (Figura 5).

5.1.2 Malha

A malha é a discretização espacial do meio contínuo através da definição geométrica de elementos finitos. Para cada elemento, serão resolvidas as equações governantes do processo.

A confecção da malha de elementos finitos foi realizada a partir do contorno delimitado do modelo, de forma a preservar os contornos naturais e a prover estabilidade numérica. As dimensões dos elementos foram definidas em respeito ao detalhamento desejado dos fenômenos de interesse.

Foram adotados elementos quadriláteros, já que estes fornecem melhores resultados que os triangulares quando utilizados pelo SisBaHiA® (Referência Técnica do SisBAHIA, Rosman).

A Figura 6 apresenta um mapa com a malha de discretização do domínio de interesse.

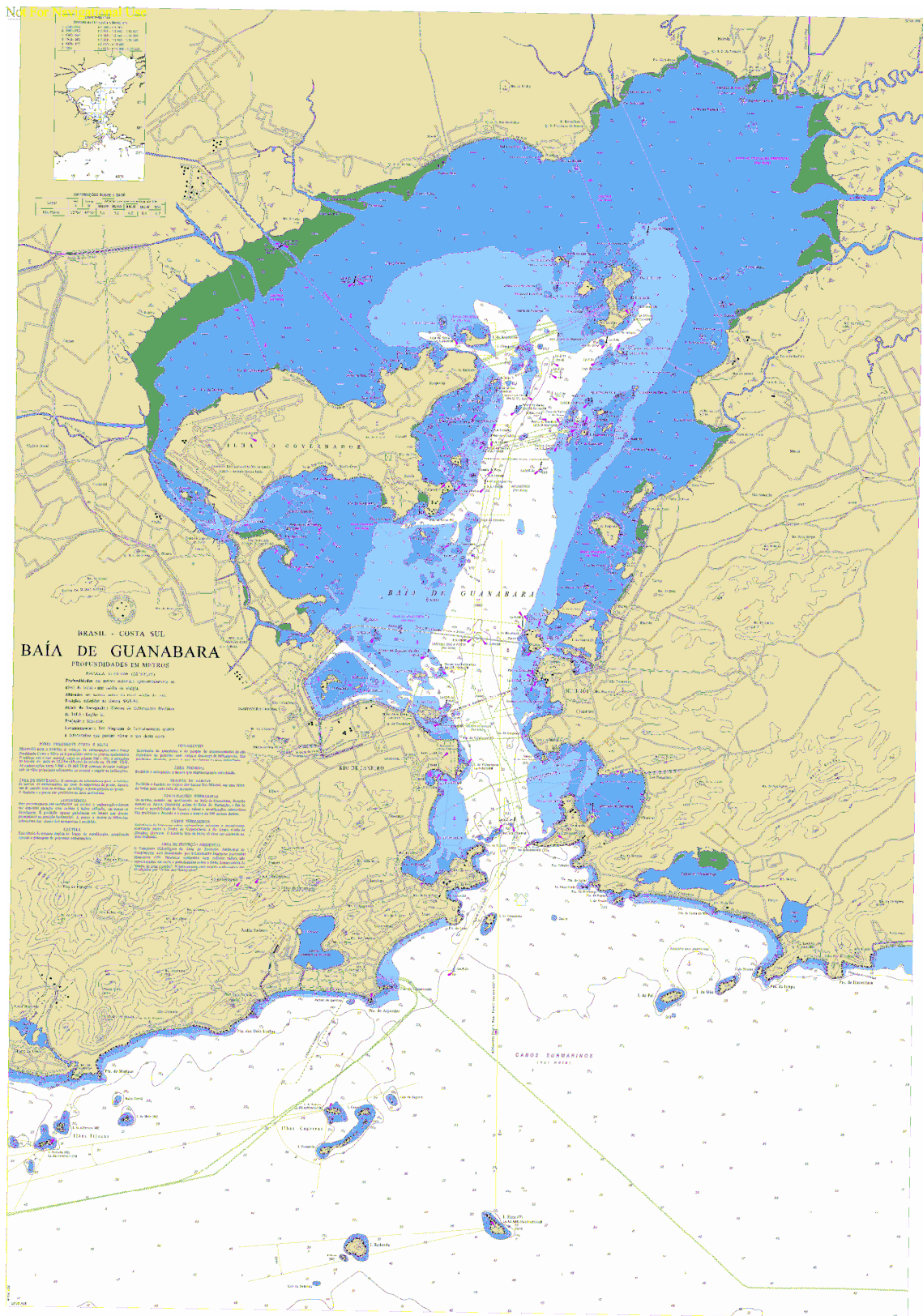


Figura 5: Carta náutica da Baía de Guanabara de 2009. Escala de 1:50.000.

Fonte: DHN

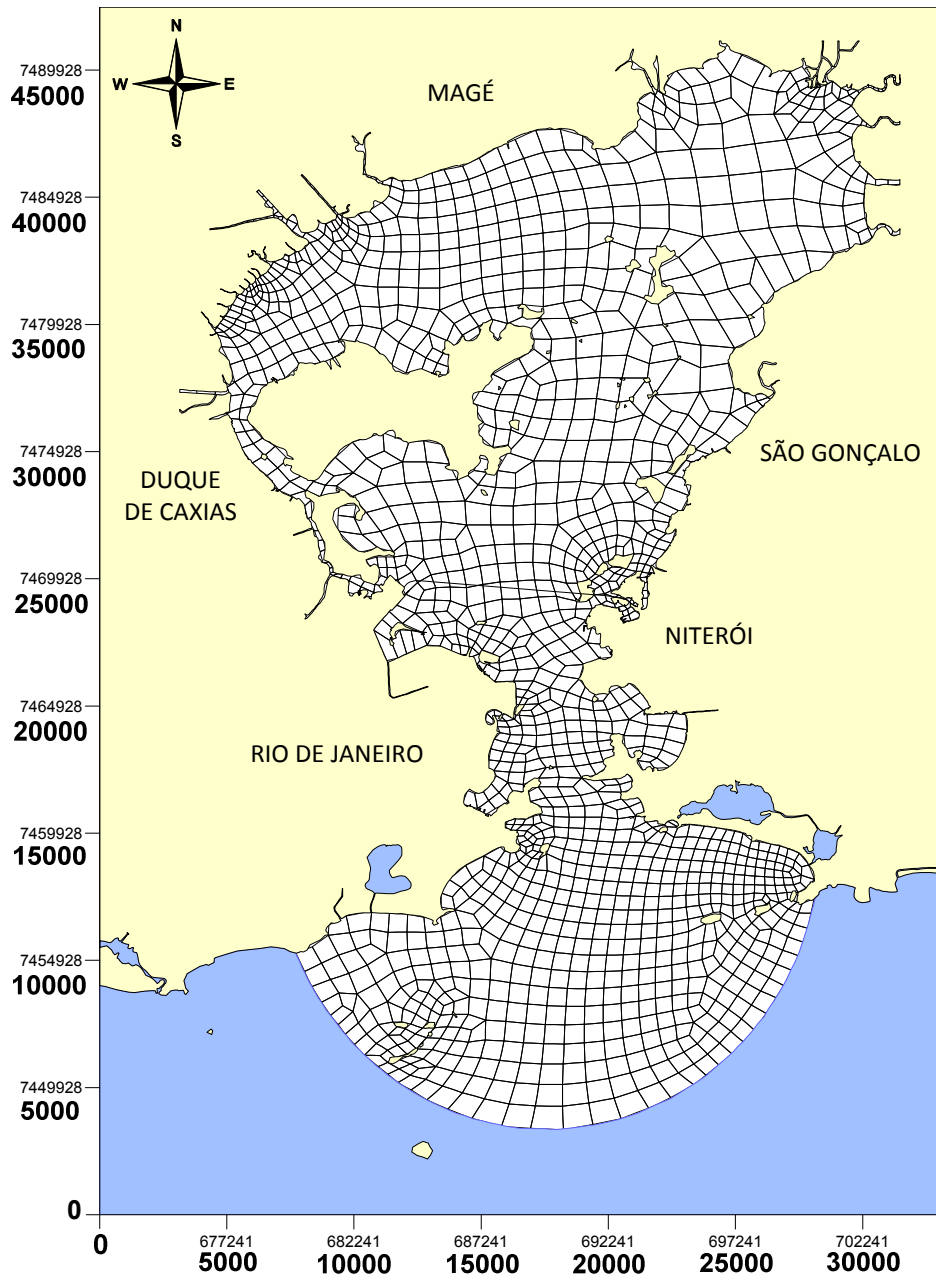


Figura 6: Malha de discretização do domínio modelado. Foram utilizados 1509 elementos quadriláteros, totalizando 6820 nós. O software Argus foi utilizado.

5.1.3 Batimetria

As informações relativas à batimetria utilizadas neste estudo foram obtidas da carta náutica anteriormente citada.

Os valores de profundidade de cada nó foram calculados através do método de interpolação de Kriging. Tal cálculo foi realizada a partir das coordenadas (x,y,z) fornecidas pela batimetria utilizada.

A batimetria, como vista pelo modelo, está apresentada na Figura 7 a seguir.

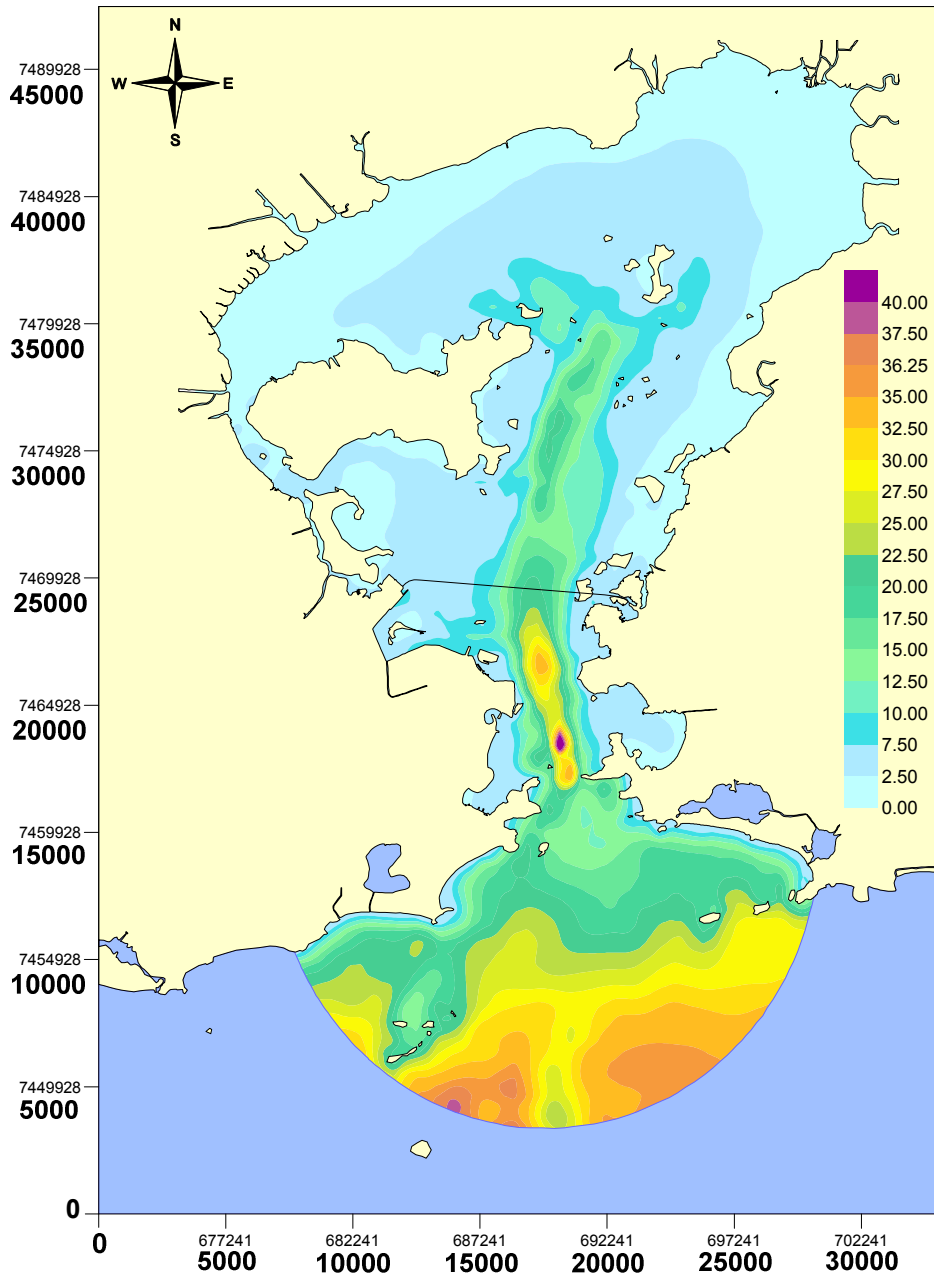


Figura 7: Batimetria utilizada no modelo, com indicação das isolinhas da profundidade (em metro) do fundo do domínio modelado

5.1.4 Rugosidade

A Baía de Guanabara possui sedimentos de fundo que variam de argilas finas a areias médias. Os valores adotados para a amplitude da rugosidade do fundo são (SAMPAIO, 2003):

- ~0,01 m: áreas onde predominam partículas coloidais e silte fino (porção norte da BG);
- ~0,02 m: áreas onde predominam areia fina e argila (a leste e ao sul da Ilha do Governador);
- ~0,03 m: áreas onde predominam as areias finas (área do canal central);
- ~0,05 m: áreas de areia média (entre a entrada da BG e o contorno aberto).

Os valores de rugosidade equivalente de cada nó foram calculados através do método de interpolação de kriging, da mesma maneira que os da batimetria.

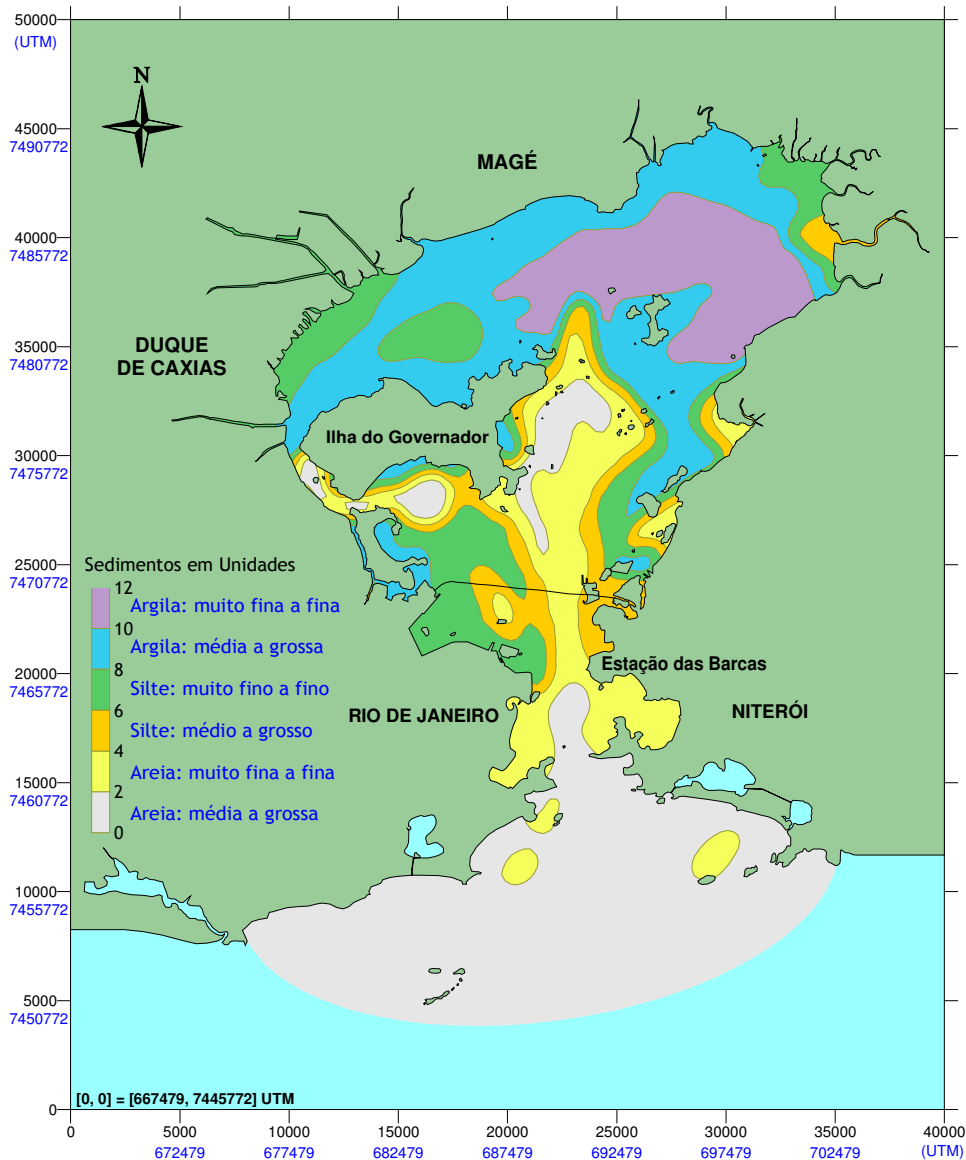


Figura 8: Tipos de fundo da Baía de Guanabara

Fonte: KAUFMANN, 2009

5.1.5 Massa Específica

O programa utilizado para a modelagem computacional utiliza valores de referência para a densidade da água, considerando a salinidade das águas estuarinas, e do ar. No modelo, as massas específicas da água e do ar são consideradas constantes ao longo do tempo e do espaço. Seus valores estão apresentados abaixo:

- $\rho_{\text{água}} = 1.025 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{\text{ar}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$

5.1.6 Maré

As alturas de maré são calculadas levando em consideração as marés parciais, representadas pelas constantes harmônicas. Cada maré apresenta um período característico universal e amplitude e fase características do local.

O modelo hidrodinâmico considera a soma da contribuição de cada maré para o cálculo da maré efetivamente utilizada, através da seguinte equação:

$$\zeta = C_0 + \sum_{i=1}^N A_i \text{sen} \left(\frac{2\pi f}{T_i} + f_i \right)$$

Onde:

ζ é o nível da maré,

C_0 corresponde à cota do nível médio do mar em relação ao nível de referência do modelo,

e A_i , T_i e f_i são, respectivamente, a amplitude, o período e a fase de cada uma das N constantes harmônicas utilizadas.

Foram consideradas as constantes harmônicas referentes à estação Porto do Rio de Janeiro - RJ, localizada na quina leste da Ilha Fiscal, ao longo da fronteira aberta. Tais constantes foram adaptadas para a utilização em todo o domínio de modelagem.

A Tabela 1 lista as 15 constantes harmônicas com maior amplitude, conforme informações adaptadas da DHN da Marinha do Brasil.

Tabela 1: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica do Porto do Rio de Janeiro - RJ, Baía de Guanabara, listadas pela significância da amplitude.

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (rad)
M2	44714	0.288	1.740
S2	43200	0.160	1.844
O1	92950	0.105	1.562
Sa	31556956	0.079	5.987
K1	86164	0.058	2.557
K2	43082	0.049	1.722
M4	22357	0.045	2.609
N2	45570	0.035	2.473
Mm	2380713	0.032	2.670
Q1	96726	0.028	1.038
P1	86637	0.022	2.313
MS4	21972	0.022	4.355
MN4	22569	0.020	1.754
mu2	46338	0.015	2.193
2N2	46459	0.012	2.560

Fonte: Adaptado da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil.

A Figura 9 mostra a curva de marés do modelo hidrodinâmico para uma simulação de 30 dias.

Observa-se o desenvolvimento do ciclo de maré, com duas preamares e duas baixamares para um período de 24 h e a ocorrência de duas quadraturas e duas sizígias, conforme a indicação da figura.

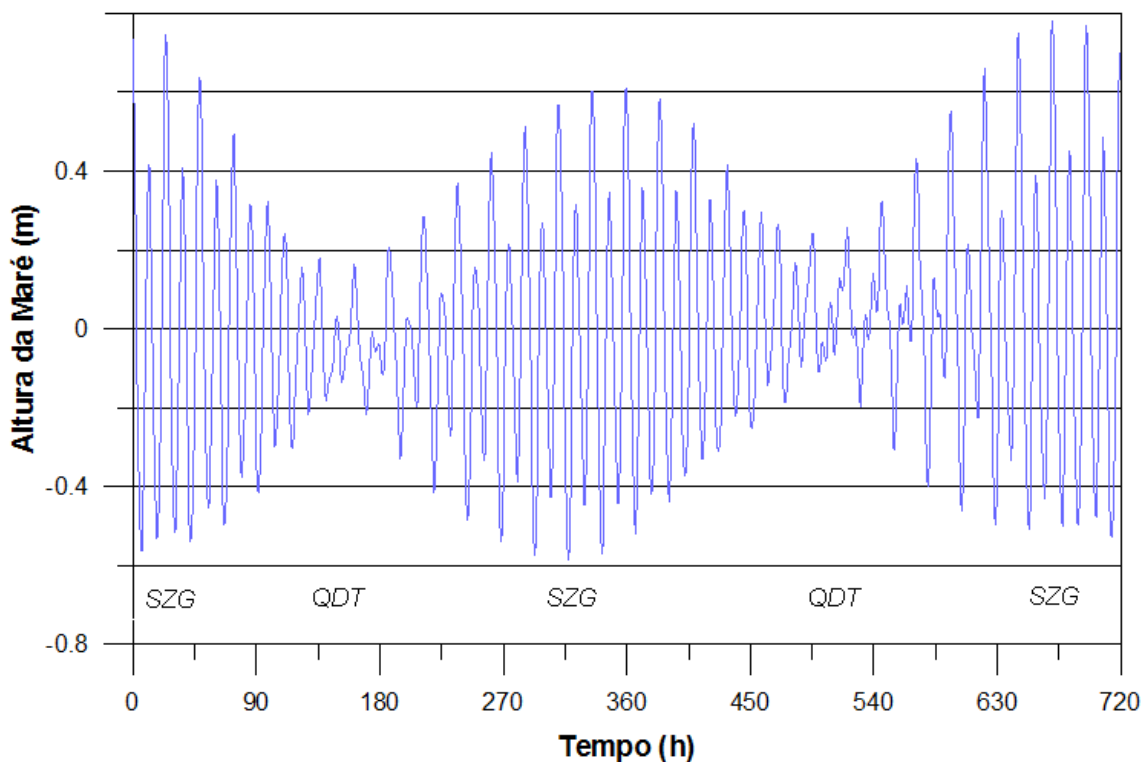


Figura 9: Ciclo de maré gerada pelo modelo hidrodinâmico para um período de 30 dias. Observa-se a ocorrência de duas marés de sizígia e duas de quadratura.

5.1.7 Rios

O cálculo das vazões dos rios contribuintes ao domínio modelado se apoiou no Método Racional (Pinto et Alli, 1976). A equação governante é a seguinte:

$$Q = \frac{i_m AC}{3,6}$$

onde:

Q = vazão em m³/s,

i_m = intensidade média da precipitação sobre toda a área drenada, de duração igual ao tempo de concentração, em mm/hora,

A = Área drenada em Km² e

C = coeficiente de escoamento.

O coeficiente de escoamento adotado foi de 50%, em função dos diversos usos do solo na bacia (SAMPAIO, 2003).

Dessa maneira, foram calculadas as vazões médias de cada rio considerado no domínio de modelagem. A vazão de estiagem foi determinada como 1/5 da vazão média. A Tabela 2 apresenta os resultados utilizados no modelo e a Figura 10 indica a localização dos rios.

Tabela 2: Rios e vazões utilizados no modelo hidrodinâmico.

Rios	Área Drenada (Km ²)	C	Chuva (mm/h)	Vazão (m ³ /s)	Vazão de Estiagem (m ³ /s)
Rio Guapimirim	1233.7	0.5	0.1712	29.34	5.87
Rio Cacerebu	758.4	0.5	0.1712	18.04	3.61
Rio Iguaçu	544.2	0.5	0.1712	12.94	2.59
Rio Estrela	342.5	0.5	0.1712	8.15	1.63
Rio São J. de Meriti	163.5	0.5	0.1712	3.89	0.78
Rio Sarapuí	159.8	0.5	0.1712	3.80	0.76
Rio Roncador	107.0	0.5	0.1712	2.54	0.51
Canal do Cunha	60.5	0.5	0.1712	1.44	0.29
Rio Suruí	53.2	0.5	0.1712	1.27	0.25
Rio Irajá	27.3	0.5	0.1712	0.65	0.13
Rio Guaxindiba	11.8	0.5	0.1712	0.28	0.06
Rio Imboassu	11.6	0.5	0.1712	0.28	0.06
Rio Iriri	8.4	0.5	0.1712	0.20	0.04
Canal de Magé	4.6	0.5	0.1712	0.11	0.02
Bacia Reduc	-	-	-	9.00	1.80

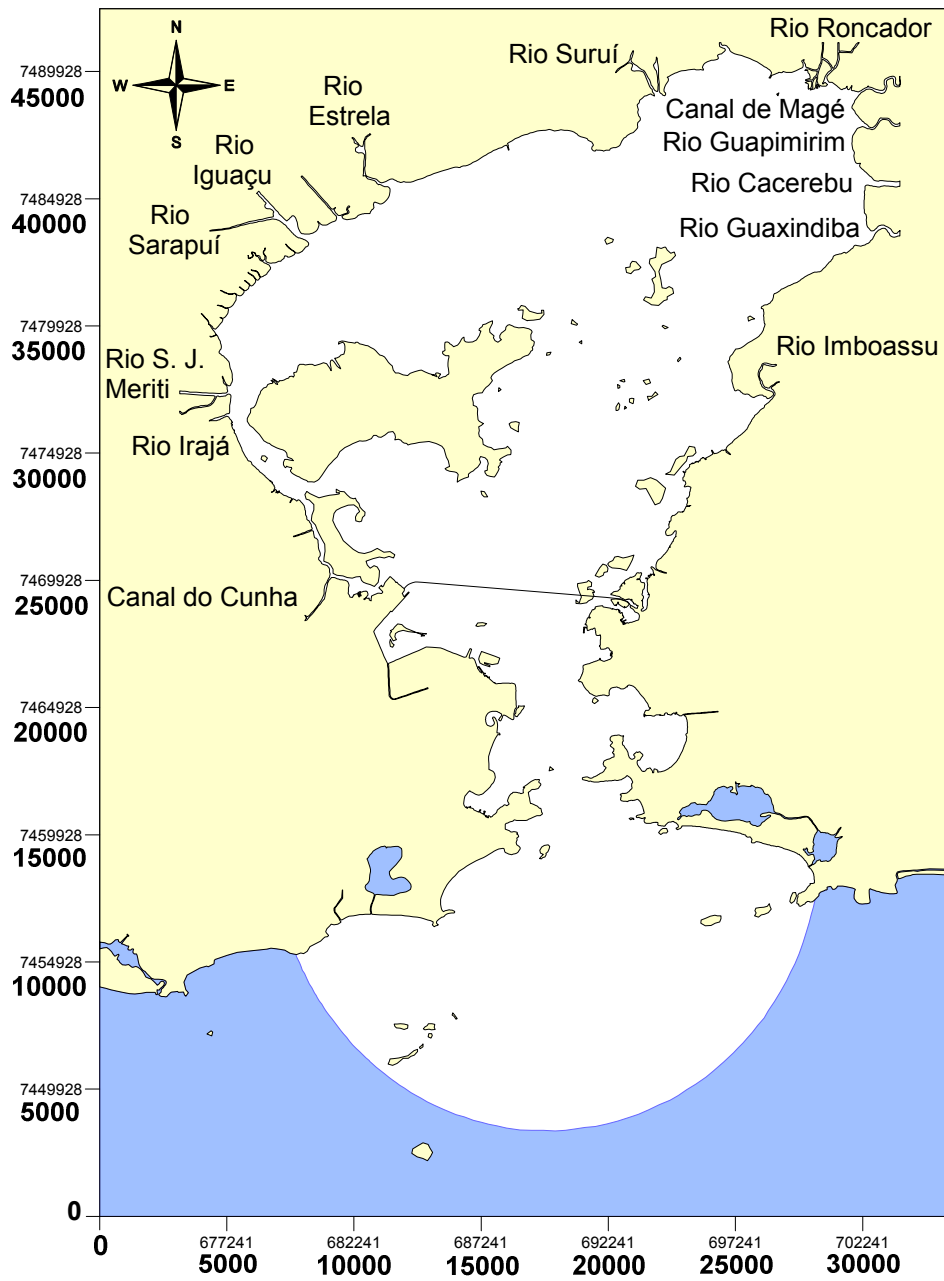


Figura 10: Mapa com a localização dos rios utilizados no modelo hidrodinâmico.

5.1.8 Vento

Os dados de vento utilizados neste trabalho para a modelagem da circulação hidrodinâmica foram fornecidos ao modelo de forma uniforme no espaço e com intensidade variável de hora em hora.

Estes dados foram obtidos da série de registros horários de direção e intensidade de ventos do ano de 2000, da estação Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro – Galeão/Maestro Antônio Carlos Jobim, operada pela INFRAERO – Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária. Os dados desta estação estão apresentados na Tabela 3, mostrada a seguir.

Tabela 3: Dados da Estação AIRJ - INFRAERO

Estação	Altitude	Latitude	Longitude
AIRJ	9 m	22° 48' 36" S	43° 15' 02" W

Para o primeiro cenário, foi escolhido o mês de outubro como referência para a entrada de dados no modelo, pois este apresentou padrão de brisa típico e sistemas frontais de intensidade representativa da amostra.

Já para o segundo cenário, foi escolhido o mês de maio como referência, pois este apresentou os sistemas frontais de forte intensidade, destoando da amostra anual analisada.

A Figura 11 e a Figura 12 ilustram em forma de gráfico os dados de direção e intensidade horários de vento dos meses de outubro e maio de 2000, respectivamente.

5.2 Condições de Contorno

No contorno aberto, foi imposta a elevação da superfície livre através do modelo harmônico, conforme discutido no estudo das marés.

No contorno de terra, impôs-se velocidade normal nula em nós ao longo das margens consideradas impermeáveis, e foram prescritas as vazões médias dos rios afluentes, explicitadas na Tabela 2 na Figura 10, adotando as vazões como normais, e forçando o valor zero da componente tangencial.

A condição de contorno vertical se traduz pela imposição de velocidade nula no fundo e pela prescrição da tensão do vento na superfície livre, conforme salientado na metodologia no trabalho.

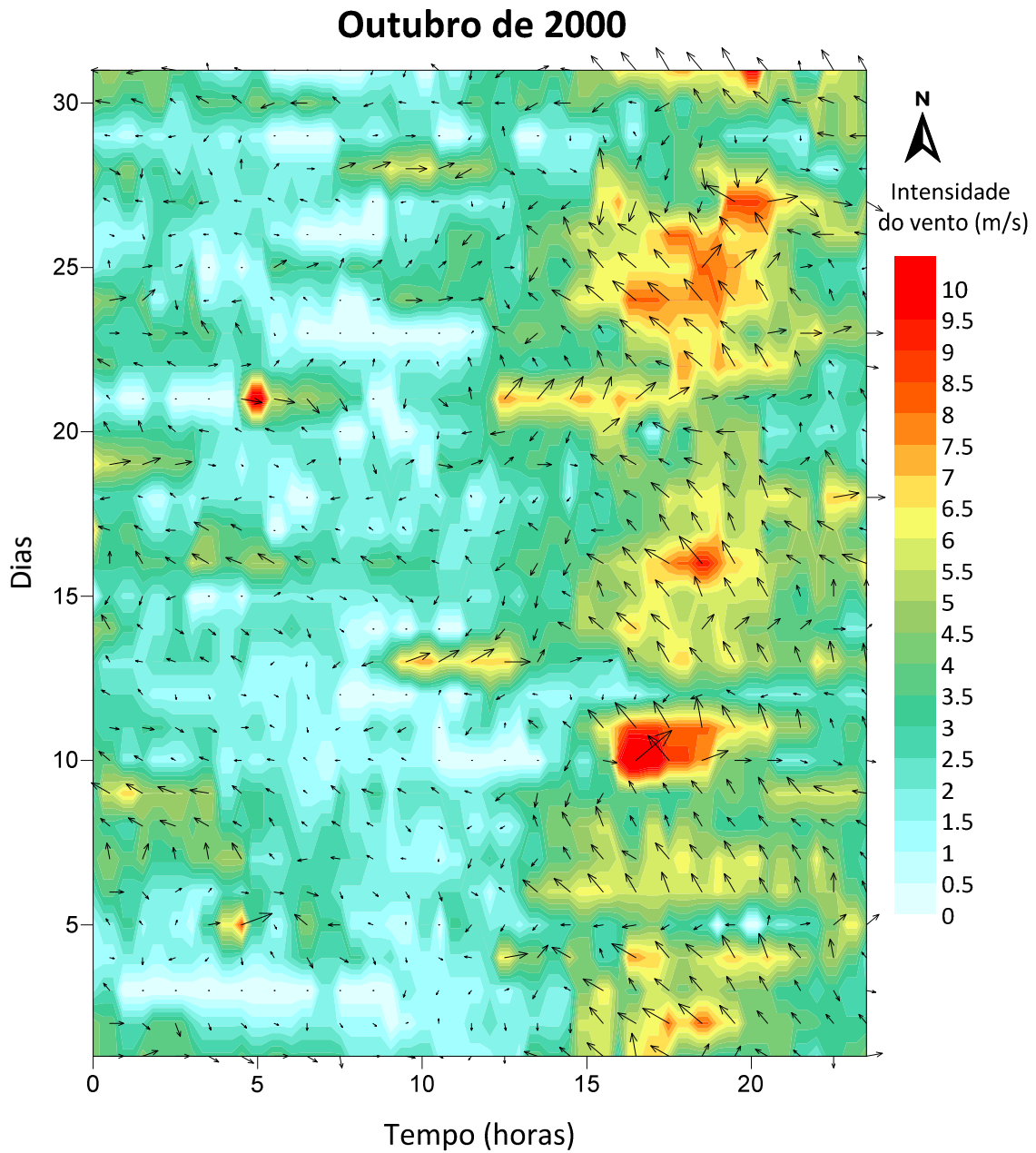


Figura 11: Gráfico da série temporal de ventos de outubro de 2000 fornecida ao modelo como dados de entrada. As setas têm módulo proporcional à velocidade do vento, que é indicada pelo padrão de cores. A direção e o sentido do vento são indicados pelas setas, relacionada à rosa de pontos cardeais.

