



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

**Avaliação do Impacto do Lançamento de Poluentes por Emissários Sub-
marinos e Fontes Costeiras Pontuais na Balneabilidade das Praias do Rio de
Janeiro e Niterói**

Luiza do Amaral Thompson Motta

Pedro Ivo Dias de Faria

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental da Esco-
la Politécnica, Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos neces-
sários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2013

Avaliação do Impacto do Lançamento de Poluentes por Emissários Submarinos e Fontes Costeiras Pontuais na Balneabilidade das Praias do Rio de Janeiro e Niterói

Luiza do Amaral Thompson Motta

Pedro Ivo Dias de Faria

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. Heloisa Teixeira Firmo, D.Sc.

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2013

Motta, Luiza do Amaral Thompson

Faria, Pedro Ivo Dias de

Avaliação do Impacto do Lançamento de Poluentes por Emissários Submarinos e Fontes Costeiras Pontuais na Balneabilidade das Praias do Rio de Janeiro e Niterói / Luiza do Amaral Thompson Motta e Pedro Ivo Dias Faria – Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITECNICA, 2013.

xvi, 91 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Projeto de Graduação – UFRJ / POLI / Curso de Engenharia Ambiental, 2013

Referências Bibliográficas: p. 90-91

1. Hidrodinâmica Ambiental; 2. Emissários Submarinos; 3. Transporte Lagrangeano; 4. Decaimento Bacteriano; 5. Balneabilidade. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III Avaliação do Impacto do Lançamento de Poluentes por Emissários Submarinos e Fontes Costeiras Pontuais na Balneabilidade das Praias do Rio de Janeiro e Niterói.

Agradecimentos - Luiza do Amaral Thompson Motta

Quero agradecer ao nosso Orientador, Professor Rosman, pela atenção e dicas importantes, e também ao Rodrigo, pela paciência de tirar várias dúvidas no início desse trabalho.

Aos grandes amigos que fiz na faculdade, que foram mais importantes do que imaginam, e vão fazer com que eu leve desses cinco anos muito mais do que um diploma. E dentre os amigos, ao Pedro, pela parceria essencial nesse trabalho, por ter paciência de me ouvir falar muito e pelas inúmeras caronas pro Fundão.

E por fim, agradeço a minha torcida organizada: Paulo, Taísa, Felipe, Marina e Gustavo, que comemoram cada conquista, ouvem todos os problemas, ficam orgulhosos de tudo o que eu faço, incluindo essa monografia, e são minha inspiração para querer fazer tudo cada vez melhor.

Agradecimentos – Pedro Ivo Dias de Faria

Quero agradecer primeiramente ao Professor Rosman, nosso orientador, por toda a dedicação e ajuda que nos deu ao longo desse projeto. Também a todos da AECO (Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica) por estarem sempre dispostos a ajudar nos momentos de dificuldade. Entre esses, em especial ao amigo Rodrigo, que tanta paciência teve no início para nos ajudar a seguir em frente.

Aos amigos que fiz ao longo destes cinco anos de graduação, que ajudaram a tornar este tempo tão importante e prazeroso, e sem os quais com certeza não teria conseguido chegar até aqui. Principalmente à Luiza, que não apenas esteve ao meu lado para este projeto, mas que tanto me aguentou e ajudou ao longo destes anos.

A toda a minha família, em especial minha mãe e minha irmã, que me deram suporte em tudo que busquei na vida, sempre torcendo pelo meu sucesso.

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

Avaliação do Impacto do Lançamento de Poluentes por Emissários Submarinos e Fontes Costeiras Pontuais na Balneabilidade das Praias do Rio de Janeiro e Niterói

Luiza do Amaral Thompson Motta

Pedro Ivo Dias de Faria

Fevereiro/2013

As praias do Rio de Janeiro e Niterói ficam constantemente impróprias para banho segundo os parâmetros estabelecidos pela resolução CONAMA 274, prejudicando assim a população dessas cidades e o turismo local. Nas duas cidades, três emissários submarinos fazem a disposição final do esgoto sanitário: Emissário Submarino da Barra da Tijuca, Emissário Submarino de Ipanema e Emissário Submarino de Icaraí, além de outras fontes pontuais que descartam o esgoto na costa. De forma a avaliar a influência desses lançamentos na balneabilidade das praias, utilizou-se a modelagem computacional, através do SiSBaHiA®, programa desenvolvido pela COPPE para modelagem hidrodinâmica. Foram criados quatro cenários com características de verão e inverno e vazões atuais e finais de projeto para o lançamento dos emissários. Inicialmente foram feitos os modelos hidrodinâmicos para os quatro cenários a fim de conhecer o padrão de circulação das águas. A partir dos modelos hidrodinâmicos, pode-se realizar a modelagem de transporte lagrangeano e verificar como a radiação solar, a altura da pluma e as condições de maré alteram o comportamento da pluma de efluente. A partir dos resultados verificou-se que os emissários não são responsáveis por alterações nas condições de balneabilidade das praias, no entanto, as fontes pontuais costeiras exercem grande influência.

Palavras-chave: Hidrodinâmica Ambiental, Balneabilidade das praias do Rio de Janeiro e Niterói, Emissários Submarinos, Modelo Computacional, Modelagem Lagrangeana;

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

Evaluation of the Impact of Submarines Outfalls Releases and Other Sewage Sources on the Bath Conditions of the Rio de Janeiro and Niteroi Beaches

Luiza do Amaral Thompson Motta

Pedro Ivo Dias de Faria

February/2013

The beaches of Rio de Janeiro and Niteroi frequently don't satisfy the recreational bath regulation according to CONAMA 274, what prejudices the local population and the tourism. In both cities, three submarines outfalls are responsible for the final disposal of sewage: Barra da Tijuca, Ipanema and Icaraí. There are also another sources that dismisses the sewage on the coast. In order to evaluate the influence of these releases on bathing beaches, we used computational modeling, through the software SiSBaHiA ®, a program developed by COPPE for hydrodynamic modeling. There were created four scenarios with characteristics of summer and winter and current and final flows for the outfalls. The hydrodynamic models were made for the four scenarios in order to know the pattern of water circulation. From the hydrodynamic models, it is possible to model the Lagrangean transport models and evaluate how the solar radiation, the height of the plume and tide conditions influence the behavior of the plume of effluent. From the results it was found that the oceanic disposal systems are not responsible for changes in the conditions of bathing beaches, however coastal punctual sources exert great influence.

Keywords: Environmental Hydrodynamics, Bath regulation of Rio de Janeiro and Niterói beaches, Submarine Outfall, Computational Model, Lagrangean Transport Model;

Conteúdo

1. Introdução	1
2. Objetivos	2
3. Lançamento de efluentes em corpos d'água	3
3.1 Sistema de Disposição Oceânica de Esgotos Sanitários.....	3
3.2 Decaimento bacteriano	7
3.3 Indicadores de Contaminação Fecal	9
3.4 Legislação	10
3.5 Balneabilidade.....	11
3.6 Situação das praias.....	13
3.7 Emissários da Barra, Ipanema e Icaraí.....	16
3.8 Outras fontes poluidoras	17
4. Metodologia.....	20
4.1 Cenários de modelagem	20
4.2 Modelagem computacional.....	20
4.3 Modelo Hidrodinâmico.....	23
4.4 Modelo de Transporte Lagrangeano	26
5. Modelagem	28
5.1 Modelagem digital do terreno	28
5.2 Malha de elementos finitos.....	30
5.3 Batimetria.....	32
5.4 Amplitude da rugosidade equivalente do fundo	33
5.5 Marés	34
5.6 Dados de ventos	36
5.7 Temperatura da água e salinidade	40
6. Resultados e Análises.....	41
6.1 Resultados do Modelo Hidrodinâmico	41
6.2 Resultados da Modelagem das Plumbras dos Emissários	46

6.2.1 Campo Próximo.....	46
6.2.2 Plumas	64
7. Conclusão.....	86
8. Referências.....	90

Índice de Figuras

Figura 1: Unidades componentes de um Sistema de Disposição Oceânica de Esgotos Sanitários (GONÇALVES E SOUSA, 1997).	3
Figura 2: Jato efluente do orifício difusor e sua dispersão. (TIAN <i>et al.</i> , 2004 <i>apud</i> FEITOSA & ROSMAN, 2007)	6
Figura 3: Localização das praias da cidade do Rio de Janeiro que estão na área do domínio desse estudo e dados da balneabilidade de janeiro a julho de 2011 das praias. (Adaptado da página virtual do INEA)	14
Figura 4: Localização das praias da cidade de Niterói que estão na área de domínio desse estudo e dados da balneabilidade de janeiro a julho de 2011 das praias. (Adaptado da página virtual do INEA).....	15
Figura 5: Localização dos lançamentos de efluentes considerados pelo trabalho.....	19
Figura 6: Diagrama do Processo de Modelagem Hidrodinâmica Ambiental. (ROSMAN, 2012)	22
Figura 7: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D e 2DH), onde NR é o nível de referência. (ROSMAN, 2012).....	24
Figura 8: Carta náutica 1501 - Baía de Guanabara, escala 1:50000, 2001.(DNH, 2012).....	29
Figura 9: Modelagem digital da área de estudo. O mapa base foi adaptado do estudo Modelagem para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ elaborado pela COPPETEC para a CEDAE em 2009.	30
Figura 10: Malha de elementos finitos quadrangulares e informações sobre os nós e elementos. A malha foi obtida do estudo Modelagem para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ elaborado pela COPPETEC para a CEDAE em 2009.	31
Figura 11: Batimetria utilizada pelo modelo com isolinhas de profundidade em metros das cotas de fundo do domínio modelado. Os dados de batimetria foram obtidos do estudo Modelagem para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de influência do Emissário	

Submarino da Barra da Tijuca, RJ elaborado pela COPPETEC para a CEDAE em 2009.....32

Figura 12: Amplitude da rugosidade equivalente do fundo utilizada pelo modelo para o fundo da Baía de Guanabara. Os dados de rugosidade foram obtidos do estudo Modelagem para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ elaborado pela COPPETEC para a CEDAE em 2009.34

Figura 13: Localização da estação meteorológica SBGL.....37

Figura 14: Mapa representativo das velocidades das correntes para o modelo de vazão atual de verão em situação de baixamar de sizígia com correntes costa-fora fluindo de leste para oeste.....42

Figura 15: Mapa representativo das velocidades das correntes para o modelo de vazão atual de verão em situação de enchente de quadratura com correntes costa-fora fluindo de leste para oeste.....43

Figura 16: Mapa representativo das velocidades das correntes para o modelo de vazão atual de verão em situação de preamar de sizígia com correntes costa-fora fluindo de oeste para leste.....44

Figura 17: Mapa representativo das velocidades das correntes para o modelo de vazão atual de verão em situação de vazante de quadratura com correntes costa-fora fluindo de oeste para leste.....45

Figura 18: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), com meia-maré vazante de quadratura, no dia 10 de janeiro, às 15 horas, em situação de verão com vazões atuais.65

Figura 19: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), com meia-maré vazante de quadratura, no dia 10 de janeiro, às 15 horas, em situação de verão com vazões finais.66

Figura 20: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), com meia-maré vazante de quadratura, no dia 11 de janeiro, às 03 horas, em situação de verão com vazões atuais.67

Figura 21: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), com meia-maré vazante de quadratura, no dia 11 de janeiro, às 03 horas, em situação de verão com vazões finais.68

Figura 22: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em preamar de sizígia, com plumas emersas em situação de inverno com vazões atuais.	70
Figura 23: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em preamar de sizígia, com plumas emersas em situação de inverno com vazões finais	71
Figura 24: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em preamar de sizígia, com plumas não emersas em situação de inverno com vazões atuais	72
Figura 25: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em preamar de sizígia, com plumas não emersas em situação de inverno com vazões finais.	73
Figura 26: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em meia-maré vazante de sizígia, em situação de inverno com vazões atuais.....	75
Figura 27: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em meia-maré vazante de sizígia, em situação de verão com vazões atuais.	76
Figura 28: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em meia-maré enchente de quadratura, em situação de inverno com vazões atuais.....	77
Figura 29: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em meia-maré enchente de quadratura, em situação de verão com vazões atuais.	78
Figura 30: Figura representativa da porcentagem do tempo, ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, que é o valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de verão com vazões atuais.	81
Figura 31: Figura representativa da porcentagem do tempo, ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, que é o valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de verão com vazões finais.	82
Figura 32: Figura representativa da porcentagem do tempo, ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800	

NFU/100ml, que é a o valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de inverno com vazões atuais.83

Figura 33: Figura representativa da porcentagem do tempo, ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, que é a o valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de inverno com vazões finais.....84

Figura 34: Figura aproximada, das praias do Rio de Janeiro, da representação da porcentagem do tempo ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, que é a o valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de verão com vazões atuais.87

Figura 35 -Figura aproximada, das praias do Niterói, da representação da porcentagem do tempo ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, que é a o valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de verão com vazões atuais.88

Índice de Tabelas

Tabela 1: Dados do Emissário Submarino da Barra de Tijuca	16
Tabela 2: Dados do Emissário Submarino de Ipanema	17
Tabela 3: Dados do Emissário Submarino de Icaraí	17
Tabela 4: Vazão das fontes poluidoras	18
Tabela 5: Constantes de marés. (Adaptado do Banco Nacional de Dados da Marinha)	35

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Níveis de maré ao longo de 30 dias.....	36
Gráfico 2: Gráfico da série temporal de ventos de janeiro de 2011. As setas tem tamanho proporcional à intensidade dos ventos e indicam a direção e o sentido destes. A escala de cores também está relacionada à intensidade.	38
Gráfico 3: Gráfico da série temporal de ventos de julho de 2011. As setas tem tamanho proporcional à intensidade dos ventos e indicam a direção e o sentido destes. A escala de cores também está relacionada à intensidade.	39
Gráfico 4: Variação da temperatura da água. Os dados de temperatura foram obtidos através da média temporal para cada profundidade. É possível perceber a maior estratificação no verão e temperaturas mais homogêneas no inverno.	40
Gráfico 5: Variação temporal da diluição mínima para o modelo de vazão atual de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC. C_e/C é a razão entre a concentração no emissário (C_e) e a concentração máxima na pluma do emissário no final do campo próximo (C).	48
Gráfico 6: Variação temporal da diluição mínima para o modelo de vazão final de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC. C_e/C é a razão entre a concentração no emissário (C_e), e a concentração máxima na pluma do emissário no final do campo próximo (C).	49
Gráfico 7: Variação temporal da diluição mínima para o modelo de vazão atual de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC. C_e/C é a razão entre a concentração no emissário (C_e) e a concentração máxima na pluma do emissário no final do campo próximo (C).	50
Gráfico 8: Variação temporal da diluição mínima para o modelo de vazão final de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC. C_e/C é a razão entre a concentração no emissário, C_e é a concentração máxima na pluma do emissário no final do campo próximo.	51
Gráfico 9: Variação temporal da profundidade do topo da pluma para o modelo de vazão atual de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	52

Gráfico 10: Variação temporal da profundidade do topo da pluma para o modelo de vazão final de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	53
Gráfico 11: Variação temporal da profundidade do topo da pluma para o modelo de vazão atual de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	54
Gráfico 12: Variação temporal da profundidade do topo da pluma para o modelo de vazão final de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	55
Gráfico 13: Variação temporal de espessura da pluma para o modelo de vazão atual de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.....	56
Gráfico 14: Variação temporal de espessura da pluma para o modelo de vazão final de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	57
Gráfico 15: Variação temporal de espessura da pluma para o modelo de vazão atual de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	58
Gráfico 16: Variação temporal de espessura da pluma para o modelo de vazão final de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	59
Gráfico 17: Variação temporal do parâmetro T_{90} no centro da pluma para o modelo de vazão atual de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	60
Gráfico 18: Variação temporal do parâmetro T_{90} no centro da pluma para o modelo de vazão final de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	61
Gráfico 19: Variação temporal do parâmetro T_{90} no centro da pluma para o modelo de vazão atual de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	62
Gráfico 20: Variação temporal do parâmetro T_{90} no centro da pluma para o modelo de vazão final de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.	63

1. Introdução

A população carioca e niteroiense convive constantemente com diversas praias do seu litoral classificadas como impróprias para banho. A degradação da qualidade da água nas praias destas cidades é impactante na atividade turística local e na qualidade de vida de seus moradores. Logo, a água contaminada tem de ser tratada não apenas como veículo de doenças e nociva para a fauna e a flora marinhas, mas também prejudicial para a economia local.

A contaminação está ligada, sobretudo, à descarga de efluentes nos oceanos e o esgoto sanitário se destaca como maior carga poluidora de centros urbanos como Rio de Janeiro e Niterói. Estas cidades têm em comum, não só o grande número de praias poluídas, mas também a utilização de emissários submarinos como alternativa para a destinação do esgoto sanitário.

O lançamento de poluentes na costa é feito tanto por fontes clandestinas quanto pelas disposições oceânicas regularizadas pelos órgãos governamentais. É importante destacar que o lançamento de esgoto não é a única fonte de poluição da costa fluminense. A Baía de Guanabara tem um histórico longo de maus cuidados em termos ambientais.

A repercussão que as questões ambientais têm tido nos últimos anos traz, por um lado, a conscientização da população quanto à necessidade do cuidado com a degradação dos meios naturais e por outro, o alarmismo, que muitas vezes impede a análise exata das causas do problema. Torna-se então necessário estudar as consequências desses diferentes descartes, que apesar de terem o mesmo fim possuem manejo e execução totalmente diferentes.

A modelagem computacional se apresenta como a ferramenta ideal para o estudo das consequências, uma vez que permite interpolar e extrapolar dados no tempo e no espaço prevendo situações em cenários com diferentes condições ambientais.

Para que o impacto sobre a balneabilidade das praias seja devidamente minimizado é necessário avaliar de perto quais são suas causas, o que neste caso inclui avaliação das consequências individuais e sinérgicas destes lançamentos de esgoto.

2. Objetivos

O trabalho presente tem como objetivo principal analisar a influência do lançamento de poluentes, pelas fontes poluidoras escolhidas, na balneabilidade das praias do Rio de Janeiro e de Niterói.

O conhecimento dos dados históricos de balneabilidade nestas praias e a análise do transporte destes poluentes através da hidrodinâmica local não nos levam necessariamente a uma conclusão sobre a relação entre estas informações. Desta forma, foi adotada uma abordagem indutiva onde, ao traçar objetivos secundários, alcança-se pelo encadeamento de resultados, uma conclusão final para o objetivo principal.