Maio de 2000

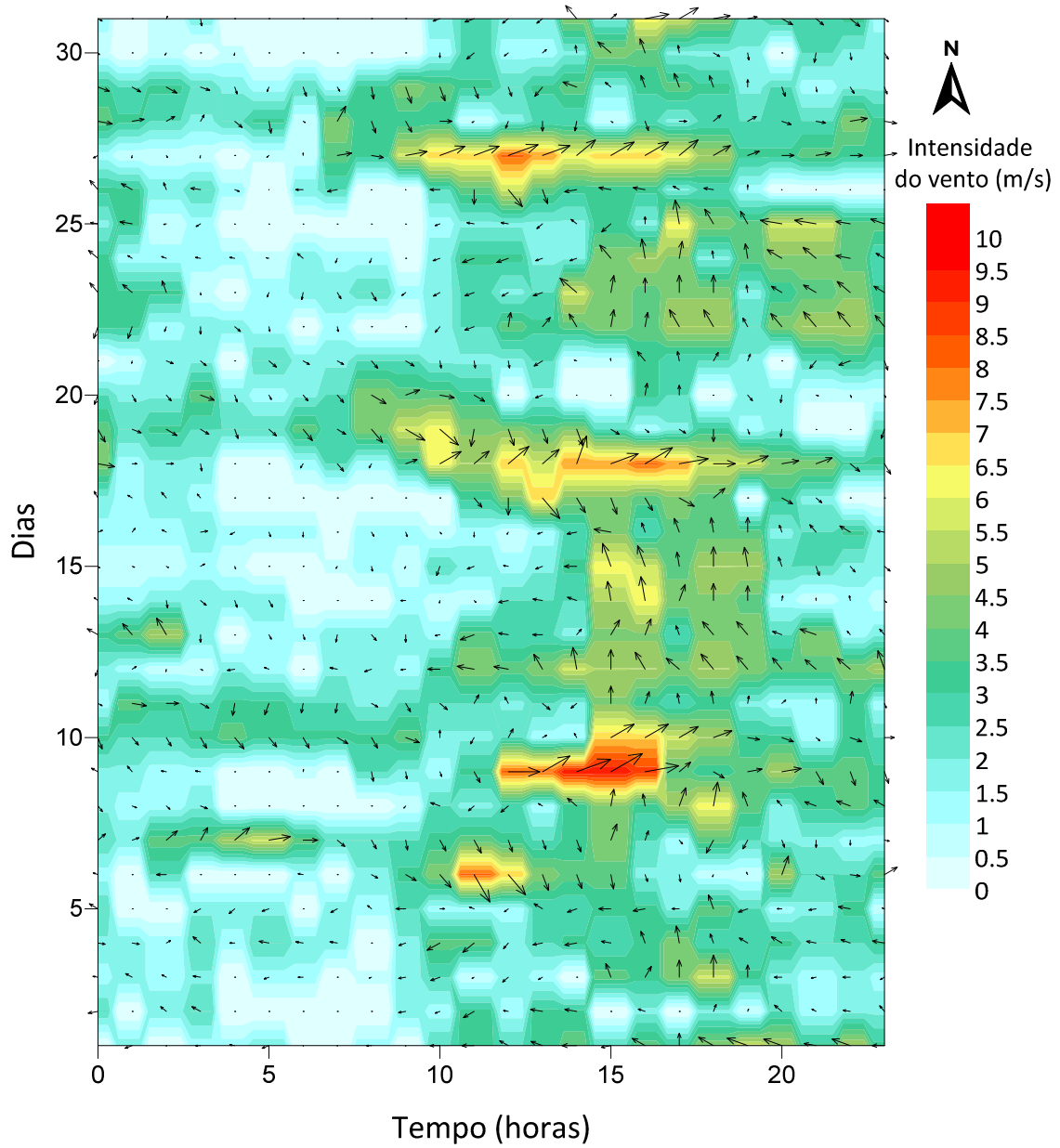


Figura 12: Gráfico da série temporal de ventos de maio de 2000 fornecida ao modelo como dados de entrada. As setas têm módulo proporcional à velocidade do vento, que é indicada pelo padrão de cores. A direção e o sentido do vento são indicados pelas setas, relacionada à rosa de pontos cardeais.

5.3 Condições Iniciais

Para contornar a dificuldade de definir os valores de elevação da superfície livre ζ e as componentes da velocidade 2DH, u e v de cada nó no instante inicial desejado, o modelo foi executado inicialmente com o valor de todas as velocidades iguais a zero e a elevação do nível do mar igual ao nível médio da maré. Após um início conturbado, o modelo se estabiliza e começa a fornecer resultados adequados.

Para os dois cenários, foi adotado o tempo de 5 dias antes da simulação desejada. Dessa forma, o primeiro cenário importou as condições finais do modelo que iniciou aos 26 de abril de 2000 como condições iniciais, e o segundo cenário fez o mesmo com as condições finais do modelo que iniciou aos 26 de setembro de 2000.

Considera-se que as simulações foram realizadas com uma partida a quente, pois as condições iniciais impostas correspondem a padrões de circulação realistas.

5.4 Resultados e Análise

Os resultados do modelo hidrodinâmico foram registrados em 7 estações, de modo a apresentar resultados representativos do fenômeno de interesse. A Tabela 4 e a Figura 13, mostradas a seguir, identificam as estações e as respectivas localizações.

Tabela 4: Identificação das estações de registro dos resultados do modelo hidrodinâmico

Num.	Estação
1	Mar Aberto
2	Desembocadura
3	Entrada da Baía 1
4	Entrada da Baía 2
5	Meio da Baía
6	Ilha de Paquetá
7	Norte da Baía

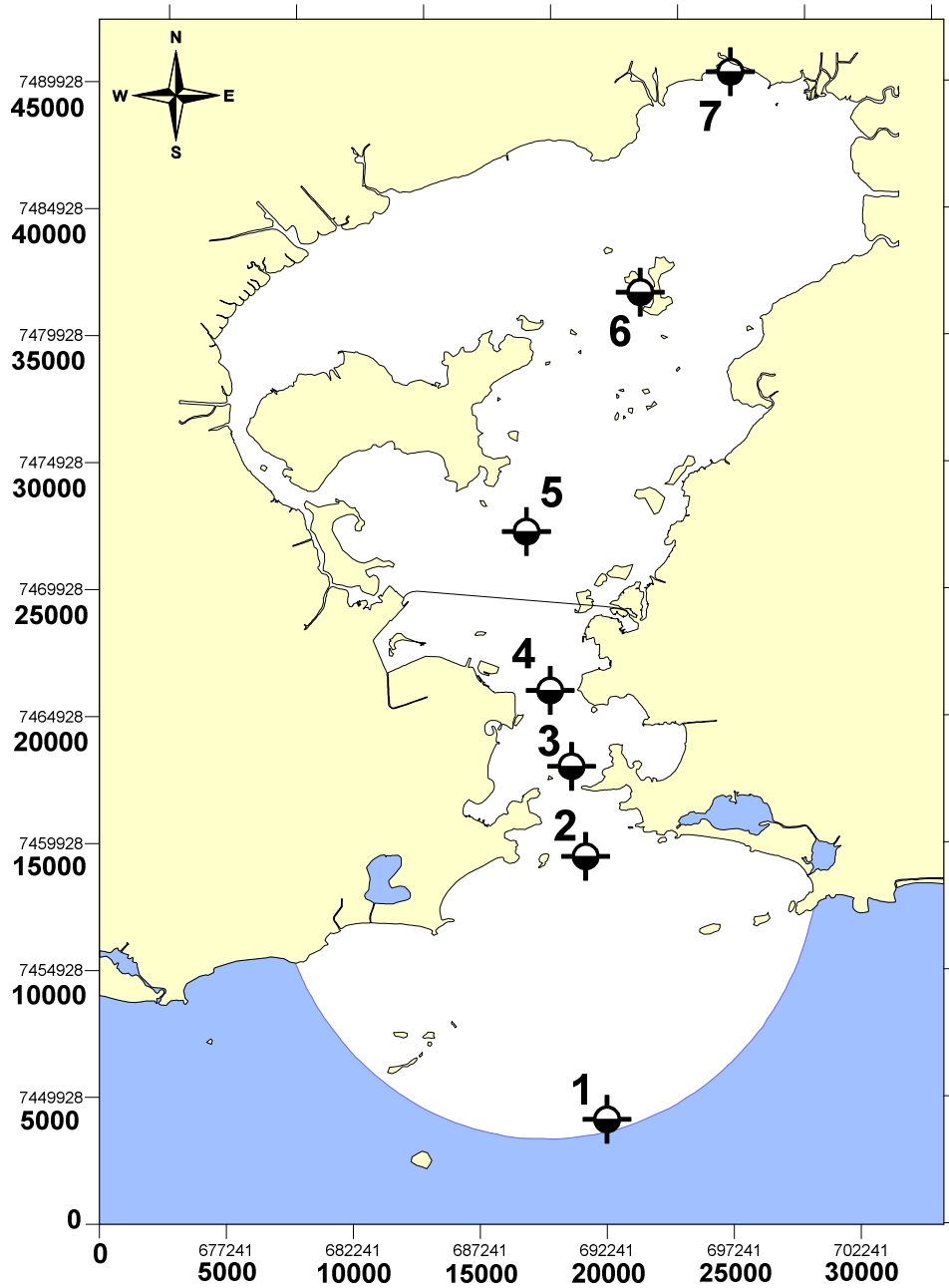


Figura 13: Estações de registro dos resultados gerados pelo modelo hidrodinâmico

Para ambos os cenários de simulação, é observada a ocorrência de duas sizígias e duas quadraturas. A Figura 14 e Figura 15 mostram a variação da elevação do nível d'água na entrada da Baía de Guanabara nos dois casos. A média móvel apresentada nas figuras representa o nível médio da maré na área de estudo.

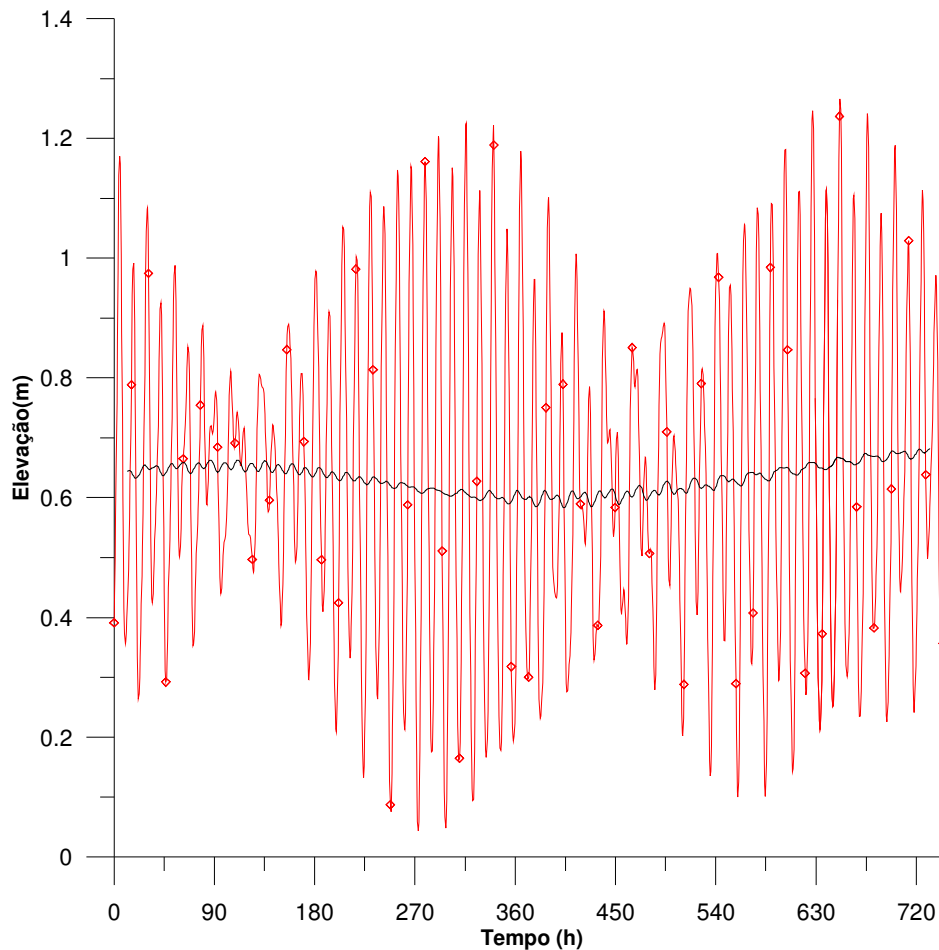


Figura 14: Cenário de Ventos Usuais - A linha vermelha indica a variação ao longo do tempo da elevação da Estação 2. A linha preta mostra a média móvel a cada dois ciclos de maré. Observa-se a ocorrência de duas marés de sizígia e duas de quadratura.

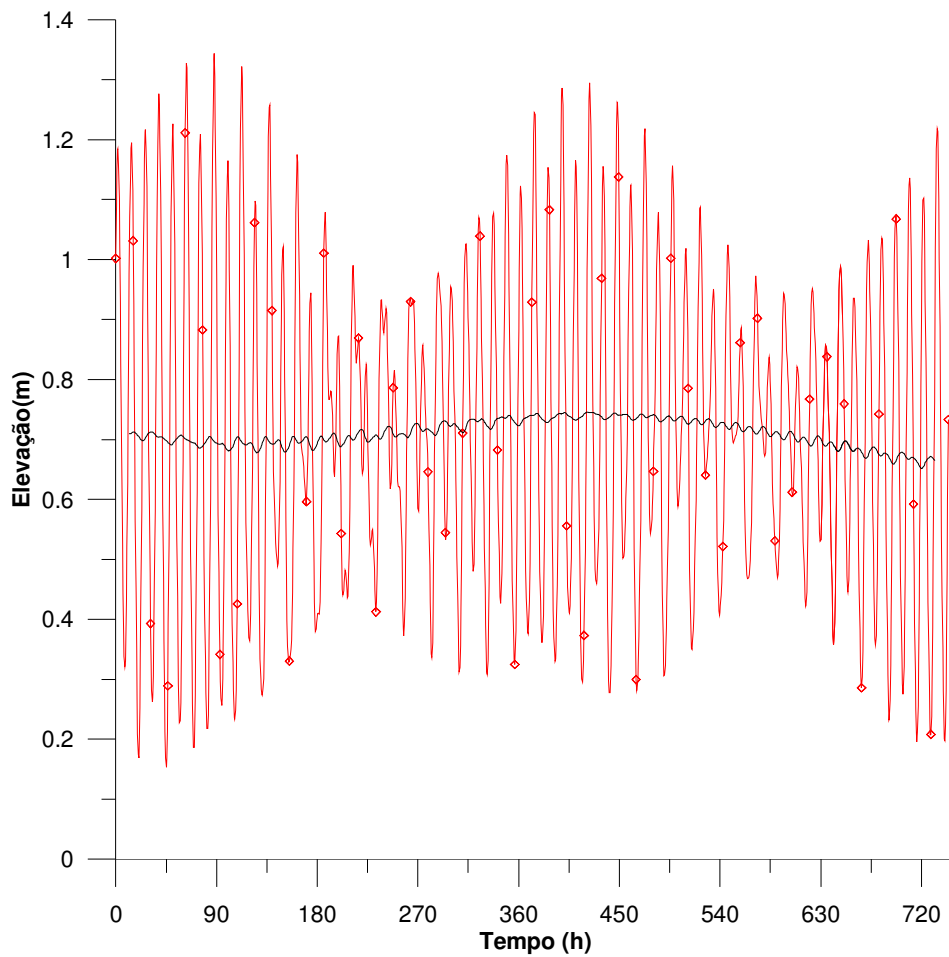


Figura 15: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria – A linha vermelha indica a variação ao longo do tempo da elevação da Estação 2. A linha preta mostra a média móvel a cada dois ciclos de maré. Observa-se a ocorrência de duas marés de sizígia e duas de quadratura.

A Figura 16 apresenta a variação da elevação ao longo de pouco mais de 2 dias de simulação. Quatro ciclos de maré podem ser percebidos.

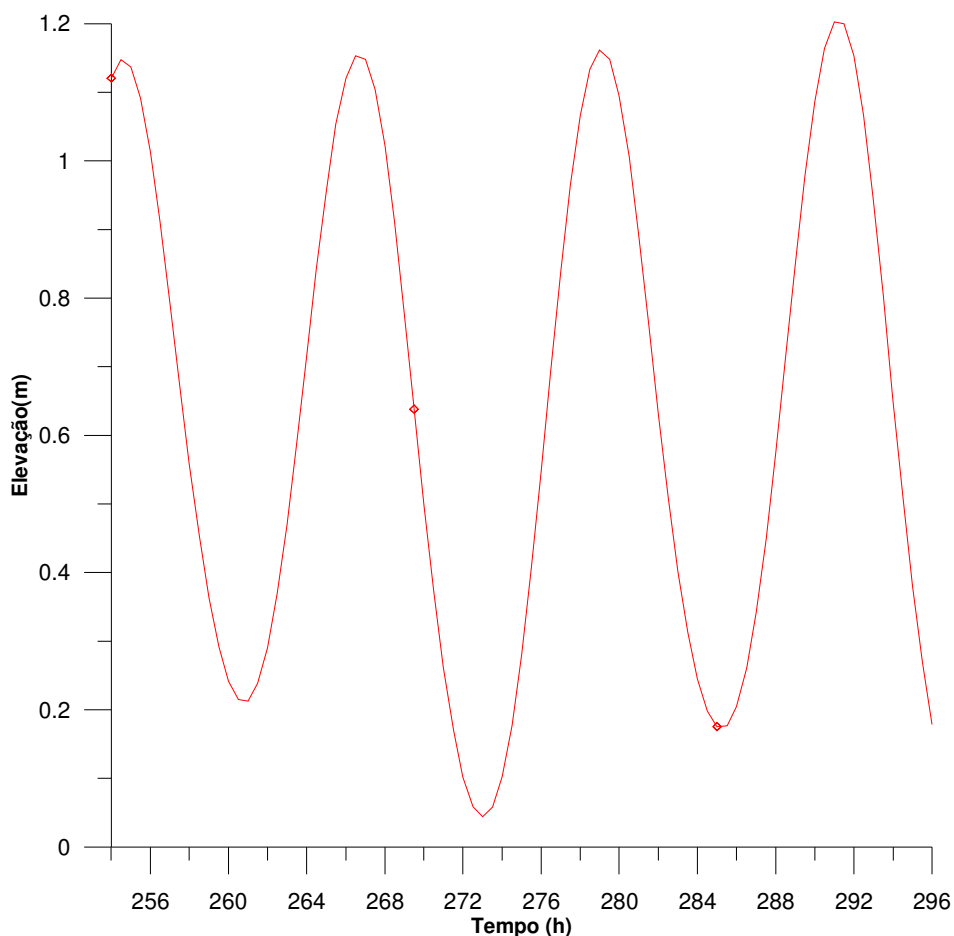


Figura 16: Cenário de Ventos Usuais – Variação da elevação da Estação 2 ao longo de aproximadamente 2 dias, durante a segunda sizígia da simulação. Quatros ciclos de marés são percebidos.

A fim de se estudar a defasagem e a amplificação das marés, foram selecionados os instantes mais representativos das simulações diferentes pontos do domínio de estudo. Foi realizada uma análise estatística simplificada dos valores de elevação das estações de registro.

As Figura 17 e Figura 18 mostram a ordem de grandeza da diferença da elevação entre diferentes estações no domínio modelado para a maré de sizígia que apresentam as maiores elevações para os cenários de estudo. Analisando a diferença do pico de elevação entre os extremos norte e sul da baía, nota-se que a amplificação máxima é de cerca de 30 cm, enquanto a diferença de fase máxima é de aproximadamente uma hora.

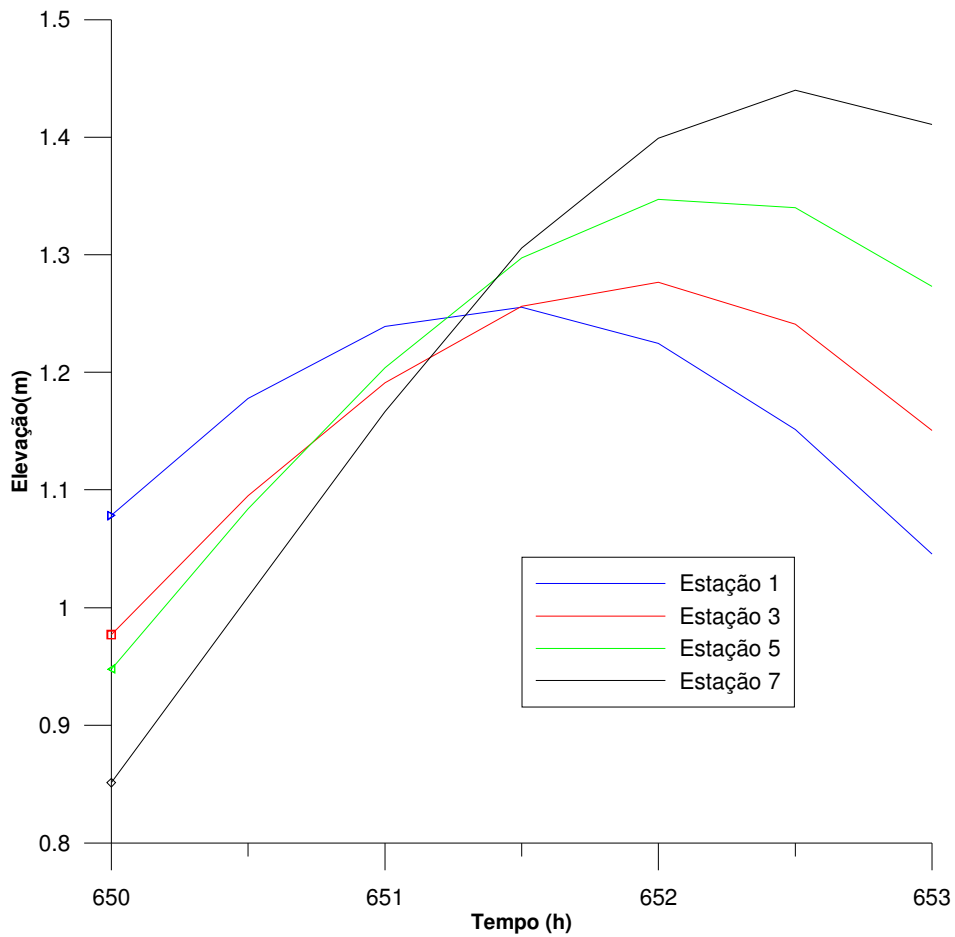


Figura 17: Cenário de Ventos Usuais - Variação da elevação de 5 estações de registro ao longo de um período de 3 h, durante a segunda sizígia. São observadas as diferenças de fase e de amplificação entre os extremos do domínio do estudo.

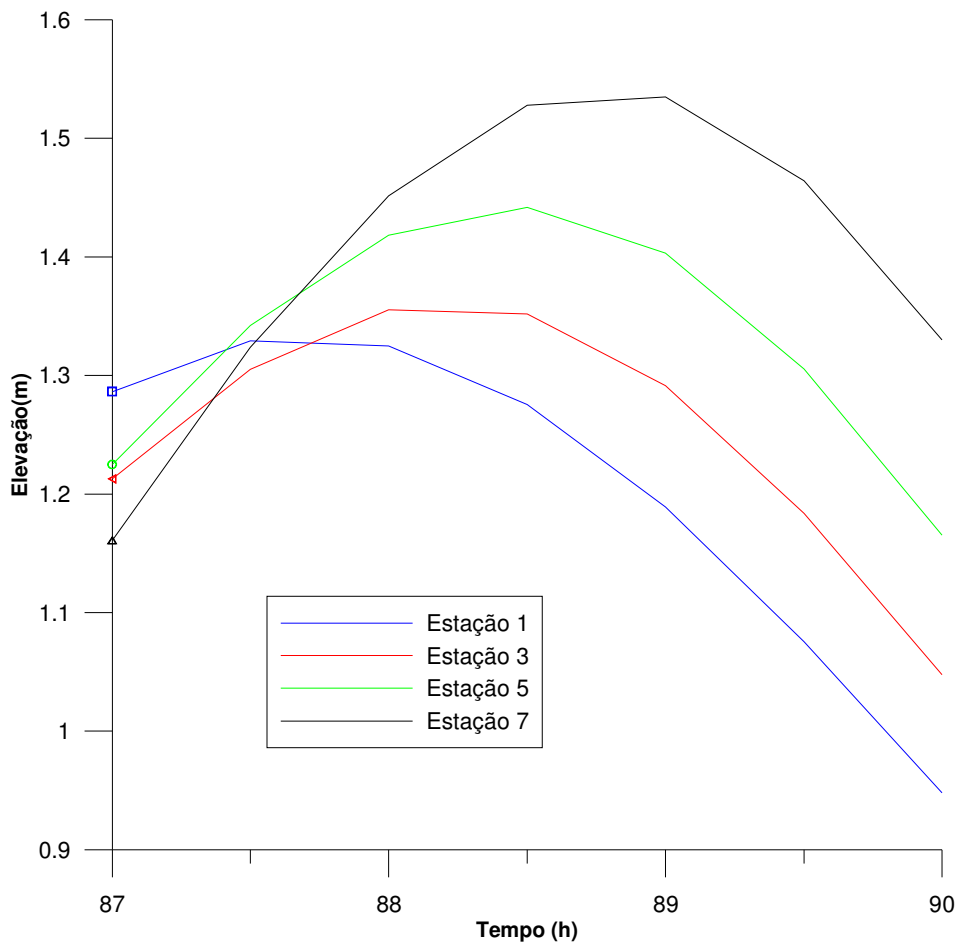


Figura 18: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria- Variação da elevação de 5 estações de registro ao longo de um período de 3 h, durante a segunda sizígia. São observadas as diferenças de fase e de amplificação entre os extremos do domínio do estudo.

A Figura 19 apresenta uma linha hipotética que liga o norte da Baía de Guanabara ao extremo sul do domínio. A Figura 20 e a Figura 21 mostram a variação da elevação ao longo da distância ao ponto de origem dessa linha (primeiro ponto ao norte) de uma maré de sizígia para os dois cenários de estudo. Considera-se o instante de maré de sizígia em relação à Estação 2 (desembocadura).

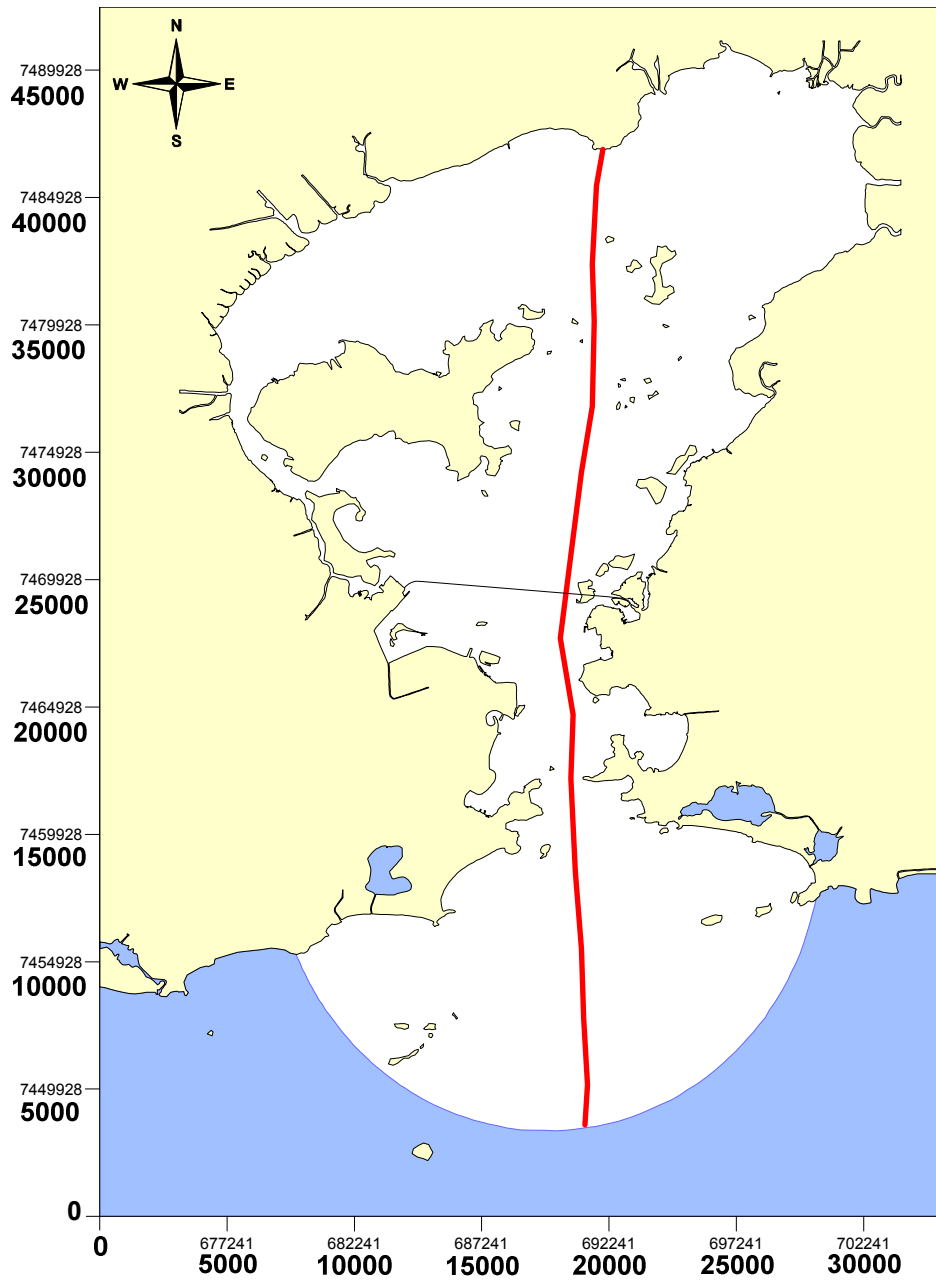


Figura 19: Linha auxiliar que liga o extremo norte ao extremo sul do domínio de estudo.

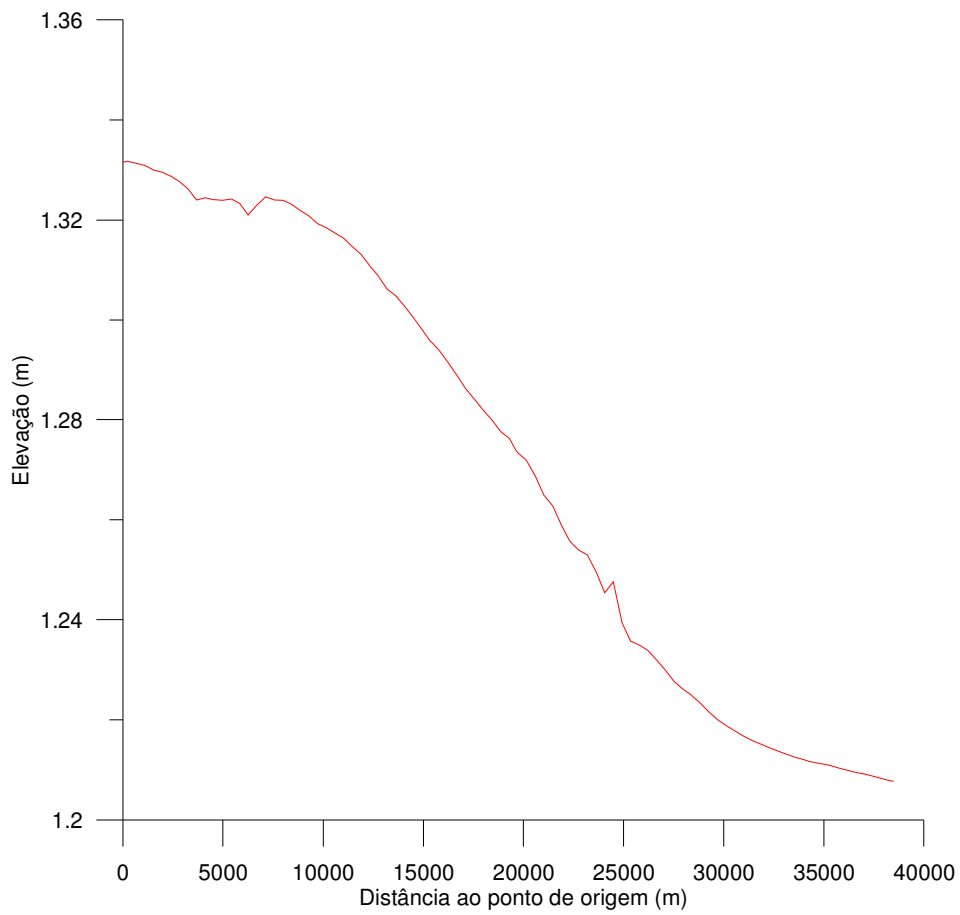


Figura 20: Cenário de Ventos Usuais - Variação da elevação ao longo da linha auxiliar, que vai do norte ao sul do domínio de estudo. O ponto de origem é o localizado mais ao norte. O instante tomado é de uma preamar de maré de sizígia.

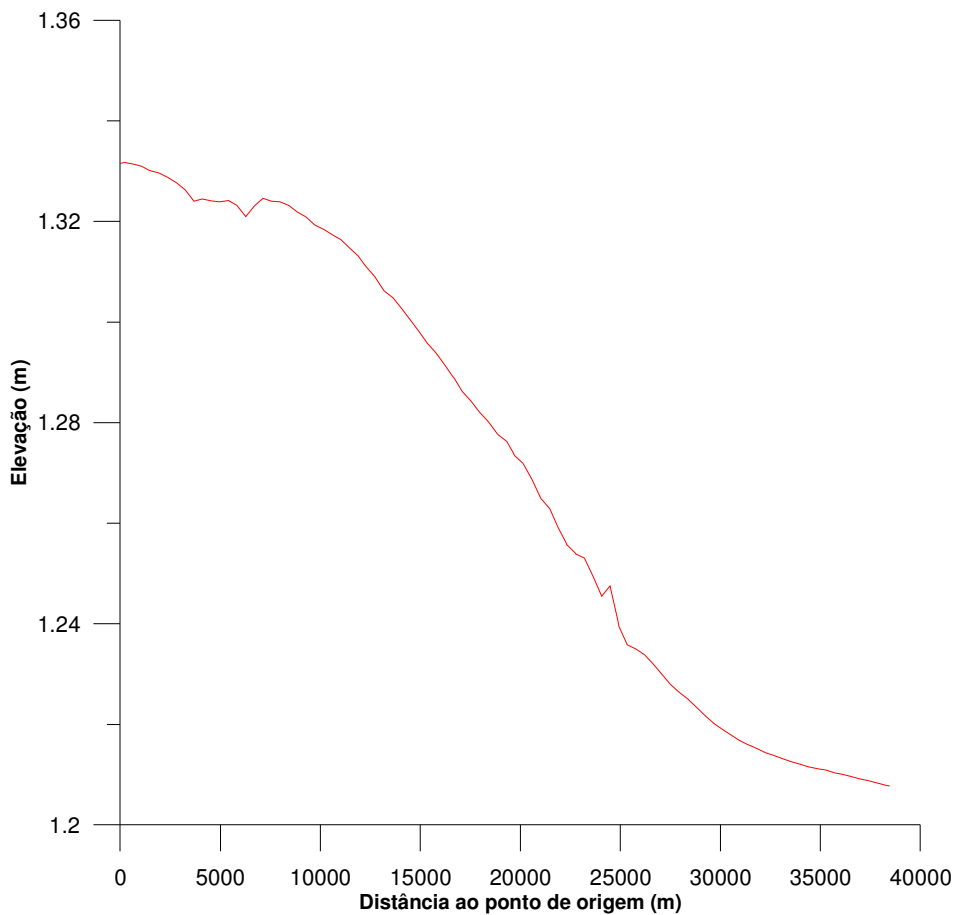


Figura 21: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Variação da elevação ao longo da linha auxiliar, que vai do norte ao sul do domínio de estudo. O ponto de origem é o localizado mais ao norte. O instante tomado é de uma preamar de maré de sizígia.

A fim de se estudar o padrão de circulação das águas da baía, foi realizada uma análise estatística simplificada dos valores de velocidade das estações.

Da Figura 22 à Figura 29, dispostas abaixo, mostra-se o padrão de circulação da Baía de Guanabara nas situações de preamar, baixamar e nas maiores velocidades de maré enchente e vazante, completando um ciclo de maré, para os cenários de entrada de ventos de frente fria e ventos usuais. As figuras representam instantes na maré de sizígia em relação à estação 2 (desembocadura).

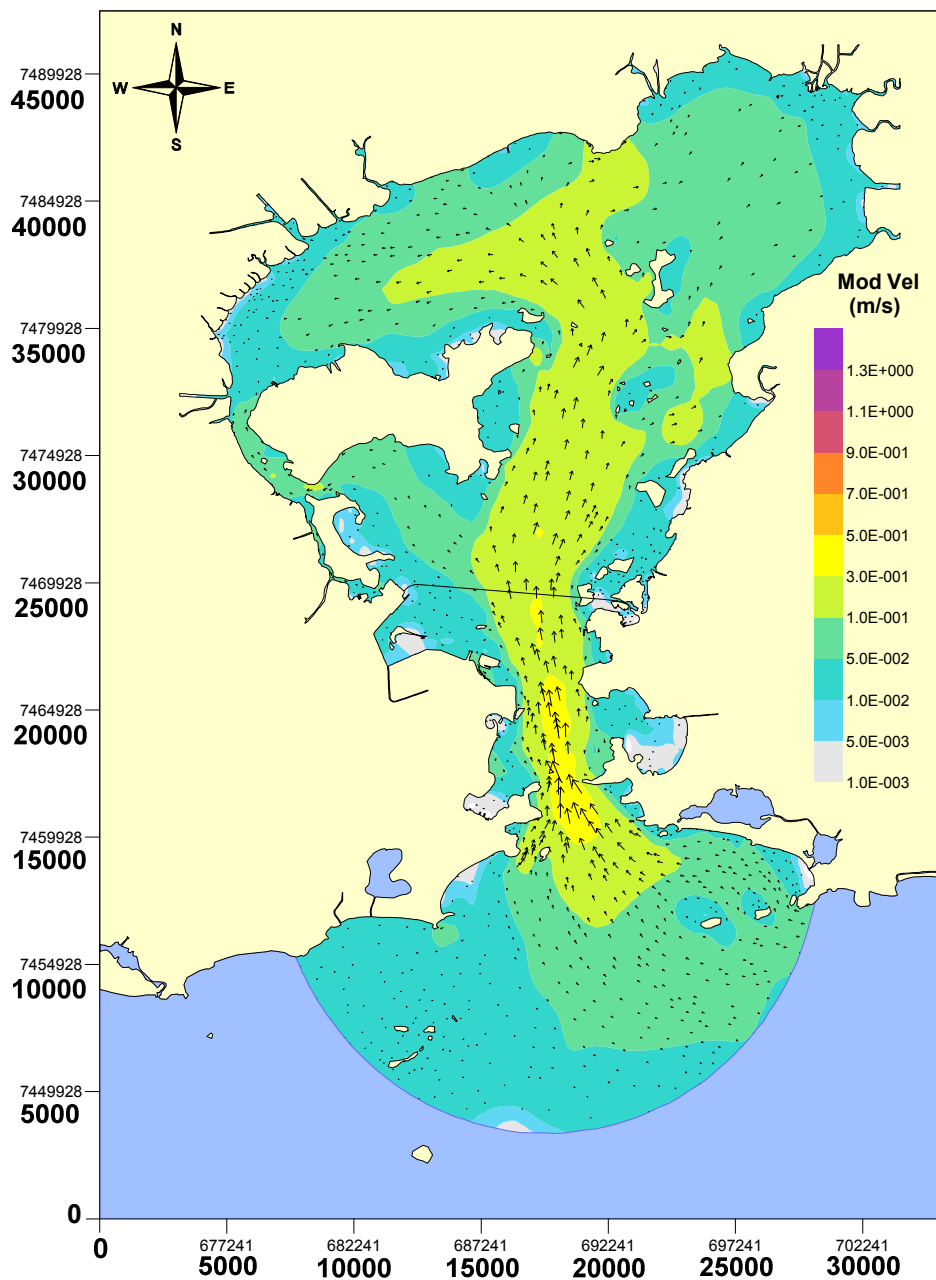


Figura 22: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de preamar na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade. A extensão dos vetores é proporcional ao módulo da velocidade.

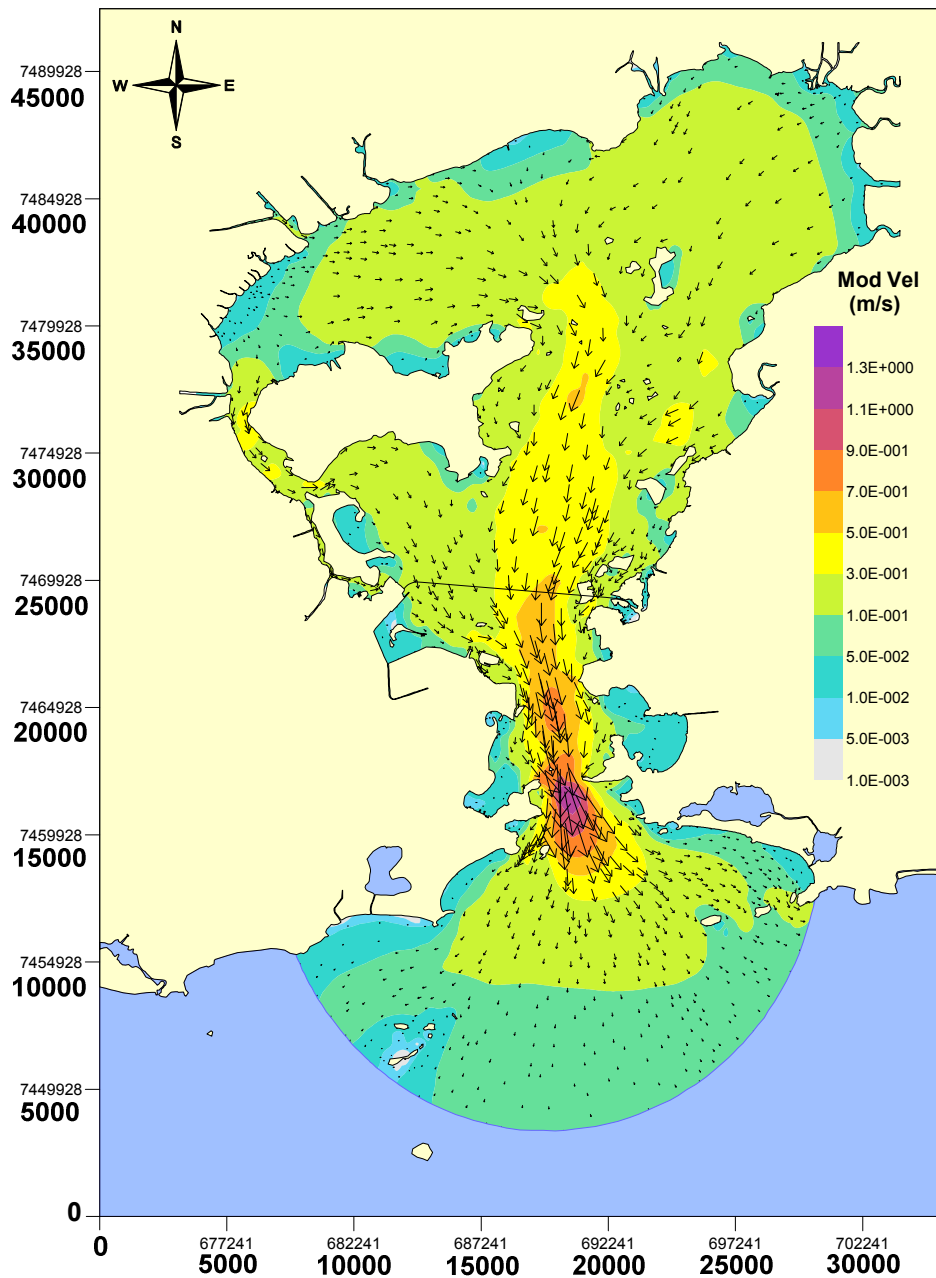


Figura 23: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de maior velocidade de maré vazante na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade. A extensão dos vetores é proporcional ao módulo da velocidade.

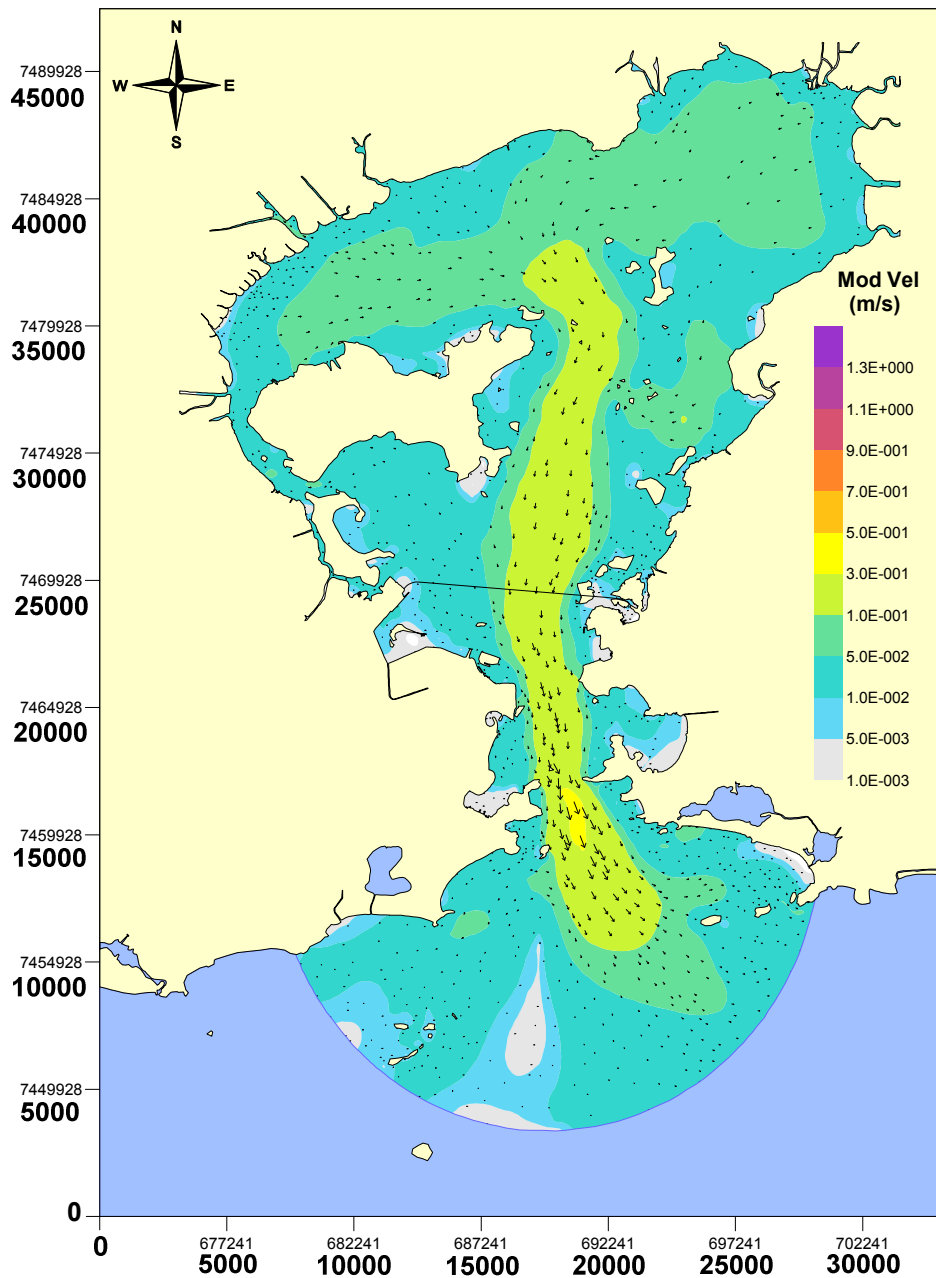


Figura 24: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de baixamar na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade. A extensão dos vetores é proporcional ao módulo da velocidade.

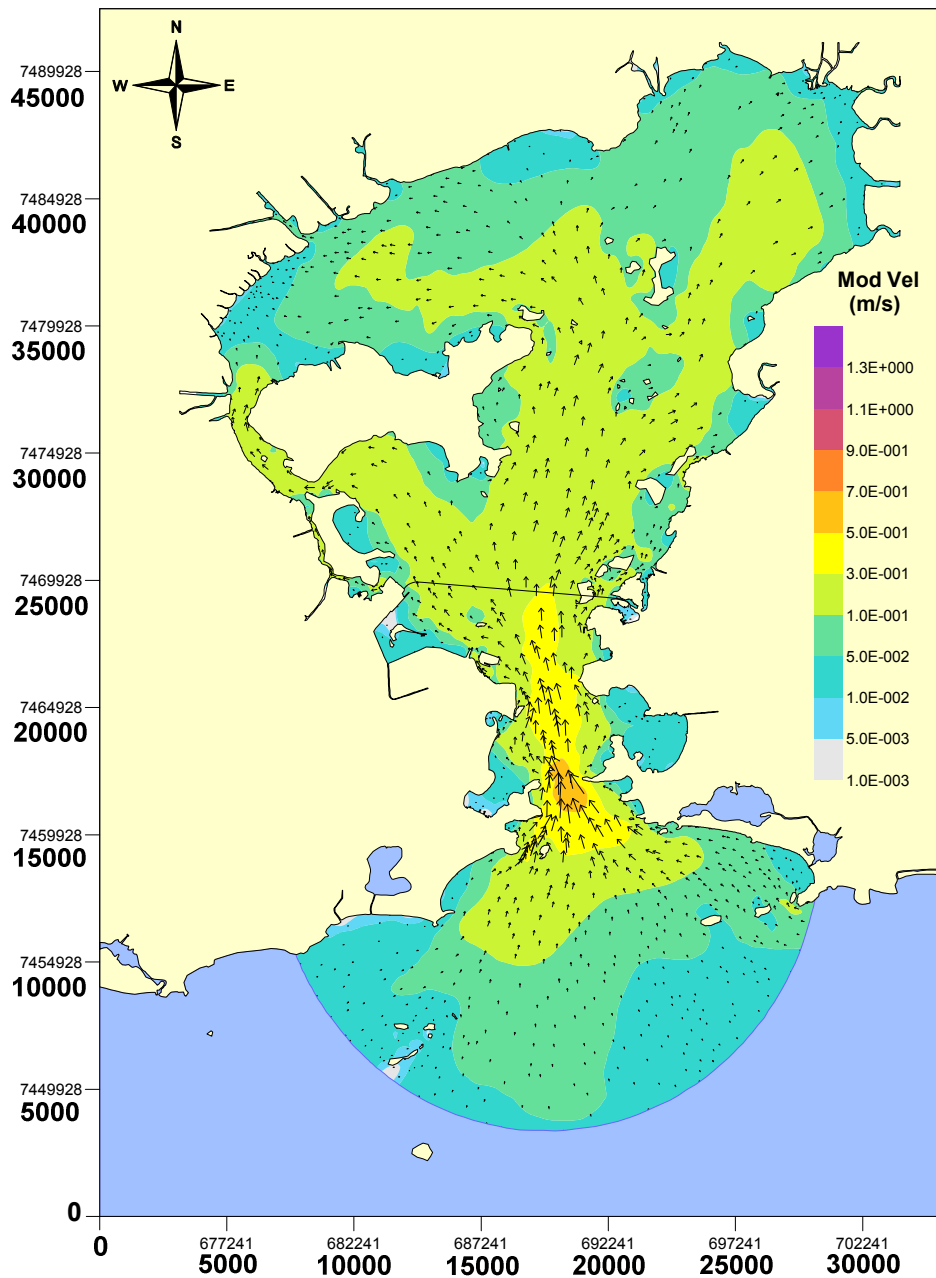


Figura 25: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de maior velocidade de maré enchente na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade. A extensão dos vetores é proporcional ao módulo da velocidade.

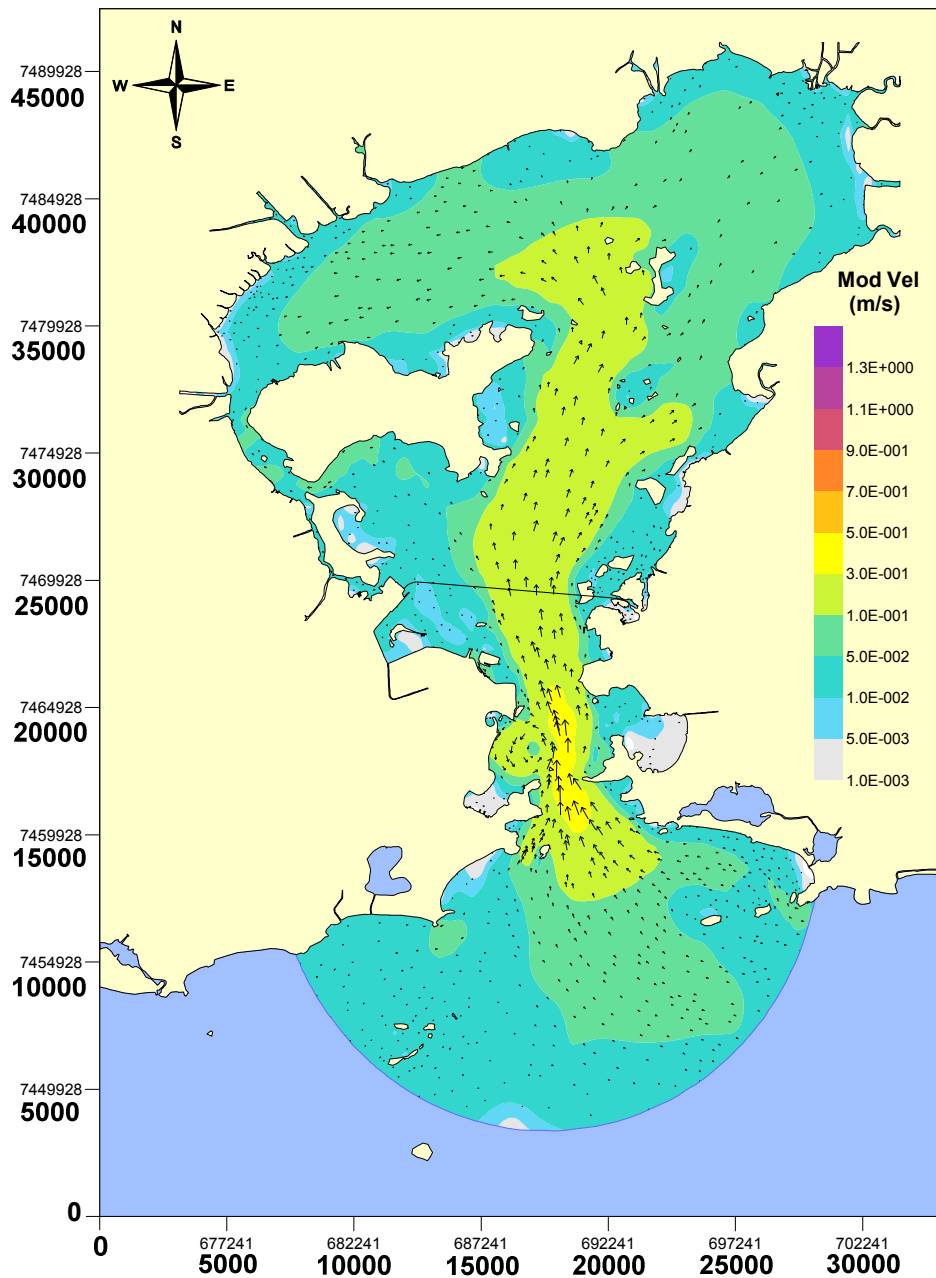


Figura 26: Cenário de Ventos Usuais - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de preamar na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade. A extensão dos vetores é proporcional ao módulo da velocidade.

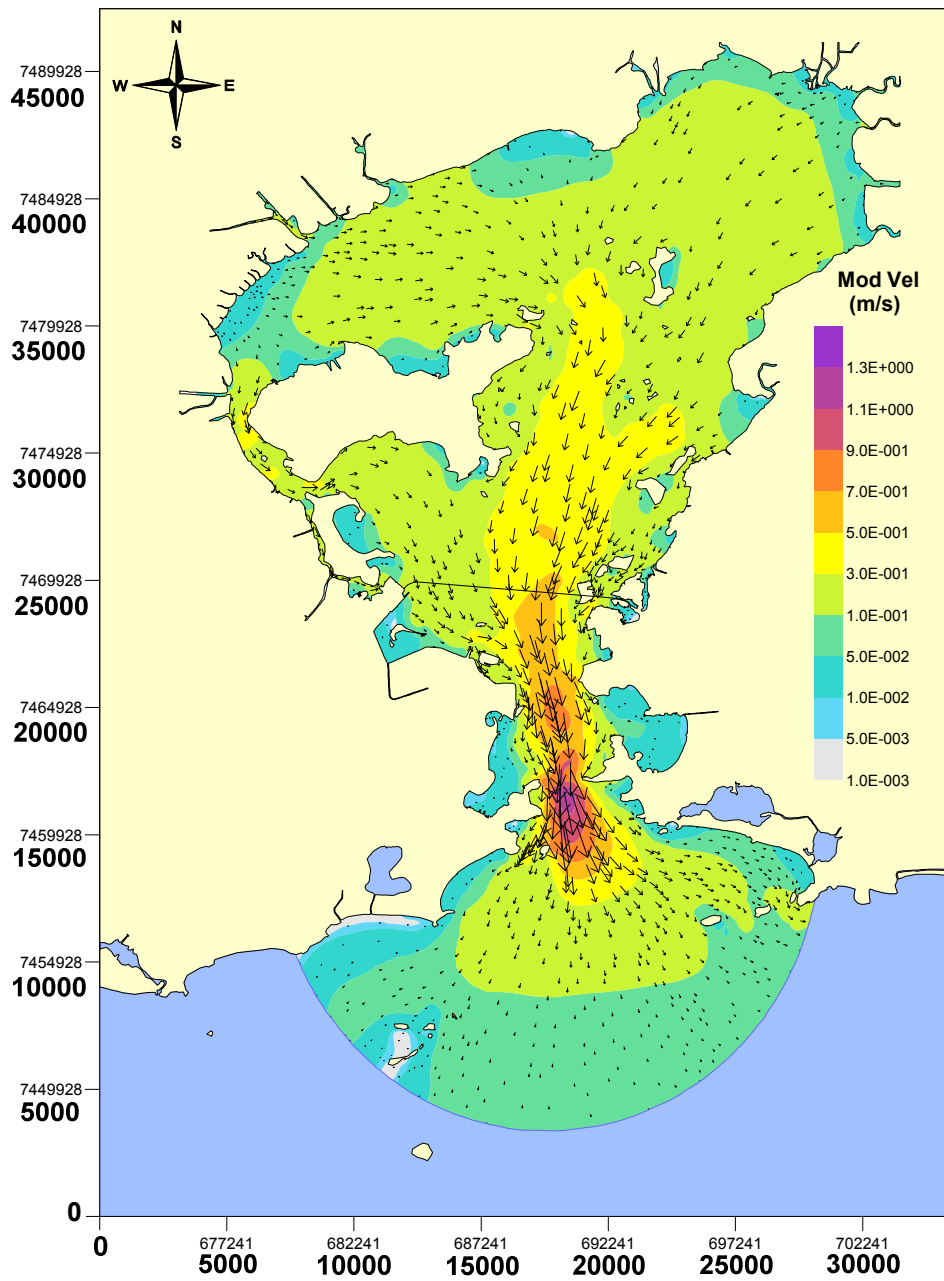


Figura 27: Cenário de Entrada de Ventos Usuais - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de maior velocidade de maré vazante na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade. A extensão dos vetores é proporcional ao módulo da velocidade.

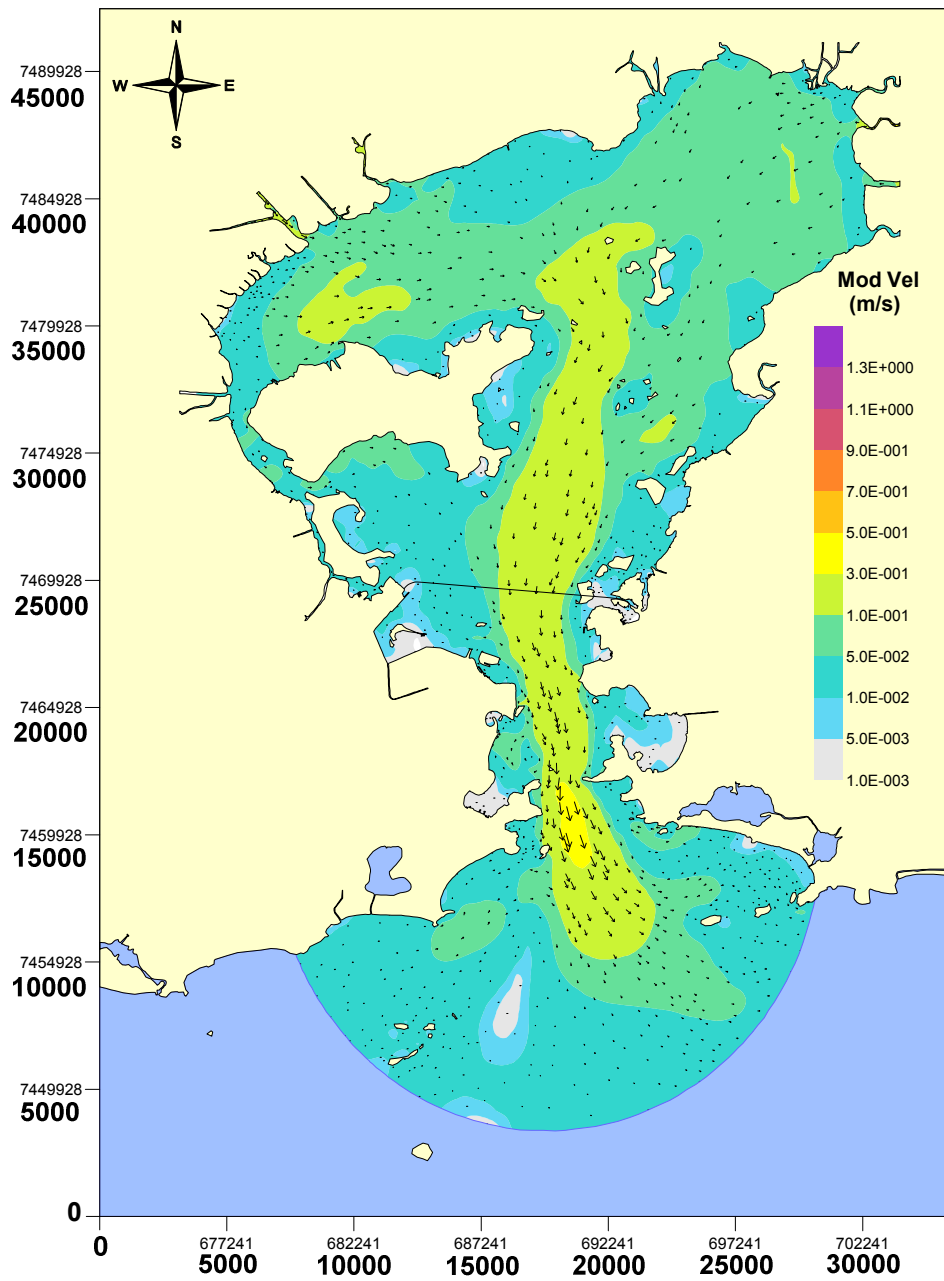


Figura 28: Cenário de Ventos Usuais - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de baixamar na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade. A extensão dos vetores é proporcional ao módulo da velocidade.

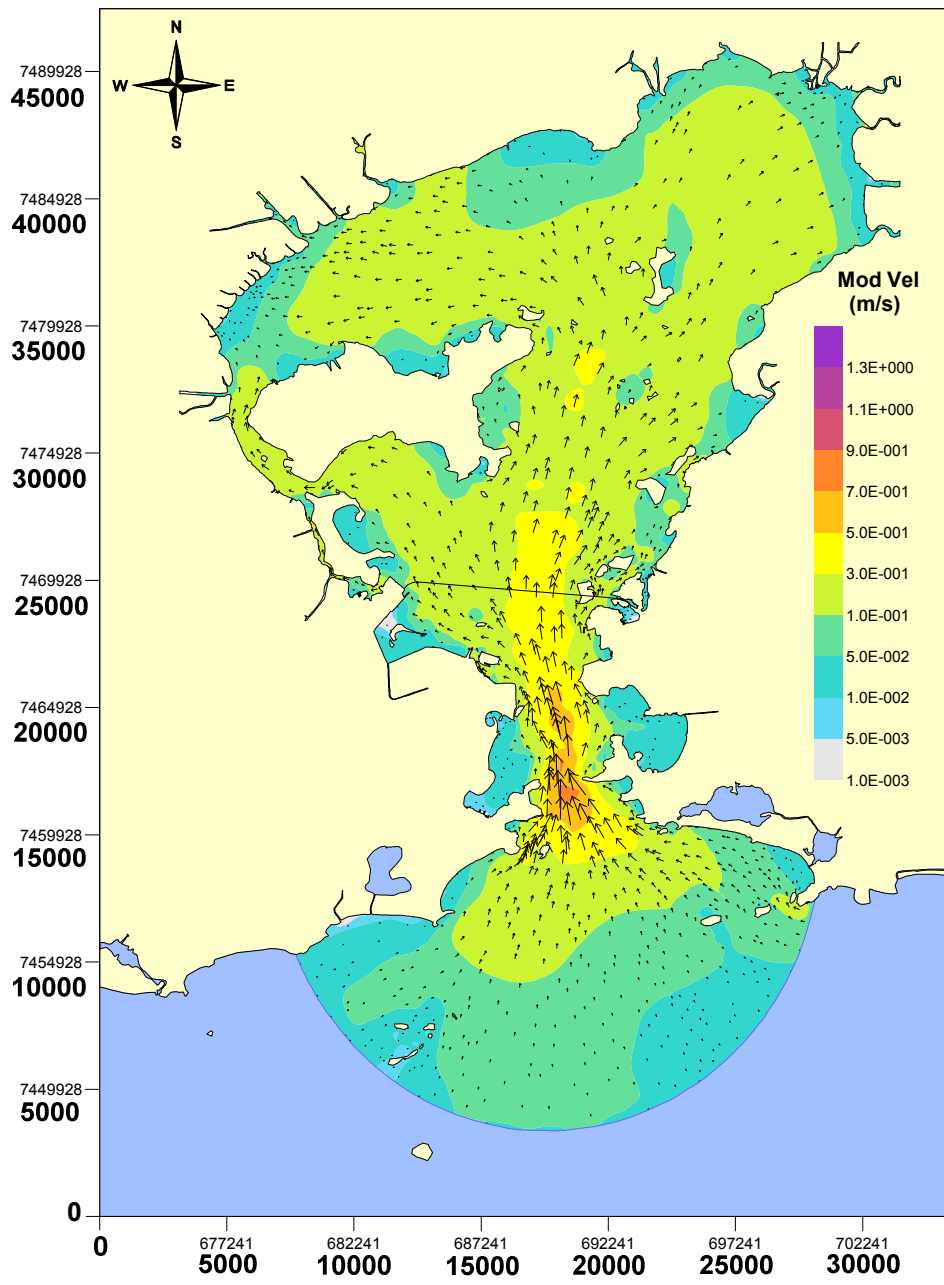


Figura 29: Cenário de Ventos Usuais - Padrão de circulação da Baía de Guanabara para as velocidades num instante de maior velocidade de maré enchente na maré de sizígia, indicando os vetores e as isolinhas de velocidade. A extensão dos vetores é proporcional ao módulo da velocidade.

6 Estudo de Troca de Massas d'Água

De modo a avaliar até que ponto a troca de massas d'água da baía com o mar influencia as praias oceânicas, aplicou-se um modelo de transporte euleriano ao domínio de modelagem.

6.1 Dados de Implementação do Modelo

Estudos de trocas de massa d'água não dependem de muitos dados reais, à exceção daqueles que já foram implementados no modelo de circulação hidrodinâmica que é utilizado como base para o modelo euleriano. O que se faz é, basicamente, atribuir uma concentração igual a 1 para a extensão que é o objeto de observação, conforme será detalhado.

6.1.1 Caso 1

No caso de avaliar a troca de água da baía com as praias, determinou-se toda a concentração da Baía de Guanabara como igual a 1. Essa condição é útil, pois através dos diversos fenômenos hidrodinâmicos, a água da baía vai se misturar com as águas oceânicas, fazendo cair essa concentração.

Ao final da modelagem, o valor de concentração resultante de cada ponto vai representar a porcentagem dessa água que era originalmente da baía. Por exemplo, caso a concentração na praia de Copacabana, após um mês de simulação, seja de 0,1, isso significa que 10% da água que se encontra ali nesse momento era pertencente a baía no início da simulação.

O tempo de simulação deste cenário foi de um mês, tanto para as condições de ventos usuais como as de frente fria.

6.1.2 Caso 2

O outro cenário modelado procurou avaliar, ao invés da influência da baía como um todo, como a água nos rios da baía influenciam as águas das praias. Assim, a concentração de todo o domínio de modelagem foi definida como nula, enquanto os rios fornecem um fluxo com concentração igual a 1. Dessa maneira sabe-se realmente até que ponto a água dos rios da baía chegam às praias oceânicas.

Do mesmo modo que no cenário anterior, caso a praia de Copacabana possua a concentração de 0,1 ao final de um mês de modelagem, isso significa que 10% de sua água nesse momento veio dos rios da Baía de Guanabara.

O tempo de simulação deste cenário foi de seis meses, para as condições de ventos usuais e de frente fria.

6.2 Resultados e Análise

6.2.1 Caso 1

Com o tempo de simulação de 1 mês, a contribuição das águas da baía às águas oceânicas é pequena. Valores de no máximo 25% são alcançados nas praias oceânicas.

As figuras a seguir apresentam os resultados destas simulações.