Os objetivos secundários do trabalho englobam então:

- Verificação da eficácia dos emissários submarinos de Ipanema, Barra da Tijuca e Icaraí. Esta verificação será feita observando se a dispersão da pluma está se dando de forma satisfatória, variando parâmetros que podem afetar sua eficácia, como vazão e época do ano, o que será explicado mais a frente. Portanto, não é escopo deste trabalho analisar ou propor alternativas técnicas ou locais.
- Análise do transporte de poluentes lançados por fontes pontuais na costa do Rio de Janeiro. Estas fontes têm vazões bem mais baixas do que as dos emissários, porém, devido à sua localização, são potenciais causas da degradação da qualidade da água nas praias.
- Observação de possíveis interferências entre as plumas de poluentes de diferentes fontes poluidoras. As fontes escolhidas, principalmente os emissários submarinos, já foram objeto de estudo de trabalhos que analisavam seu impacto na qualidade das águas. No entanto, ao abordar diversas fontes neste mesmo trabalho, visa-se verificar se o lançamento conjunto de poluentes causa algum tipo de interferência que possa alterar os resultados obtidos em estudos separados.

- Analisar a influência da variação dos aspectos que interferem no decaimento bacteriano, de forma a entender em quais circunstâncias a diluição é mais ou menos eficaz.

3. Lançamento de efluentes em corpos d'água

O lançamento de efluente em corpos d'água abordado nesse estudo é feito através de um sistema de disposição oceânica de esgotos sanitários. Nessa seção será esclarecido como funciona essa disposição; os fatores que interferem no decaimento bacteriano do esgoto na água salina; os indicadores utilizados para mensurar a concentração de organismos patogênicos; a legislação que regula os lançamentos e a situação atual de balneabilidade das praias do Rio de Janeiro e Niterói.

3.1 Sistema de Disposição Oceânica de Esgotos Sanitários

A disposição oceânica de esgotos sanitários é a utilização dos fenômenos naturais presentes nos oceanos (físicos, químicos e biológicos) para o tratamento desse efluente. Através do avanço da engenharia sanitária, foi possível reproduzir e sofisticar os processos naturais em estações de tratamento de esgoto e também estudar a melhor forma de disposição oceânica como solução complementar ou única.

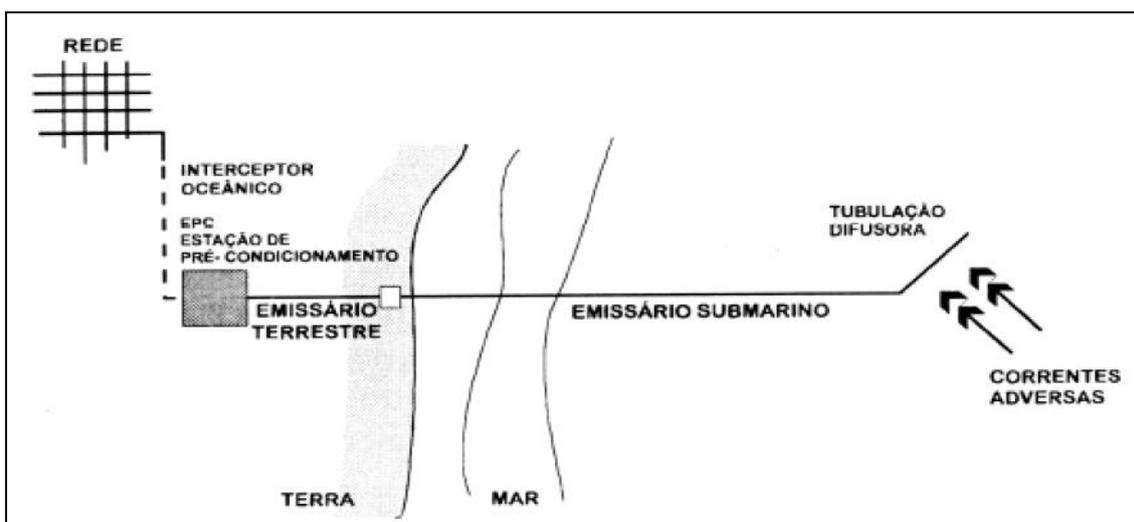


Figura 1: Unidades componentes de um Sistema de Disposição Oceânica de Esgotos Sanitários (GONÇALVES E SOUSA, 1997).

A utilização do potencial natural do mar de depuração de esgotos se mostra muito relevante no Brasil, país que possui litoral extenso. Por outro lado, o uso desta técnica se mostra extremamente delicado, haja vista que este litoral apresenta-se densamente povoado e já com crescente degradação da qualidade da água do mar devido ao lançamento irregular de efluentes na costa.

O sistema de disposição oceânica é aquele destinado a promover tratamento de esgotos sanitários utilizando da capacidade de autodepuração das águas marinhas para a redução da concentração de poluentes. Essa redução deverá ser feita antes que a pluma de esgoto possa atingir áreas de uso benéfico, como banho, esportes aquáticos ou aquicultura. (GONÇALVES E SOUSA, 1997)

Um sistema de disposição oceânica é composto por cinco unidades: (GONÇALVES E SOUSA, 1997)

- Estação de condicionamento prévio:

É o local onde o efluente vai receber algum tipo de tratamento destinado a reduzir as concentrações dos poluentes e contaminantes até os níveis de emissão permitidos pela legislação ou até níveis para os quais o corpo receptor se mostre capaz de reduzir as concentrações lançadas. As estações podem ser implantadas com tratamento preliminar, primário ou secundário, ou até se reduzir a um condicionamento hidráulico dotado de grades de barras.

- Emissário terrestre:

Destinado a transportar os efluentes até a câmara de equilíbrio.

- Câmara de equilíbrio:

Estrutura com o objetivo de absorver as flutuações de pressão geradas pelas variações de vazão e da maré e garantir a estabilidade do bombeamento do efluente de forma contínua e estável.

- Emissário submarino:

Garantem o transporte de forma hidráulicamente adequada do efluente da câmara de equilíbrio para a tubulação difusora.

- Tubulação difusora:

Estrutura responsável por efetivamente lançar o esgoto no mar e promover a adequada disposição de modo à formação de um campo de mistura inicial otimizado capaz de reduzir a concentração de poluentes para níveis aceitos pela legislação mesmo em condições de transporte adversas. A disposição é feita através de jatos por orifícios da tubulação.

O efluente despejado pela tubulação difusora tem densidade significativamente menor do que a água do mar. Essa diferença de densidade vai gerar uma força vertical de deslocamento do efluente que, juntamente com a força horizontal gerada pelo deslocamento no interior do emissário, será responsável pela trajetória do fluxo de esgoto na água marinha. Conforme se deslocam e ascendem, as partículas vão perdendo atrito e se misturam e homogeneízam com a água do mar, reduzindo a velocidade inicial e formando um cone de ascensão e uma área de cisalhamento e turbulência.

A injeção do esgoto na água se dá através de orifícios espaçados, e não por um único bocal, para que os cones de ascensão do campo de mistura não se interceptem muito próximos ao lançamento.

O espaçamento entre orifícios constitui um parâmetro que influi significativamente no comportamento do efluente lançado no ambiente marinho (FEITOSA & ROSMAN, 2007).

Dessa forma a tubulação difusora é projetada com um número de orifícios difusores e espaçamento entre eles de modo a otimizar a diluição inicial que ocorre no chamado campo próximo.

Após a diluição inicial é formado um campo de mistura mais próximo da superfície marinha e mais uniforme. Esse campo estará mais sujeito as correntes marinhas prevaletentes. A figura a seguir mostra a característica da pluma na região de mistura inicial.

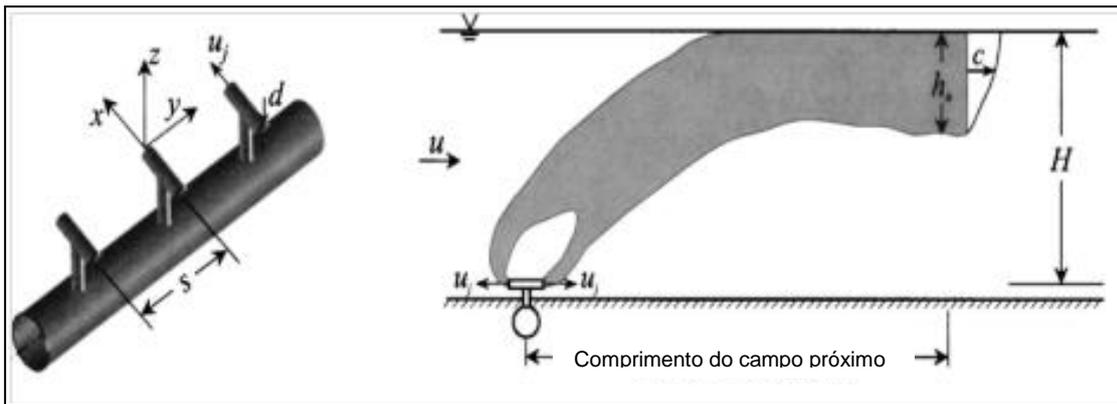


Figura 2: Jato efluente do orifício difusor e sua dispersão. (TIAN *et al.*, 2004 | *apud* FEITOSA & ROSMAN, 2007)

O contato do esgoto com a água marinha também é responsável pelo fenômeno do decaimento bacteriano ao submeter os organismos contaminantes às condições apresentadas pela água. Esse fenômeno ocorre desde o primeiro contato do esgoto com a massa receptora, e é também responsável pela depuração do contaminante.

O que se observa então é a formação de duas regiões distintas:

Campo Próximo: região próxima ao lançamento onde a diferença na quantidade de movimento e a diferença de densidade vão ser os responsáveis pela dispersão e diluição do efluente. Região de intensa turbulência.

O fim do campo próximo é definido como o ponto onde a diluição não varia mais significativamente com a distância em relação à tubulação difusora. (FEITOSA, 2007)

Campo Afastado: onde a intensidade e a orientação das correntes marinhas vão governar a dispersão da pluma do emissário submarino. Não existem diferenças entre as quantidades de movimento do efluente e do fluido receptor, portanto, a pluma não vai interferir na hidrodinâmica do local.

No campo afastado a distribuição de concentrações do contaminante no corpo receptor vai depender dos seguintes processos (FEITOSA, 2007):

- Advecção promovida pelas correntes oceânicas;
- Difusão turbulenta do contaminante devido a atritos internos na massa d'água, tensões de atrito com o fundo e atrito de vento na

superfície livre. No entanto, a advecção é mais expressiva no campo afastado do que a difusão.

- Reações cinéticas de produção ou decaimento do contaminante, que variam principalmente em razão da salinidade, temperatura e incidência de radiação solar, entre outros fatores que serão vistos a diante.

Na transição do campo próximo para o campo afastado ocorre o espalhamento superficial da pluma e diminuição gradual de sua espessura. A troca de massa do contaminante na vertical passa a ser de pouca relevância se comparada à troca de massa do contaminante no plano horizontal, que ocorre principalmente devido turbulência oceânica (BLENINGER, 2006 *apud* FEITOSA 2007)

3.2 Decaimento bacteriano

Um dos principais aspectos da poluição das águas é a possibilidade de transmissão de doenças e um corpo d'água receptor de esgoto pode ser veiculador dessas, afetando, portanto a sua balneabilidade. Ao estudar os agentes transmissores de doenças, sabe-se que eles têm sua condição ótima no trato intestinal humano, e que fora dele, em condições adversas, tendem a decrescer em número, o que caracteriza o decaimento. (VON SPERLING, 2005)

Segundo VON SPERLING, os fatores que podem contribuir para esse decaimento são físicos, físico-químicos, biológicos e bioquímicos:

Fatores físicos:

- Luz solar (radiação ultravioleta);

É um dos fatores mais importantes no decaimento das bactérias. A radiação solar tem efeito forte nos primeiros 30 metros de profundidade. Seu efeito é pouco pronunciado depois desse limite, sendo atenuado por ação da reflexão e absorção. A porção de luz solar emitida vai depender, além da profundidade, da turbidez e do comprimento de onda (FEITOSA, 2007);

- Temperatura;

Quanto maior a temperatura, maior o decaimento. No entanto, a temperatura possui maior influência no decaimento na ausência de incidência de radiação solar pois os efeitos da temperatura se tornam pouco relevantes comparados à

radiação (FEITOSA, 2007). A temperatura pode afetar a velocidade de crescimento, as exigências nutricionais, a atividade enzimática e a composição química dos microrganismos (RHEINHEIMER, 1980 *apud* FEITOSA & ROSMAN, 2007).

- Adsorção;

Ligação de microrganismos às partículas sólidas do meio líquido. Depende fortemente da natureza das partículas, sendo a adsorção em sedimentos argilosos mais significativa do que em siltes ou areais (CHAMBERLIN & MITCHELL, 1978 *apud* FEITOSA & ROSMAN, 2007).

- Flocculação;

Agregação de microrganismos com a incorporação de água formando assim flocos de maiores dimensões, o que interfere no processo de sedimentação.

- Sedimentação;

É a deposição de particulados e agregados de bactérias, ou seja, a simples transferência de um meio físico (líquido) para o outro (sólido) no fundo. É mais significativa em corpos d'água menos turbulentos do que águas costeiras.

Fatores físico-químicos:

- Salinidade;

Atua nos microrganismos que estarão sujeitos a um choque osmótico ao entrarem em contato com a água salina, e, além disso, podem sofrer alterações na velocidade do crescimento, fisiologia e reprodução. (DE OLIVEIRA, 1990 *apud* FEITOSA & ROSMAN, 2007)

- pH;

A maioria das bactérias cresce em determinadas faixas pequenas de pH. Porém a variação no decaimento causada por esse fator não é muito relevante devido às pequenas variações de pH nas águas marinhas.

- Toxicidade química e oxigênio dissolvido.

A presença de substâncias tóxicas como detergentes metais pesados e hidrocarbonetos pode ser nociva para as bactérias, ou seja, muitas vezes o próprio esgoto contém esses elementos tóxicos.

O decaimento é agravado caso haja uma brusca variação de um ambiente com baixa concentração de oxigênio para um com alta concentração, situação comum no caso de emissários submarinos. (KOTT, 1982 *apud* FEITOSA & ROSMAN, 2007)

Fatores biológicos e bioquímicos:

- Falta de nutrientes;

A mudança de ambiente pode gerar a falta de nutrientes essenciais para o desenvolvimento dos microrganismos.

- Predação e competição.

A predação varia de acordo com as condições do ambiente e com os microrganismos presentes.

Dentre esses fatores, a radiação solar destaca-se como mais relevante para o decaimento. No ambiente marinho também são importantes a salinidade, a temperatura e a predação, embora essa última seja de difícil quantificação, portanto não é considerada em estudos como esse para diminuir o risco de incerteza (FEITOSA, 2007).

3.3 Indicadores de Contaminação

Os principais grupos de organismos associados à transmissão de doenças são as bactérias, os vírus, os protozoários e helmintos, que são majoritariamente de origem humana, refletindo a saúde da população. A quantidade de agentes transmissores de doenças presentes no esgoto também é consequência das condições sanitárias do local e da presença de indústrias pecuárias. A contaminação por uma doença transmitida por esses agentes, dada a ingestão da água contaminada, vai depender do volume de água ingerida; do tempo de contato; da concentração do organismo; da dose infectiva relativa do organismo patogênico; e da resistência do indivíduo: idosos e crianças apresentam menor resistência.

Para obter um índice de contaminação poderia se utilizar a detecção da presença de organismos patogênicos, no entanto, a detecção pode demandar volumes muito grandes de água, já que em uma população não são todos os habitantes que estão infectados, mesmo nas fezes desses habitantes podem não ser

altas as concentrações, e tais concentrações ainda serão reduzidas com o despejo do esgoto sanitário.

A melhor opção é, portanto a utilização de um organismo indicador de contaminação, que não necessariamente é patogênico, mas possui potencial de ser. As bactérias do grupo coliforme são as mais utilizadas, segundo VON SPERLING, pelas seguintes razões: se apresentam em grande quantidade nas fezes humanas (de um terço a um quinto do peso das fezes humanas é constituído por bactérias); possuem resistência superior do que a maioria das bactérias (os coliformes tendem a morrer um pouco depois do que a bactérias patogênicas, o que dá alguma segurança a padrões que exigem concentrações máximas de coliformes); os mecanismos de remoção das bactérias patogênicas são os mesmos dos coliformes, fazendo com que sua remoção seja associada; e as técnicas para a detecção dos coliformes são rápidas e econômicas.

Os principais indicadores coliformes são coliformes totais (CT), coliformes termotolerantes e *Escherichia coli* (EC). Tanto os coliformes totais quanto os coliformes termotolerantes podem abranger bactérias de vida livre, portanto o único indicador que dá garantia de contaminação exclusivamente fecal é o *Escherichia coli*, que é utilizado pela legislação e será utilizado nesse estudo.

Deve se ressaltar que a presença de *Escherichia coli* garante que os organismos são de origem fecal, mas não necessariamente humana. No entanto, esse organismo é o predominante dentre os coliformes termotolerantes em corpos d'água poluídos por esgoto doméstico, o que é o caso desse estudo.

Na modelagem numérica um parâmetro comumente usado para estimar o decaimento bacteriano e que será utilizado nesse trabalho é o T_{90} , ou seja, o tempo necessário para o decaimento de 90% da população original de bactérias.

3.4 Legislação

A legislação acerca da disposição de efluentes é feita pelo CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. De acordo com a Lei 9.638 de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, o CONAMA é um órgão consultivo e deliberativo que tem como uma de suas competências deliberar sobre normas e padrões compatíveis com o meio ambiente equilibrado e com a qualidade de vida.

A Resolução 430 da CONAMA, publicada em 13 de maio de 2011 de forma complementar a Resolução 357/2005, dispõe sobre as diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos d'água receptores. É estabelecido por ela que deve ser precedido de tratamento que garanta o atendimento das seguintes condições (CONAMA, 2011):

- pH entre 5 e 9;
- temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- desarenação prévia com eficiência mínima de remoção de 20% dos sólidos em suspensão totais;
- sólidos grosseiros e materiais flutuantes virtualmente ausentes;
- atender aos padrões da classe do corpo receptor, após o limite da zona de mistura e ao padrão de balneabilidade, de acordo com as normas e legislação vigentes.