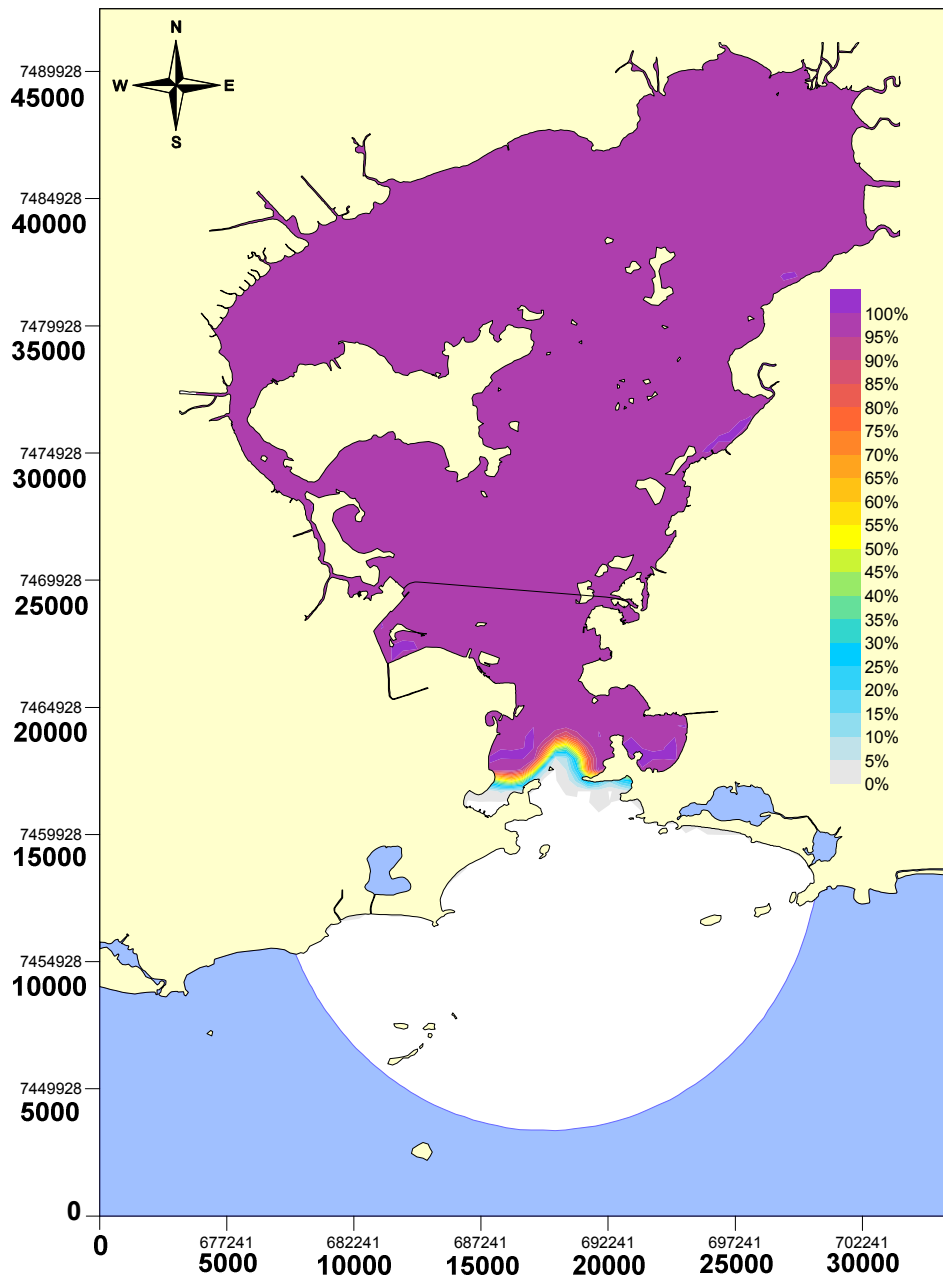


Figura 30: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 hora após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente à baía no instante zero.

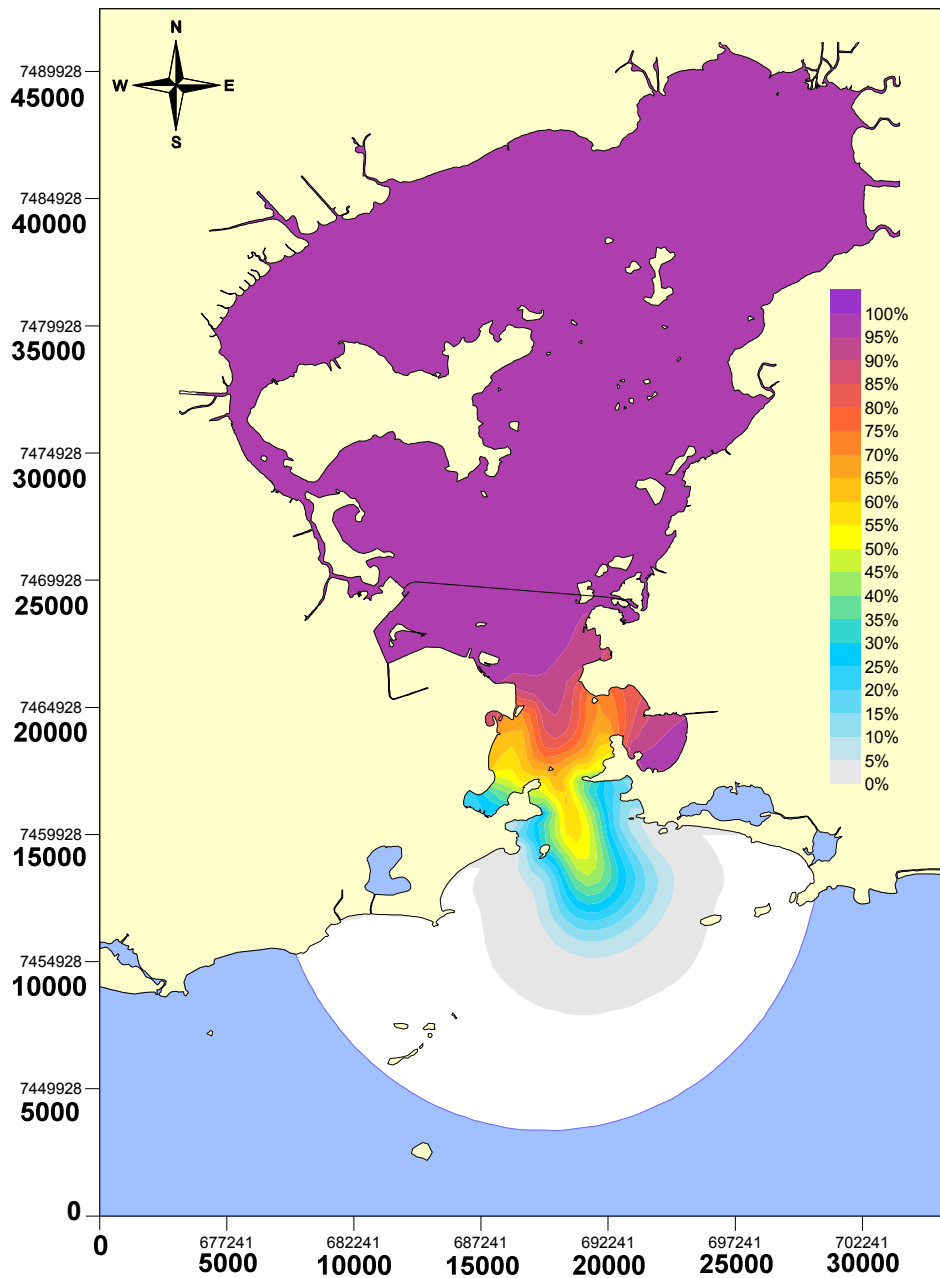


Figura 31: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 dia após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente à baía no instante zero. Nesse momento, as águas da baía já alcançam as praias oceânicas.

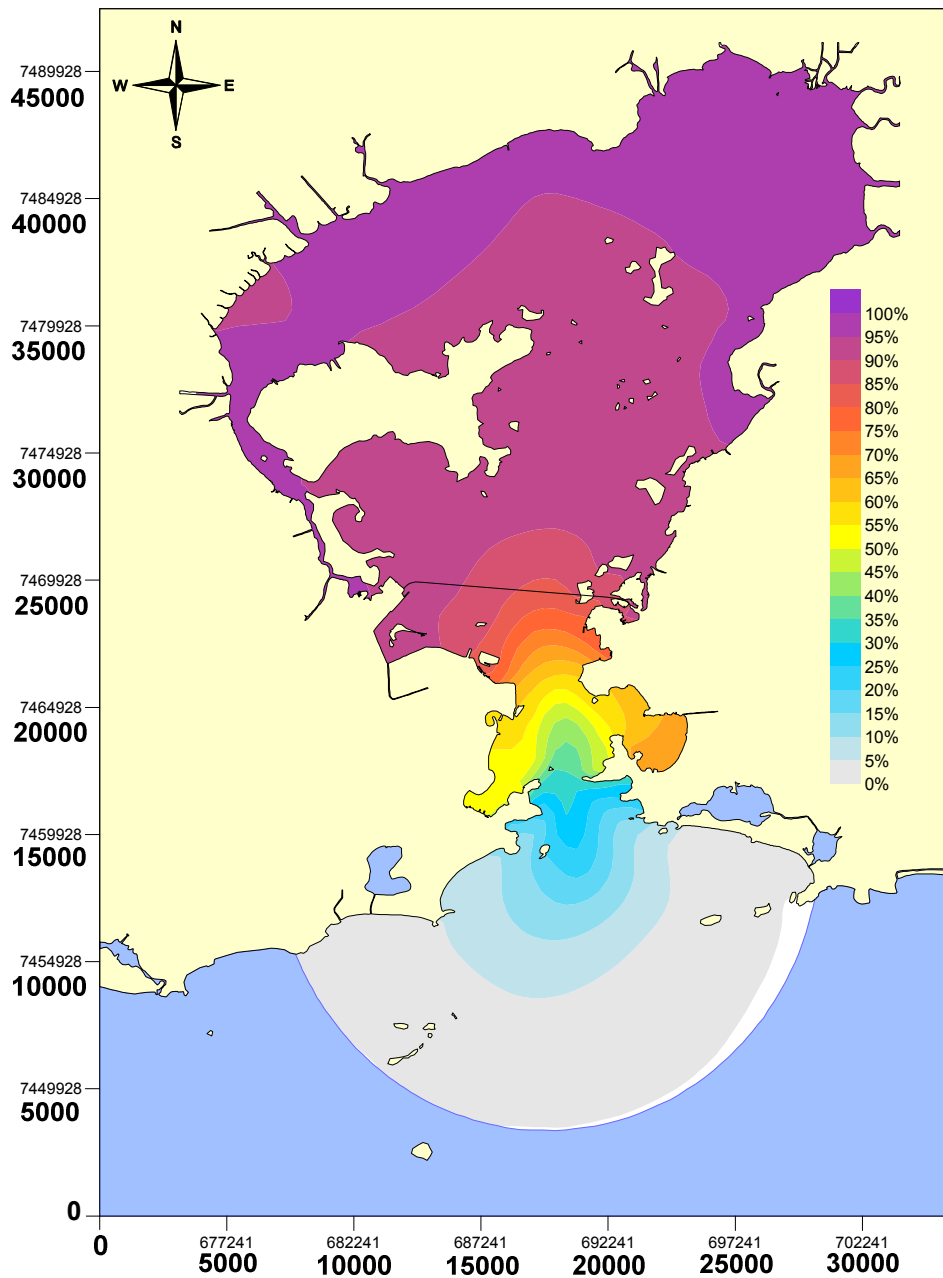


Figura 32: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 semana após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente à baía no instante zero. Quantidades maiores de água da baía chegam às praias oceânicas.

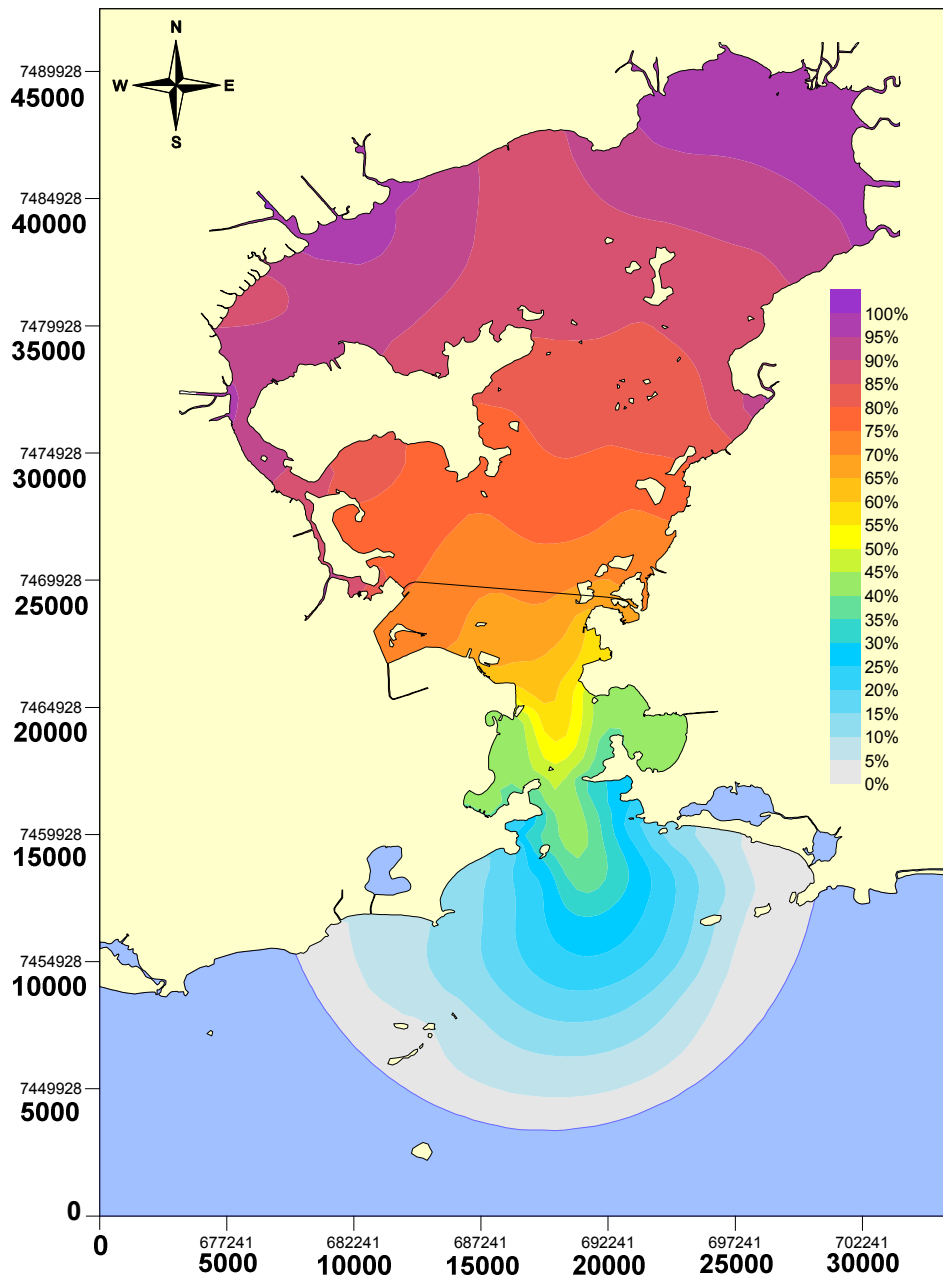


Figura 33: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 mês após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente à baía no instante zero. Após um mês, a porcentagem de água da baía nas praias oceânicas não ultrapassa 25%.

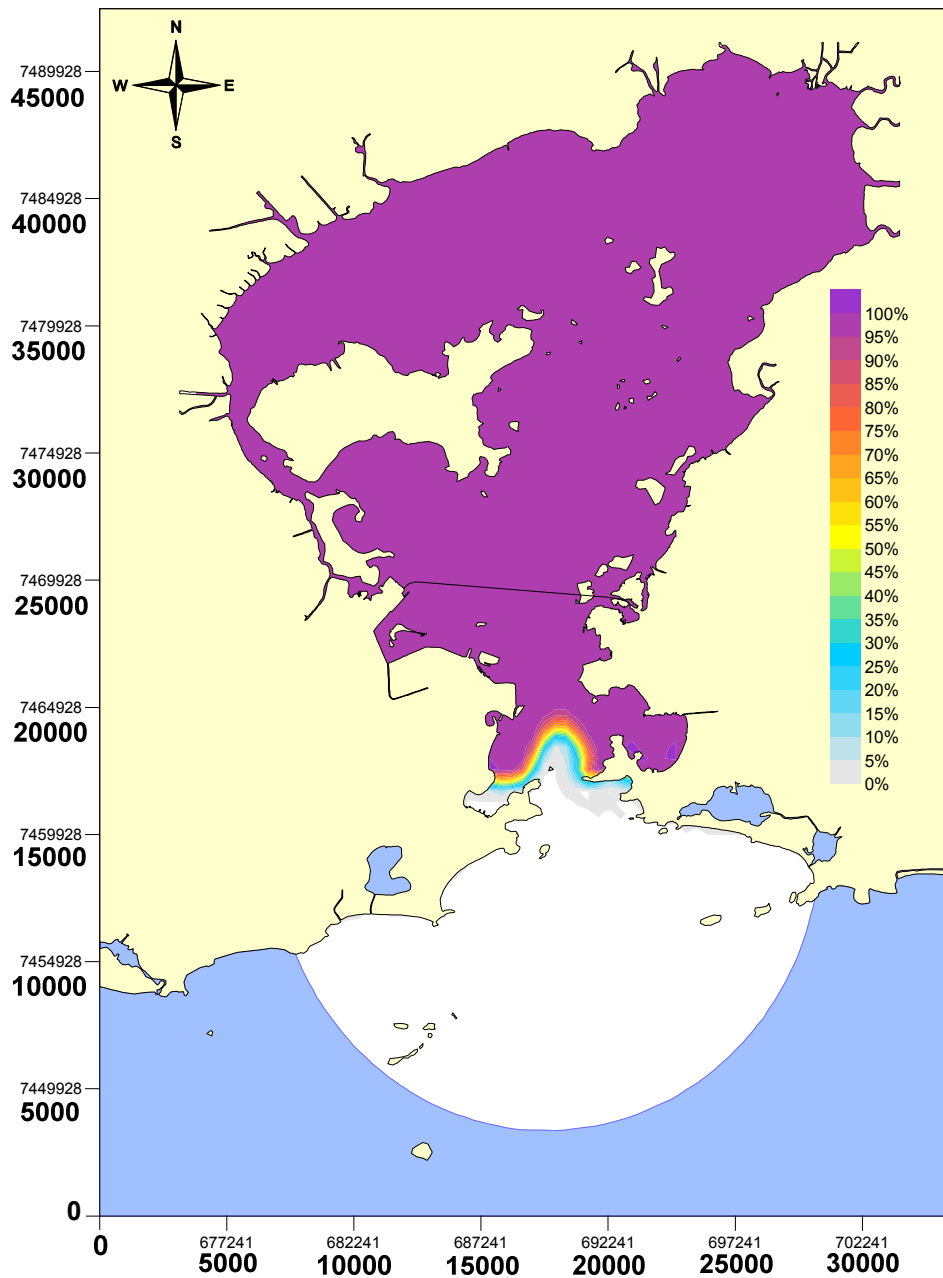


Figura 34: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 hora após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente à baía no instante zero.

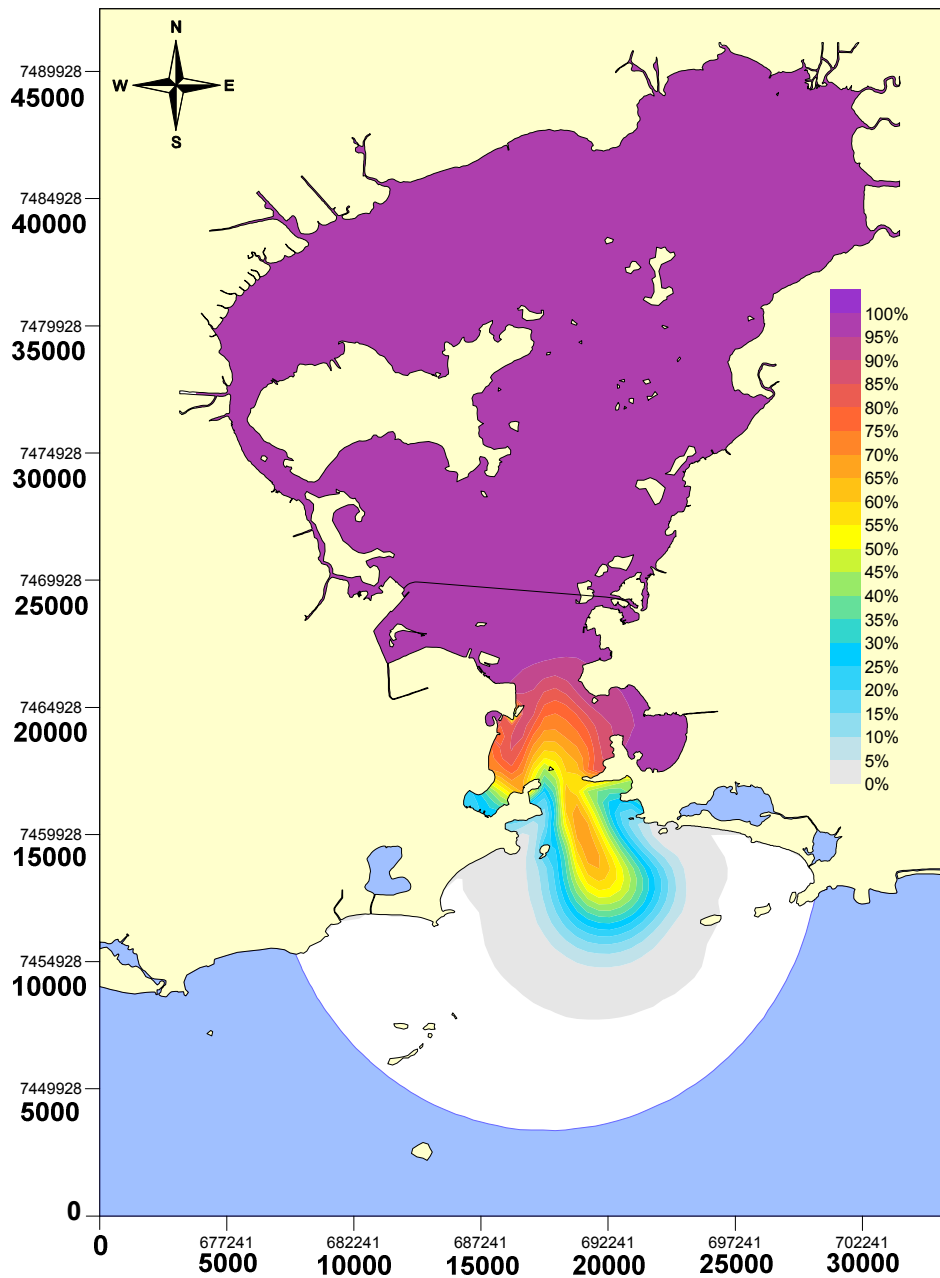


Figura 35: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 dia após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente à baía no instante zero. Nesse momento, as águas da baía já alcançam as praias oceânicas.

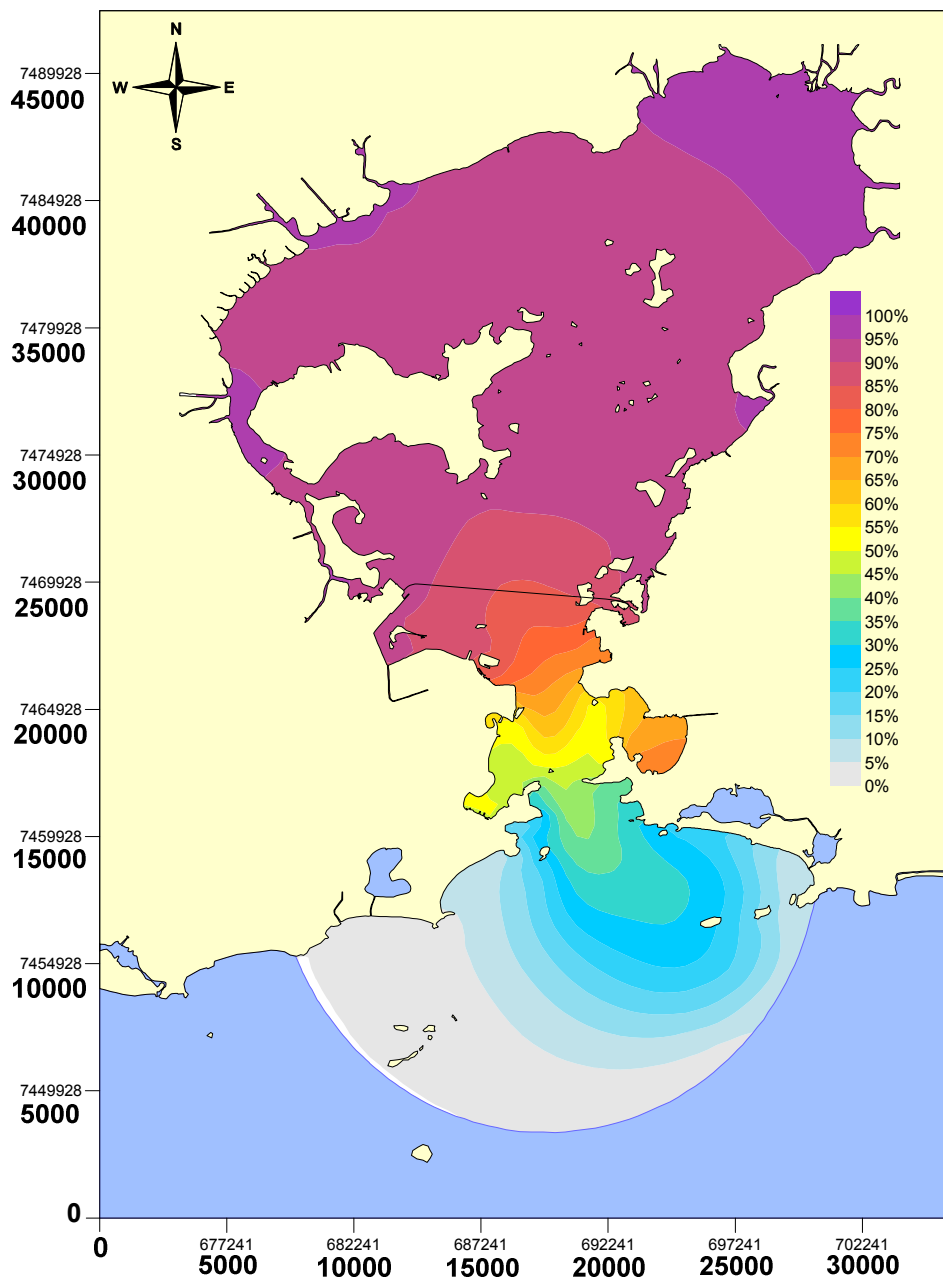


Figura 36: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 semana após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente à baía no instante zero. No cenário de frente fria, o movimento exterior da água da baía é acentuado para o leste.

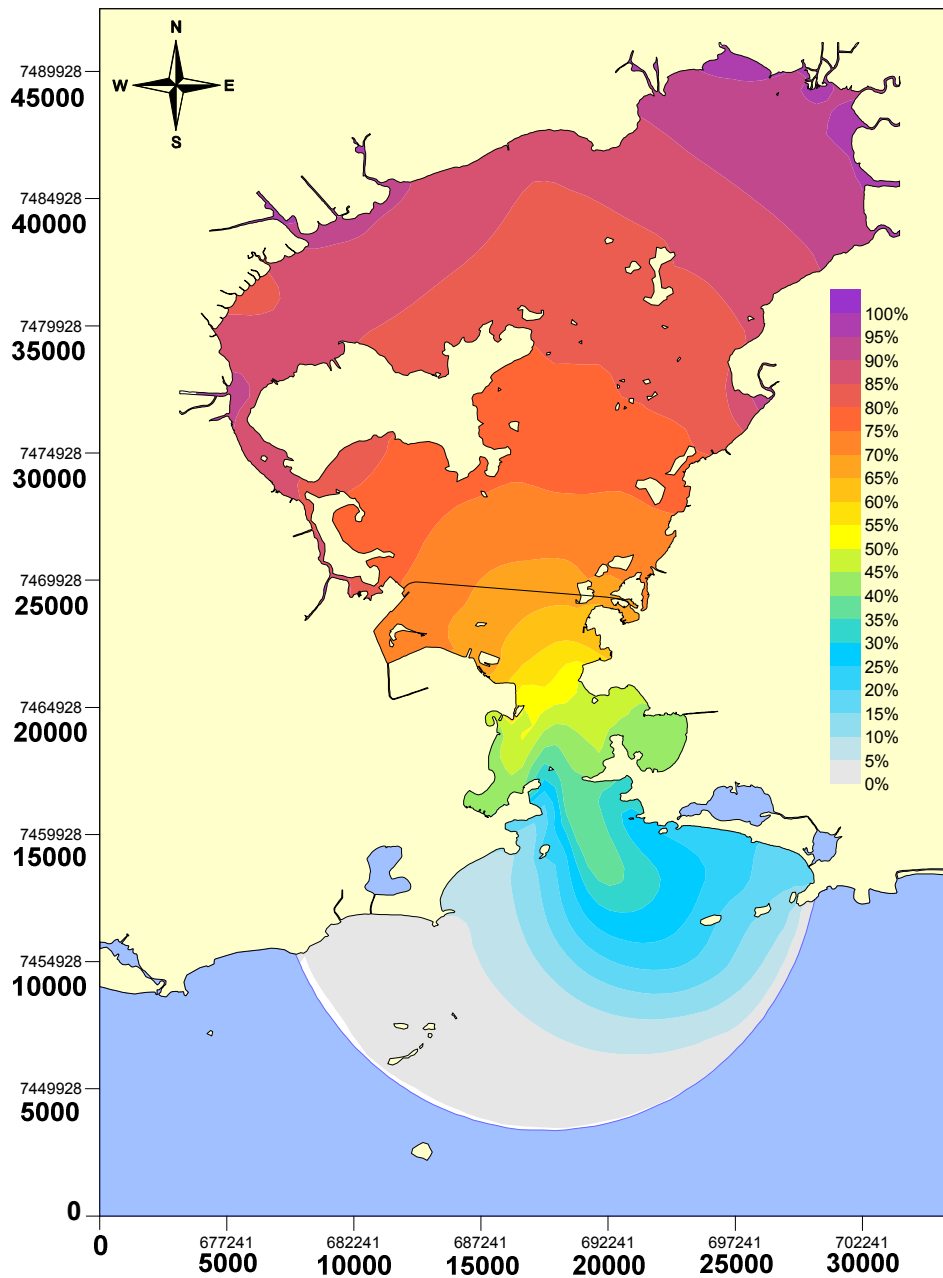


Figura 37: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 mês após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente à baía no instante zero. Com a frente fria, o RJ quase não recebe águas da baía, ao contrário de Niterói, onde cerca de 25% da água das praias veio da baía.

6.2.2 Caso 2

Com o aumento do tempo de simulação, a contribuição dos rios da baía às águas oceânicas tende a aumentar, uma vez que seu fluxo permanece constantemente igual a 1 e há maior tempo para que suas águas saiam do interior da baía. Por esse motivo, optou-se por mostrar resultados somente a partir de 1 mês de simulação.

As figuras a seguir apresentam os resultados destas simulações.

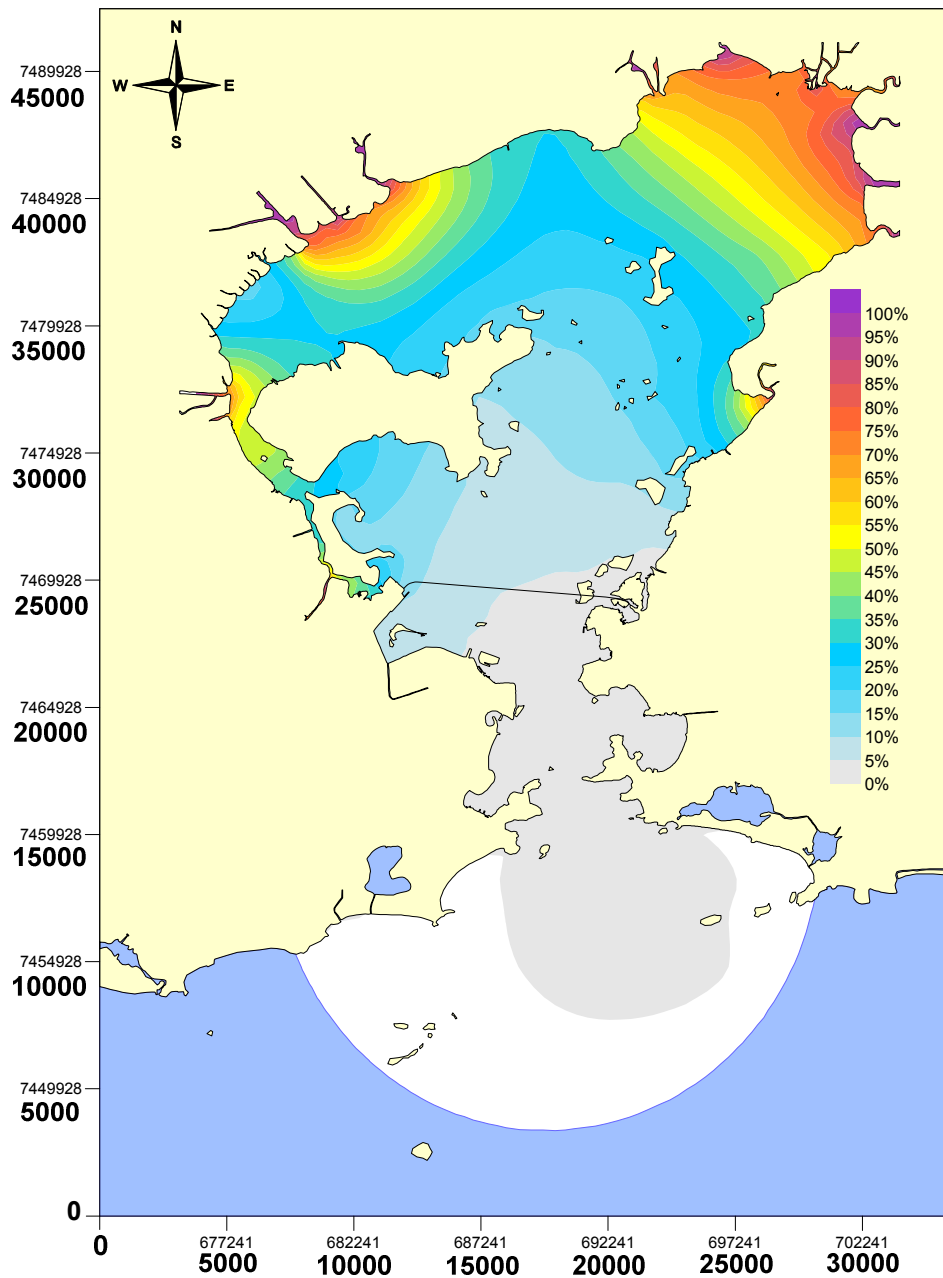


Figura 38: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 mês após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente aos rios da baía em qualquer instante. Após um mês, a água dos rios praticamente ainda não chega às praias.

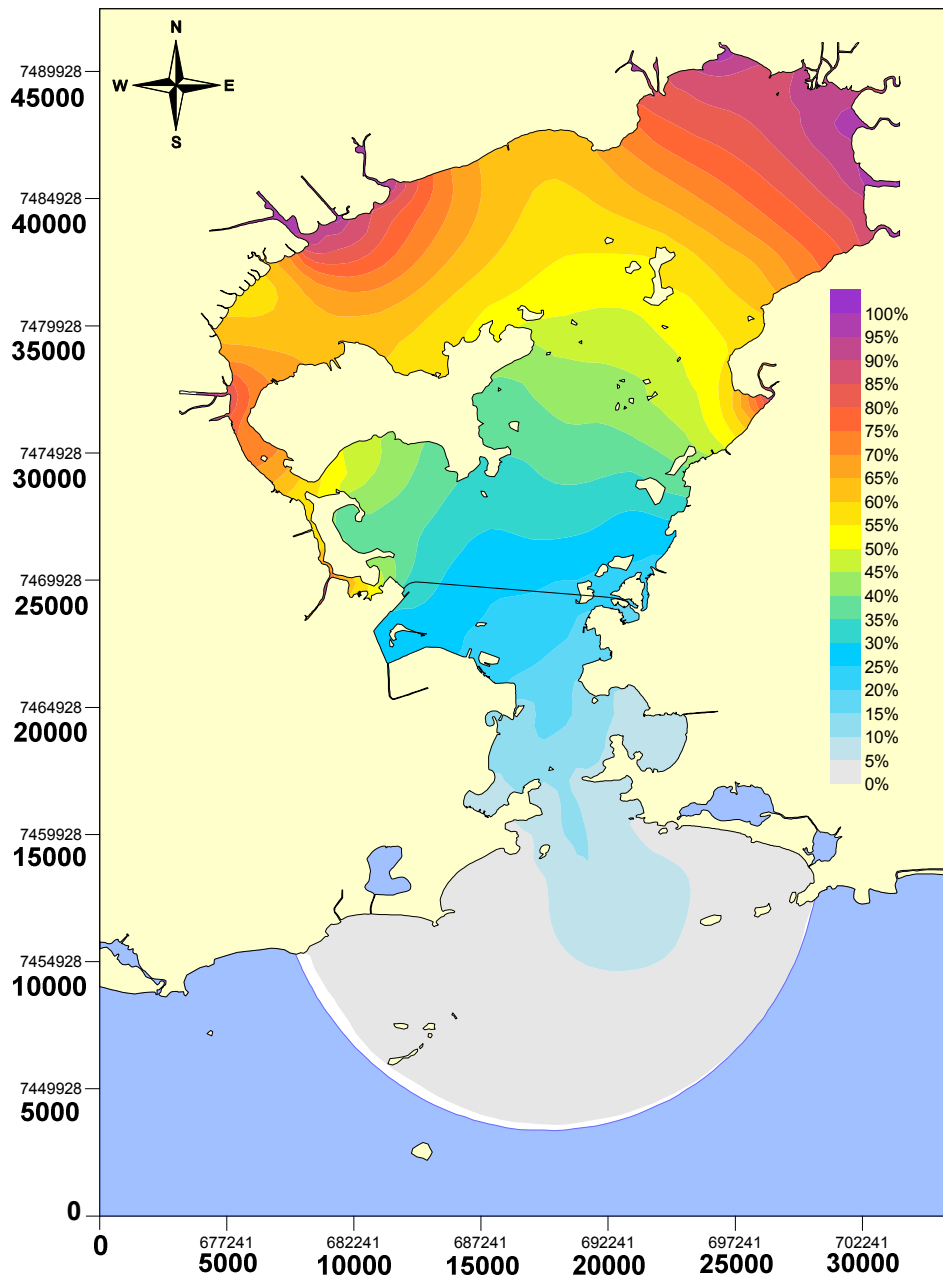


Figura 39: Cenário de Ventos Usuais. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 3 meses após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente aos rios da baía em qualquer instante. Ainda não há quase contribuição alguma dos rios às praias oceânicas.

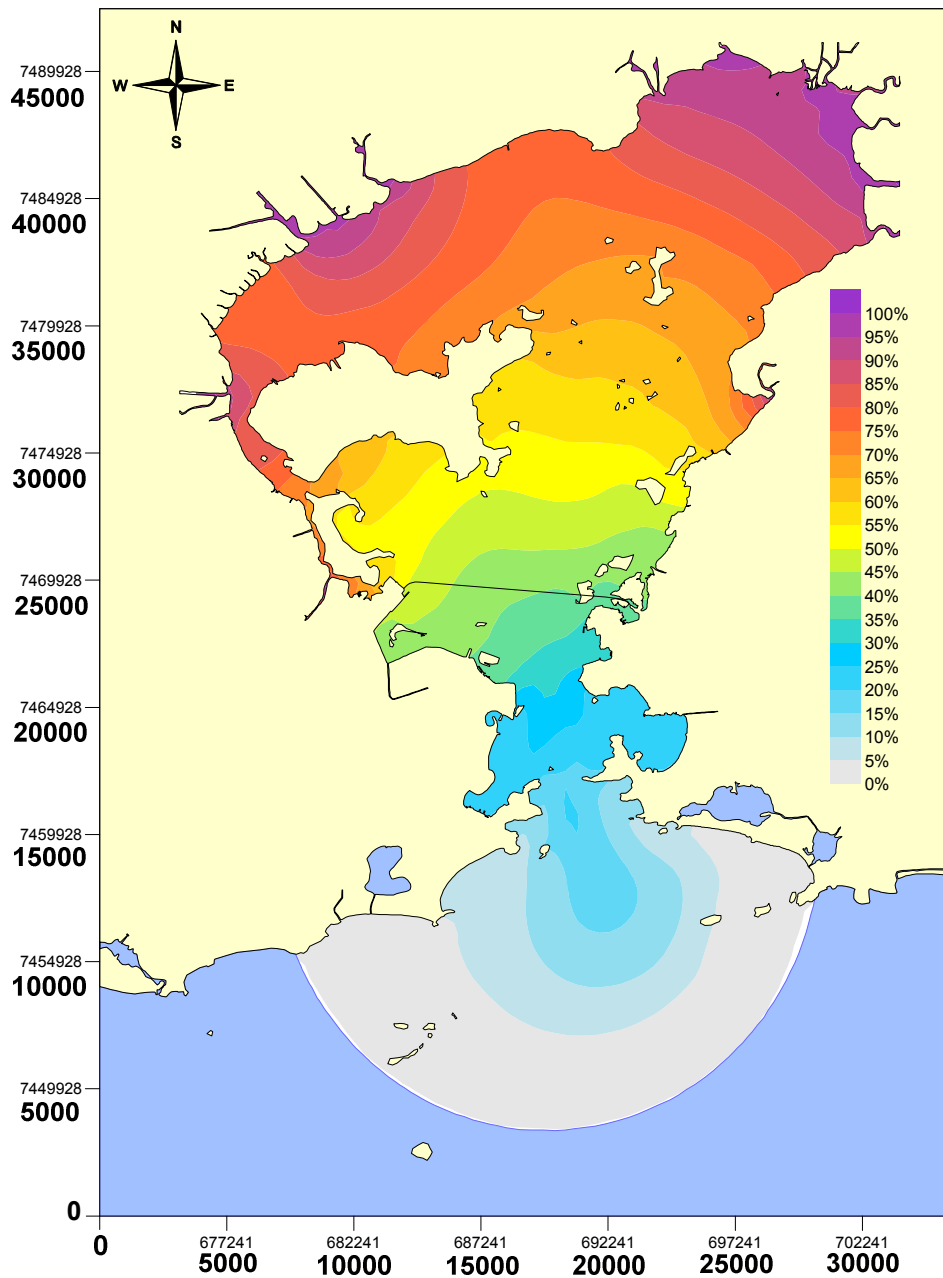


Figura 40: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 6 meses após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente aos rios da baía em qualquer instante. A contribuição da água dos rios às praias oceânicas não ultrapassa 10%.

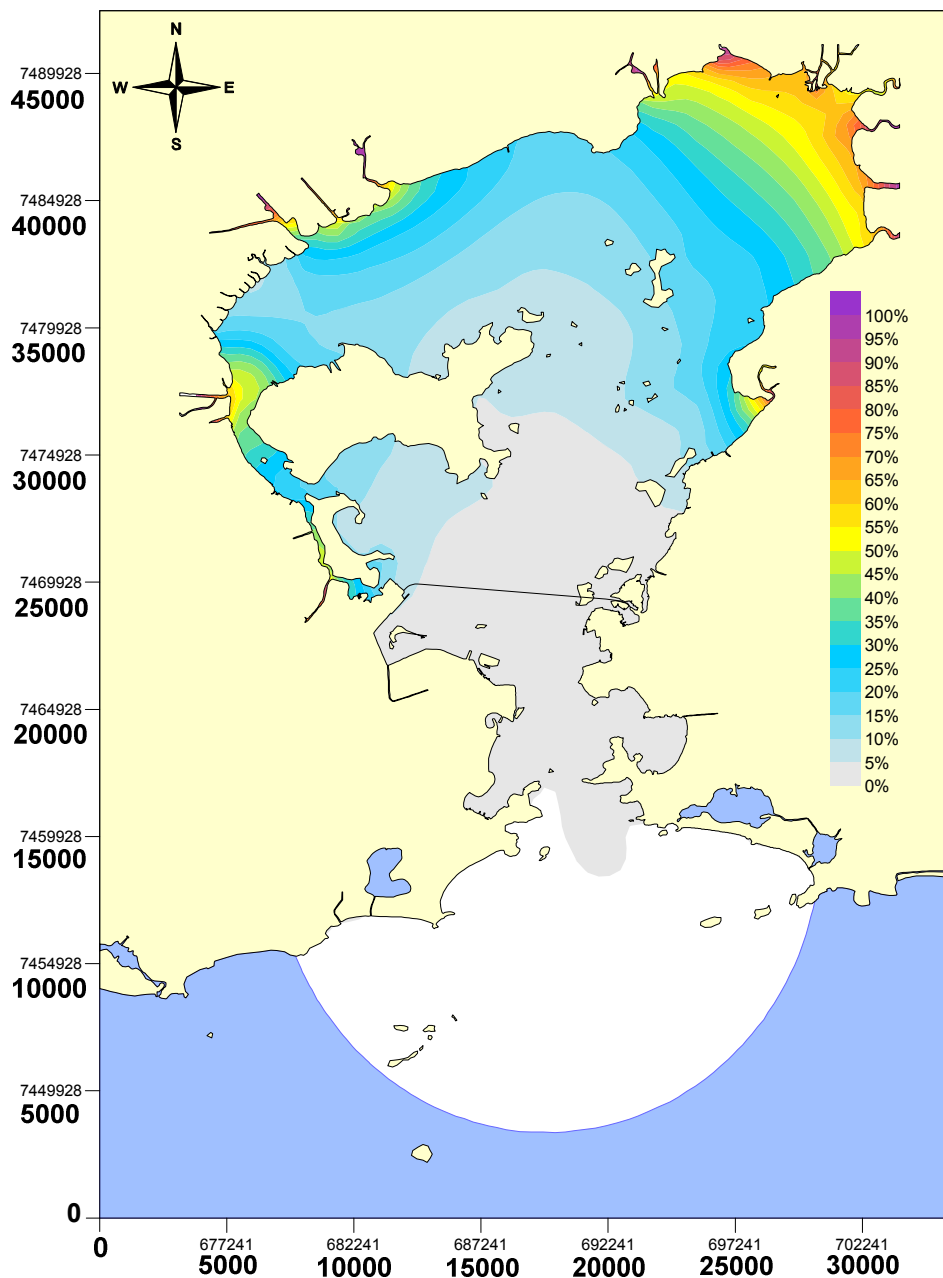


Figura 41: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 1 mês após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente aos rios da baía em qualquer instante. Após um mês, a água dos rios ainda não chegou às praias oceânicas.

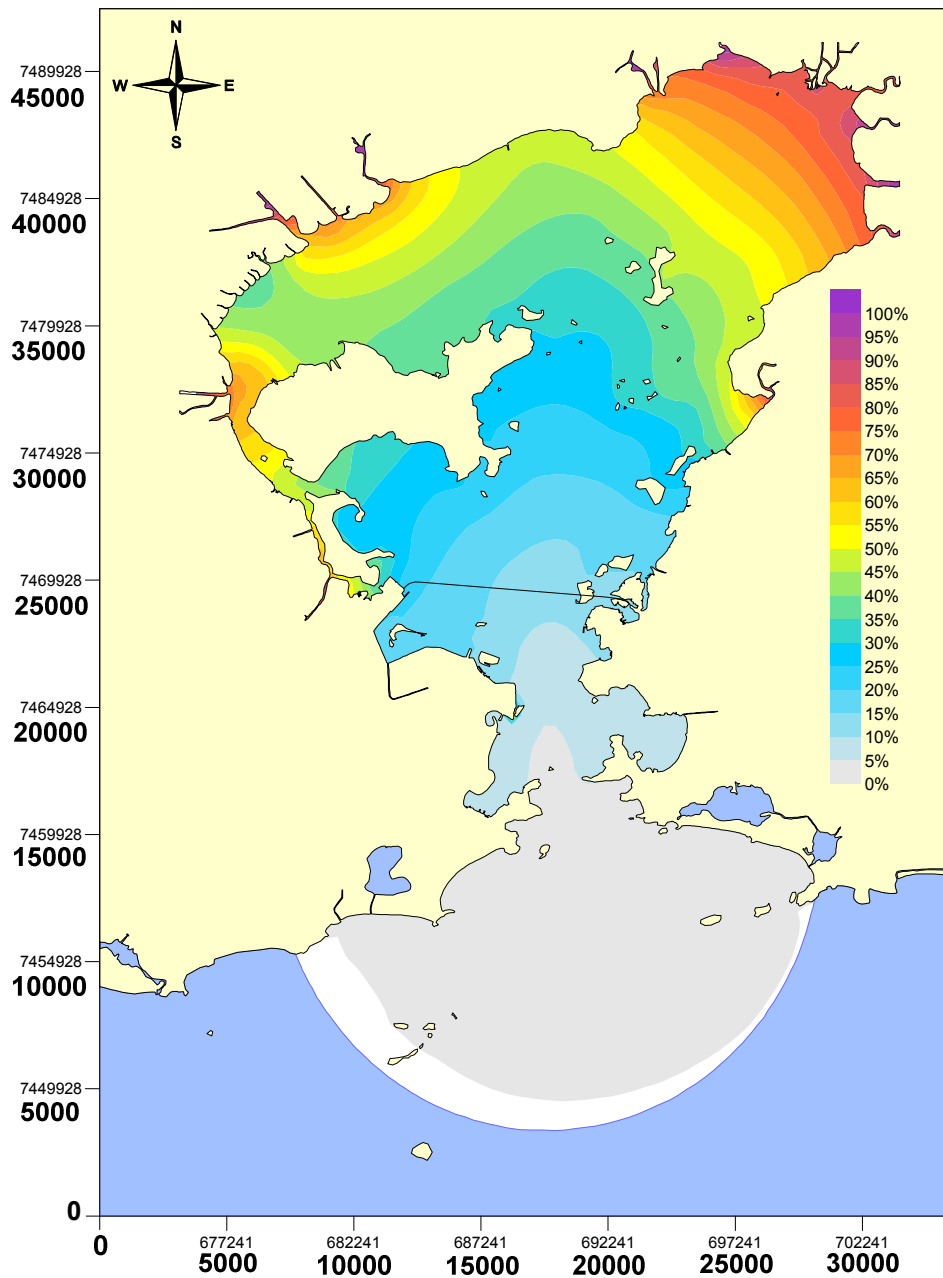


Figura 42: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 3 meses após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente aos rios da baía em qualquer instante. Após 3 meses, a água dos rios praticamente ainda não chegou às praias.

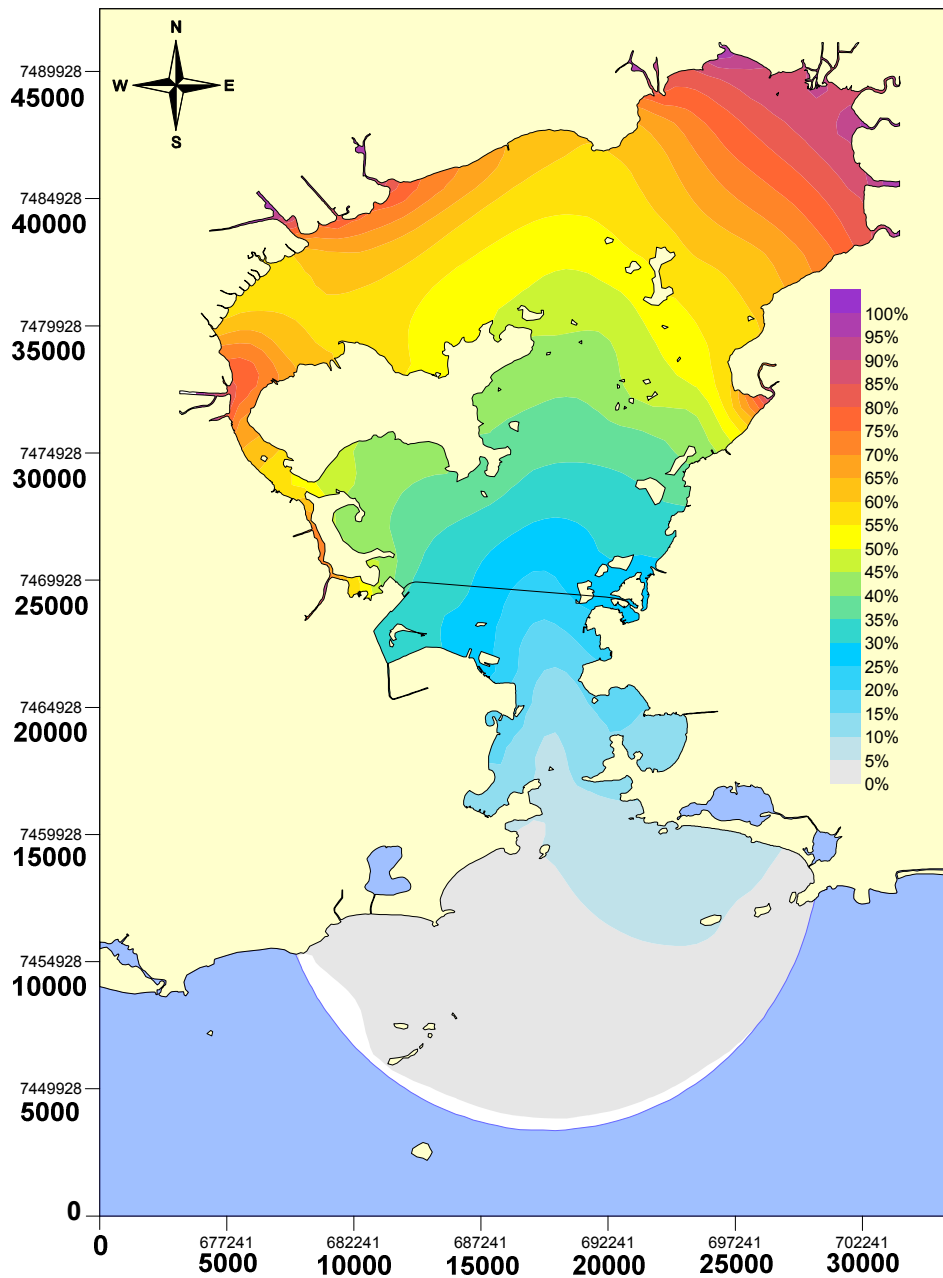


Figura 43: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinha da porcentagem de troca de massas d'água 6 meses após o início da simulação, onde 100% representa água inteiramente pertencente aos rios da baía em qualquer instante. A contribuição da água dos rios às praias oceânicas não ultrapassa 10%.

7 Colimetria

O principal aspecto de qualidade de água avaliado, quando se trata da exposição humana a contaminações, é a colimetria. Esse fato é muito bem representado pelo fato de a resolução CONAMA 274 fornecer dados quantitativos somente de parâmetros microbiológicos, dentre os quais, a colimetria.

Para avaliar se os rios da baía contribuem com cargas significativas desse parâmetro às praias, foi utilizado um modelo lagrangeano no qual a única contribuição de coliformes ao sistema modelado era proveniente dos rios que deságuam na baía.

7.1 Dados de Implementação do Modelo

Devido ao fato de os rios da Baía de Guanabara receberem grandes quantidades de esgoto proveniente das áreas urbanas da metrópole, parte deles contém grandes quantidades de coliformes termotolerantes. Para verificar se os microorganismos carregados por esses rios poderiam eventualmente alterar a qualidade da água das praias oceânicas, aplicou-se um modelo lagrangeano no qual cada rio afluente à baía foi modelado como um emissário, com a própria vazão do rio e concentração de coliformes termotolerantes de 10^6 org/100ml. Nessa análise, não foram consideradas as cargas de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), como a ETE de Alegria, ou de emissários existentes no interior da baía, como o de Icaraí.

O modelo de emissários do SisBaHiA considera uma curva de decaimento variável para os coliformes. Isso é devido ao fato de que o decaimento de coliformes é fortemente influenciado pela radiação solar (FEITOSA, 2007), ilustrado pela Figura 44.

Ao contrário do óleo, coliformes possuem um decaimento muito acentuado, possuindo um T90, tempo necessário para que a concentração da substância seja reduzida a 10% da concentração original, que não chega a ultrapassar 1,5 dia. Para fins de comparação da diferença de magnitude entre os dois parâmetros de qualidade de água analisados, após 5 dias apenas cerca de 40% do óleo derramado nas simulações realizadas nesse trabalho havia sido degradado, conforme será visto no capítulo a seguir, na Figura 62.

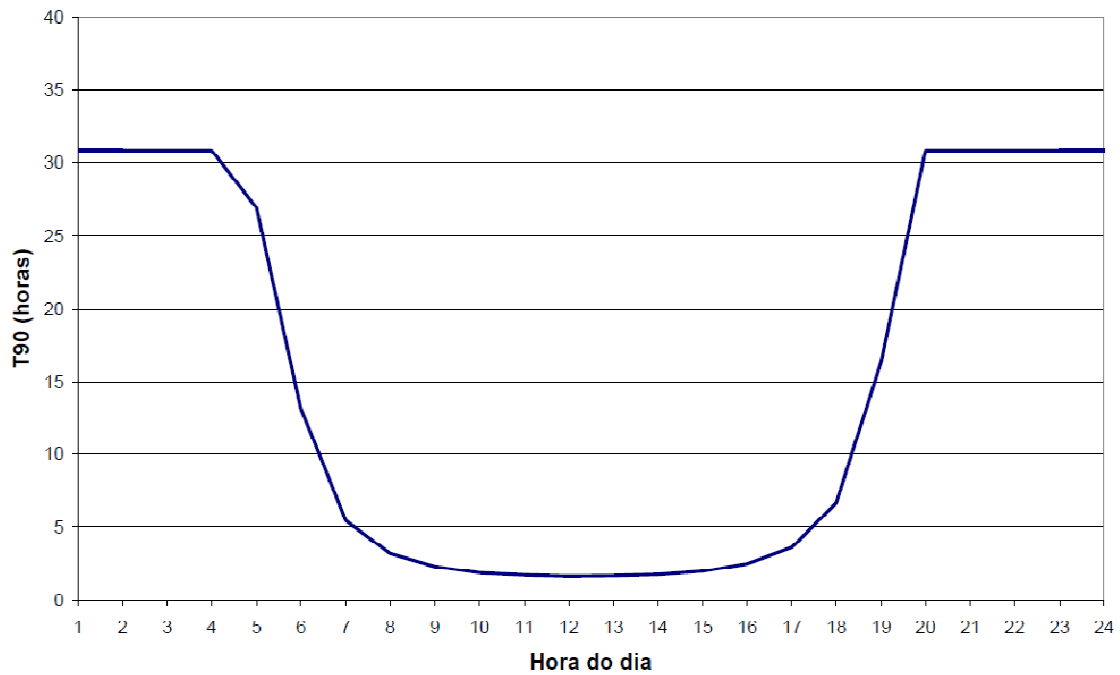


Figura 44: Variação do T90 de coliformes em função radiação solar, representada pela hora do dia (FEITOSA, 2007).

7.2 Resultados e Análise

Duas horas do dia, as 5:00 e as 17:00, foram selecionadas para ilustrar os resultados. Esses horários foram escolhidos por representarem a variação diária da concentração de coliformes. Às 5:00 a concentração de coliformes está próxima ao seu auge porque durante a noite o T90 está em seu máximo. Depois das 5:00, ele já começa a cair drasticamente, fazendo com que a concentração diminua. Doze horas depois, às 17:00, o T90 volta a crescer, saindo de seu mínimo, o que torna esse horário representativo de uma das menores concentrações diárias.

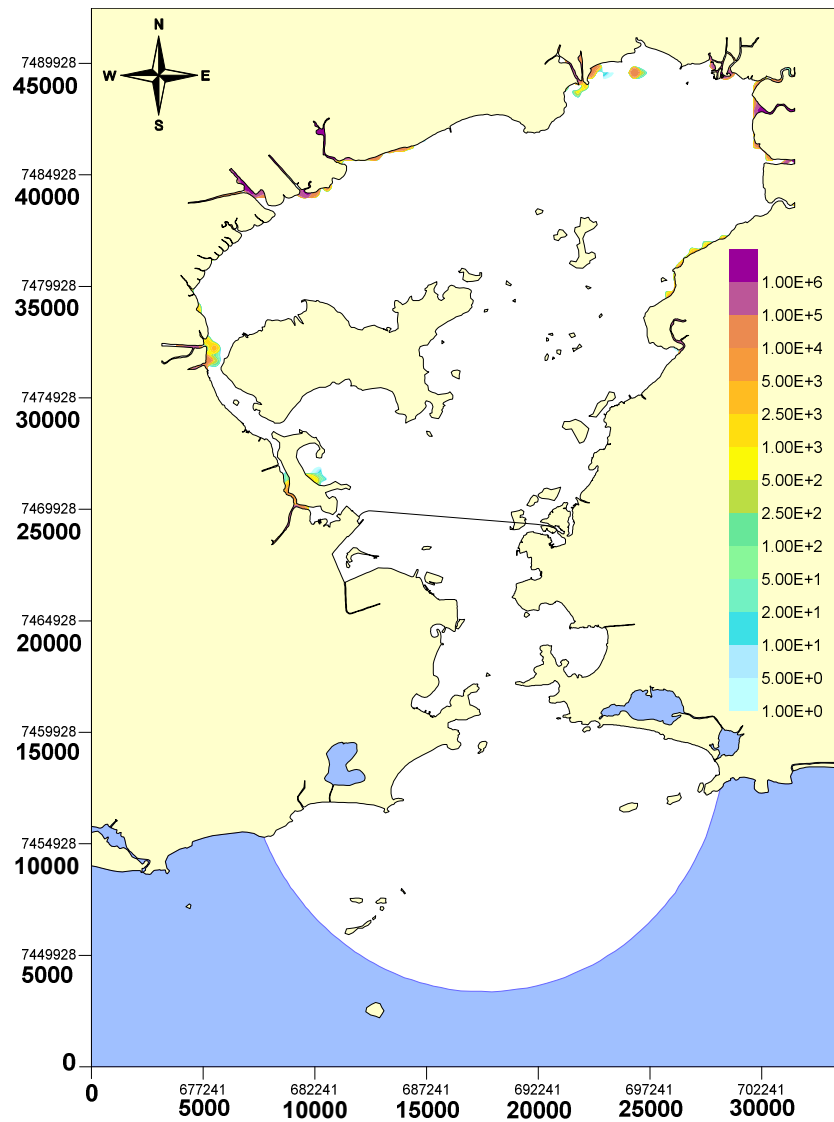


Figura 45: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. A carga de coliformes começa a entrar na baía.

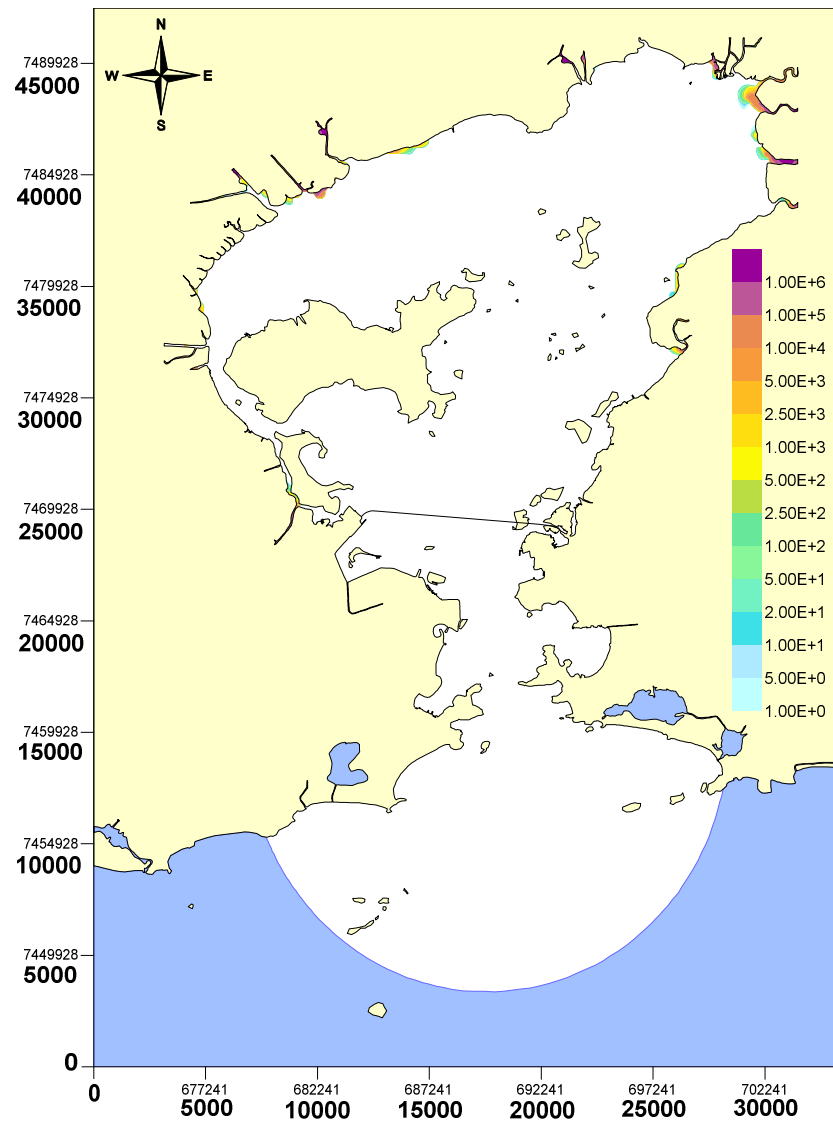


Figura 46: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. O sol reduziu a concentração que havia às 5 horas da manhã, restringindo as cargas de coliformes aos locais mais próximos aos rios.

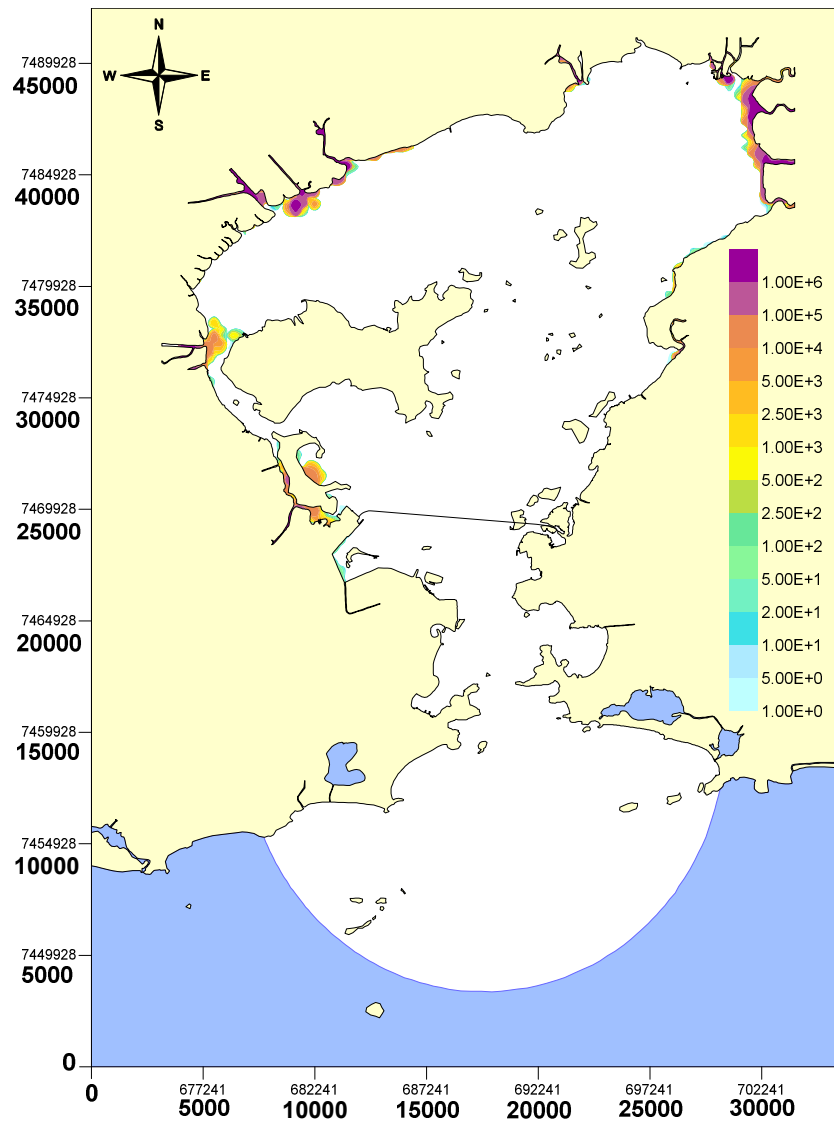


Figura 47: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, um dia e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Inicia-se um avanço mais significativo da concentração de coliformes.

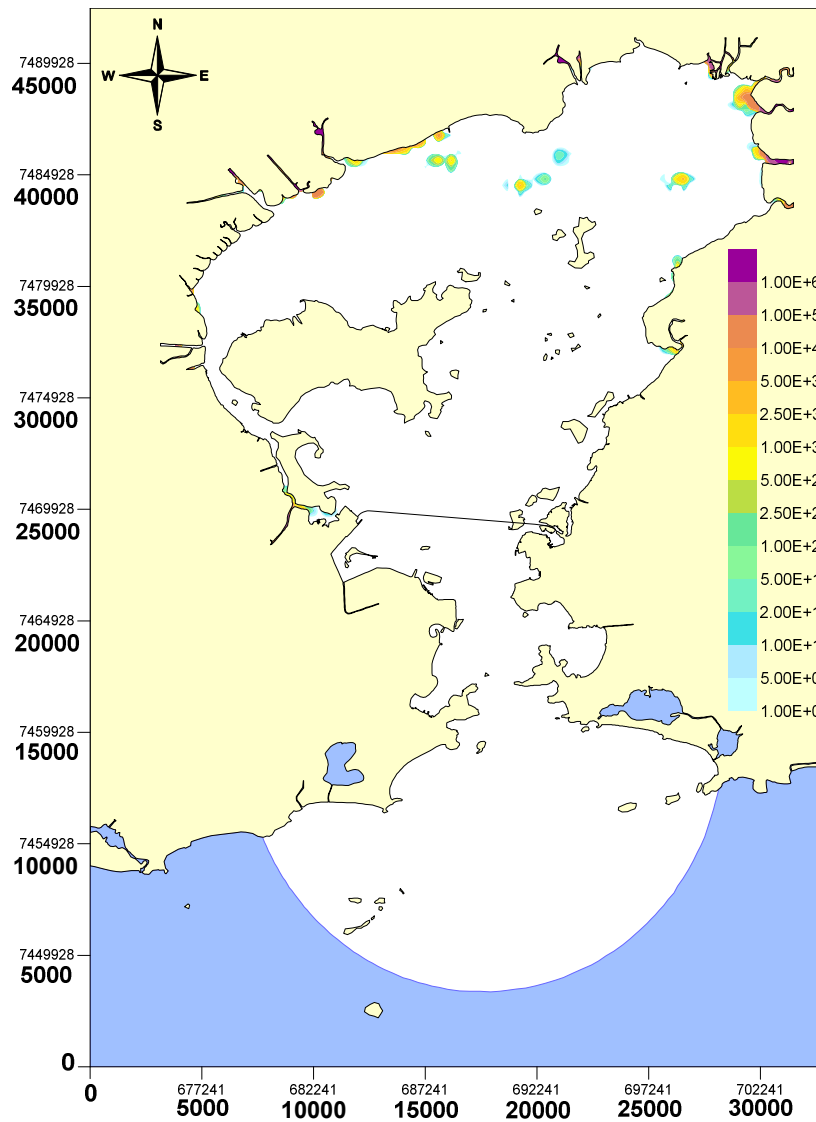


Figura 48: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, um dia e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Após a ação do sol, a concentração diminui. Praticamente não se vê mais a isolinha de 1.00E+6, como era comum às 5 da manhã desse dia.