Acerca dos padrões da classe do corpo receptor, a Resolução CONAMA 357 classifica e enquadra os corpos d'água de acordo com a qualidade requerida para o seu uso preponderante. No caso da água salina, definida pela Resolução como água com salinidade igual ou superior a 30‰, a classificação que se adequa ao uso da água no caso desse estudo é água salina de Classe 1, que pode ser destinada à recreação de contato primário, à proteção de comunidades aquáticas, à aquicultura e à atividade da pesca.

3.5 Balneabilidade

O CONAMA no uso de suas competências publicou a Resolução 274 de 2000 que define os critérios de balneabilidade das águas brasileiras. A legislação considera a balneabilidade como fator interveniente na saúde e no bem estar humano. A Resolução 274 estabelece parâmetros para classificar as águas doces, salobras e salinas em próprias ou impróprias para banho (recreação de contato direto). E dentre as águas próprias existe ainda outra classificação (CONAMA, 2000):

- 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 termotolerantes ou 200 *Escherichia coli* ou 25 enterococos por 100 mililitros;

- 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 termotolerantes ou 400 *Escherichia coli* ou 50 enterococos por 100 mililitros;
- 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 termotolerantes ou 800 *Escherichia coli* ou 100 enterococos por 100 mililitros.

Segundo a Resolução 274, não basta atender os padrões acima para não ser considerada imprópria. As águas serão consideradas impróprias se forem verificadas algumas das ocorrências (CONAMA, 2000):

- não atendimento aos critérios estabelecidos para as águas próprias;
- valor obtido na última amostragem for superior a 2500 coliformes fecais (termotolerantes) ou 2000 *Escherichia coli* ou 400 enterococos por 100 mililitros;
- incidência elevada ou anormal, na região, de enfermidades transmissíveis por via hídrica, indicada pelas autoridades sanitárias;
- 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;
- pH < 6,0 ou pH > 9,0 (águas doces), à exceção das condições naturais;
- floração de algas ou outros organismos, até que se comprove que não oferecem riscos à saúde humana;
- outros fatores que contraindiquem, temporária ou permanentemente, o exercício da recreação de contato primário.

O CONAMA define ainda que cabe ao órgão de controle ambiental a aplicação da Resolução e a divulgação das condições de balneabilidade das praias e dos balneários pertinentes. No Estado do Rio Janeiro, o órgão responsável é o

INEA – Instituto Estadual do Ambiente que divulga em sua página virtual a situação das praias.

3.6 Situação das praias

O INEA monitora cento e vinte praias no Estado do Rio de Janeiro, em um total de quinze municípios, incluindo as praias na área de estudo desse trabalho. O monitoramento é feito semanalmente ou mensalmente dependendo da estabilidade de cada praia. A divulgação dos resultados é feita através de boletins que seguem as orientações da CONAMA.

Através dos dados disponíveis na página virtual do INEA pode-se analisar a balneabilidade das praias da área de interesse de estudo no último ano e especialmente nos meses de janeiro e julho, que serão objetivo de estudo da modelagem hidrodinâmica. É importante destacar que diversos fatores não considerados no modelo podem afetar a balneabilidade das praias, como a presença de outras fontes poluidoras ou a contaminação residual na Baía de Guanabara. O boletim é apresentado aqui, portanto de forma a se apresentar a motivação às análises feitas posteriormente, não constituindo um parâmetro de comparação final dos resultados.

Algumas praias cariocas como Barra de Guaratiba, Barra da Tijuca, Botafogo, Urca e Flamengo encontram-se impróprias tanto em janeiro quanto em julho, sendo que de maneira geral em relação a todas as praias, as condições de balneabilidade em julho são piores.

Em Niterói a situação é mais crítica, com muitas praias impróprias em todas as medições para esses dois meses. As figuras com a localização das praias vão ajudar a interpretação dos resultados no capítulo a seguir. As praias classificadas como recomendadas com restrições possuem trechos impróprios para o banho.

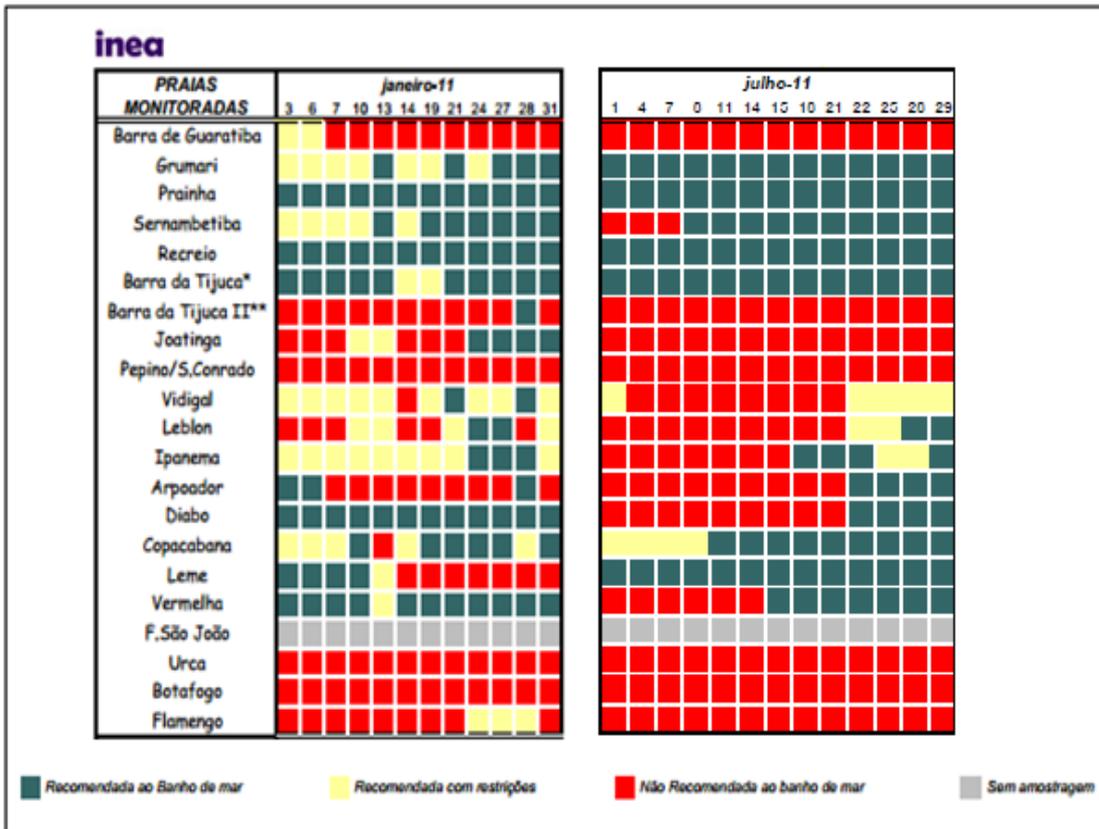
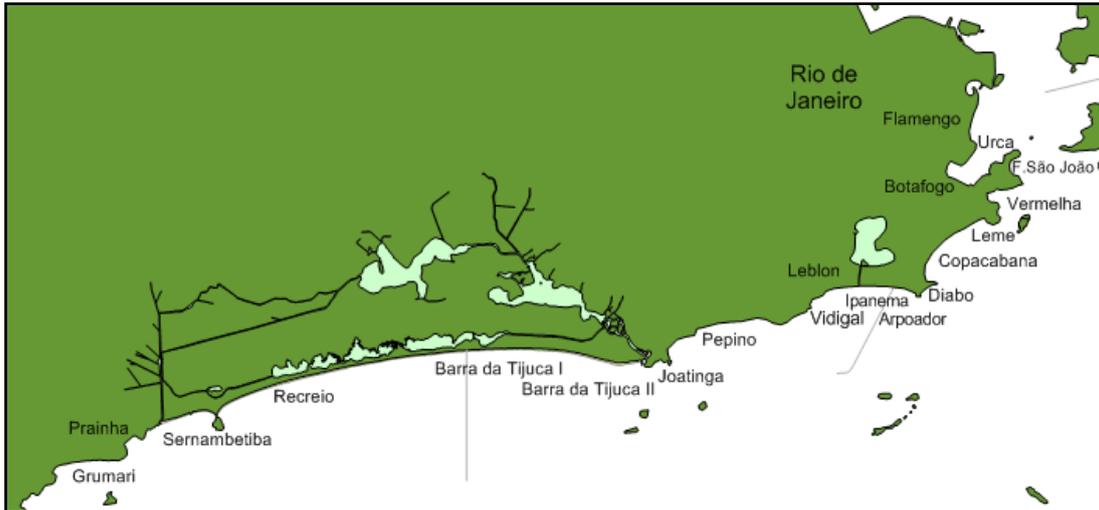


Figura 3: Localização das praias da cidade do Rio de Janeiro que estão na área do domínio desse estudo e dados da balneabilidade de janeiro a julho de 2011 das praias. (Adaptado da página virtual do INEA)

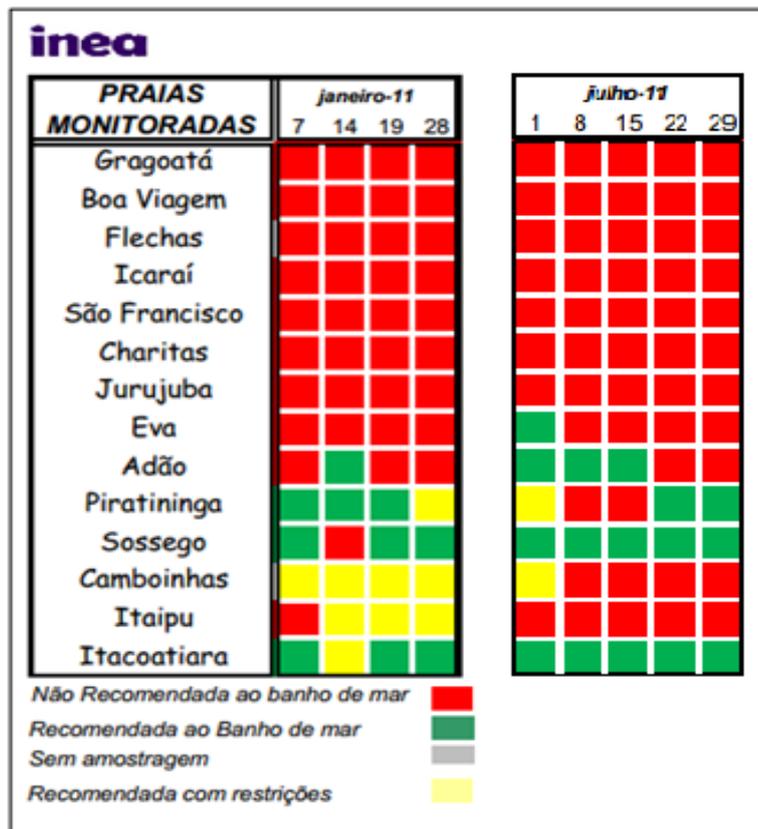


Figura 4: Localização das praias da cidade de Niterói que estão na área de domínio desse estudo e dados da balneabilidade de janeiro a julho de 2011 das praias. (Adaptado da página virtual do INEA)

3.7 Emissários da Barra, Ipanema e Icaraí

Emissário da Barra da Tijuca

O sistema de disposição oceânica da Barra da Tijuca atende as populações do Rio das Pedras, Jardim Clarice, Anil, Cidade de Deus, Taquara, Freguesia e Praça Seca, em Jacarepaguá, e na Barra da Tijuca, dos Condomínios Santa Mônica e Novo Leblon, Jardim Oceânico, Condomínios ao Norte do canal de Marapendi e Condomínios ao Sul do canal de Marapendi. (AMORIM, 2010)

O emissário é composto por duas tubulações paralelas em PEAD, polietileno de alta densidade. O emissário principal está em funcionamento desde 2006, enquanto o reserva tem previsão de funcionamento para 2016. O funcionamento é de responsabilidade da CEDAE – Companhia Estadual de Águas e Esgotos.

O esgoto antes de ser despejado é submetido a tratamento primário que consiste em gradeamento, desarenação, tanques de aeração e decantação primária.

A tabela a seguir apresenta dados construtivos do emissário que foram utilizados para a elaboração da modelagem lagrangeana desse trabalho.

Tabela 1: Dados do Emissário Submarino da Barra de Tijuca

Emissário Submarino da Barra da Tijuca			
Profundidade (m)	Comprimento (m)	Vazão Atual (m ³ /s)	Vazão Final de Projeto (m ³ /s)
45	5000	1.0	5.0
Quantidade de Difusores	Orifícios por Difusor	Espaçamento entre Difusores (m)	Diâmetro dos Orifícios (m)
40	1	2.5	0.09

Emissário de Ipanema

O emissário de Ipanema teve sua construção concluída em 1975 e é um componente essencial para o esgotamento sanitário da Zona Sul do Rio de Janeiro. Sua operação é de responsabilidade da CEDAE.

Tabela 2: Dados do Emissário Submarino de Ipanema

Emissário Submarino de Ipanema			
Profundidade (m)	Comprimento (m)	Vazão Atual (m ³ /s)	Vazão Final de Projeto (m ³ /s)
27	4325	6.0	10.0
Quantidade de Difusores	Orifícios por Difusor	Espaçamento entre Difusores (m)	Diâmetro dos Orifícios (m)
70	2	4.5	0.18

Emissário de Icaraí

A operação do emissário é feita pela empresa Águas de Niterói, responsável pelo esgotamento sanitário dessa cidade. Segundo a empresa, a tubulação é de PEAD e o comprimento da linha difusora é de 252,5 metros. Demais dados estão na tabela abaixo.

Tabela 3: Dados do Emissário Submarino de Icaraí

Emissário Submarino de Icaraí			
Profundidade (m)	Comprimento (m)	Vazão Atual (m ³ /s)	Vazão Final de Projeto (m ³ /s)
16	3300	1.0	2.0
Quantidade de Difusores	Orifícios por Difusores	Espaçamento entre Difusores (m)	Diâmetro dos Orifícios (m)
40	1	2.5	0.09

3.8 Outras fontes poluidoras

Foram consideradas na modelagem do lançamento de esgotos na costa, além dos emissários submarinos, fontes de descarga de esgoto *in natura*. Através dessas fontes o efluente é lançado junto à costa, sem que haja o afastamento dado pelos emissários ou qualquer tipo de tratamento primário.

A causa desses lançamentos é a falta de acesso ao esgotamento sanitário, que ainda não atende a toda população do Rio de Janeiro, Niterói e outros municípios no entorno da Baía de Guanabara, principalmente nas áreas mais pobres e a ligação clandestina de esgoto na rede pluvial.

O trabalho não pretende representar todas as fontes pontuais, devido à dificuldade de obter essa informação não oficial, mas representá-las para análise comparativa com os emissários.

As fontes poluidoras consideradas nesse estudo e suas respectivas vazões poluidoras estão apresentadas na tabela abaixo. É importante destacar que tais vazões não representam a vazão total de cada uma dessas fontes e sim a vazão de esgoto, é portanto somente a vazão poluidora, que é lançada misturada com a água.

Tabela 4: Vazões poluidoras.

Fontes Poluidoras	Vazão (m ³ /s)
Canal do Jardim de Allah	0.05
Canal da Joatinga	0.20
Canal da Sernambetiba	0.10
Canal da Visconde de Albuquerque	0.05
Rocinha/ São Conrado	0.10

As vazões correspondem a estimativas utilizadas no estudo Modelagem para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ elaborado pela COPPETEC para a CEDAE em 2009.

Não foram feitas estimativas de vazões finais para os lançamentos dessas fontes já que elas não fazem parte de nenhum planejamento de tratamento de esgoto, muitas vezes são clandestinas e não deveriam existir, portanto não há uma vazão final de projeto como no caso dos emissários.

Através da figura a seguir é possível observar a localização dos lançamentos de efluentes pontuais e os feitos pelos emissários da Barra (ESBT), Ipanema (ESEI) e Icarai (ESIC).

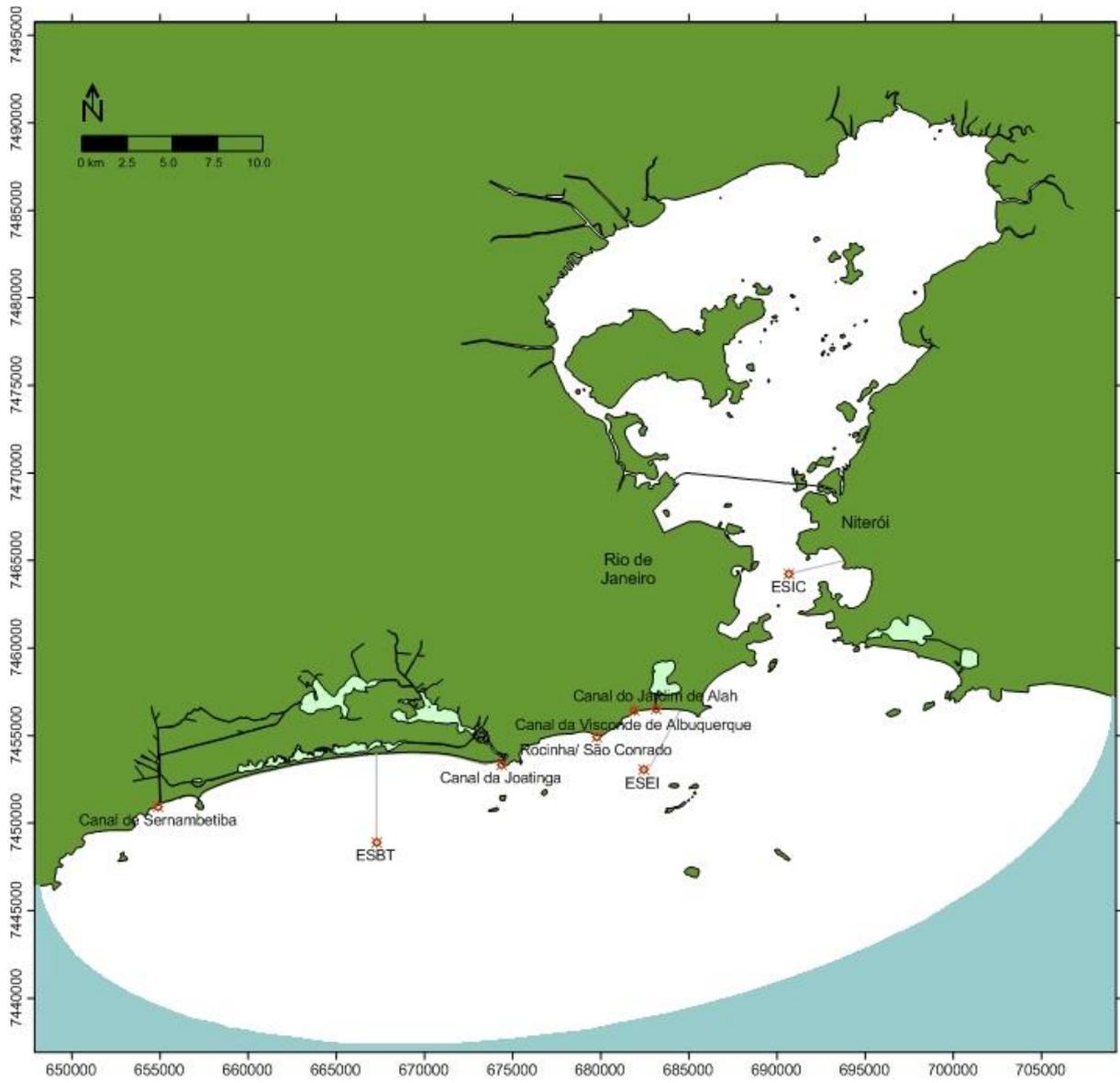


Figura 5: Localização dos lançamentos de efluentes considerados pelo trabalho.

4. Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos foram feitas simulações de cenários de condições ambientais diferentes utilizando a ferramenta da modelagem computacional.

4.1 Cenários de modelagem

A fim de abordar as principais condições de hidrodinâmica e de transporte do efluente foram criados quatro cenários de modelagem com características que variam entre si e resultados independentes:

- Verão Atual: condições de vento, temperatura da água, salinidade e radiação de verão (janeiro) e vazão atual dos emissários.
- Verão Final: condições de vento, temperatura da água, salinidade e radiação de verão (janeiro) de verão e vazão final de projeto dos emissários.
- Inverno Atual: condições de vento, temperatura da água, salinidade e radiação de inverno (julho) e vazão atual dos emissários.
- Inverno Final: condições de vento, temperatura da água, salinidade e radiação de inverno (julho) e vazão final de projeto dos emissários.

A partir dos resultados da modelagem computacional serão gerados gráficos e imagens que possam mostrar como a pluma de contaminantes varia de acordo com os fatores que afetam o decaimento, como profundidade da pluma, radiação solar, variação de T_{90} e espessura da pluma, além da variação da maré. Através das comparações de diferentes cenários e a geração de um resultado probabilístico espera-se chegar aos objetivos do presente estudo.

4.2 Modelagem computacional

A modelagem computacional é muito utilizada para estudos e projetos de gestão de recursos hídricos onde dados ambientais são escassos, e paradoxalmente, essenciais. Os dados disponíveis são de medições em pontos de interesse e representam apenas uma pequena fração do todo. Portanto, modelos se tornam ferramentas indispensáveis para que se possa interpolar e extrapolar os dados no tempo e no espaço, além de ajudar a interpretar medições feitas em estações pontuais e propiciar o entendimento da dinâmica de processos. (ROSMAN, 2012)

Modelos quando aferidos com dados de campo e analisados por especialistas podem permitir (ROSMAN, 2012):

Em análise de diagnóstico:

- Otimizar custos de monitoramento e medição integrando informações dispersas;
- Estender o conhecimento para regiões onde não há medições já que modelos são um modo consistente de extrapolar e interpolar.

Em análise de prognóstico:

- Prever situações simulando cenários para estudos e projetos;
- Mapeamento das áreas de risco e determinação de destinos prováveis de contaminantes, ambos utilizados em Licenciamento Ambiental;
- Elaboração de Planos de Emergência;
- Elaboração de Planos de Mitigação;
- Prever a evolução de eventos em tempo real.

O modelo utilizado nesse estudo foi o SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, um sistema profissional de modelos computacionais gerado 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).

As etapas da modelagem computacional podem ser vistas na Figura 6. A primeira delas e mais fundamental é a elaboração do modelo conceptual (DUARTE E PEIXOTO, 2012), que é o entendimento por parte do modelador dos processos físicos atuantes no fenômeno de interesse.

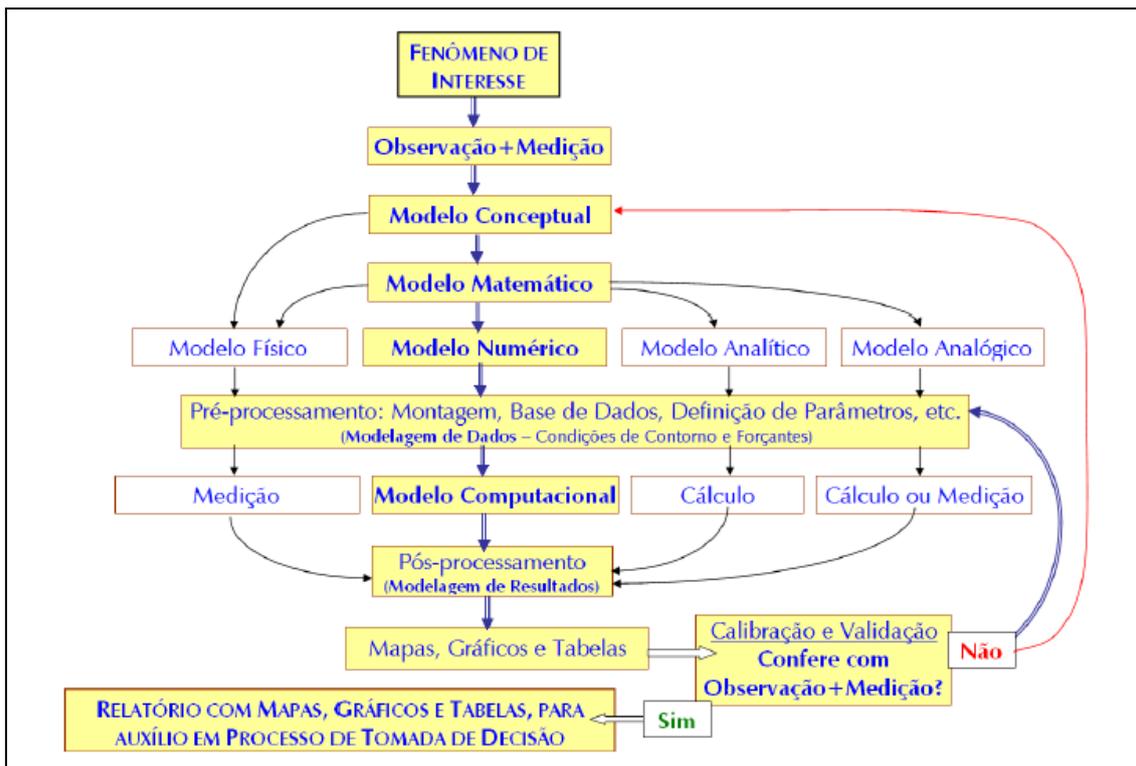


Figura 6: Diagrama do Processo de Modelagem Hidrodinâmica Ambiental. (ROSMAN, 2012)

Seguindo o diagrama, a etapa seguinte consiste na formulação do Modelo Matemático, ou seja, a tradução para a linguagem matemática do modelo conceitual do fenômeno de interesse. Existem quatro métodos possíveis para resolver modelos matemáticos: analítico, analógico, físico e numérico (ROSMAN, 2012).

O modelo matemático deve em grande parte das vezes ser resolvido de forma não analítica, já que as soluções analíticas consideram situações simplificadas e idealizadas, o que não se aplica a observação dos fenômenos naturais. Já o modelo analógico é aplicável para situações muito peculiares, é mais teórico do que prático. A modelagem física é de caráter essencialmente empírico, bastante trabalhosa e demorada, e exige a reprodução de fenômenos através de protótipos. A outra opção seria a modelagem numérica, que consiste em transformar modelos matemáticos para outros métodos de cálculo de mais fácil operação. (DE SIQUEIRA E QUEIROZ, 2012).

Modelos numéricos, no entanto, geram uma quantidade massiva de informações, e somente com a computação se tornou viável processar dados e resolver contas em um tempo reduzido e com maior confiabilidade. A rota computacio-

nal fez com que solução numérica de praticamente todos os modelos matemáticos fosse possível. (ROSMAN, 2012).

Para obter confiabilidade na resolução dos modelos numéricos, no entanto, é necessário que a coleta de dados seja feita de forma precisa e que haja a calibração dos modelos computacionais, aproximando o resultado da realidade medida em campo. Um modelo, portanto, é, inevitavelmente, no máximo tão bom quanto os dados que o alimentam (DE SOUSA E SILVA, 2011).

Os modelos utilizados nesse estudo foram: modelo hidrodinâmico e modelo lagrangeano.

4.3 Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico adotado pelo SisBaHiA® é o FIST3D, um modelo tridimensional adequado para escoamentos homogêneos e de grande escala. O modelo é composto por dois módulos (ROSMAN, 2012):

- Módulo 2DH: sempre calculado pelo FIST3D. Bidimensional na horizontal, através do qual a elevação da superfície e velocidades de corrente 2DH promediadas na vertical são calculadas.
- Módulo 3D: calcula o campo de velocidades tridimensional através do módulo 2DH.

Para o caso deste estudo, a modelagem no módulo 3D se apresentou mais adequada, já que, ao considerarmos emissários submarinos apoiados no leito oceânico, parte importante da análise é a movimentação hidrodinâmica vertical, que nos permitirá, mais à frente, uma verificação completa do comportamento da pluma contaminante. Parâmetros como a profundidade da pluma são de extrema necessidade para a tirada de conclusões que são objetivadas neste trabalho.

O modelo numérico é composto pelas equações de Navier-Stokes, que representam o 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 d'água. (ROSMAN, 2012)

Na Figura 7 está apresentado o sistema de coordenadas dos módulos 2DH e 3D.

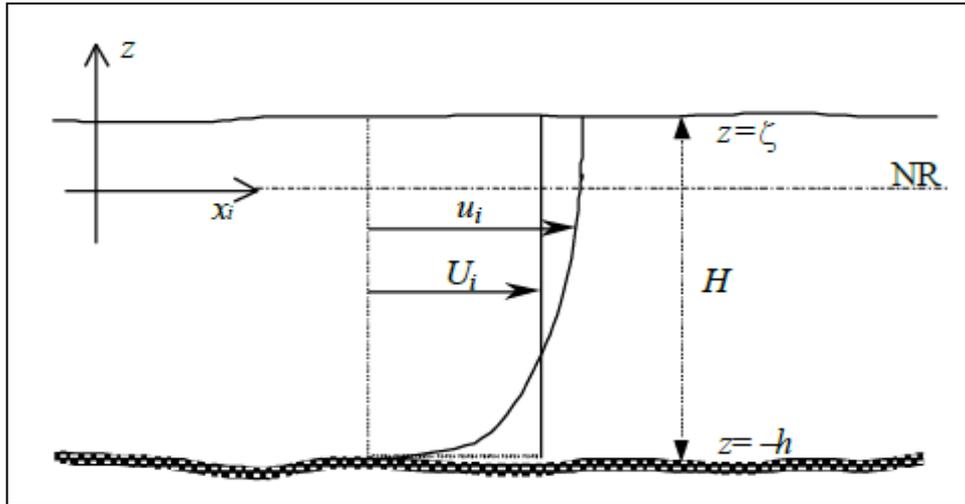


Figura 7: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D e 2DH), onde NR é o nível de referência. (ROSMAN, 2012)

A componente da velocidade na direção i (x, y) é representada por u_i e ζ é a elevação da superfície livre. Sendo assim temos quatro variáveis a serem calculadas pelo programa. As equações que resolvem essas variáveis são:

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

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

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

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

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:

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

Onde:

u, v, w = componentes da velocidade na direção x, y, z , respectivamente;

g = aceleração da gravidade;

ζ = elevação da superfície livre;

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

Para resolver as equações devem ser fornecidas condições iniciais e de contorno.

As condições de contorno podem ser verticais ou horizontais, sendo os últimos abertos ou fechados. 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 é uma limitação física, mas 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. (MACHADO E DA SILVA, 2010)

As condições de contorno das fronteiras abertas utilizadas neste trabalho são decorrentes da própria maré local, refletindo, inclusive, a diferença de fase que existe devida à grande largura da área de estudo. Ou seja, a elevação da maré varia de acordo com a coordenada x do ponto fronteiro em estudo.

Já as condições de contorno de terra foram calculadas atribuindo a cada nó um tipo que indicará, por uma combinação de características, o modo de cálculo de sua velocidade. No caso de nós em que não há contribuição externa, uma vazão nula foi imposta. Já em nós que representam a desembocadura de rios e canais, a vazão foi informada.

As condições iniciais servem primeiramente para que o programa calcule a variação dos parâmetros analisados e sejam feitas interpolações e extrapolações pertinentes. O modelador deve informar, para o instante inicial de simulação, os valores de elevação da superfície livre e as componentes da velocidade 2DH, U e V para todos os nós do domínio modelado. (SAMPAIO, 2003)

A condição inicial no atual trabalho foi obtida diretamente da curva de maré que será apresentada mais à frente. A indicação de uma condição inicial homogênea se mostra um artifício bem eficiente quando não temos dados concretos da elevação no instante determinado como início do modelo. Com o passar do tempo no modelo, os valores irão, através das outras variantes inseridas como parâmetros, convergir para a resposta correta, isto é, para os valores reais.

4.4 Modelo de Transporte Lagrangeano

O modelo de transporte lagrangeano foi escolhido já que se mostra extremamente eficiente quando aplicado a problemas com fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico ou com fortes gradientes, portanto de aplicação útil nesse trabalho. Esse modelo se baseia na observação da trajetória da partícula e tem a vantagem de utilizar o campo de velocidades gerado pelo modelo hidrodinâmico. (ROSMAN, 2012)

A pluma no modelo lagrangeano é representada por uma nuvem com inúmeras partículas e o problema principal é computar a posição no espaço contínuo de cada partícula. A discretização do modelo hidrodinâmico é usada apenas para a interpolação do campo de velocidades. Isso evita com que surjam conflitos de escala entre as escalas de discretização do modelo hidrodinâmico e as escalas das plumas de contaminantes. (ROSMAN, 2012)

O modelo lagrangeano do SisBaHiA® é composto por três módulos que funcionam acoplados:

- Transporte Lagrangeano Determinístico: modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas para camadas de escoamento 3D ou 2DH. Adequado para simulações de plumas de emissários ou pontos de lançamento de efluentes ao longo da costa, permite a simulação de plumas de esgoto

com vazões variáveis e taxas de decaimento T_{90} variáveis. (ROSMAN, 2012)

- Transporte Lagrangeano Probabilístico: acoplado ao modelo anterior, permite a obtenção de resultados probabilísticos computados a partir de N eventos ou de resultados ao longo de um período de tempo T . Podem ser gerados resultados como: probabilidade de toque no litoral, probabilidade de passagem de machas ou plumas de contaminantes com concentração acima de um valor limite, etc. (ROSMAN, 2012)
- Campo Próximo para Emissários e Fontes Pontuais: está inserido no Modelo de Transporte Lagrangeano e funciona dinamicamente acoplado a um modelo hidrodinâmico. O modelo considera as características geométricas da linha difusora, perfis verticais variáveis de densidade no meio receptor, turbidez variável da água para cálculo de incidência de radiação solar. A radiação solar é computada em função da latitude e da longitude da localidade, variando a partir da data e hora de início da simulação, com variação da cobertura de nuvem, etc. No caso de análise de balneabilidade, aceita diferentes tipo de bactérias, além de curvas de decaimento prescritas pelo usuário. (ROSMAN, 2012)

5. Modelagem

Conforme dito na seção anterior, um modelo será no máximo tão bom quanto os dados que forem inseridos nele (DE SOUSA E SILVA, 2011). A presente seção busca, portanto, apresentar os dados inseridos para que a modelagem computacional das plumas dos emissários fosse representativa da realidade.

5.1 Modelagem digital do terreno

O modelo digital do terreno é feito através da elaboração de um mapa base. O mapa base tem como objetivo representar a área de estudo, localizá-la geograficamente e delimitar o domínio da modelagem. É nele que serão apresentados os resultados espaciais gerados pela modelagem.

O mapa base pode ser elaborado através de imagens digitais do terreno, cartas náuticas, dados de campos, entre outros. Nesse trabalho foi utilizada a carta náutica DHN- Diretoria de Hidrografia e Navegação 1501 – Baía de Guanabara, escala 1: 50000, que pode ser vista na figura abaixo.

As zonas de alagamento e secagem serão tratadas pela metodologia do meio poroso-rugoso (MRP). Nesse método é considerado que existe uma faixa de meio poroso abaixo da superfície do terreno, no entanto, o local só será afetado por efeitos de escoamento quando a altura da coluna d'água acima do fundo for inferior à espessura da camada de escoamento equivalente no meio poroso.



Figura 8: Carta náutica 1501 - Baía de Guanabara, escala 1:50000, 2001.(DNH, 2012)

Foi utilizado o programa Surfer 10 ® para definir os contornos, a escala e ajustar os aspectos visuais. O mapa base produzido para esse trabalho pode ser visto na figura a seguir.