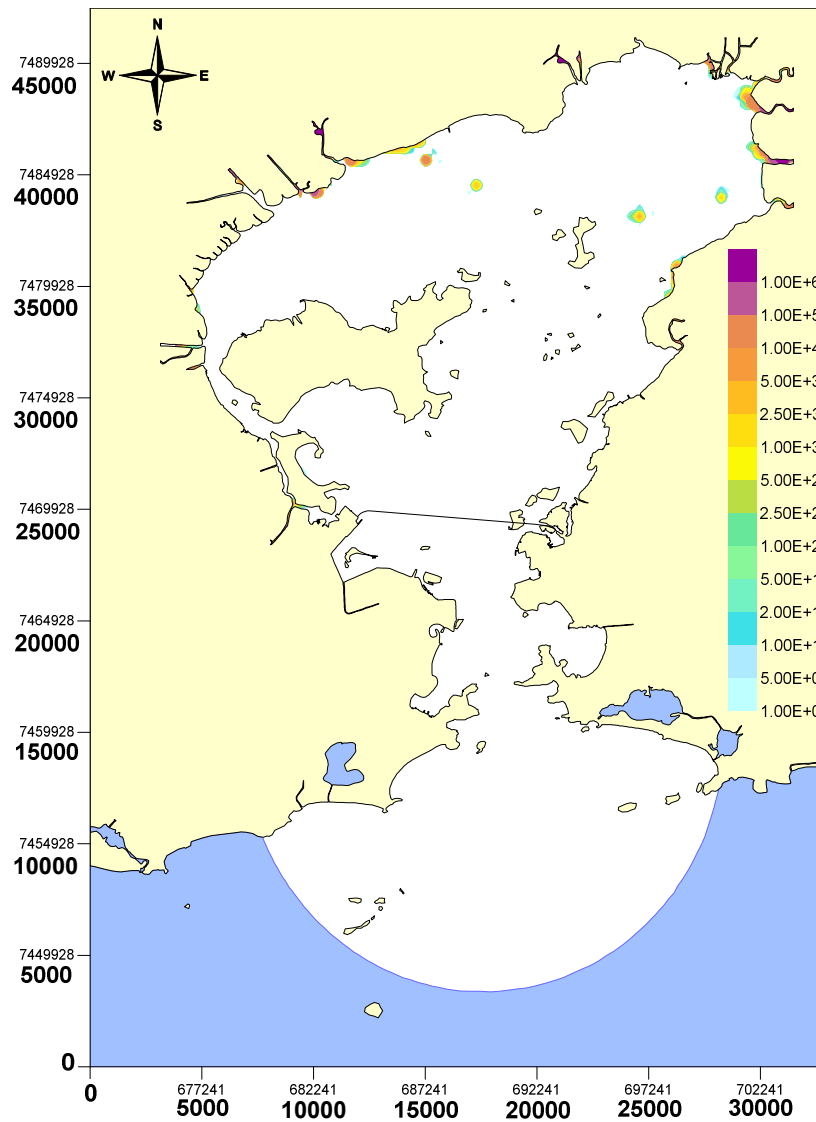
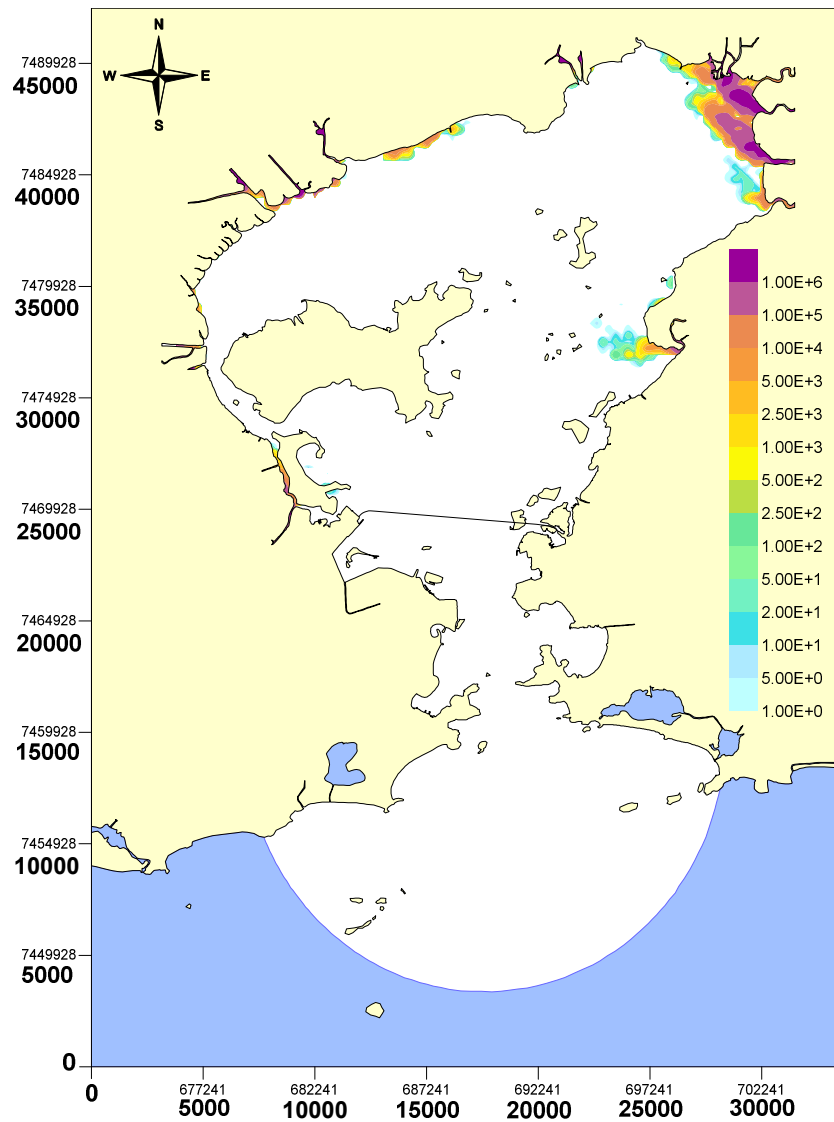


Figura 49: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, uma semana e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. A isolinha de 1.00E+6 atinge seu avanço máximo.

Figura 50: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, uma semana e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Da mesma forma que ocorreu nos outros dias, o sol reduz drasticamente a concentração de coliformes, reuzindo-a a pequenos aglomerados.

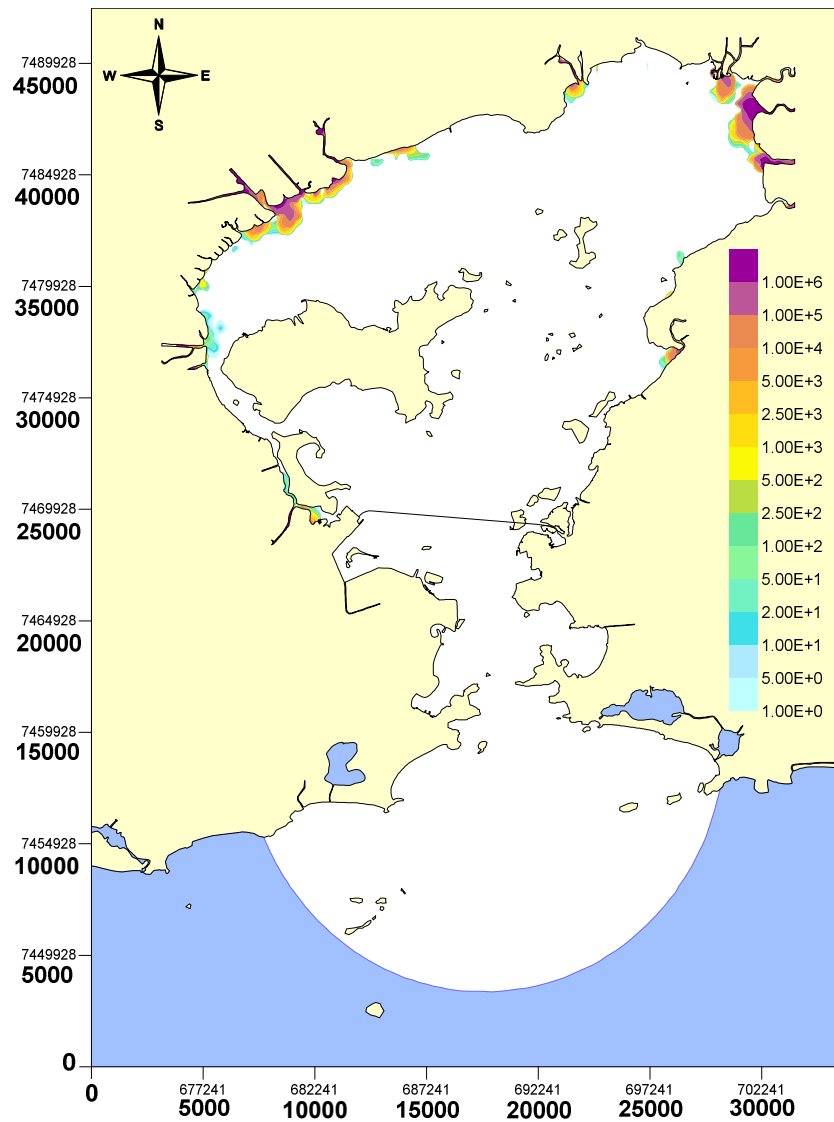


Figura 51: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, um mês e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Mesmo tendo decorrido um maior tempo, a concentração após um mês não é maior do que aquela encontrada com uma semana de simulação.

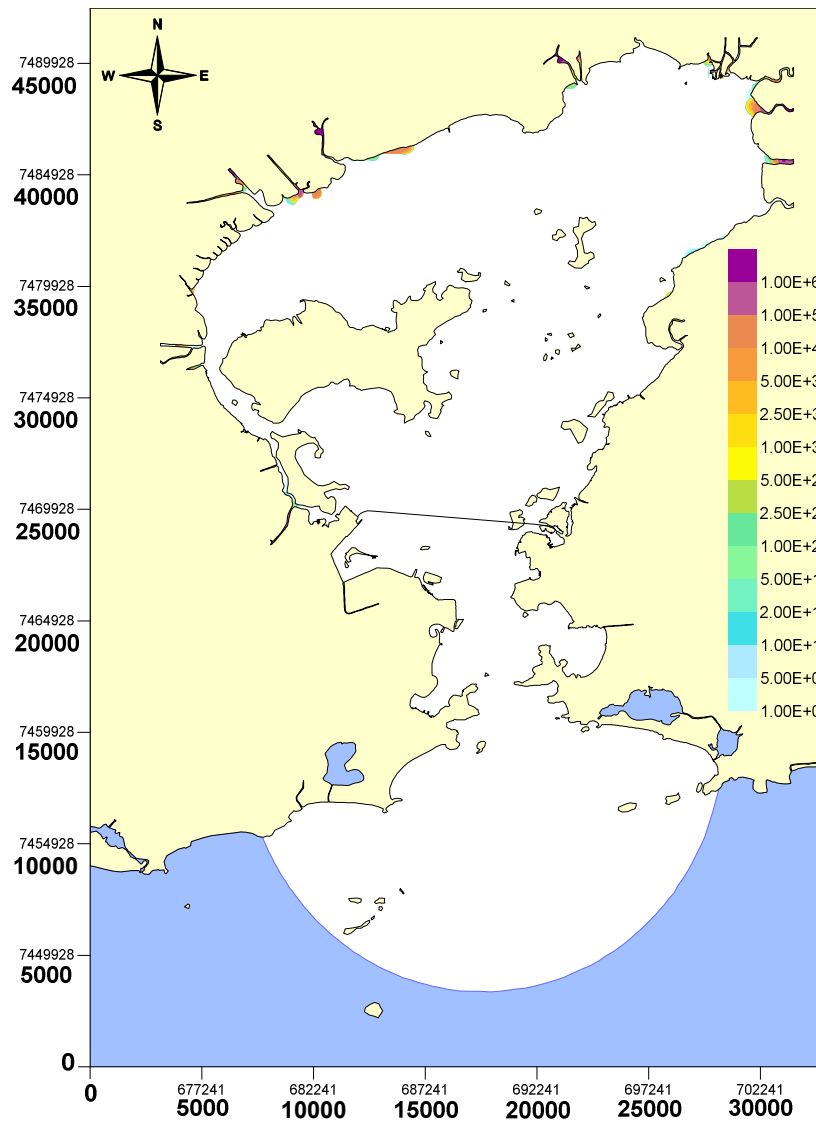


Figura 52: Cenário de Ventos Usuais. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas da tarde, um mês e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Assim como nas demais vezes, a ação do sol praticamente elimina quaisquer cargas de coliformes.

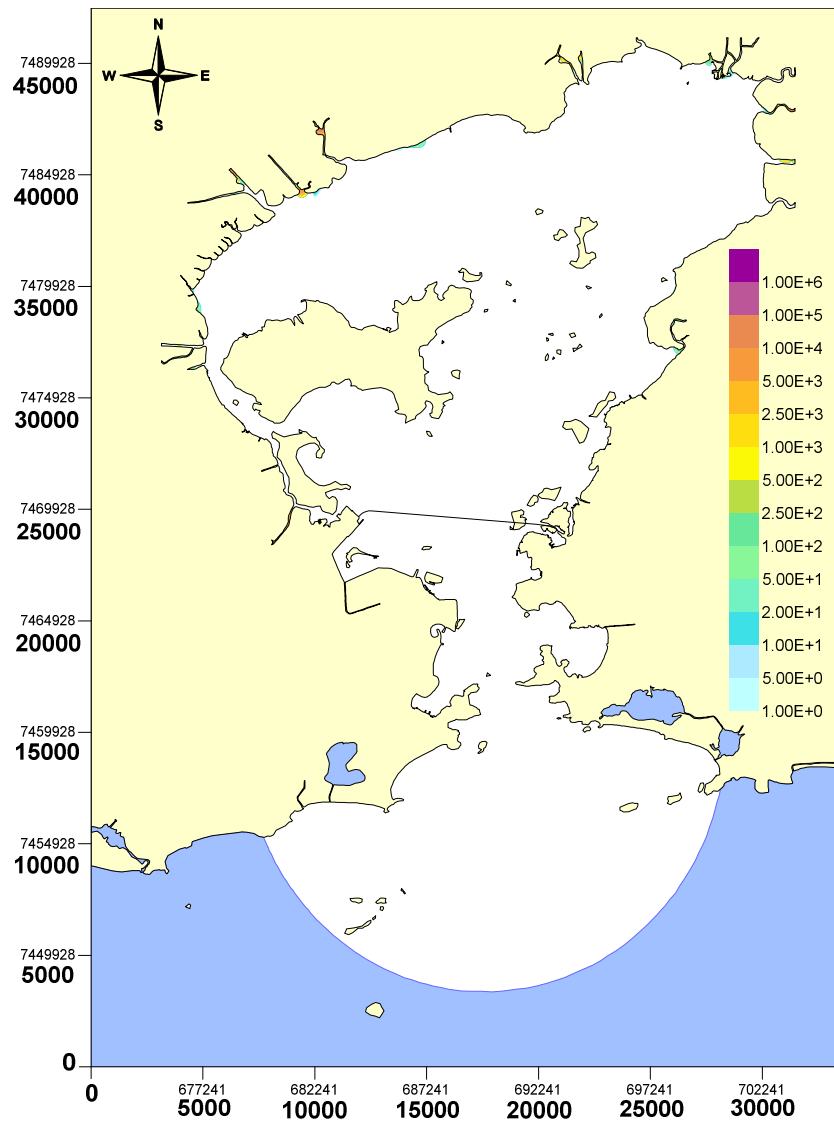


Figura 53: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Nota-se que é muito difícil enxergar as isolinhas de concentração por serem muito pequenas e estarem muito próximas ao contorno de terra.

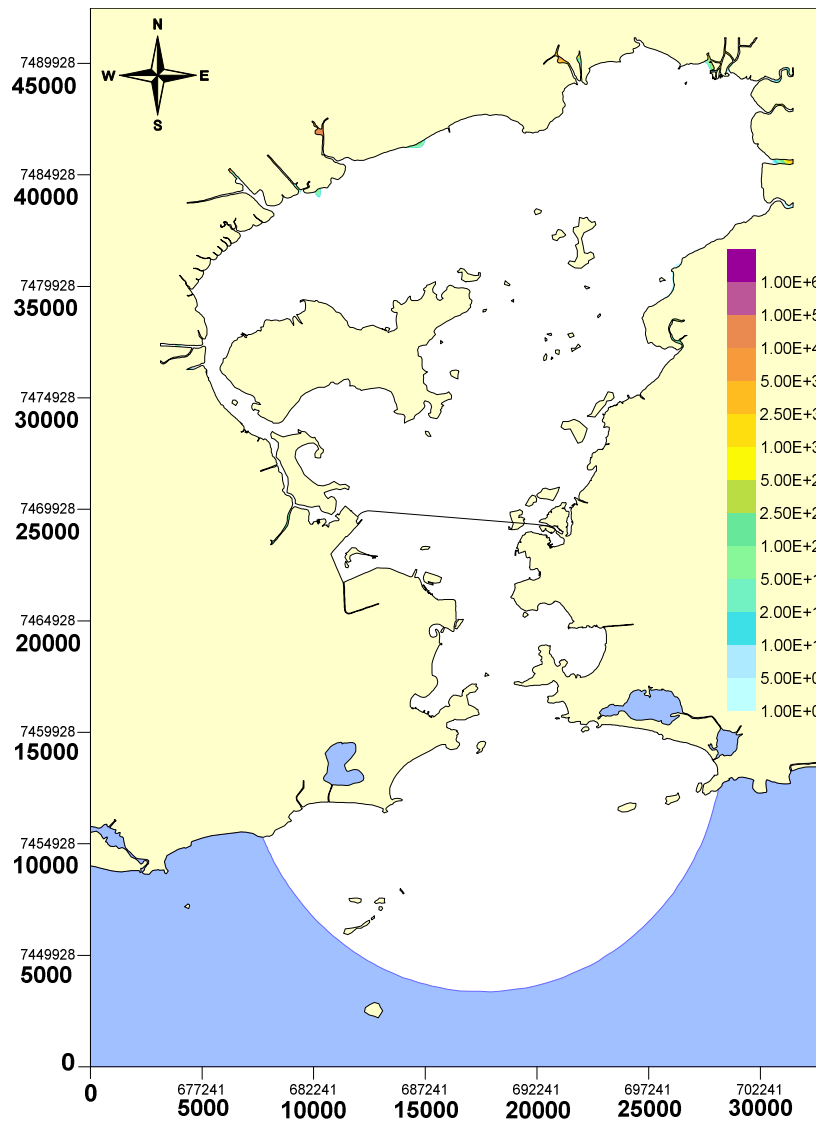


Figura 54: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Nessa hora do dia, a concentração é mais reduzida devido à ação do sol nas horas anteriores.

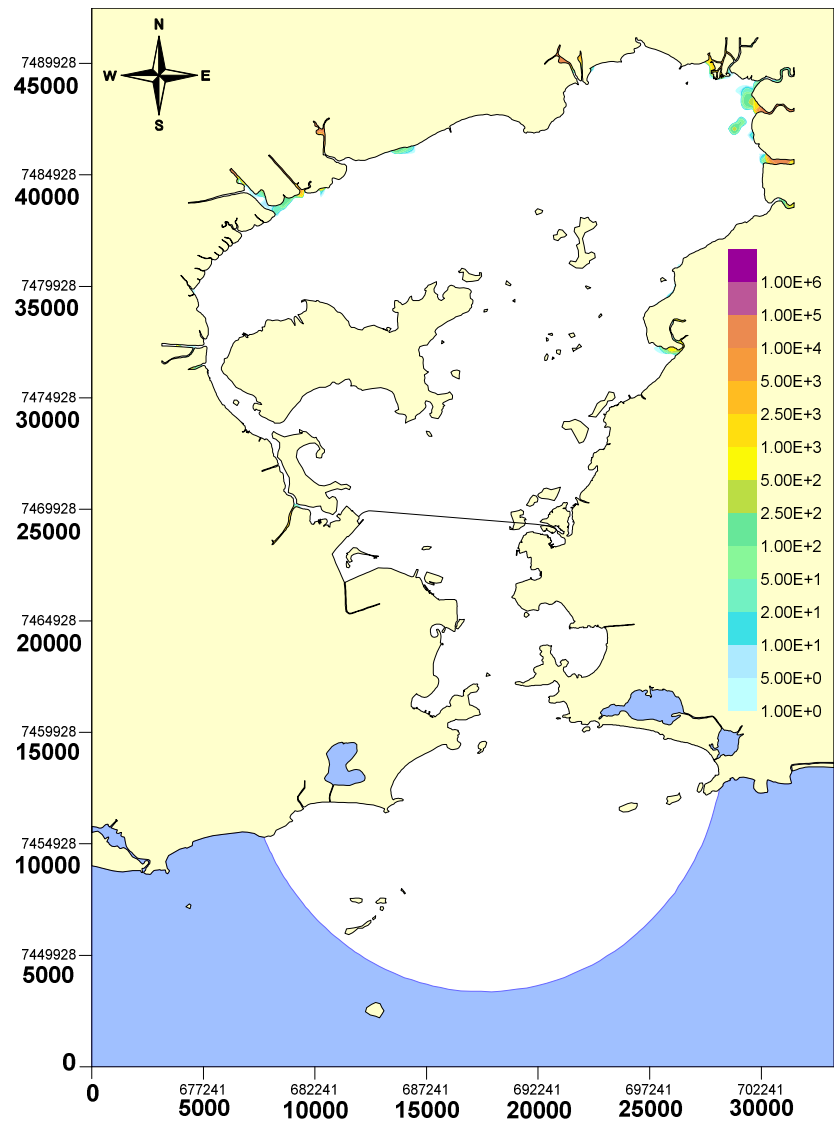


Figura 55: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, 1 dia e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Observa-se um avanço inicial da concentração na baía.

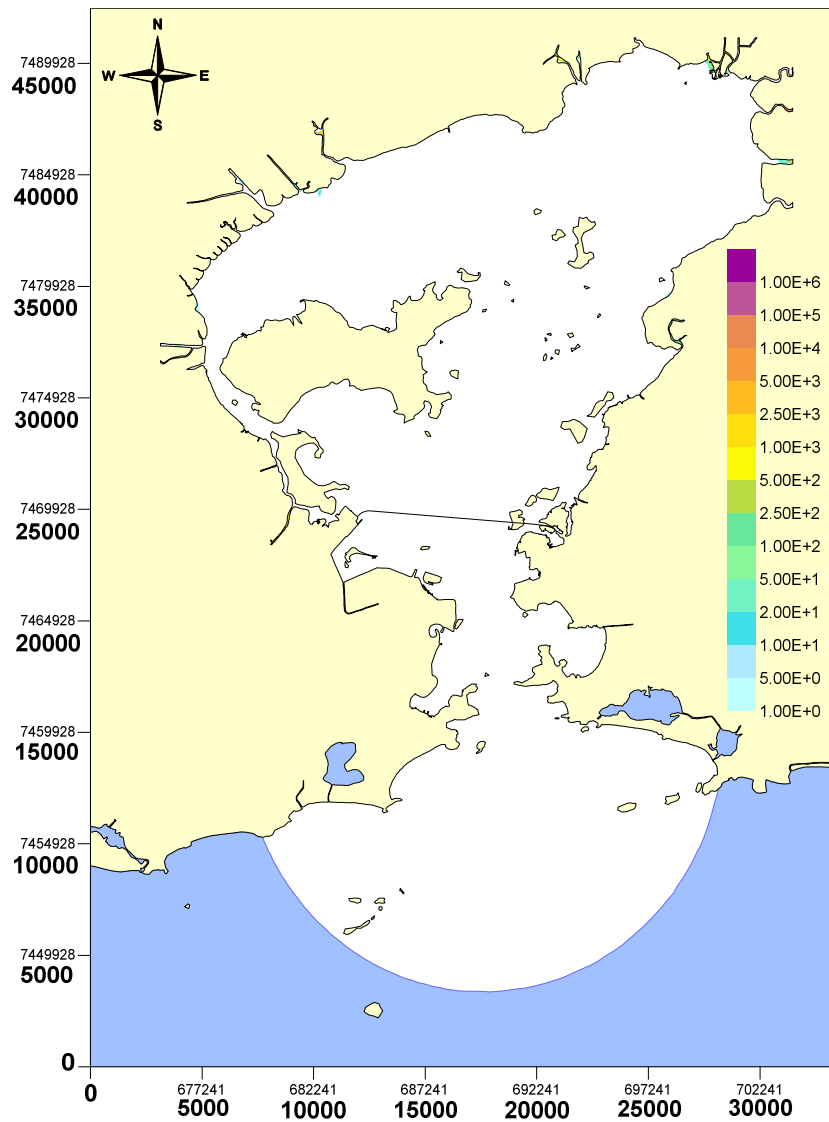


Figura 56: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, 1 dia e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Após a ação do sol, o avanço inicial da concentração foi praticamente eliminado.

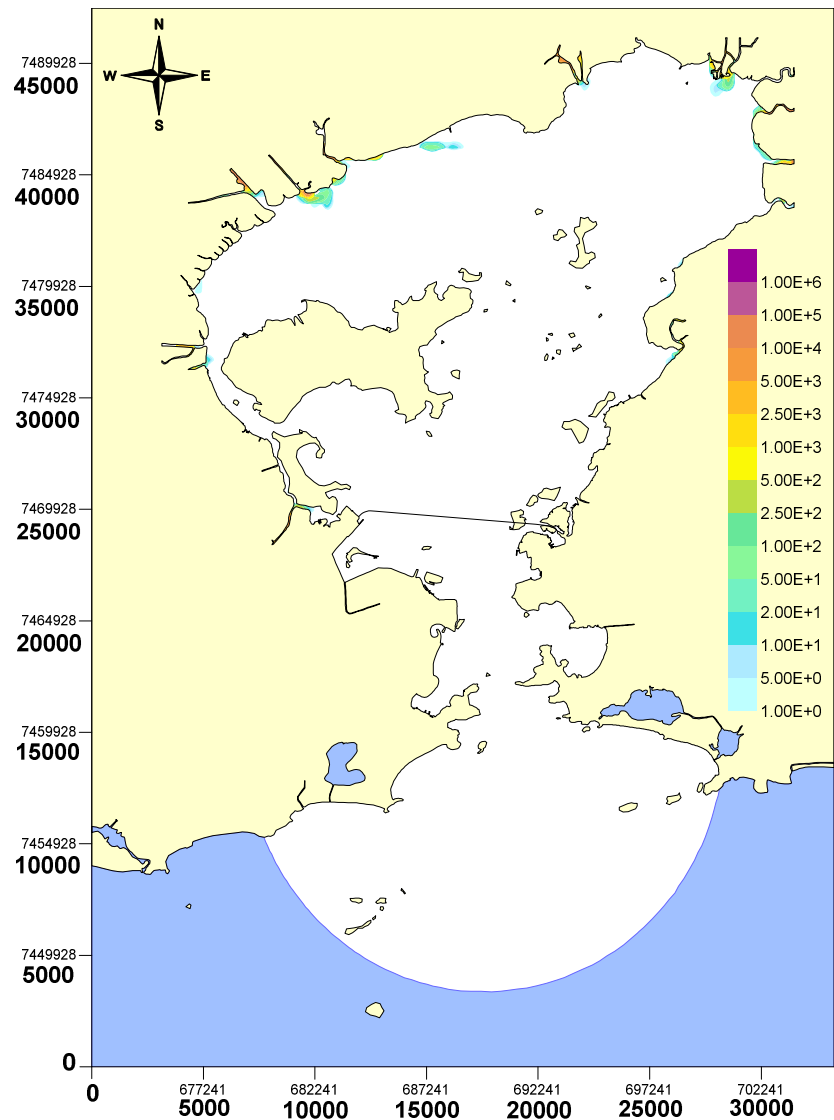


Figura 57: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, uma semana e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Novamente a concentração avança para dentro da baía.

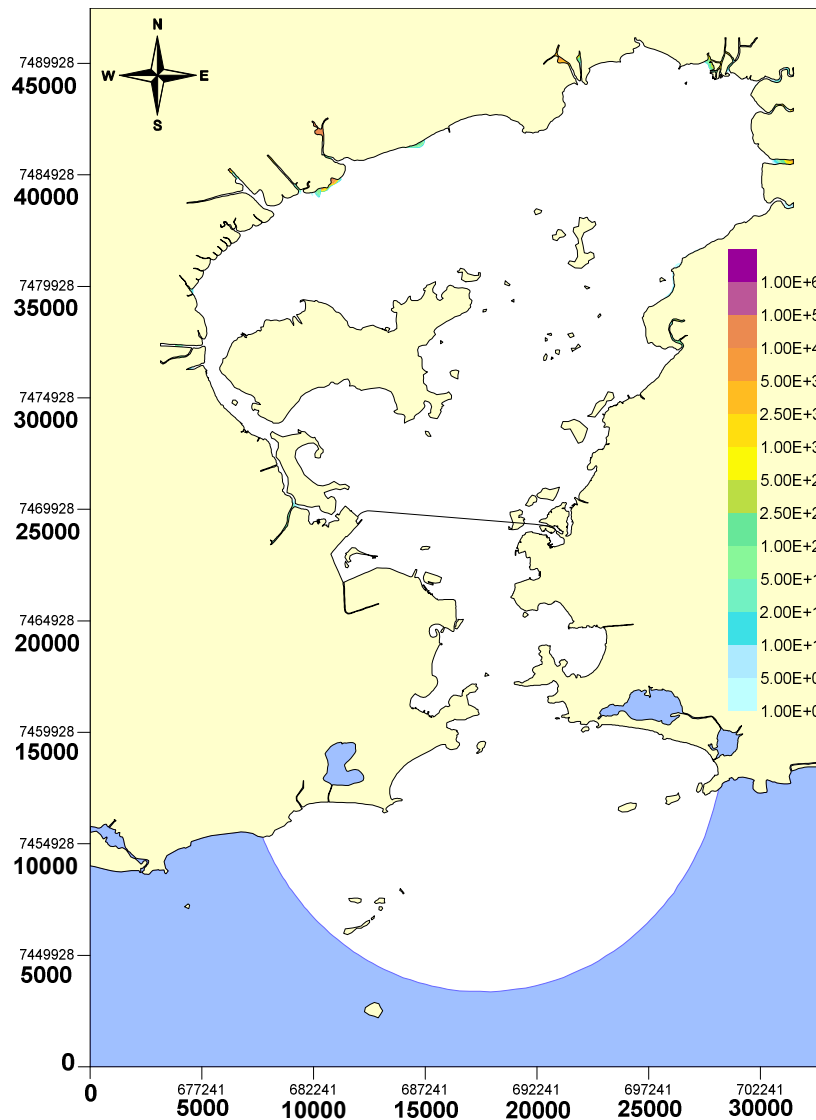


Figura 58: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, uma semana e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Assim como anteriormente, o sol elimina a carga de coliformes que estava presente às 5 horas da manhã do mesmo dia.

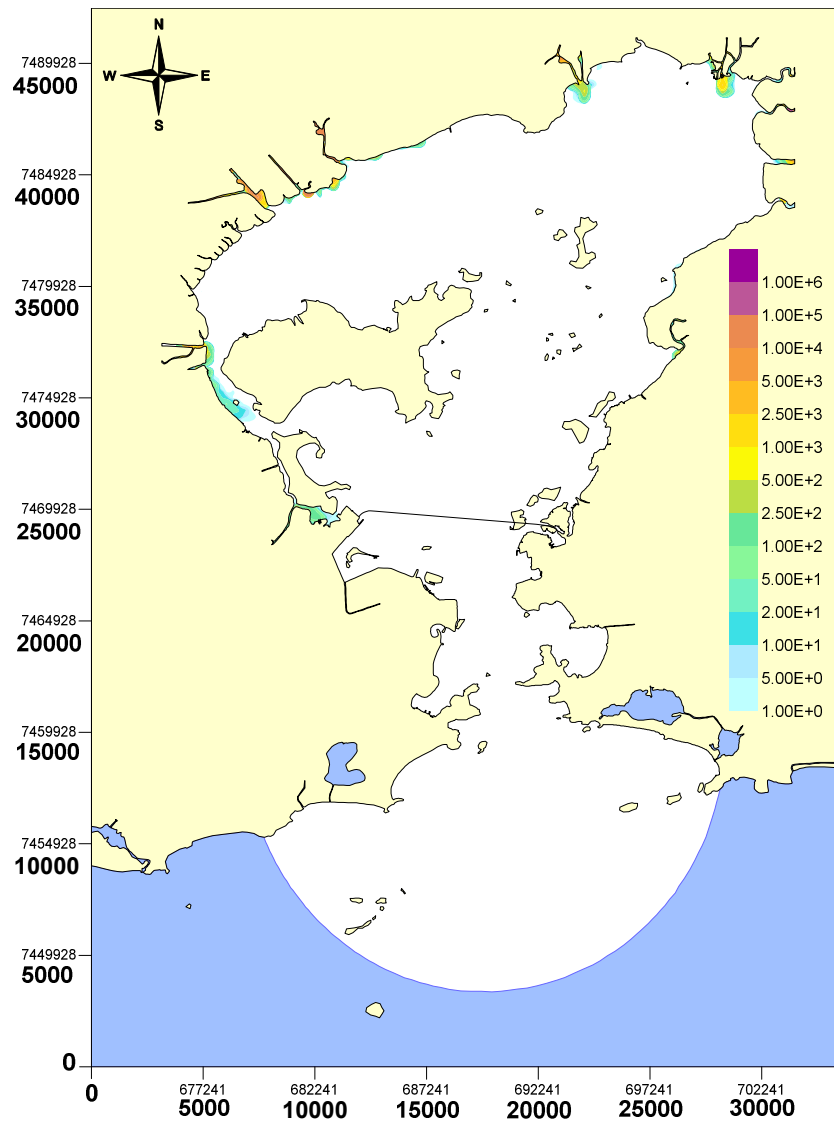


Figura 59: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 5 horas da manhã, um mês e 5 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Mesmo ainda tímido, o avanço dos coliformes é maior que nos tempos anteriores.