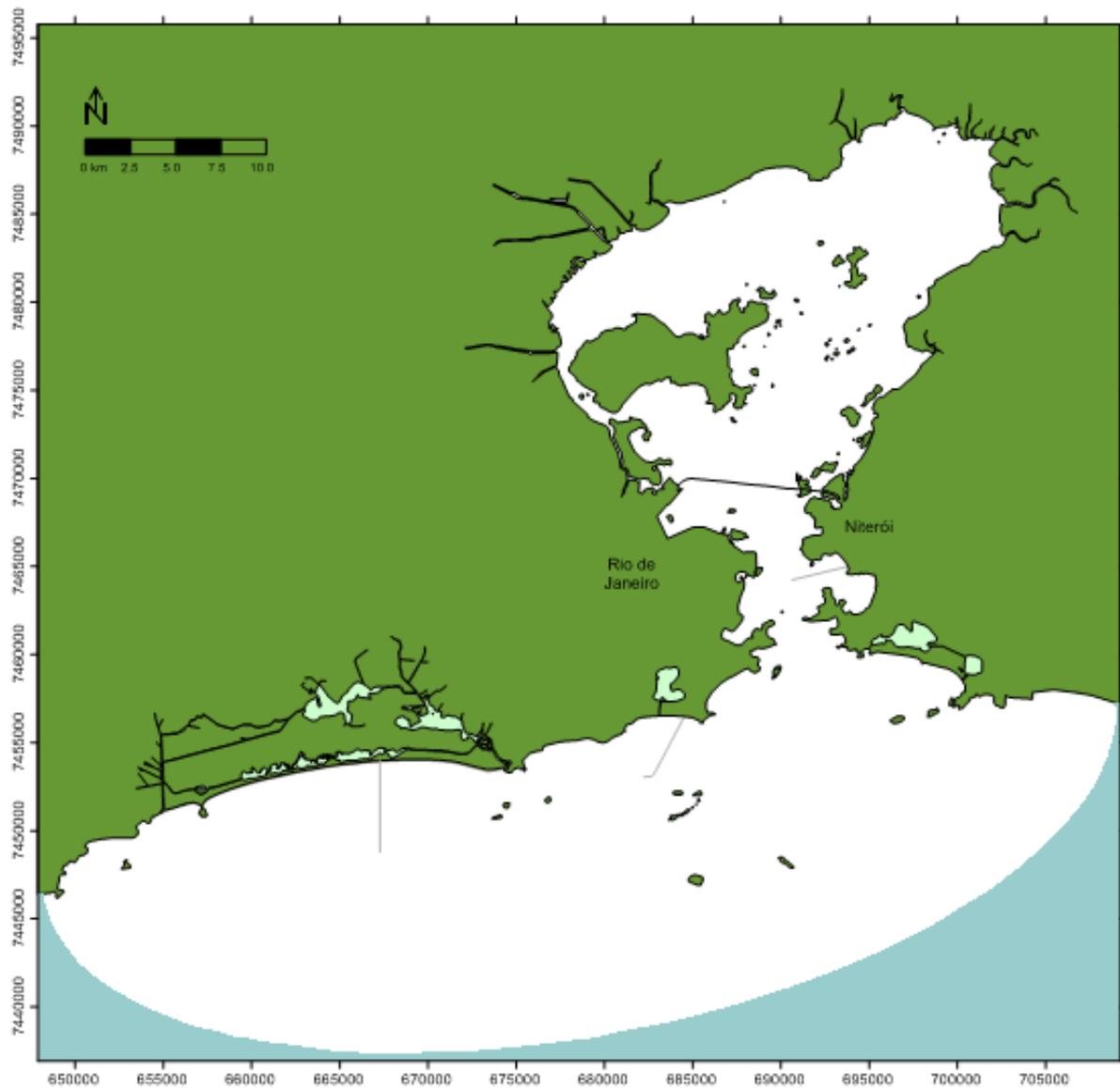


Figura 9: Modelagem digital da área de estudo. O mapa base foi adaptado do estudo Modelagem para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ elaborado pela COPPETEC para a CEDAE em 2009.

5.2 Malha de elementos finitos

A malha é a discretização do espaço contínuo através de elementos finitos. Os elementos finitos, no caso desse trabalho, quadriláteros, discretizam toda a

área modelada. Para cada nó desses elementos serão resolvidas as equações governantes do modelo hidrodinâmico e de transporte.

A confecção da malha foi feita através do programa Argus ONE®. A malha deve respeitar o contorno do domínio de modelagem e para isso é feita a partir do contorno do mapa base.

Pode-se perceber, além disso, que a discretização foi feita de modo mais minucioso nos pontos próximos às fontes que serão estudadas. Isto se dá pelo fato de serem desejados resultados mais precisos nestas áreas.

A figura a seguir apresenta dados sobre a área de domínio e a malha de elementos finitos.

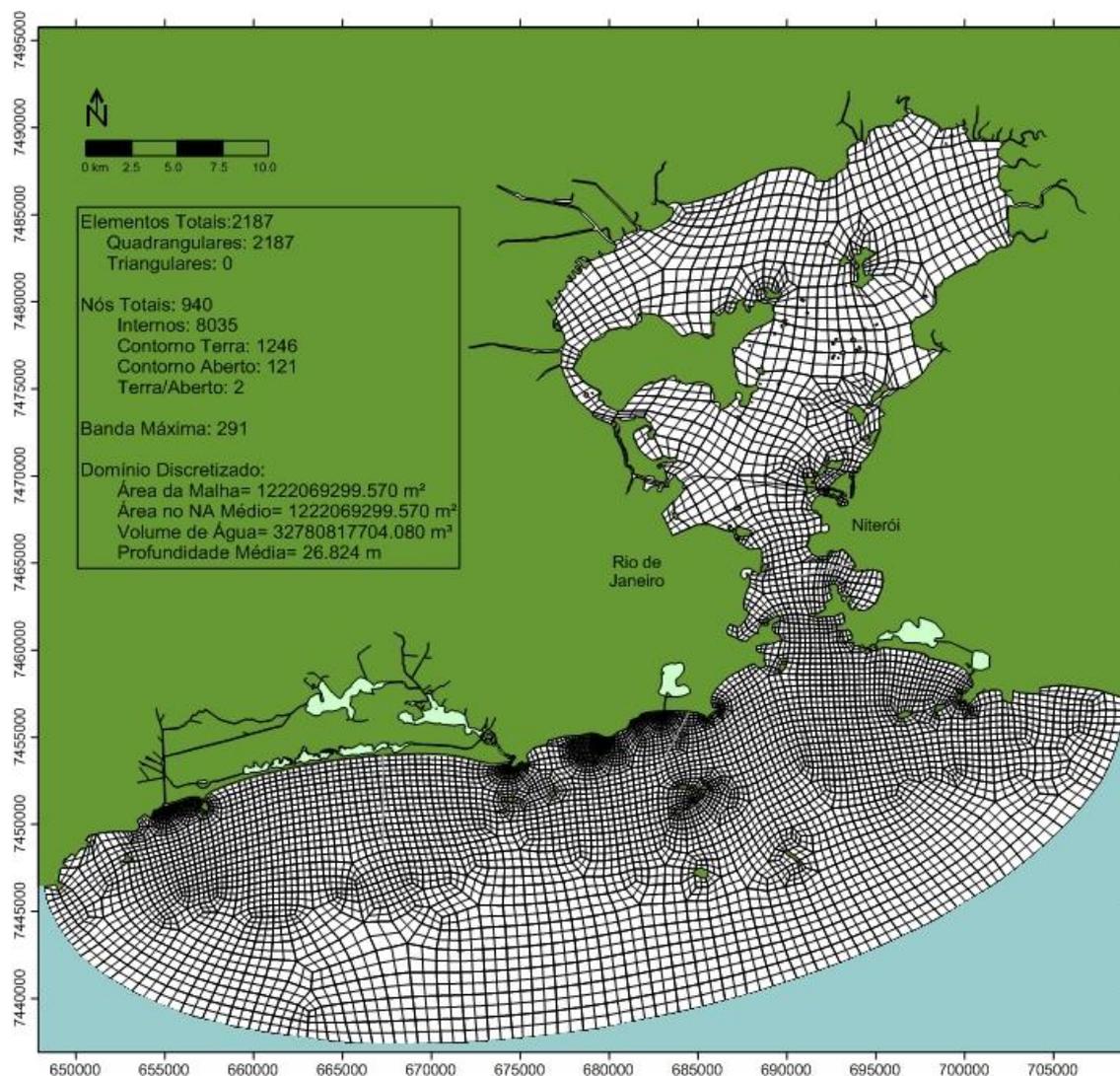


Figura 10: Malha de elementos finitos quadrangulares e informações sobre os nós e elementos. A malha foi obtida do estudo Modelagem para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ elaborado pela COPPETEC para a CEDAE em 2009.

5.3 Batimetria

Os dados de batimetria inseridos no modelo foram obtidos da carta náutica DHN- Diretoria de Hidrografia e Navegação 1501 – Baía de Guanabara, escala 1: 50000, apresentada anteriormente.

Para obter o valor da profundidade de cada nó da malha de elementos finitos foi criada uma grid de interpolação através do método de Kriging e com o auxílio do programa Surfer 10[®]. Dessa forma, foi possível cobrir todo o domínio de modelagem, interpolando dados e extrapolando para onde fosse necessário.

O mapa base com a batimetria do domínio de modelagem está na Figura 11 a seguir.

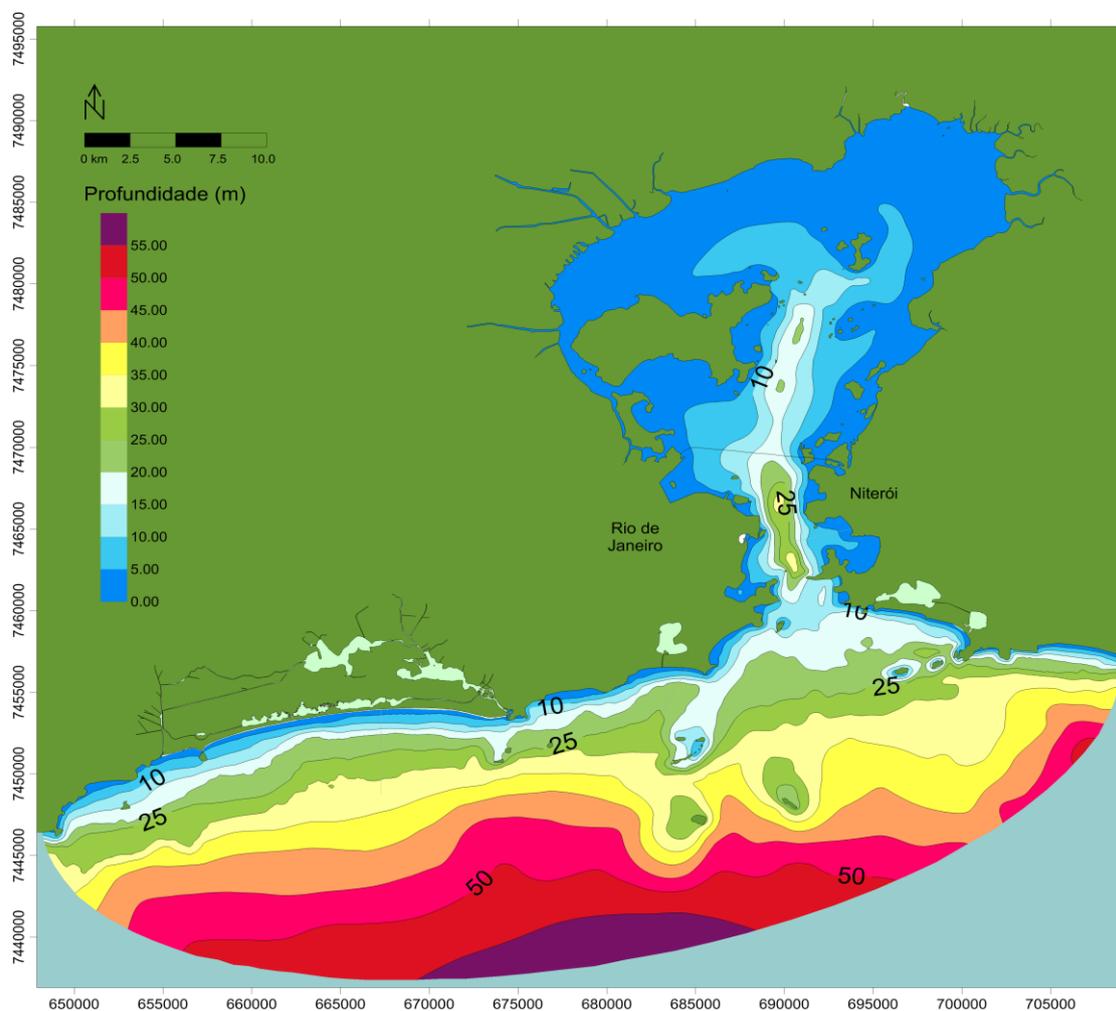


Figura 11: Batimetria utilizada pelo modelo com isolinhas de profundidade em metros das cotas de fundo do domínio modelado. Os dados de batimetria foram obtidos do estudo Modelagem para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ elaborado pela COPPETEC para a CEDAE em 2009.

5.4 Amplitude da rugosidade equivalente do fundo

A região de estudo possui sedimentos que variam de argilas finas a areias médias. Os valores adotados para a amplitude da rugosidade equivalente do fundo foram: (SAMPAIO, 2003)

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

Através dos dados das áreas de predominância dos sedimentos, os valores de rugosidade equivalente para cada nó da malha de elementos finitos foi obtido através de uma interpolação pelo método de Kriging, com o auxílio do programa Surfer 10 ®.

A Figura 12 a seguir apresenta o mapa base com os valores de rugosidade para o domínio modelado.

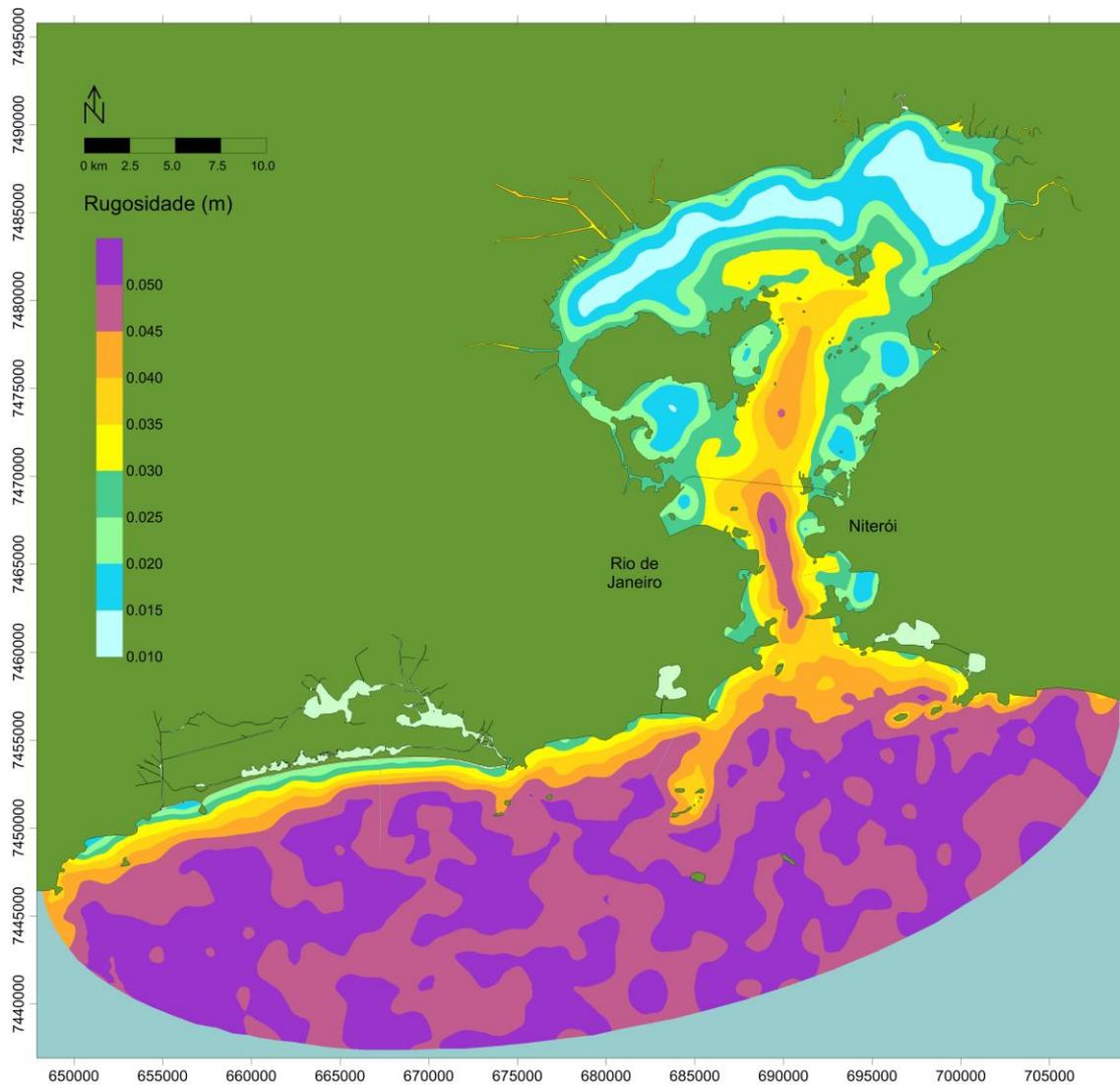


Figura 12: Amplitude da rugosidade equivalente do fundo utilizada pelo modelo para o fundo da Baía de Guanabara. Os dados de rugosidade foram obtidos do estudo Modelagem para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ elaborado pela COP-PETEC para a CEDAE em 2009.

5.5 Marés

Os níveis de maré foram impostos como condicionantes na fronteira do domínio de modelagem.

As curvas de maré foram calculadas utilizando-se as marés parciais, representadas pelas principais constantes harmônicas da região. 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, de acordo com a seguinte equação:

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

Onde:

ζ é o nível da maré;

C_0 é a cota do nível médio do mar em relação ao nível de referência do modelo;

A_i é a amplitude, T_i é o período e f_i a fase das constantes harmônicas utilizadas.

Foram utilizadas as principais constantes harmônicas da região referentes à estação localizada na Ilha Fiscal. Os dados foram fornecidos pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos.

Tabela 5: Constantes de marés. (Adaptado do Banco Nacional de Dados da Marinha)

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (rad)
M4	22357.082	0.034	33.999
Q1	96726.084	0.028	58.001
M2	44714.164	0.303	78.999
mu2	46338.327	0.015	82.999
O1	92949.63	0.107	86.001
S2	43200	0.172	86.998
N2	45570.054	0.038	120.997
MS4	21972.021	0.015	125.999
M1	89399.694	0.009	125.999
K1	86164.091	0.063	152
MN4	22569.026	0.015	351

O Gráfico 1 a seguir mostra a curva de marés do modelo hidrodinâmico em um período de 30 dias.

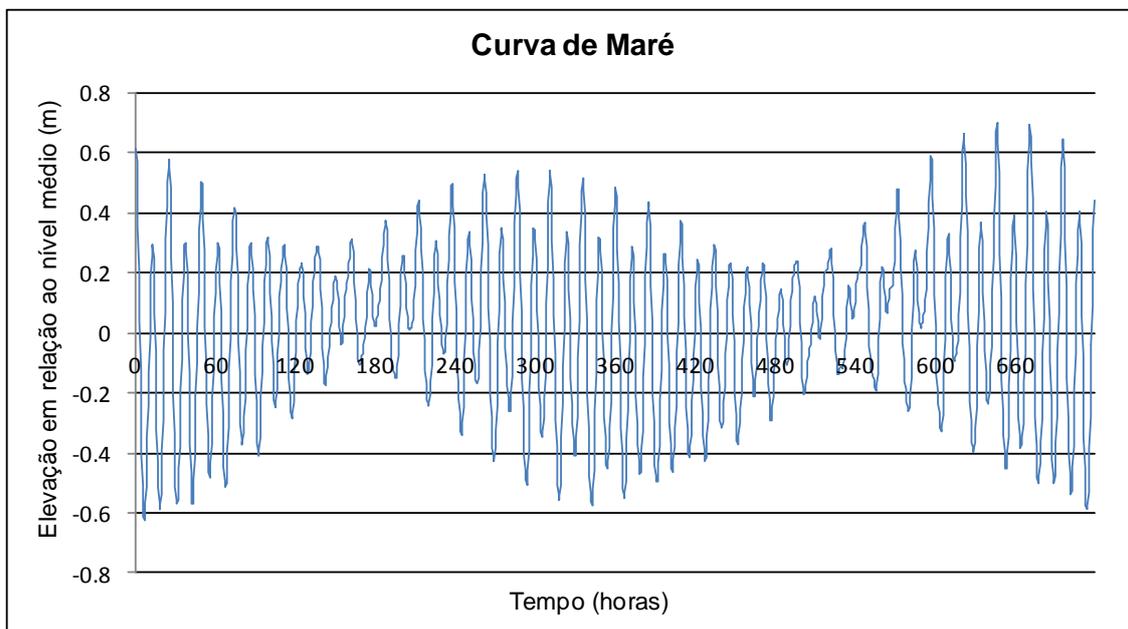


Gráfico 1: Níveis de maré ao longo de 30 dias.

Foi utilizada a maré genérica calculada a partir das constantes harmônicas e ainda foi levada em consideração a maré meteorológica para chegar à curva de maré. Desta forma os cenários de verão e inverno possuíram no modelo as mesmas curvas de maré, e vão se diferenciar por outros fatores.

5.6 Dados de ventos

Os dados de ventos usados na elaboração do modelo hidrodinâmico foram inseridos de forma uniforme no espaço e com intensidade e direção variando no tempo em intervalos de uma hora.

Os dados obtidos foram os medidos na estação meteorológica SBGL. A estação está localizada no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro – Galeão e é operada pela INFRAERO – Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Os dados são disponibilizados através da REDEMET – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica. A localização da estação na área de estudo pode ser vista na Figura 13 abaixo.

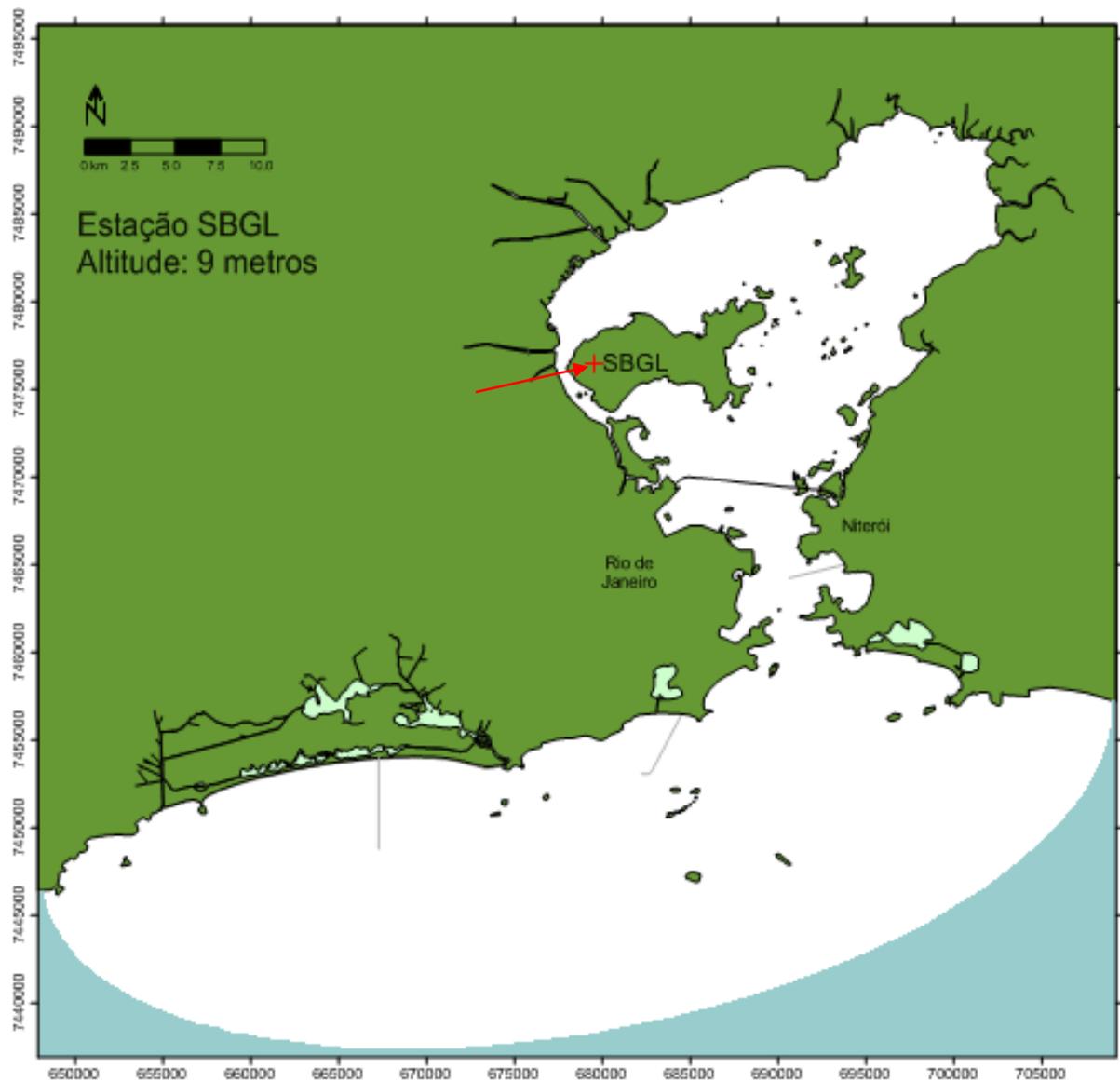


Figura 13: Localização da estação meteorológica SBGL.

Foram coletados dados de vento do mês de janeiro de 2011 para serem utilizados nos modelos hidrodinâmicos Verão Atual e Verão Final e dados de julho de 2011 para os modelos Inverno Atual e Inverno Final.

As variações de intensidade diárias dos ventos podem ser observadas através dos gráficos abaixo.

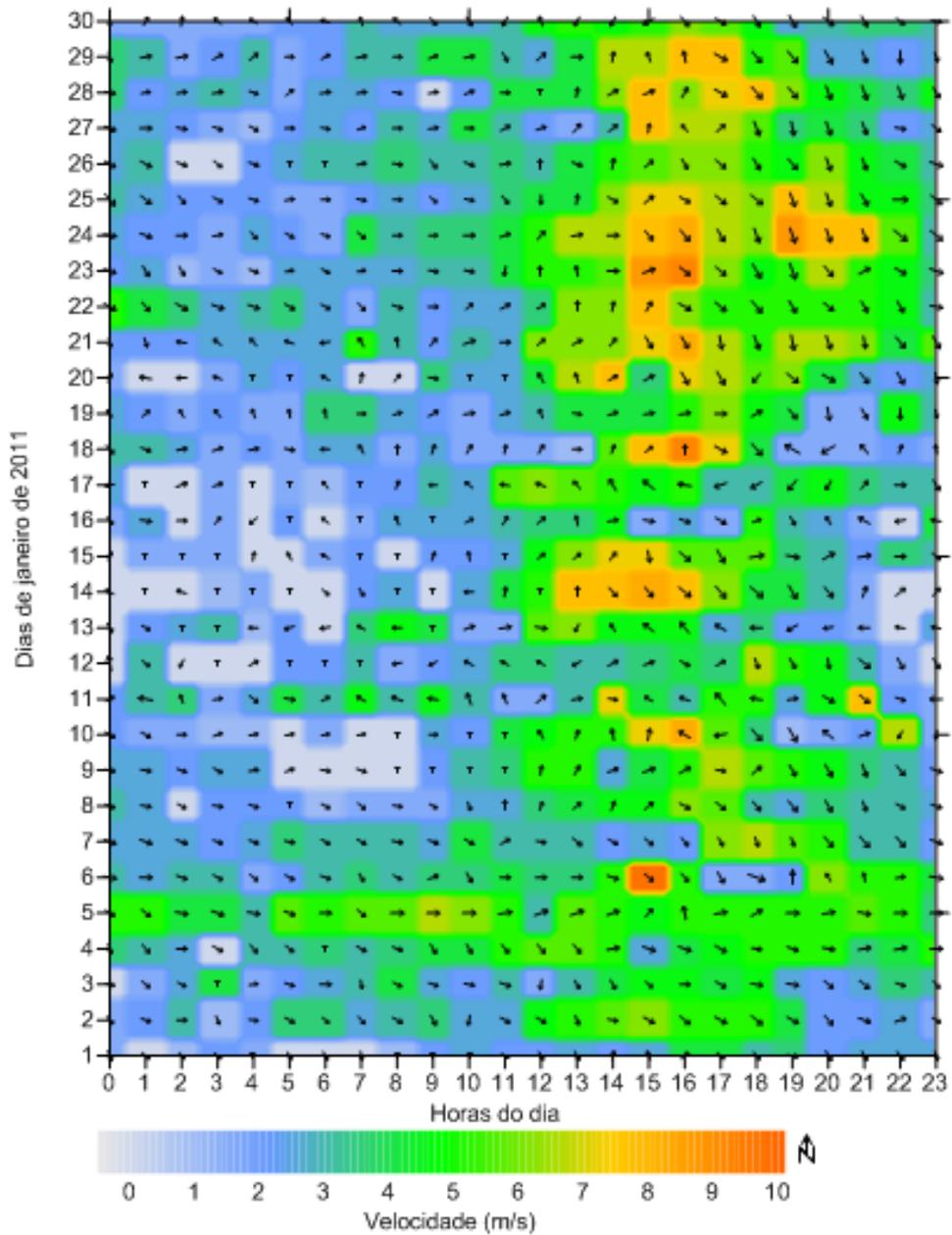


Gráfico 2: Gráfico da série temporal de ventos de janeiro de 2011. As setas tem tamanho proporcional à intensidade dos ventos e indicam a direção e o sentido destes. A escala de cores também está relacionada à intensidade.

Pode se observar que ventos mais intensos acontecem no fim do dia devido à ocorrência da brisa marítima.

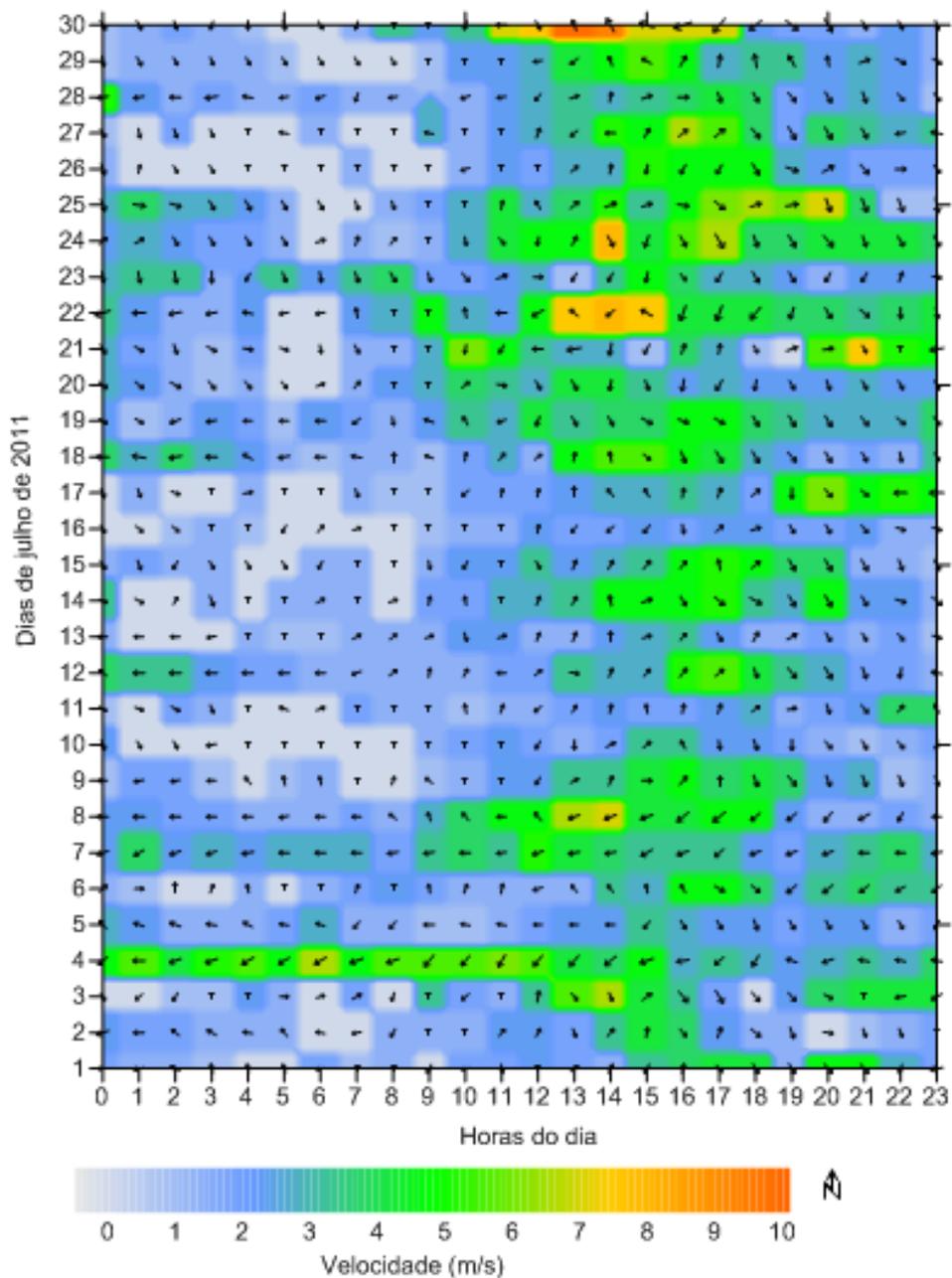


Gráfico 3: Gráfico da série temporal de ventos de julho de 2011. As setas tem tamanho proporcional à intensidade dos ventos e indicam a direção e o sentido destes. A escala de cores também está relacionada à intensidade.

Pode se observar também ventos mais intensos no final do dia devido à brisa marítima e uma intensidade maior nos ventos do final de julho.

5.7 Temperatura da água e salinidade

Os dados inseridos no modelo referentes à temperatura da água e a salinidade foram obtidos no estudo Modelagem para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ elaborado pela COPPETEC para a CEDAE em 2009. Os dados foram fornecidos pelo Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ que mediram perfis de temperatura e salinidade próximos aos difusores do Emissário Submarino de Ipanema em 1996 e 1997, no inverno e no verão.

Analisando as temperaturas nas diferentes profundidades ao longo do tempo é possível constatar que no verão ocorre uma maior estratificação térmica, enquanto no inverno, a temperatura da água é mais homogênea. Além disso, a temperatura da água na superfície no inverno é mais alta, o que é justificado pelo fenômeno de ressurgência que ocorre no verão e traz a água das correntes geladas para a superfície. Tais características podem ser observadas no gráfico a seguir onde as temperaturas são representadas por médias no tempo para cada profundidade:

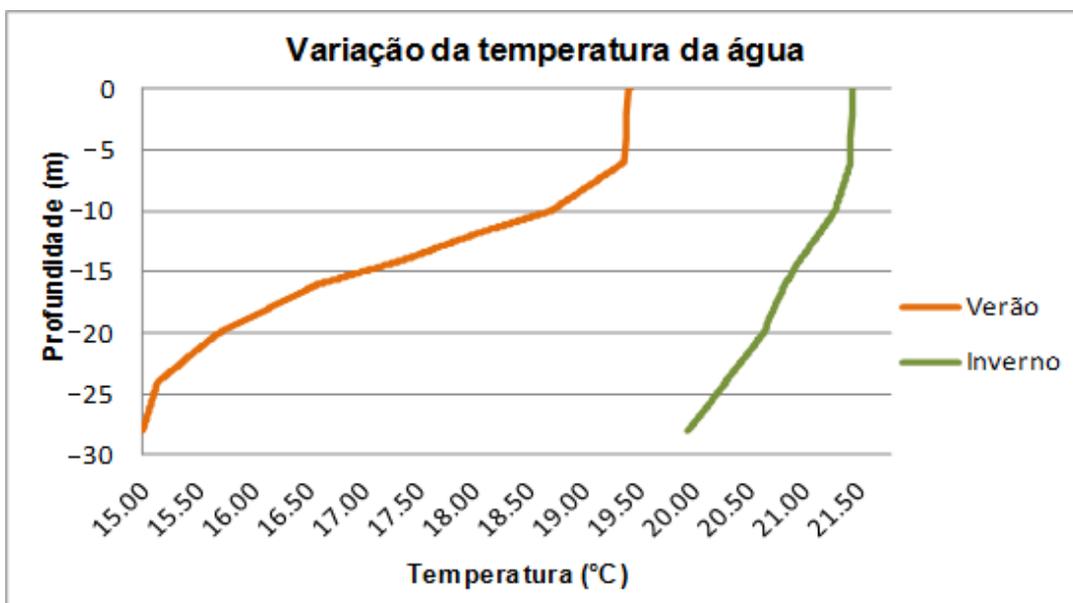


Gráfico 4: Variação da temperatura da água. Os dados de temperatura foram obtidos através da média temporal para cada profundidade. É possível perceber a maior estratificação no verão e temperaturas mais homogêneas no inverno.