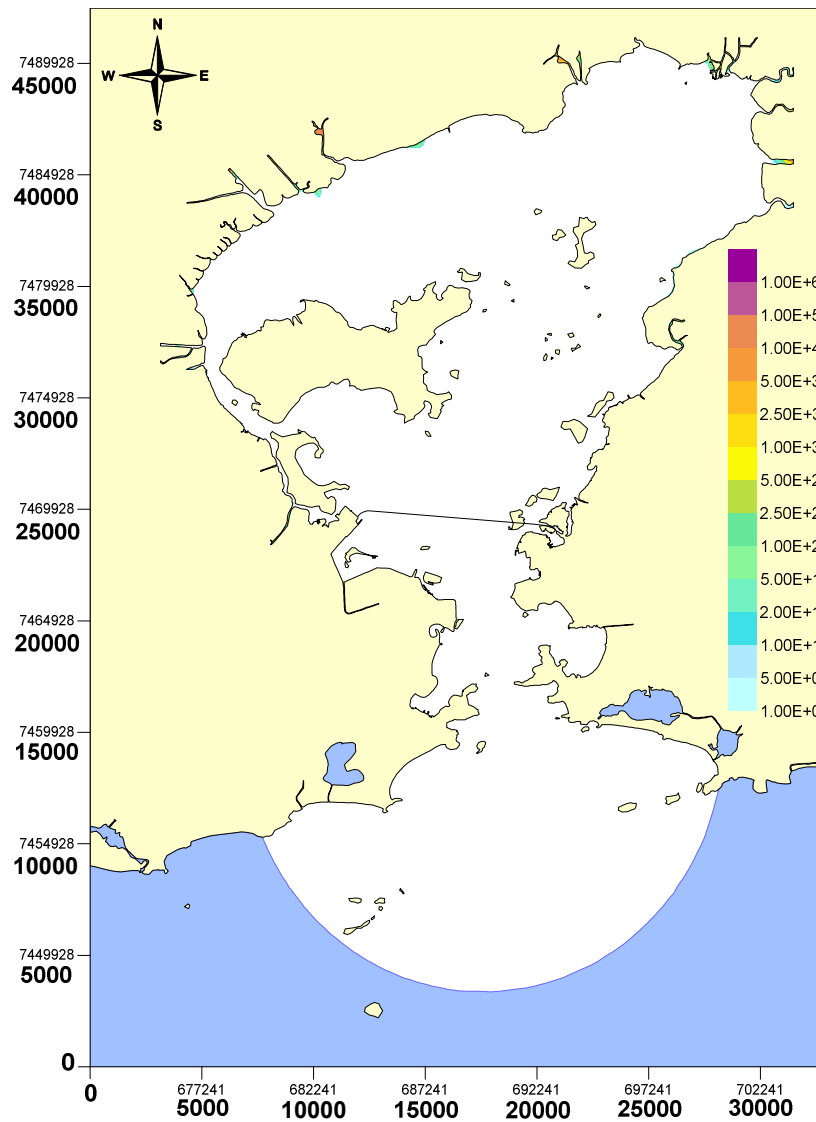


Figura 60: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria. Isolinhas da concentração de coliformes às 17 horas, um mês e 17 horas após o início do lançamento da carga de coliformes. Apesar do aumento um pouco maior da concentração às 5 da manhã desse dia, após a ação do sol praticamente não se vê qualquer concentração de coliformes.

Apesar de notar-se um avanço da quantidade de coliformes durante a noite, a redução do T90 durante o dia é uma barreira muito grande para que haja alguma contribuição, por parte da baía, à concentração de coliformes nas praias. Por mais que isso altere drasticamente a qualidade da água em alguns pontos do interior da Baía de Guanabara, ela não contribui com qualquer carga significativa de coliformes às praias. Como o tempo requerido para que essa carga chegue às praias é bastante longo, seu decaimento não permite que os coliformes sobrevivam o tempo necessário para sair da baía.

Dessa forma, a colimetria da Baía de Guanabara dificilmente vai influenciar as concentrações desse parâmetro nas praias oceânicas.

8 Vazamentos de Óleo

Segundo Pinheiro (2008), a Baía de Guanabara possui dentre as suas potenciais fontes de contaminação 14 terminais marítimos de carga e descarga de produtos oleosos, 2 portos comerciais, 2 refinarias de petróleo e diversos estaleiros, o que torna o local suscetível a derramamentos de óleo.

Com o objetivo de analisar a possível contribuição de um acidente desse tipo à qualidade da água nas praias oceânicas, simulou-se, através de um modelo lagrangeano, 3 cenários de derramamento de óleo: rompimento de um duto na Ilha d'Água, próximo à Ilha do Governador; naufrágio de um navio de transporte de óleo na entrada da baía com vazamento de toda sua carga; e naufrágio do mesmo navio na desembocadura da baía. A Figura 61 mostra a localização destes pontos.

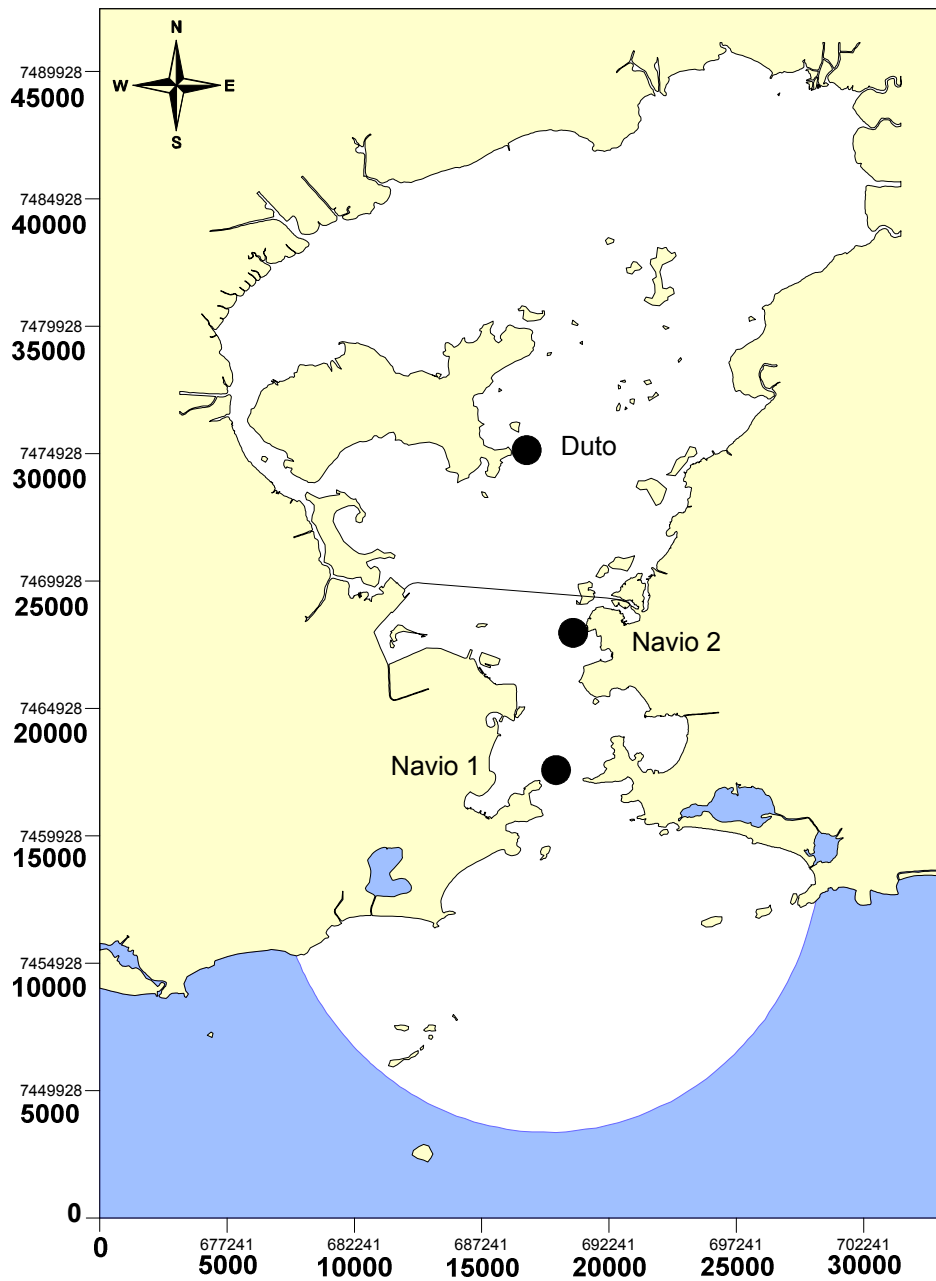


Figura 61: Pontos nos quais foram simulados os vazamentos de óleo

8.1 Dados de Implementação do Modelo

De modo a avaliar o deslocamento da mancha de óleo em diferentes condições meteorológicas e hidrodinâmicas, cada um dos 3 cenários mencionados foi simulado através de um modelo lagrangeano para condições usuais e de frente fria em 50 instantes aleatórios de derrame.

O intuito de utilizar 50 instantes diferentes é de analisar como a mancha se comportaria em diferentes condições de maré e vento que pudessem ser mais ou menos propícias à sua dispersão. Como não se sabe em qual momento um vazamento ocorreria, é útil avaliar sua dispersão em diferentes condições oceanográficas e meteorológicas, por isso a distribuição aleatória.

A quantidade de instantes com vazamentos simulados é importante para que se dê confiabilidade ao resultado final, e quanto maior a quantidade de instantes, mais representativo é o resultado. Nessa análise, cada evento é tratado de maneira distinta, a fim de analisar a probabilidade de cada derramamento de óleo influenciar a qualidade de água das praias oceânicas. Inicialmente utilizou-se a simulação de 100 vazamentos, porém, por ter tido resultados semelhantes, mostrou-se desnecessário simular o derrame em mais de 50 instantes.

Apesar da variação espacial e temporal dos vazamentos, alguns dados foram comuns a todas as simulações. Todos os cenários consideraram um óleo de mesma densidade (840 kg/m^3) e a mesma espessura inicial da mancha, de 0,84 m calculada de acordo com Rosman (ROSMAN, 2002).

Diversos processos ocorrem com o óleo após seu derramamento que causam sua redução de massa, como a emulsificação, evaporação, taxa de escape, etc. (PINHEIRO, 2008), dos quais a evaporação é predominante. Em geral, pode-se considerar que após 10 dias o óleo já não se encontra mais no ambiente, tendo sido perdido pelos diversos processos que causam o decaimento de sua concentração (PINHEIRO, 2008). Porém, devido à dificuldade e incerteza relacionada à modelagem de todos esses processos, considerou-se que o óleo decairia de acordo com sua curva de evaporação percentual ao longo do tempo obtida pelo *software* ADIOS2 (Automated Data Inquiry for Oil Spills, site:) para as características do vazamento, mostrada na Figura 62 a seguir. O ADIOS2 é uma ferramenta desenvolvida pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA) cujo objetivo é auxiliar a elaboração de planos de contingência e estratégias de resposta para derrames de óleo.

Ressalta-se que esta curva só apresenta o decaimento do óleo para os primeiros cinco dias, limitação imposta pelo software utilizado. Após este tempo, por precaução, foi adotado que o óleo não mais decairia.

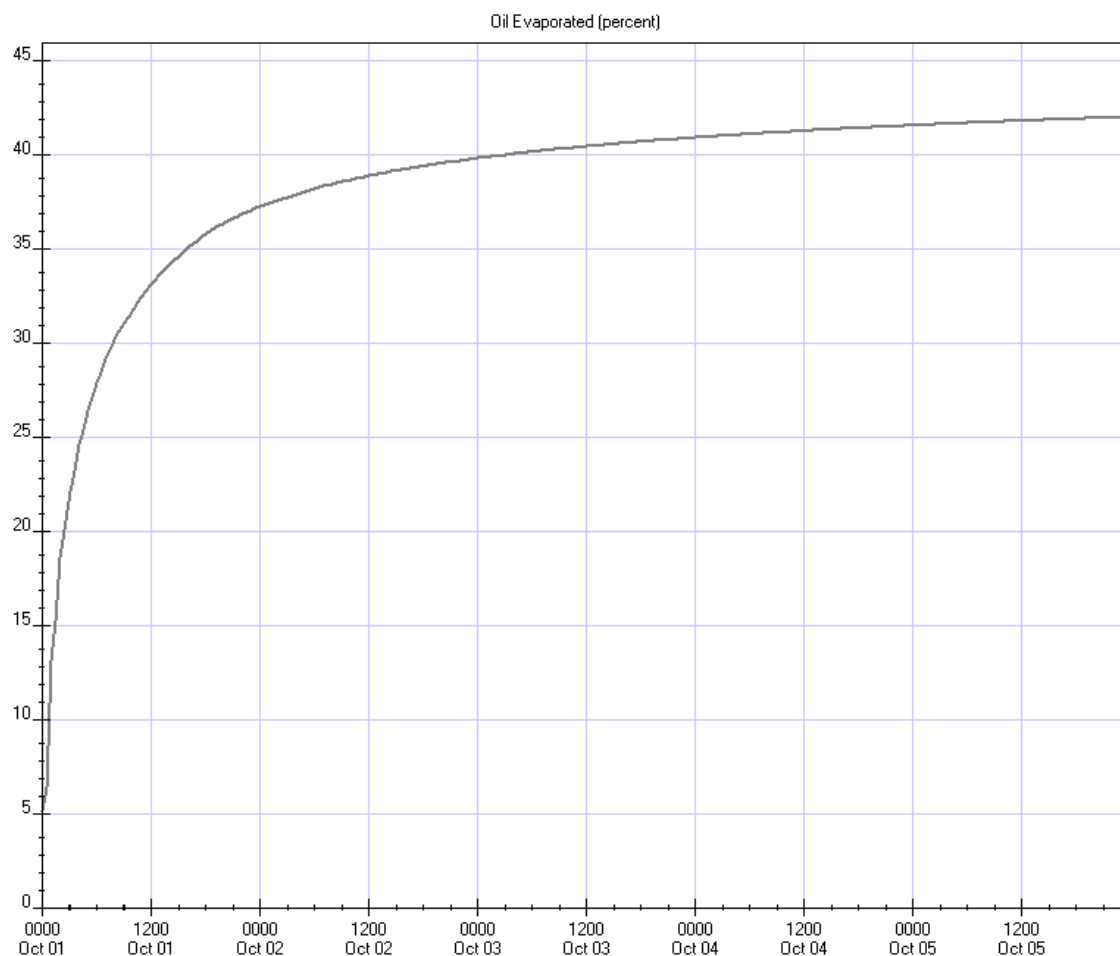


Figura 62: Curva de evaporação extraída do software ADIOS2 para um vazamento ocorrido às 00:00 h do dia 1 de outubro.

Outro ponto importante relativo à perda de massa de óleo é sua absorção pela costa. Dependendo do coeficiente de absorção adotado, parte do óleo, ao chocar-se contra um contorno de terra, não retorna, fazendo com que sua massa se perca. Tal coeficiente de absorção é função das características da costa e adotou-se para a Baía de Guanabara os valores de 0,7 para terrenos de mangue, 0,5 para praias e 0,1 para costões rochosos. A classificação da costa foi feita a partir das imagens de satélite do *software* Google Earth, conforme ilustra a Figura 63:



Figura 63: Classificação da costa a partir de imagens do Google Earth. Na figura, a cor verde representa terreno de mangue; branco representa praia; e vermelho, costões rochosos.

Fonte: Google Earth, 2010

No caso do vazamento por dutos, considerou-se uma profundidade de 0,2 metros para o vazamento assim como Pinheiro (2008). As informações específicas dessa fonte estão dispostas na 5, mostrada a seguir:

Tabela 5: Dados considerados no vazamento de óleo por dutos na Ilha d'Água

Duto da Ilha d'Água	
Coordenada X (UTM)	689214
Coordenada Y (UTM)	7475061
Comprimento da Região Fonte (m)	15
Largura da Região Fonte (m)	12
Espessura da Região Fonte (m)	0.84
Profundidade da Fonte (m)	0.2
Volume da região Fonte (m ³)	151.2
Tempo de Vazamento (h)	0.5
Massa de óleo (ton)	1092
Volume de óleo(m ³)	1300
Densidade (kg/m ³)	840
Vazão (m ³ /s)	0.722

Por ser mais provável que o naufrágio de um navio na baía ocorra em águas rasas, foram selecionados dois pontos de mudanças bruscas (positivas) de profundidade

para simular os vazamentos. A capacidade do navio foi adotada de acordo com as características dos navios que circulam pela região e considerou-se que todo o volume de combustível transportado pelo navio foi derramado. Dados específicos para cada uma das simulações de navios encontram-se nas tabelas a seguir:

Tabela 6: Dados considerados no vazamento de óleo na boca da baía.

Navio – Cenário 1	
Coordenada X (UTM)	690206
Coordenada Y (UTM)	7462531
Comprimento da Região Fonte (m)	100
Largura da Região Fonte (m)	20
Espessura da Região Fonte (m)	0.84
Profundidade da Fonte (m)	1
Volume da região Fonte (m ³)	1680
Tempo de Vazamento (h)	1
Massa de óleo (ton)	2048
Volume de óleo(m ³)	2438
Densidade (kg/m ³)	840
Vazão (m ³ /s)	0.677

Tabela 7: Dados considerados no vazamento de óleo na entrada da baía.

Navio – Cenário 2	
Coordenada X (UTM)	690918
Coordenada Y (UTM)	7467862
Comprimento da Região Fonte (m)	100
Largura da Região Fonte (m)	20
Espessura da Região Fonte (m)	0.84
Profundidade da Fonte (m)	1
Volume da região Fonte (m ³)	1680
Tempo de Vazamento (h)	1
Massa de óleo (ton)	2048
Volume de óleo(m ³)	2438
Densidade (kg/m ³)	840
Vazão (m ³ /s)	0.677

8.2 Resultados e Análise

Seguem abaixo os resultados das simulações realizadas para vazamentos de óleo. A porcentagem indicada na figura representa a chance de, ocorrendo o derrame, ocorrer uma concentração superior à concentração limite no determinado local, dadas as condições simuladas. Duas concentrações limite foram consideradas, uma “aceitável”, de 1 mg/l e outra de 20 mg/l que seria uma concentração alta, portanto “inaceitável”.

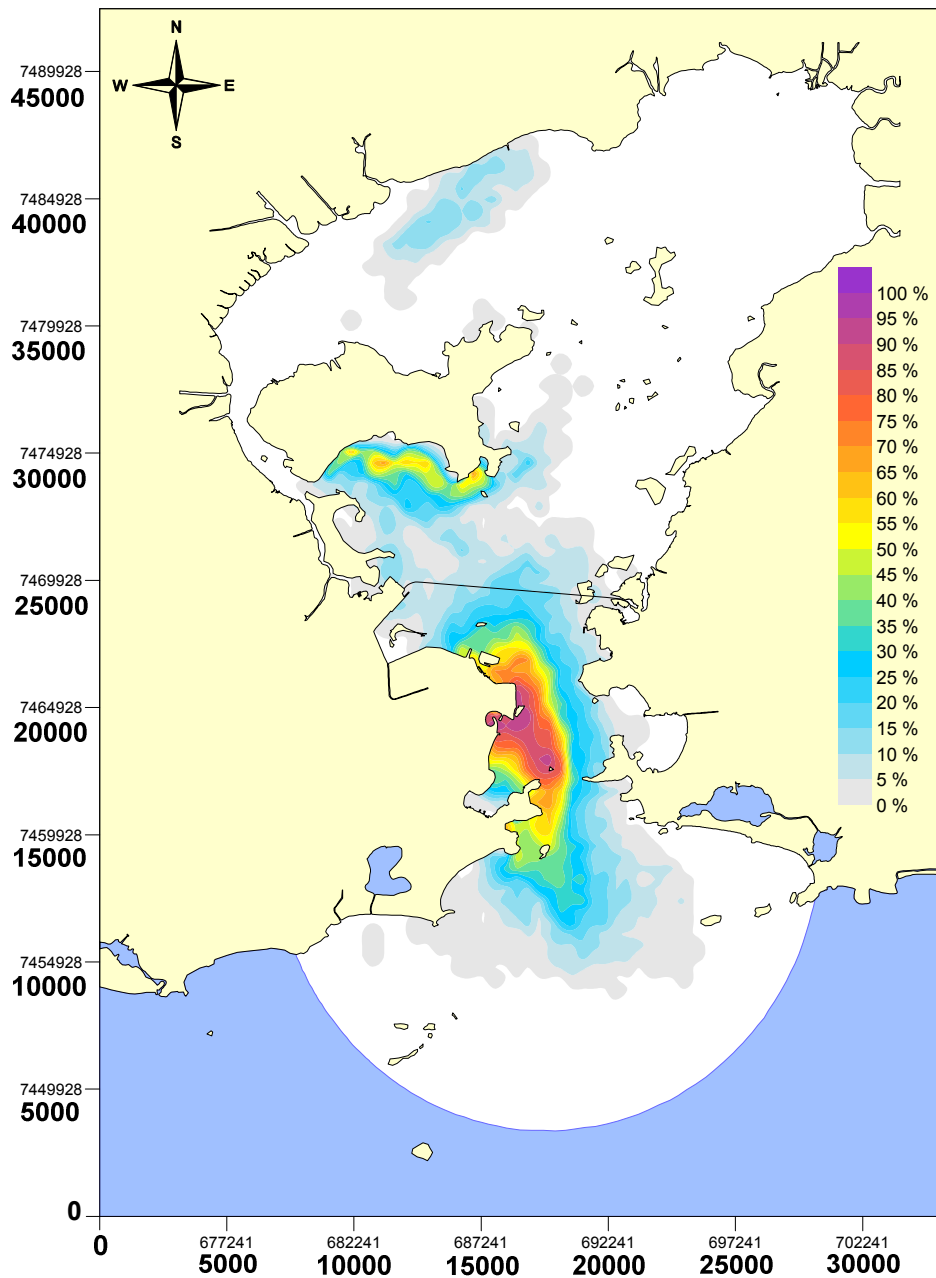


Figura 64: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Navio 1 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l. A probabilidade de o óleo alcançar as praias varia de 0 a 15%.

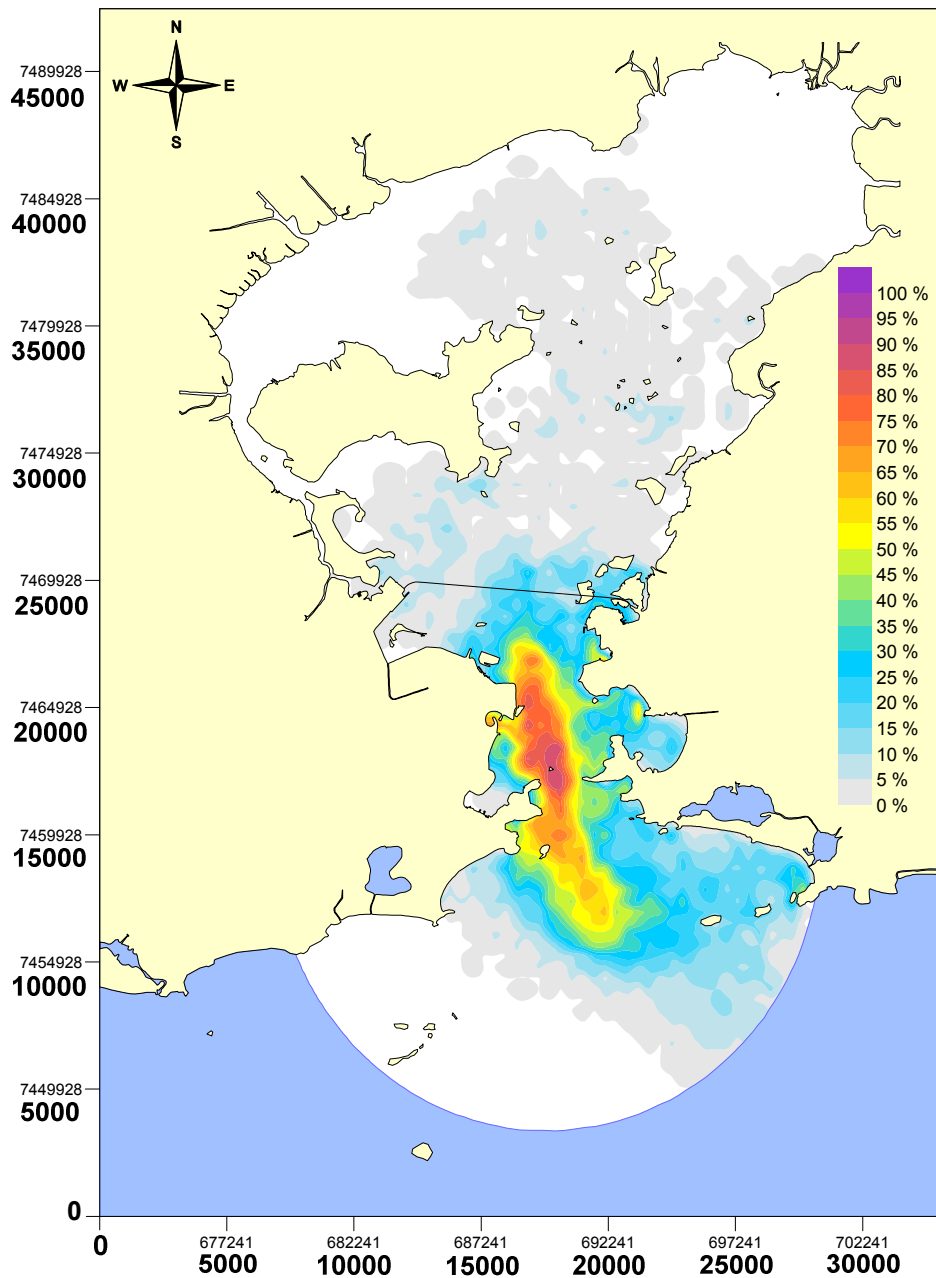


Figura 65: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Navio 1 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l. A probabilidade de o óleo alcançar as praias chega a 15%. As praias do Rio de Janeiro e de Niterói seriam afetadas.

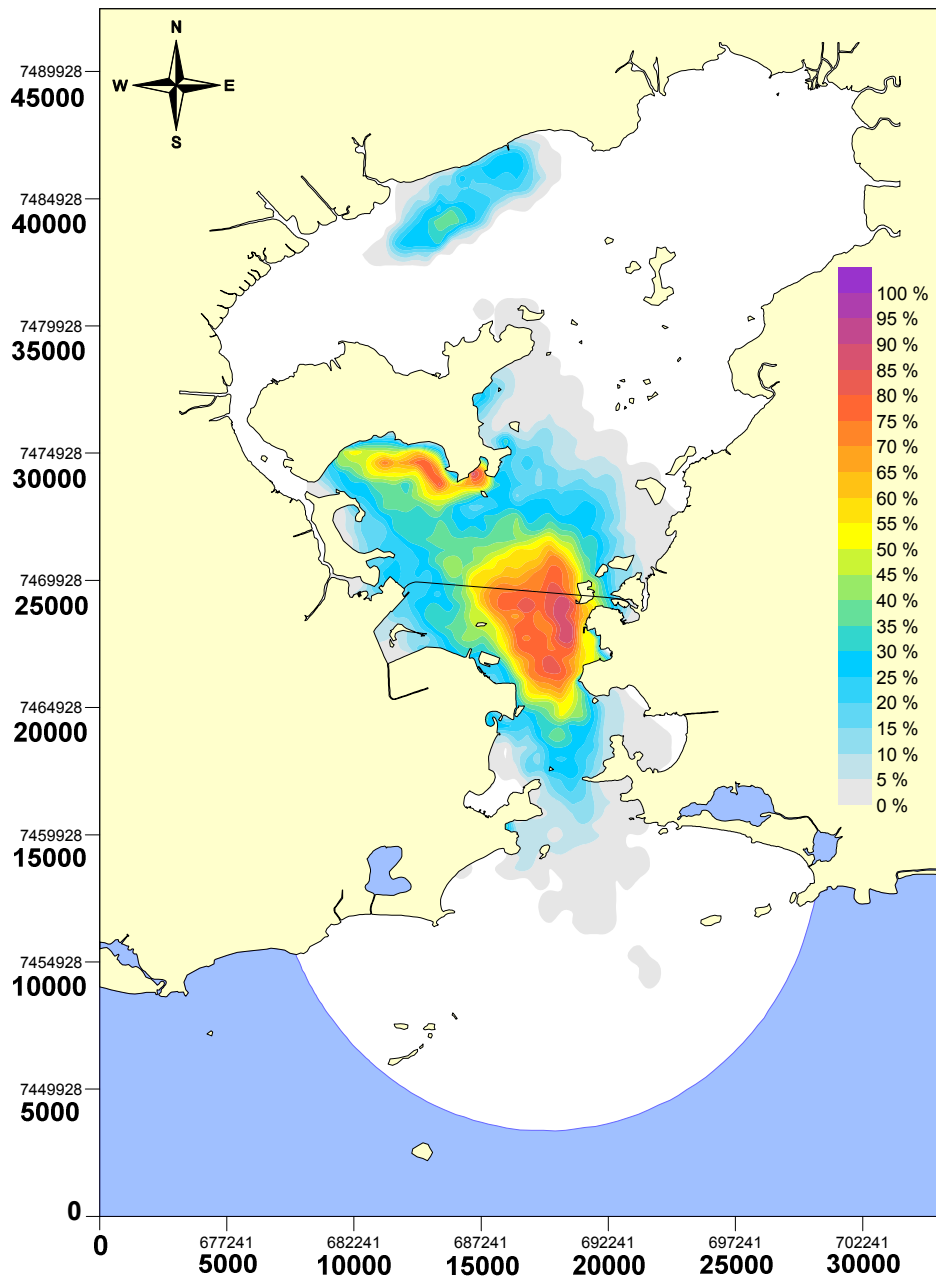


Figura 66: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Navio 2 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l. A probabilidade de o óleo alcançar as praias oceânicas é de 0% na maioria da extensão das praias.

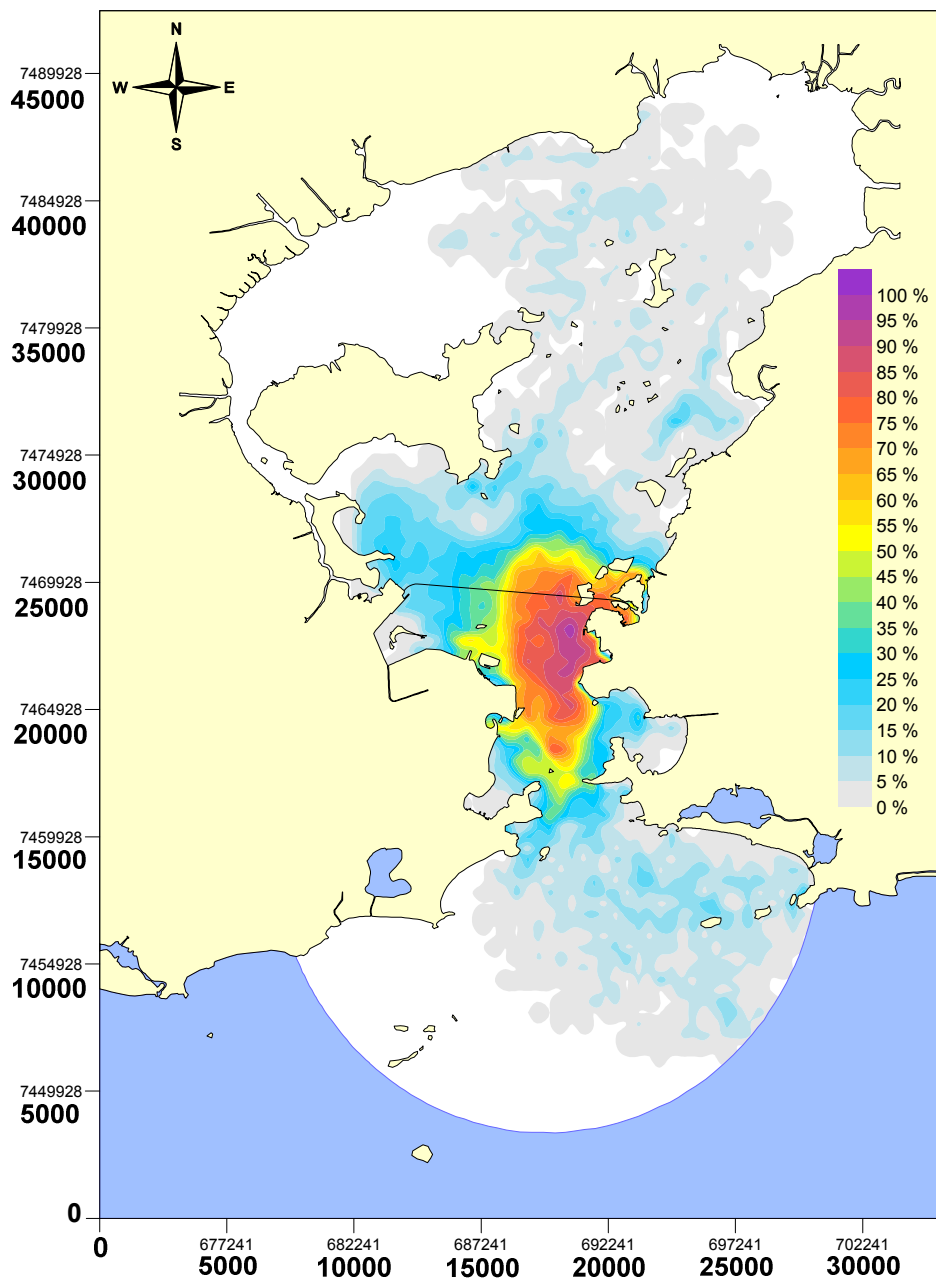


Figura 67: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Navio 2 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l. A probabilidade de o óleo alcançar as praias oceânicas chega a cerca de 10% em alguns pontos.

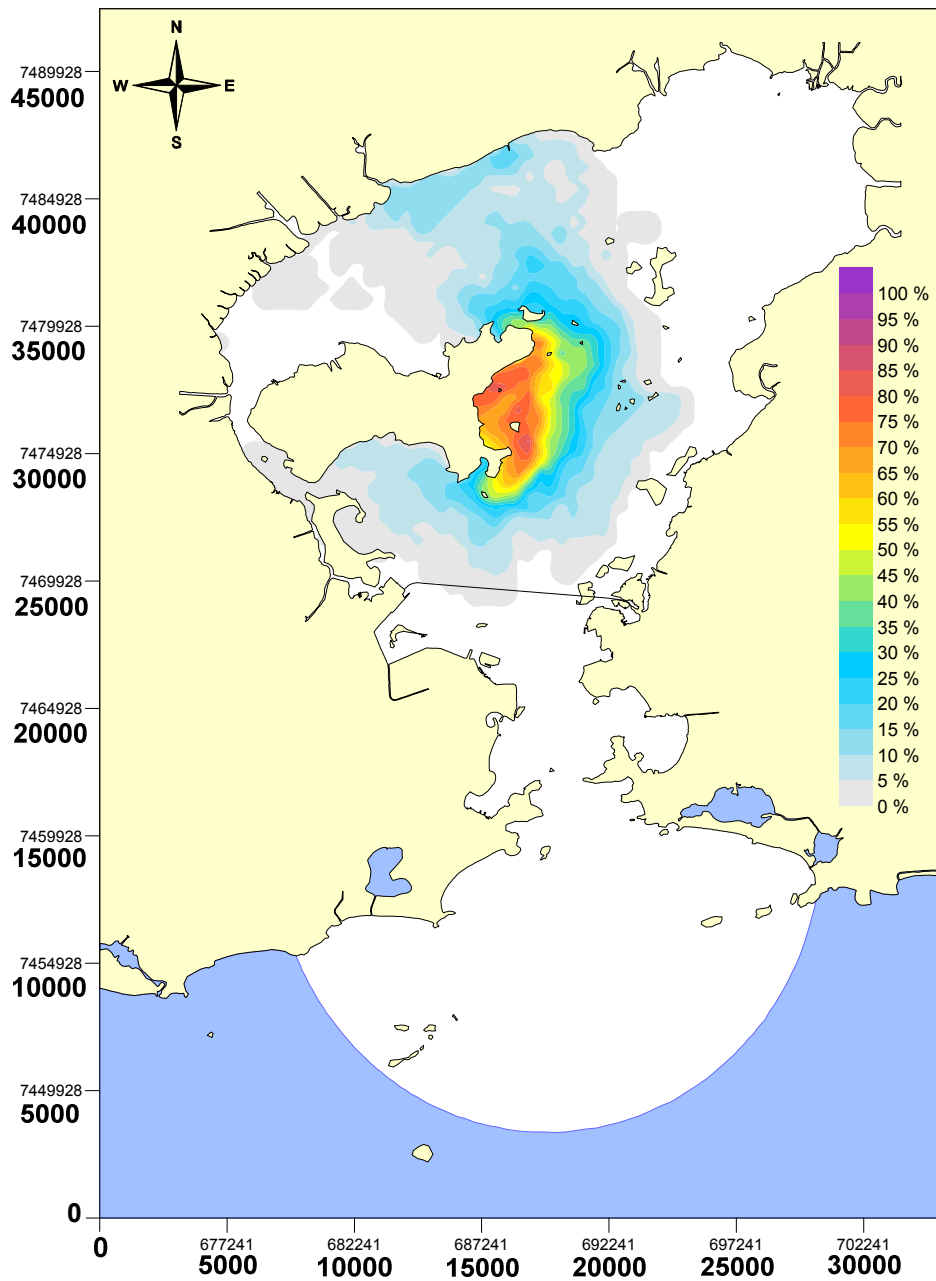


Figura 68: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Duto - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l. A probabilidade de o óleo alcançar as praias oceânicas é nula.

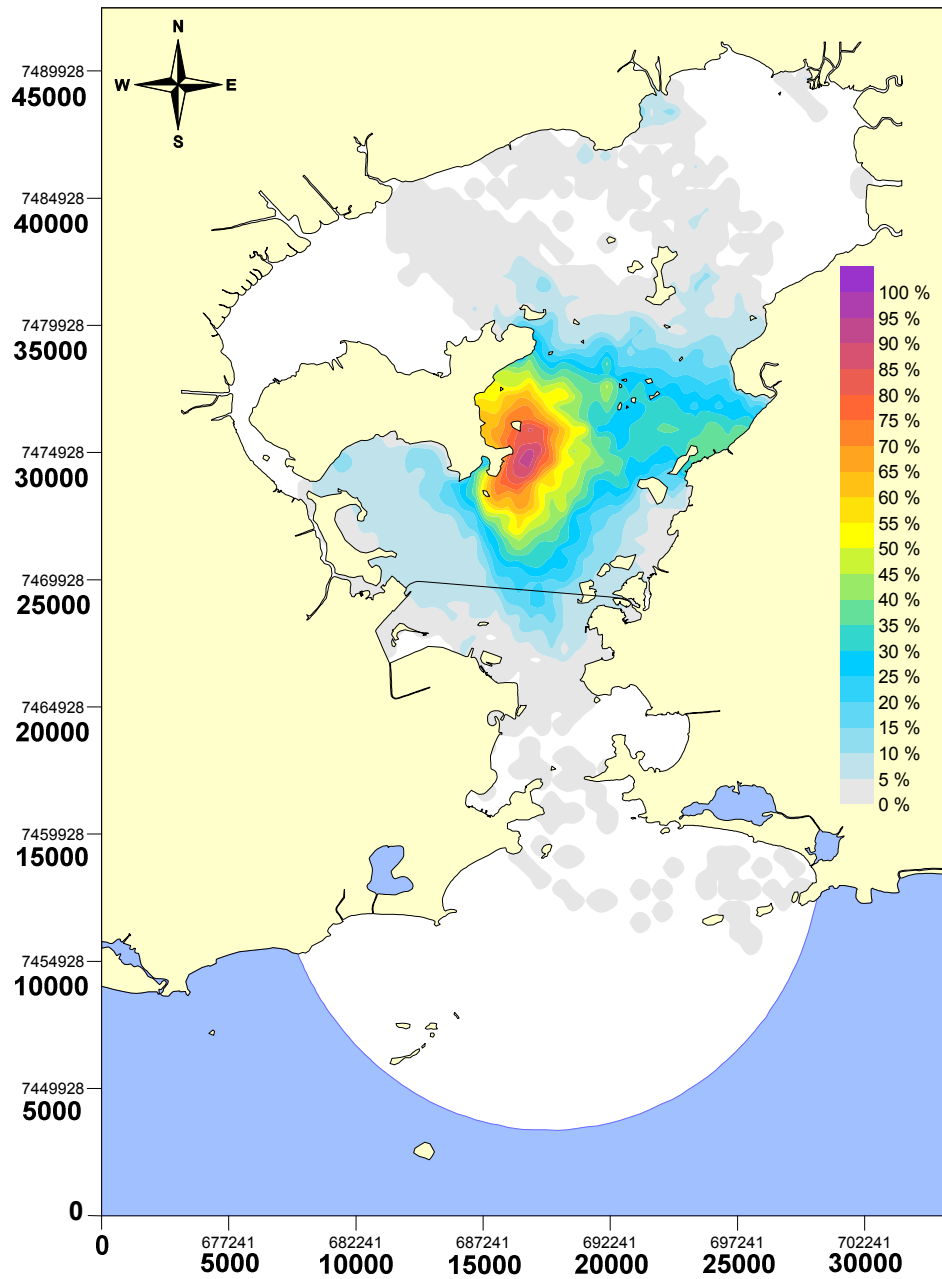


Figura 69: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Duto - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 1 mg/l. A probabilidade de o óleo alcançar as praias oceânicas não ultrapassa 5%.

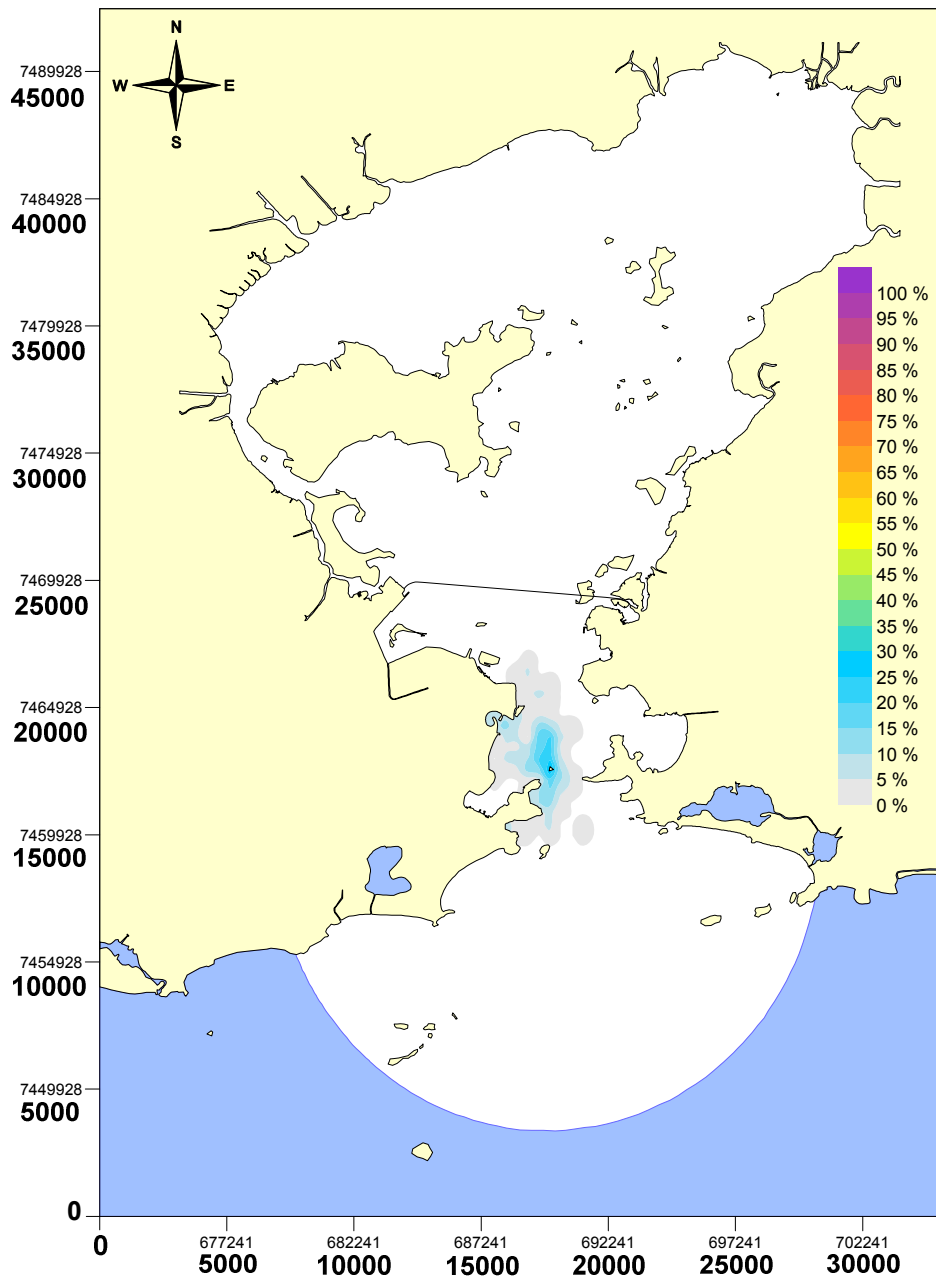


Figura 70: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Navio 1 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l. Nota-se uma menor dispersão da pluma com o aumento da concentração limite.

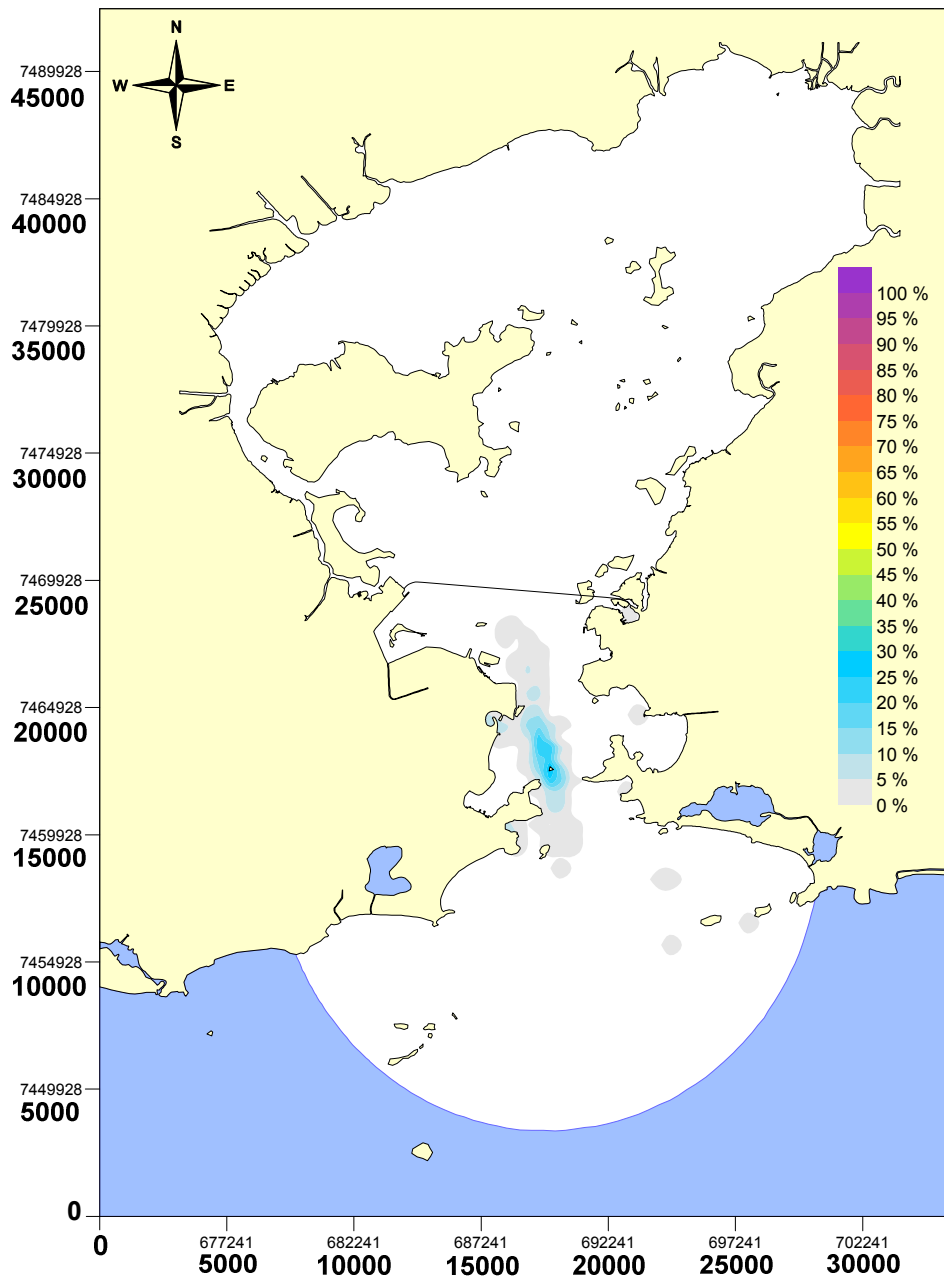


Figura 71: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Navio 1 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.

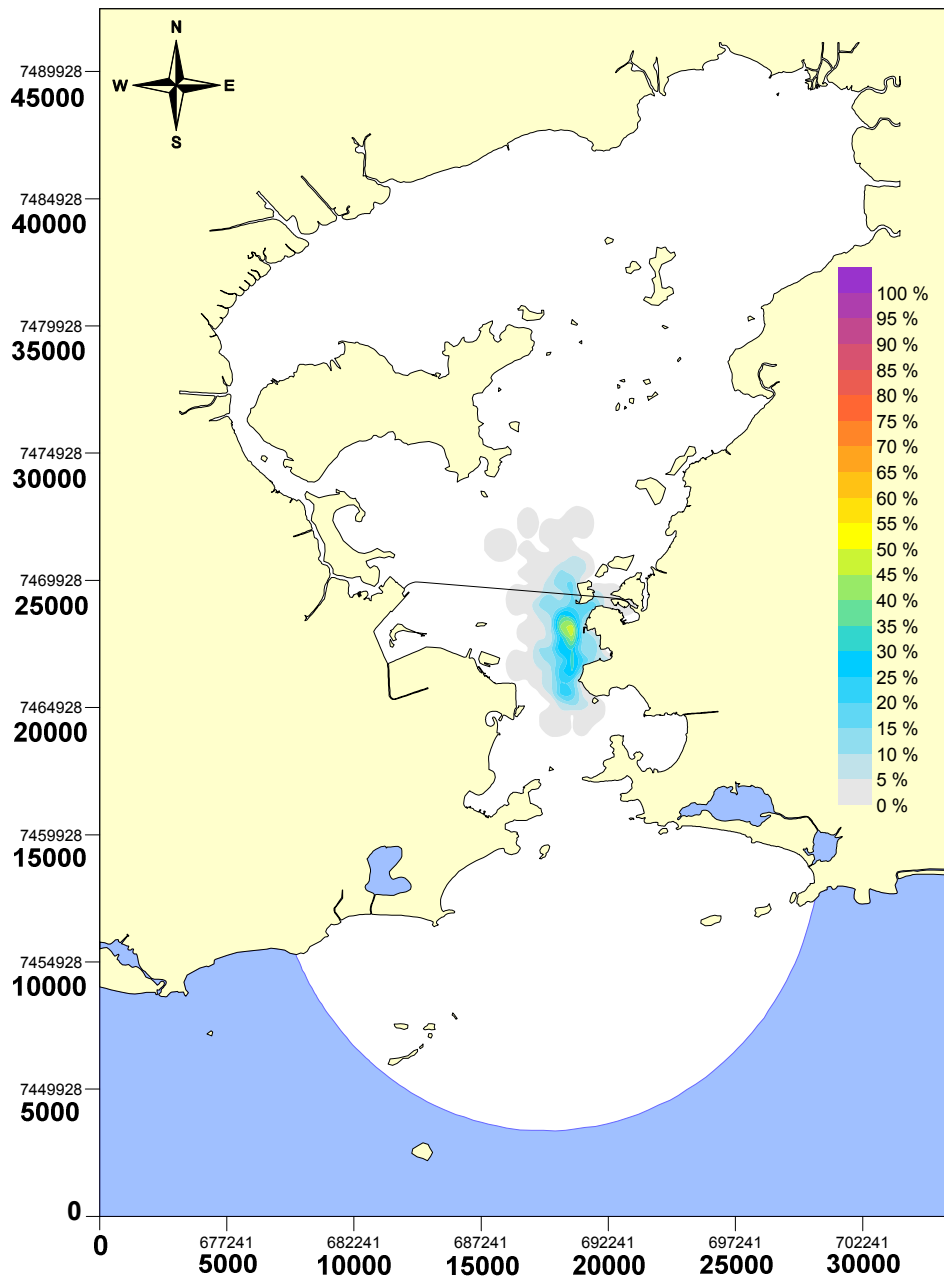


Figura 72: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Navio 2 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.

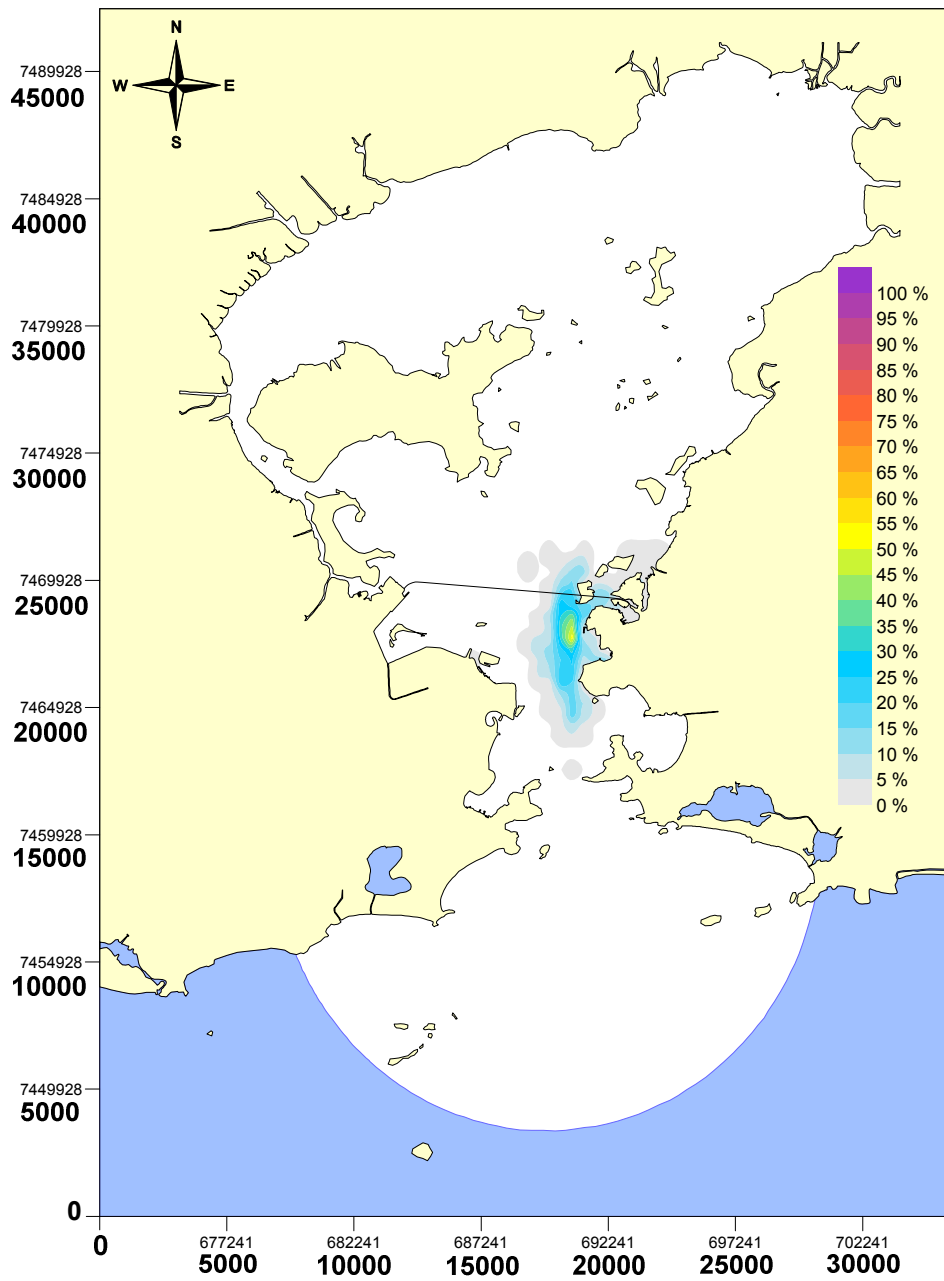


Figura 73: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Navio 2 - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.

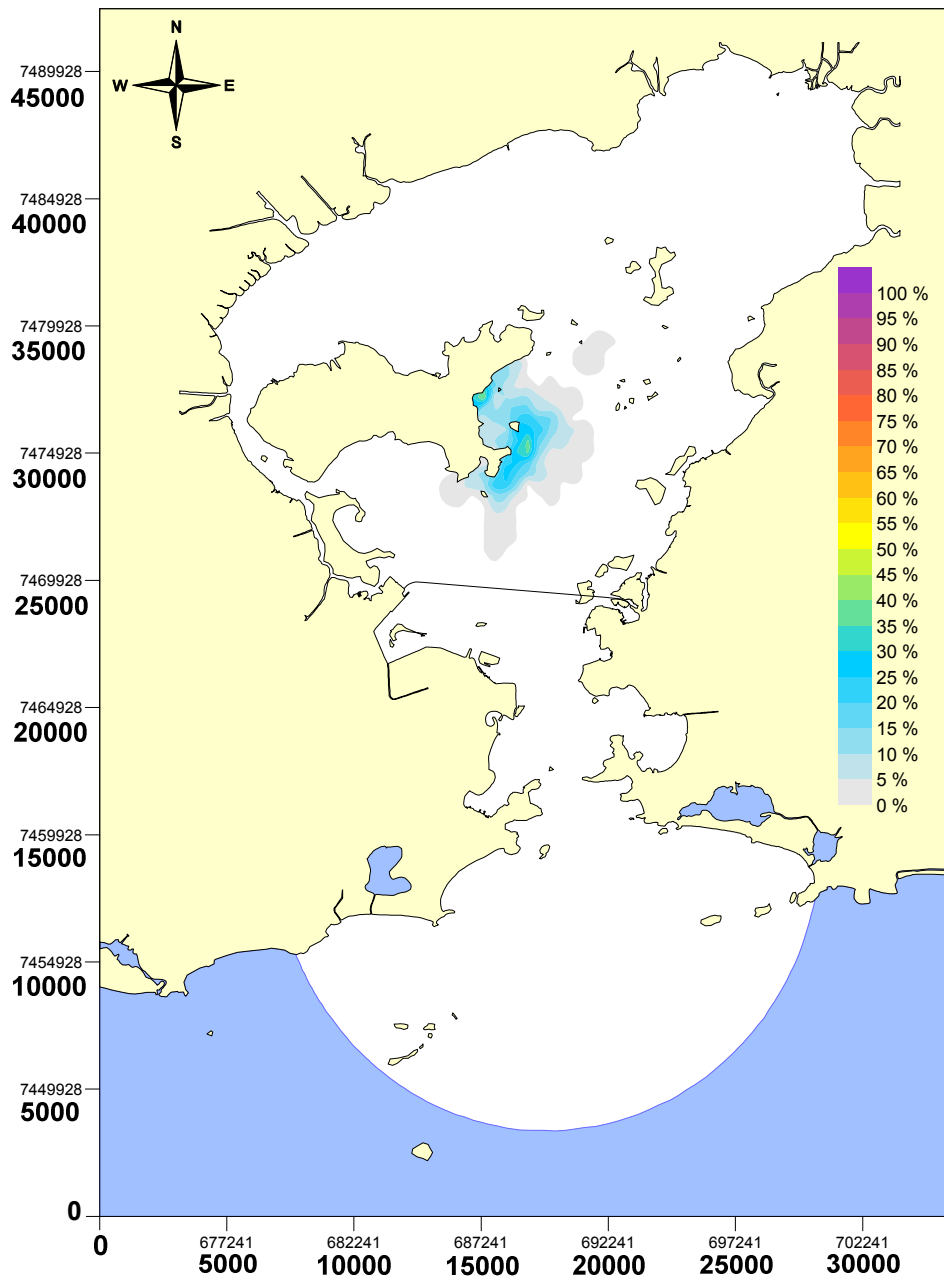


Figura 74: Cenário de Ventos Usuais - Vazamento de Óleo do Duto - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.

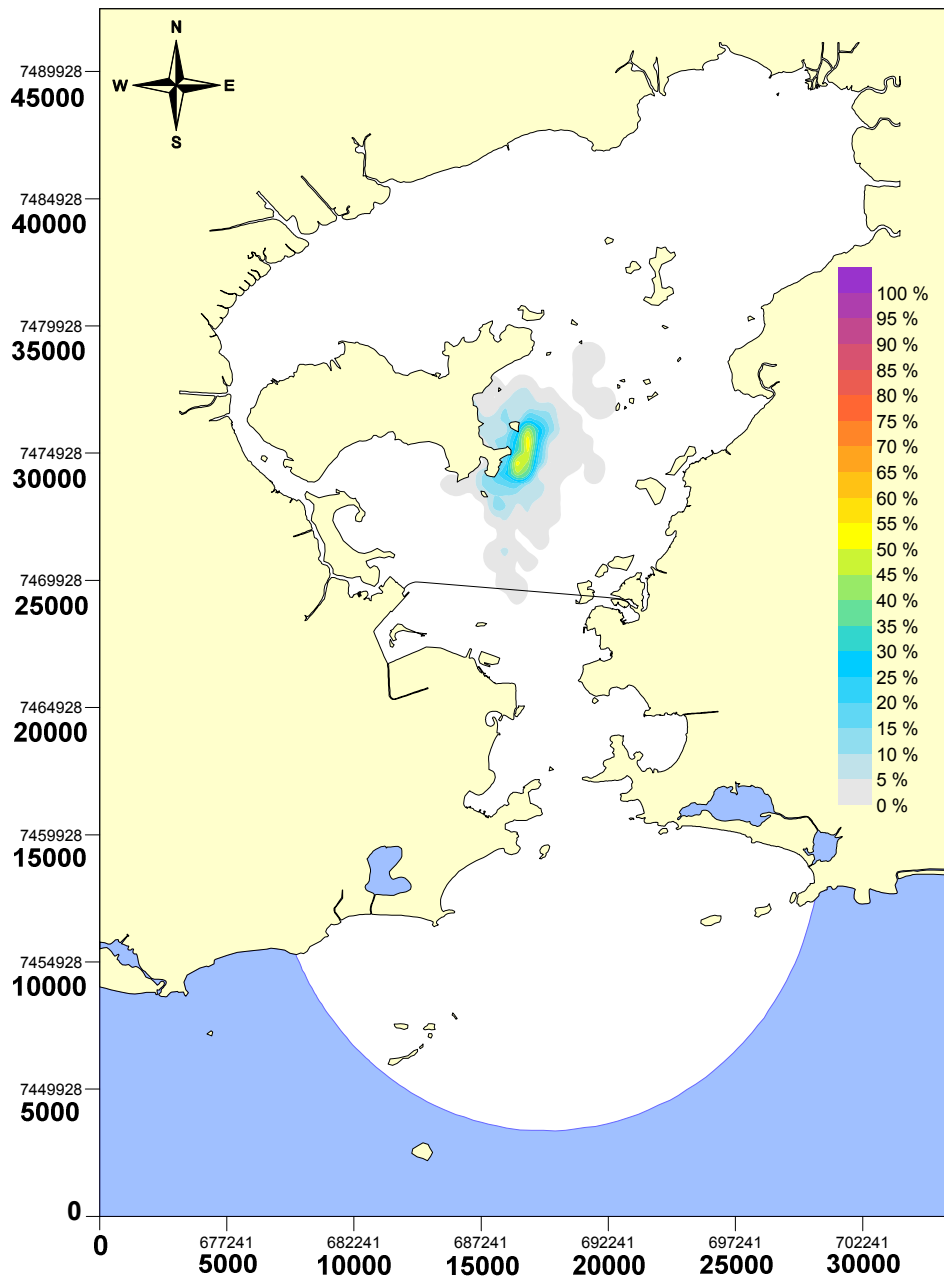


Figura 75: Cenário de Entrada de Ventos de Frente Fria - Vazamento de Óleo do Duto - Probabilidade de ocorrência de concentração superior à concentração limite de 20 mg/l.

Ao examinar os resultados observa-se que, mesmo com altíssimos volumes vazados de óleo, a probabilidade de esse óleo alcançar as praias é ainda remota. No vazamento do navio no cenário 1, o pior cenário simulado devido à sua proximidade das praias oceânicas, a probabilidade de esse óleo chegar às imediações da costa oceânica, local onde poderia ocorrer a exposição humana, com a concentração de 1 mg/l não ultrapassou 15%.

O vazamento do navio no cenário 2 também ilustra a baixa probabilidade de um derrame desse tipo afetar as praias oceânicas. Tanto nas condições usuais quanto na frente fria, a das praias possuem concentrações acima do limite de 1 mg/l foi dificilmente maior que 5%.

Finalmente, no derrame de óleo pelos dutos, menor ainda é a probabilidade de a costa oceânica ser afetada, não tendo ultrapassado 5% em momento algum. Isso se deve provavelmente a dois fatos: o volume mais reduzido de óleo derramado e o ponto de vazamento no interior da baía.

Em todas as simulações realizadas com a concentração limite de 20 mg/l, a probabilidade do óleo chegar às praias oceânicas não chegou a 5%, tendo sido nulo para o vazamento do navio no cenário 2 e no vazamento do duto.

Conclui-se assim, que a tendência de movimento de um possível vazamento de óleo na Baía de Guanabara é muito mais acentuada na direção norte, para o interior da baía, e não no sentido das praias oceânicas. Mesmo simulando-se situações bastante graves, como um navio de 2.000 toneladas deixar toda sua carga ser derramada no mar, e adotando-se premissas conservadoras, como a concentração limite de 1 mg/l – o que representa uma espessura de 0,001 mm da camada de óleo – um derramamento de óleo na baía provavelmente não afetaria a qualidade da água das praias oceânicas.

9 Conclusões

Verificou-se, através das diversas simulações realizadas, que a Baía de Guanabara não exerce um papel determinante na qualidade da água das praias oceânicas adjacentes à sua desembocadura. Apesar de a troca de massas d'águas entre a baía e essas praias não ser negligenciável, ela não é suficiente para que os parâmetros de qualidade de água sejam alterados somente por ação das águas da baía.

Dois principais fatores impedem uma influência mais acentuada da baía nas praias oceânicas.

Primeiramente, a rapidez com a qual as águas da baía e das praias interagem não é tão grande, o que torna lento qualquer transporte de substâncias. Como a maioria dos contaminantes que se encontram no ambiente sofrem algum decaimento em função do tempo, como é o caso dos coliformes e do óleo, por exemplo, o aporte de substâncias da baía às praias oceânicas é dificultado. Poluentes que possuem decaimento veloz, como é o caso dos coliformes, dificilmente irão persistir a todo o percurso do interior da baía às praias exteriores.

Em segundo lugar, nota-se, em determinados momentos, tendências de movimento mais acentuadas em direção ao norte da baía, especificamente para a região de Magé, conforme foi observado em alguns cenários de derramamento de óleo. Mesmo nos derramamentos próximos à desembocadura da baía, pequenas concentrações de óleo chegaram a ser transportadas para fora da baía.

Ainda assim, o fato de os parâmetros de qualidade avaliados não serem tão alterados pela baía não significa que a importância da baía em relação às praias oceânicas deva ser menosprezada ou tampouco que a qualidade da água da baía não seja importante. Há diversas praias no interior da baía que, por mais que não sejam muito frequentadas por banhistas, são extremamente relevantes do ponto de vista ambiental, o que é ilustrado pela Área de Proteção Ambiental de Guapimirim, situada no nordeste da baía.

Além disso, mesmo não sendo a baía a causa da poluição das praias oceânicas, isso também não indica que as praias possuam uma boa condição de balneabilidade, uma vez que pode haver outros fatores que influenciem sua qualidade. O intuito do trabalho foi somente avaliar até que ponto as águas da baía seriam responsáveis pela qualidade das praias oceânicas, e não avaliar a qualidade das praias oceânicas em si.

10 Referências Bibliográficas

ADIOS2, 2006. Software desenvolvido pela National Oceanic and Atmospheric Administration dos Estados Unidos. Disponível em:

[http://response.restoration.noaa.gov/type_topic_entry.php?RECORD_KEY\(entry_topic_type\)=entry_id,topic_id,type_id&entry_id\(entry_topic_type\)=181&topic_id\(entry_topic_type\)=1&type_id\(entry_topic_type\)=3](http://response.restoration.noaa.gov/type_topic_entry.php?RECORD_KEY(entry_topic_type)=entry_id,topic_id,type_id&entry_id(entry_topic_type)=181&topic_id(entry_topic_type)=1&type_id(entry_topic_type)=3)

Acessado em 07/05/2010.

Anisio, L., 2006, Análise da contaminação atual da baía de Guanabara através da utilização de modelagem hidrodinâmica probabilística e avaliação de dados

geoquímicos de sedimentos de praia. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BRASIL., Lei n. 6938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.

CONAMA. Resolução n. 274, de 29 de novembro de 2000. Dispõe sobre os padrões de balneabilidade de águas.

CONAMA. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

de Paula, T., 2009, Análise Hidrodinâmica e de Renovação de Massas d'Água na Lagoa Rodrigo de Freitas através do Uso de Modelagem Computacional. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Feitosa, R., 2007, Acoplamento de modelos de campo próximo e campo afastado com cinética de decaimento bacteriano variável – aplicações em emissários submarinos. Tese submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Kaufmann, C., 2009, Estudo hidrodinâmico e de qualidade de água após revitalização do canal do fundão, Baía de Guanabara - RJ. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Pinheiro, L., 2008. Vulnerabilidade e sensibilidade ambiental de praias da baía de guanabara ao derramamento de petróleo e derivados. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rosman, P. C., 2008, Referência Técnica do SisBaHiA. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC.

Rosman, P.C., 1997, Extrato do livro: Métodos numéricos em recursos hídricos. Capítulo 3: Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos.

Rosman, P.C., 2002, Um critério para uniformizar os limites de apresentação de resultados de modelos de derrame de óleo. Documento entregue a ELPN/IBAMA - ESCRITÓRIO DE LICENCIAMENTO DE ATIVIDADES DO PETRÓLEO E NUCLEAR do INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, em resposta a discussões ocorridas no Workshop Interno sobre Modelagem de Derramamento de Óleo no Mar, ocorrido em 23/08/2002.

Sampaio, M., 2003, Estudo de Circulação Hidrodinâmica 3D e Trocas de Massas d'Água da Baía de Guanabara - RJ. Tese submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SEBRAE, 2007. Informe do SEBRAE: "Empreendedores apostam em praias". Disponível em:

<http://revistapegn.globo.com/EditoraGlobo/DownloadShow/pdf/0,27955,46,00.pdf>.

Acessado em 01/06/2010.

SEMADS, 2001, Bacias Hidrográficas e Rios Fluminenses, Síntese Informativa por Macrorregião Ambiental., Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio de Janeiro, Projeto Planágua SEMADS/GTZ, volume III, 2001.

Souza, R. V.; Lage, V., 2008, A Economia da praia. Brasília: SEBRAE. 225 p. : il. Color. ; 27 cm.