A diferença na variação de temperatura vai afetar o posicionamento da pluma, e conseqüentemente o decaimento bacteriano, como veremos a seguir. No verão, com maior estratificação a pluma tende a ficar abaixo da termoclina (varia-

ção brusca de temperatura), enquanto no inverno, a pluma fica mais emergente, chegando a superfície livre. (ROSMAN, 2009)

6. Resultados e Análises

Foram obtidos primeiramente resultados da modelagem hidrodinâmica. Esses resultados foram utilizados para que fosse feita a modelagem das plumas do emissários a partir do modelo lagrangeano. As figuras, gráficos e análises comparativas dos resultados são apresentados nesta seção.

6.1 Resultados do Modelo Hidrodinâmico

O primeiro passo para entendimento do comportamento dos poluentes pós-lançamento na área de estudo é compreender a movimentação hidrodinâmica na região. Por isso, o resultado do modelo hidrodinâmico compõe parte imprescindível do conjunto de fatores que levam a um prognóstico conceitual de qual será a conclusão final sobre a pluma de poluentes que será apresentada mais à frente.

De qualquer forma, é preciso deixar claro que estes resultados já estão intrínsecos aos do modelo lagrangeano e, por isso, não serão abordados de forma mais detalhada, já que o escopo deste trabalho é muito mais relativo à dispersão final dos poluentes do que o caminho e razões para movimentação em si.

Foram escolhidos quatro momentos bem distintos para representar as condições possíveis instantâneas no que diz respeito ao modelo para representar o efeito total das correntes marítimas no local. Os momentos foram escolhidos de modo a demonstrar as diferenças entre correntes de sizígia e quadratura, além de meias-marés de enchente e vazante e correntes de costa fora fluindo para leste e para oeste.

Ainda por questões metodológicas, optou-se por apresentar todos os resultados em situação de verão com vazões atuais. Assim, restringem-se as análises de diferença entre os escoamentos quanto aos parâmetros de maré previamente citados.

Esta escolha não prejudica o entendimento das condições hidrodinâmicas, já que, pelas metodologias de parâmetros escolhida nesta parte do trabalho, as diferenças entre os modelos hidrodinâmicos seriam desprezíveis. Isto porque, em

relação às vazões, elas foram inseridas nos modelos como índices pluviométricos em suas áreas de influência, causando impacto irrisório no resultado final. Já quanto às estações, como foi dito, as diferenças dizem respeito a condições meteorológicas, que só seriam percebidas e fariam sentido na análise com verificações residuais, o que não é consistente em apresentações de resultados instantâneos.

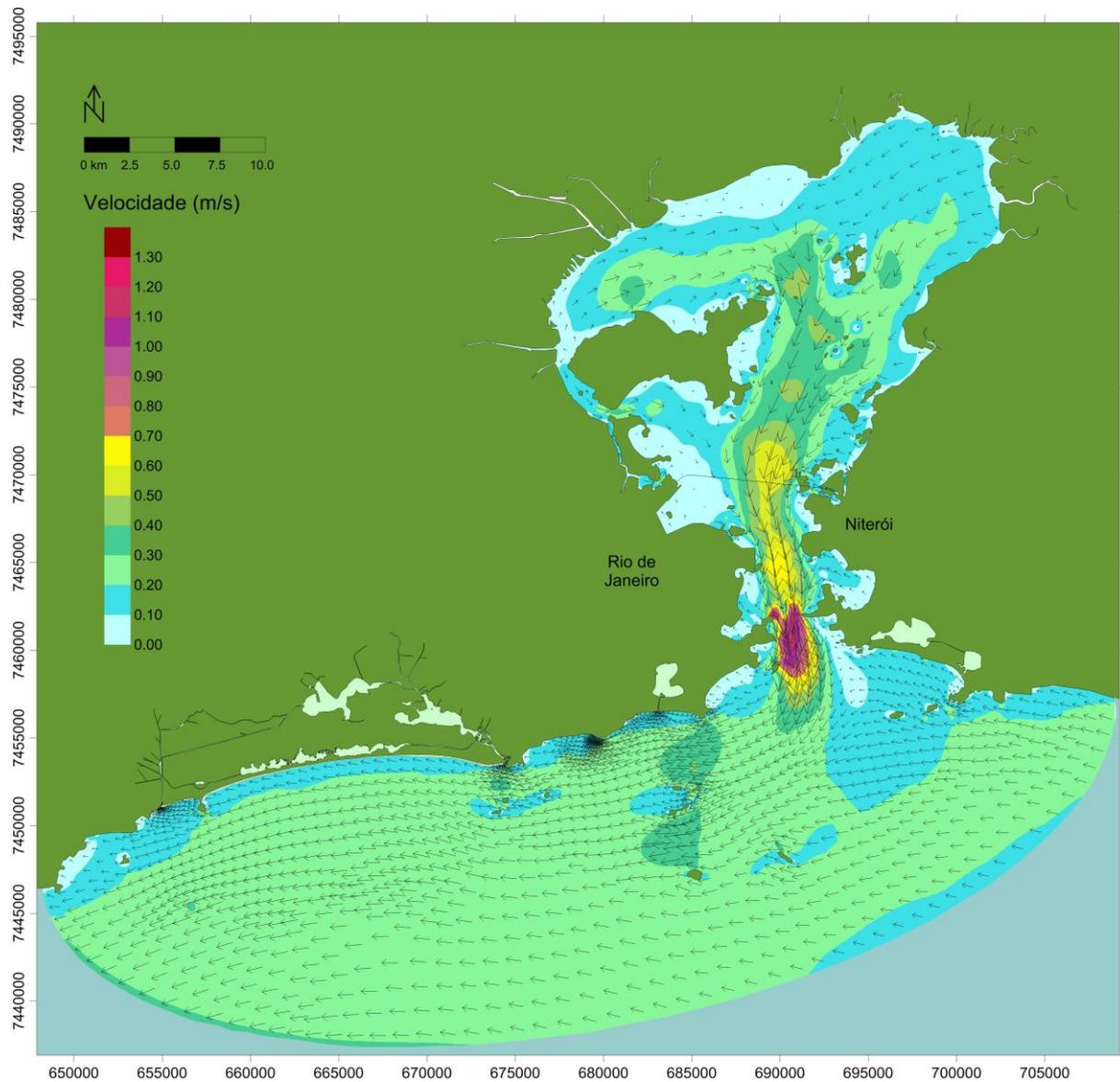


Figura 14: Mapa representativo das velocidades das correntes para o modelo de vazão atual de verão em situação de baixamar de sizígia com correntes costa-fora fluindo de leste para oeste.

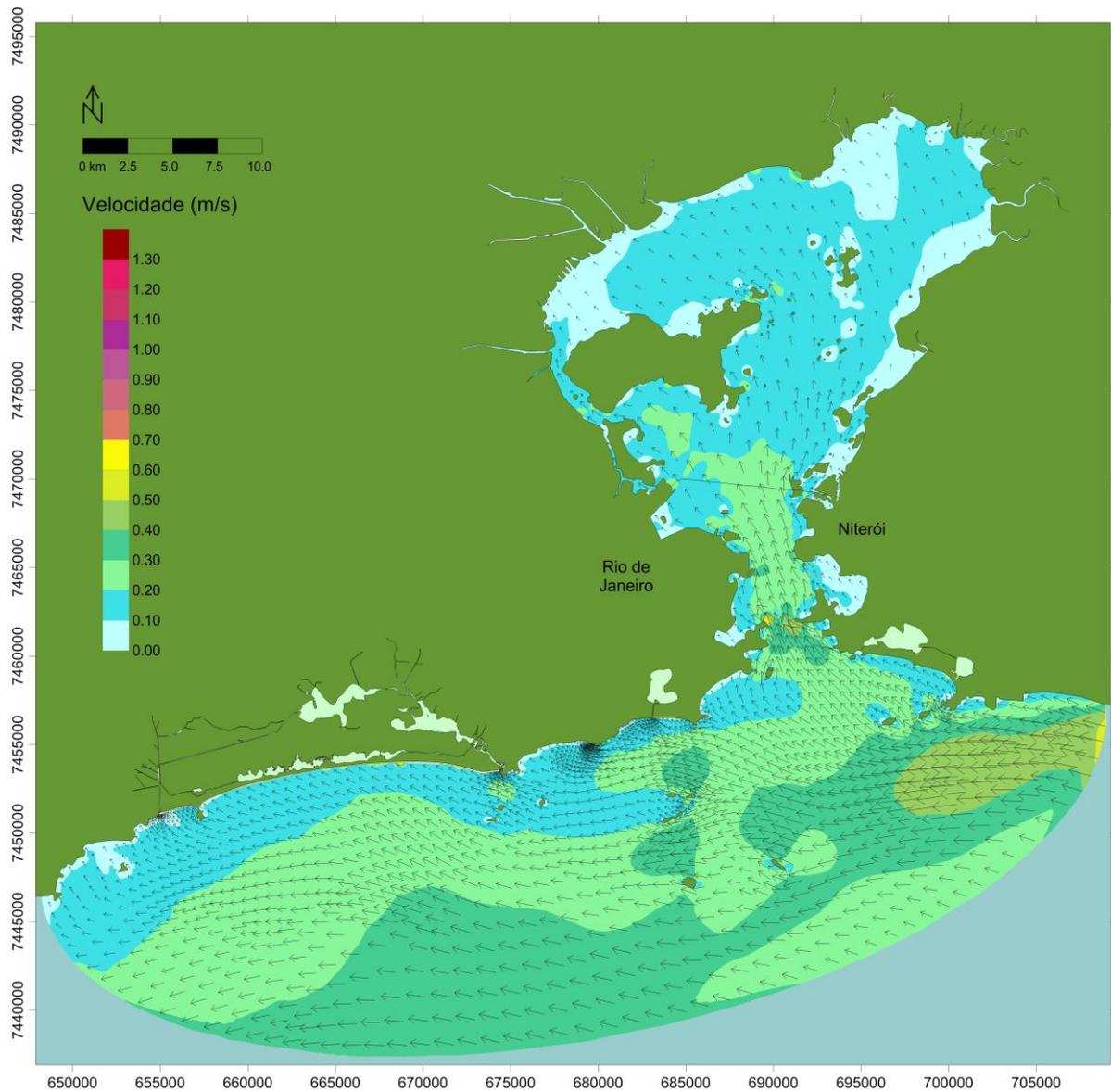


Figura 15: Mapa representativo das velocidades das correntes para o modelo de vazão atual de verão em situação de enchente de quadratura com correntes costa-fora fluindo de leste para oeste.

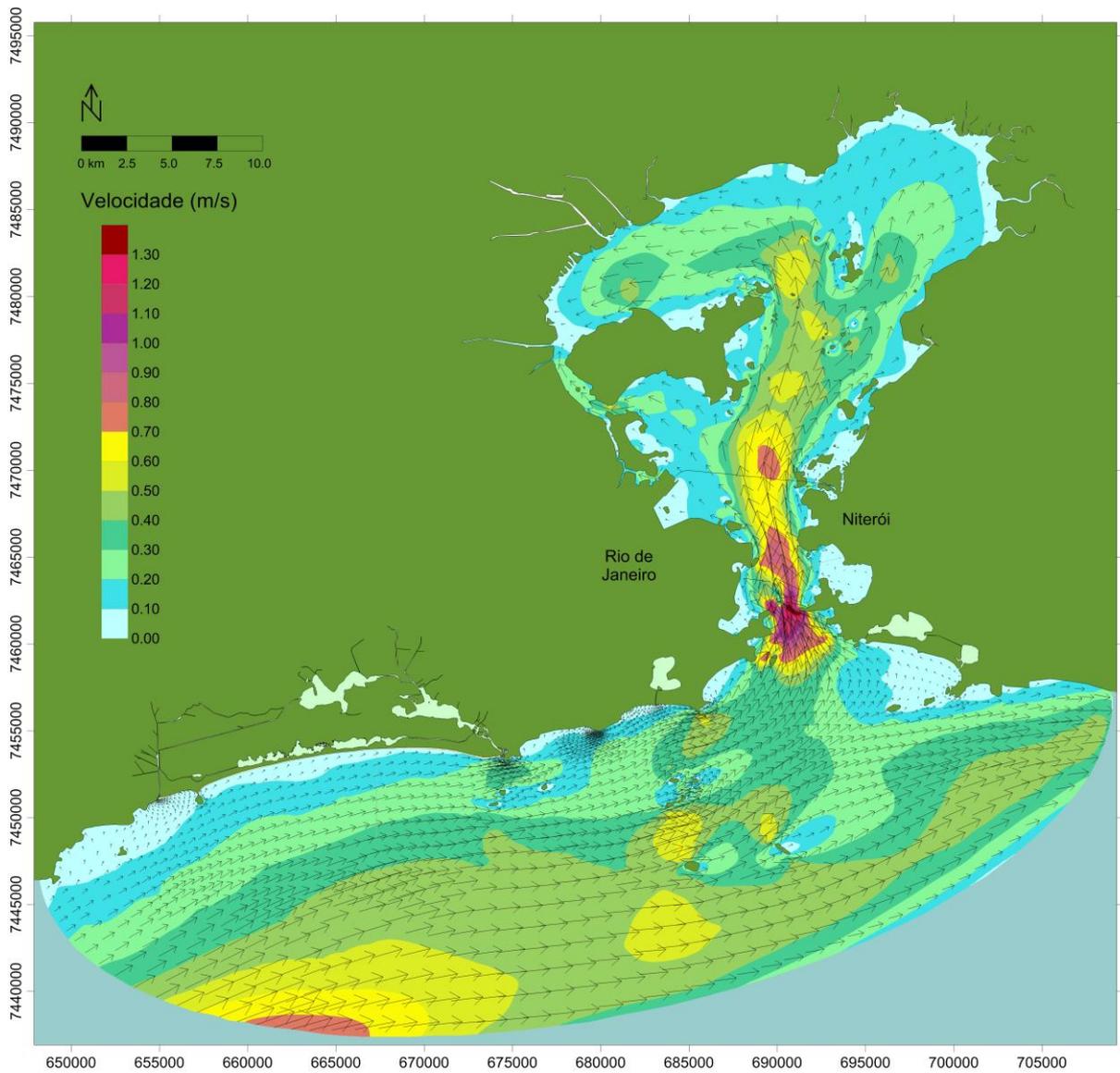


Figura 16: Mapa representativo das velocidades das correntes para o modelo de vazão atual de verão em situação de preamar de sizígia com correntes costa-fora fluindo de oeste para leste.

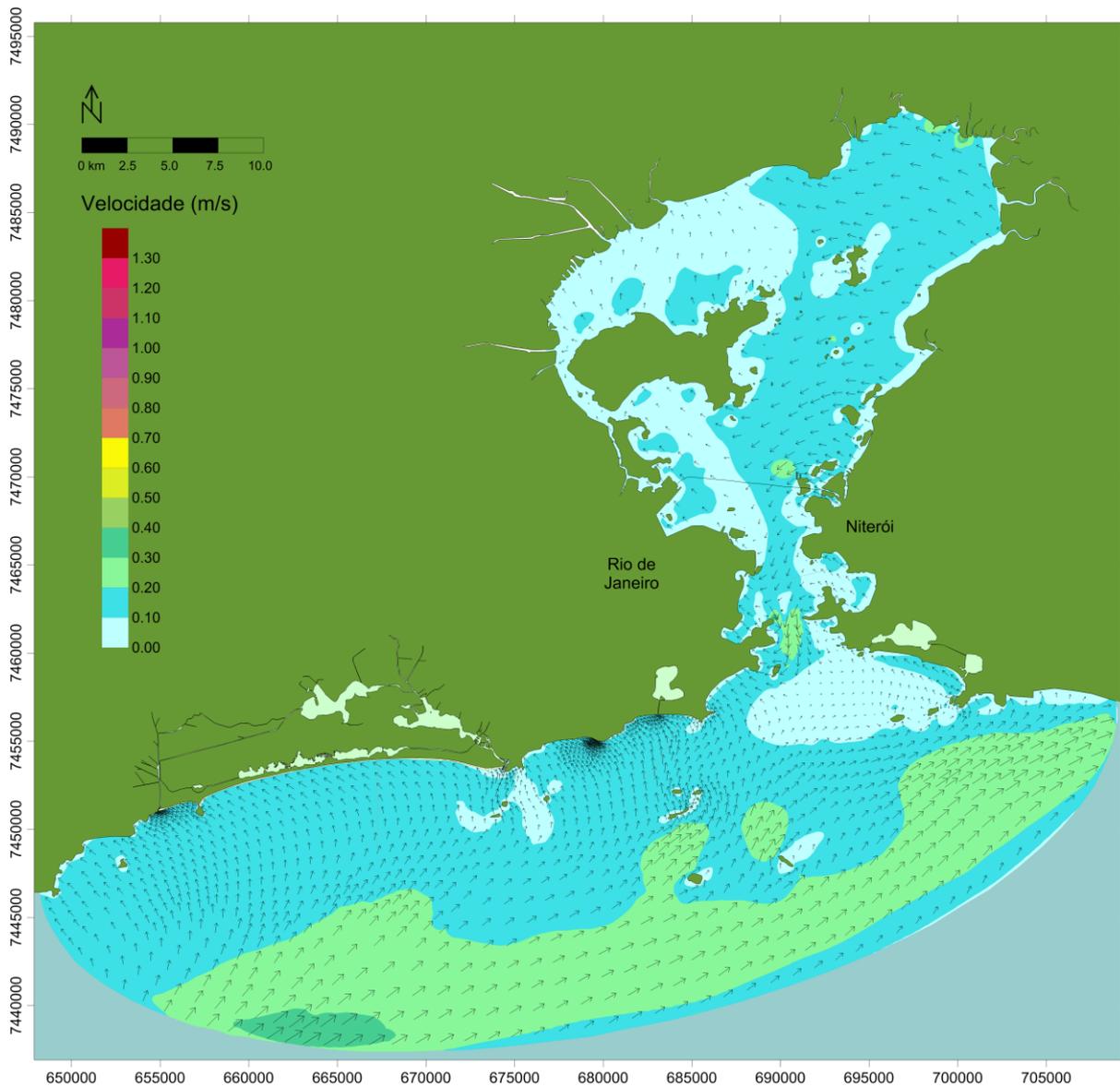


Figura 17: Mapa representativo das velocidades das correntes para o modelo de vazão atual de verão em situação de vazante de quadratura com correntes costa-fora fluindo de oeste para leste.

6.2 Resultados da Modelagem das Plumadas dos Emissários

Os resultados da modelagem das plumadas dos emissários serão apresentados através de gráficos de variações temporais dos parâmetros analisados e figuras com a representação das plumadas no mapa base.

6.2.1 Campo Próximo

A partir do resultado da modelagem lagrangeana de campo próximo é possível extrair séries temporais de parâmetros que são interessantes para avaliar o comportamento do efluente no corpo d'água.

Para melhor compreensão e análise dos resultados desse estudo foram escolhidos quatro parâmetros: diluição mínima no final do campo próximo, profundidade da pluma, espessura do campo afastado e variação do T_{90} . Para cada parâmetro há três séries diferentes de dados relativas aos três emissários da área de estudo.

A diluição mínima no final do campo próximo é um importante indicador em um estudo que pretende analisar a influência desses emissários na balneabilidade, pois informa o quanto a concentração já foi reduzida apenas na zona de mistura inicial, onde a hidrodinâmica do efluente é ativa no processo. E permite, portanto, analisar em quais casos será necessário que no campo afastado a hidrodinâmica do local seja mais favorável à diluição e ao decaimento.

A profundidade da pluma é um parâmetro que está diretamente relacionado com o potencial de decaimento bacteriano, já que interfere na intensidade de radiação solar recebida. Quanto mais profunda a pluma, menos radiação e menos decaimento.

A profundidade varia de acordo com a intensidade das correntes, os níveis de marés e a diferença de densidade entre o efluente e o meio. Tal diferença será evidenciada com a variação da coluna d'água, e esta por sua vez tem significativa variação referente ao inverno e ao verão. No verão, com maior estratificação a pluma tende a ficar abaixo da termoclina (variação brusca de temperatura), enquanto no inverno, a pluma fica mais emergente, chegando à superfície livre. (ROSMAN, 2009)

A espessura do campo afastado também afetará a capacidade de decaimento, já que quanto maior a espessura da pluma, mais difícil a ação da radiação solar. Essa espessura variará em função da hidrodinâmica do local.

A variação do T_{90} , o tempo necessário para que o decaimento de 90% da população original de bactérias, é um indicador direto de como está a eficiência do decaimento bacteriano, considerando todos os fatores que o influenciam.

Diluição Mínima do Fim do Campo Próximo

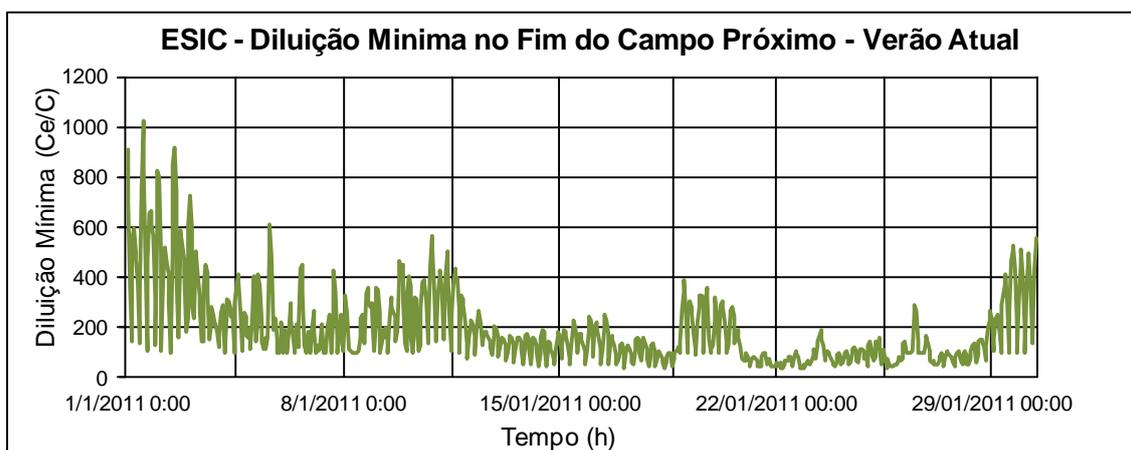
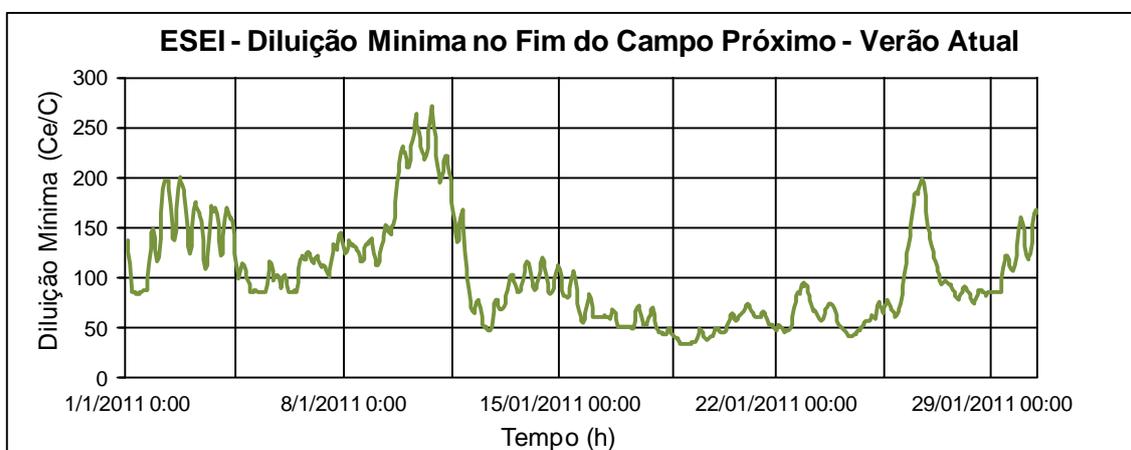
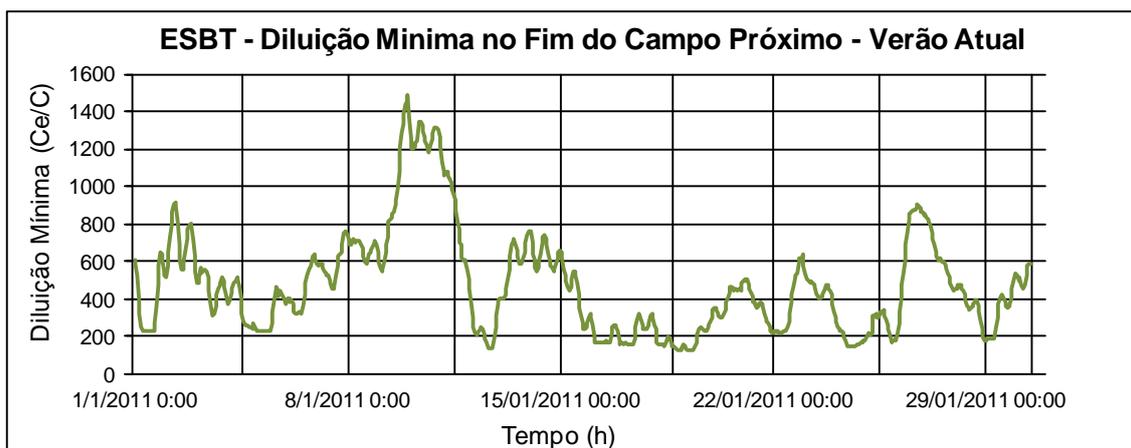


Gráfico 5: Variação temporal da diluição mínima para o modelo de vazão atual de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC. Ce/C é a razão entre a concentração no emissário (Ce) e a concentração máxima na pluma do emissário no final do campo próximo (C).

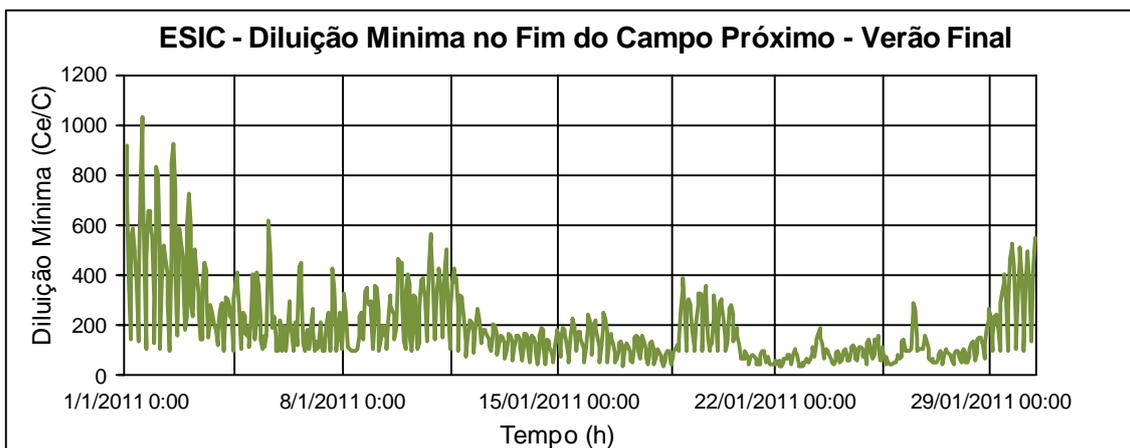
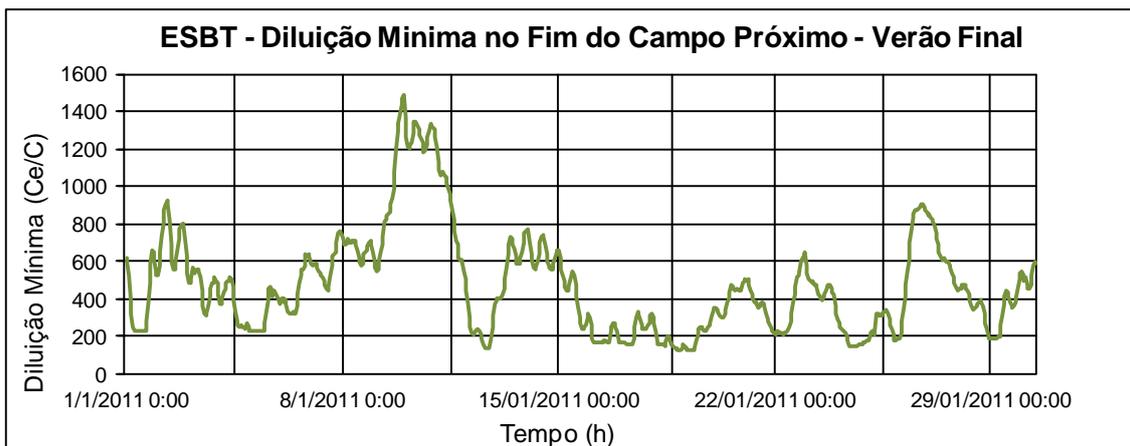


Gráfico 6: Variação temporal da diluição mínima para o modelo de vazão final de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC. Ce/C é a razão entre a concentração no emissário (Ce), e a concentração máxima na pluma do emissário no final do campo próximo (C).

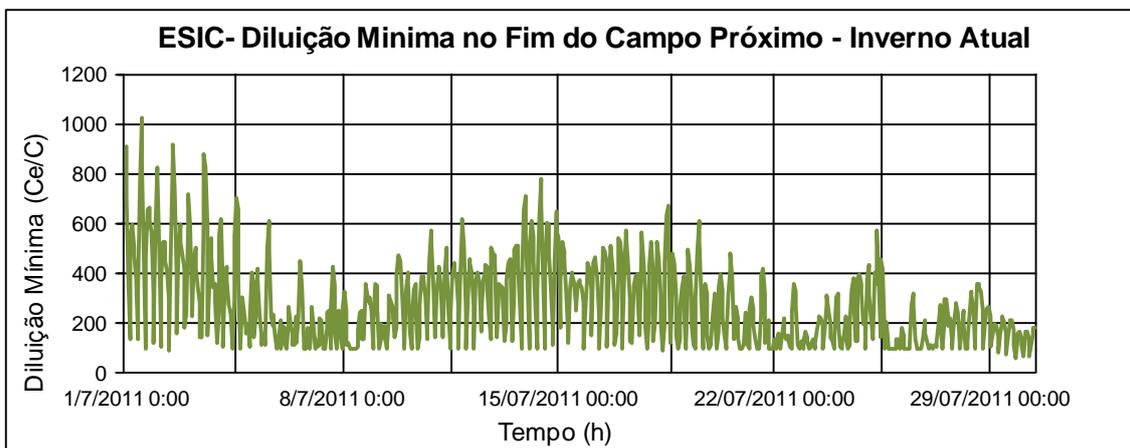
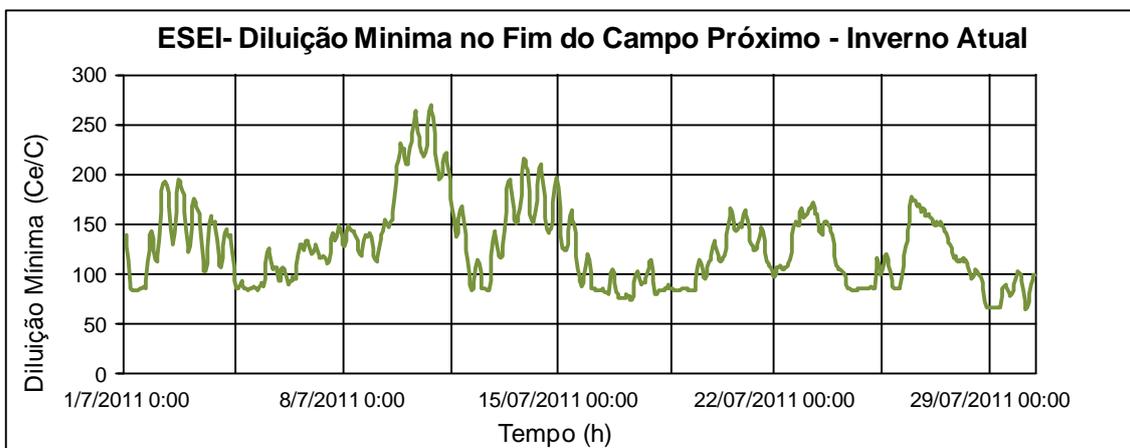


Gráfico 7: Variação temporal da diluição mínima para o modelo de vazão atual de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC. Ce/C é a razão entre a concentração no emissário (Ce) e a concentração máxima na pluma do emissário no final do campo próximo (C).

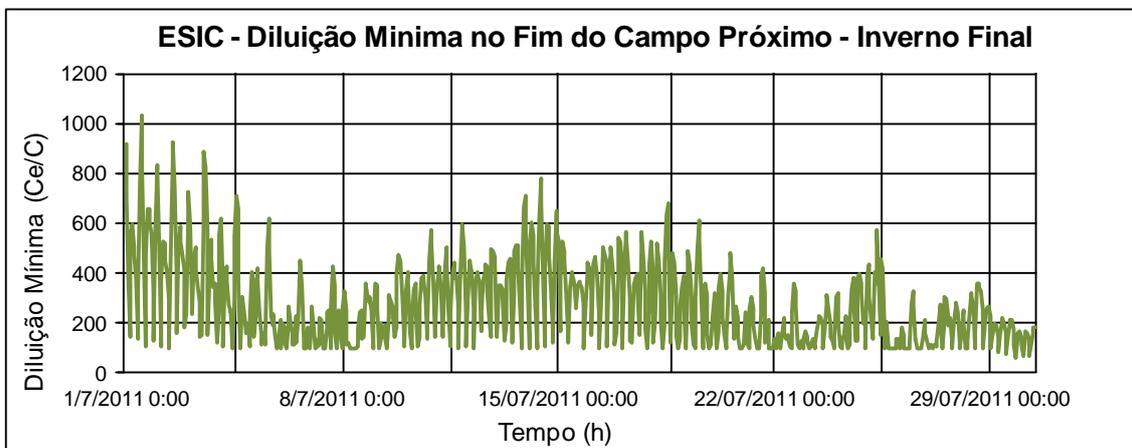
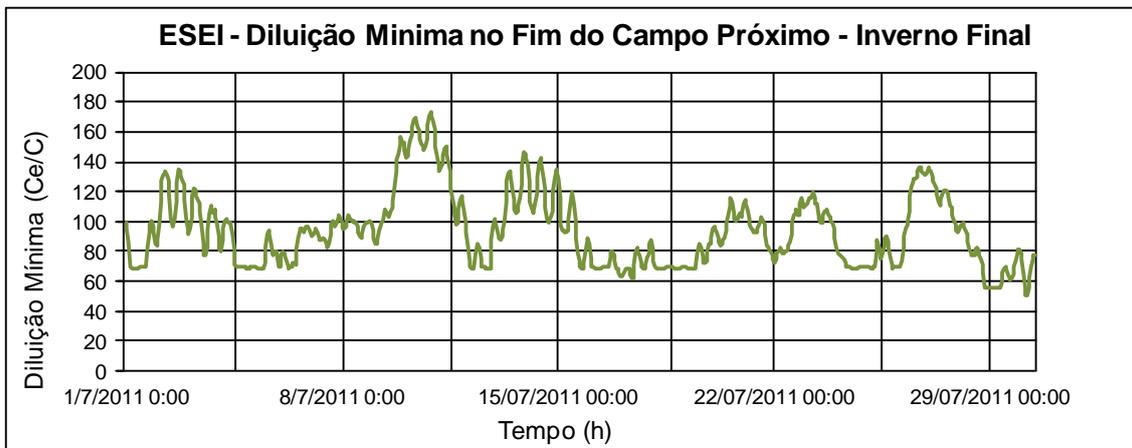


Gráfico 8: Variação temporal da diluição mínima para o modelo de vazão final de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC. Ce/C é a razão entre a concentração no emissário, Ce é a concentração máxima na pluma do emissário no final do campo próximo.

A diluição mínima no fim do campo próximo é uma forma de avaliar o projeto do emissário, ou seja, mostra o quanto a localização, o posicionamento e o espaçamento entre os difusores são eficientes em promover uma diluição adequada. Comparando os gráficos verifica-se que o projeto do Emissário de Ipanema é menos eficaz na diluição inicial do que o Emissário da Barra da Tijuca e o

Emissário de Icaraí. O posicionamento da tubulação difusora do Emissário de Ipanema de forma paralela a direção das correntes, ao contrário das outras duas que são transversais, faz com que a diluição seja dificultada.

Profundidade da Pluma

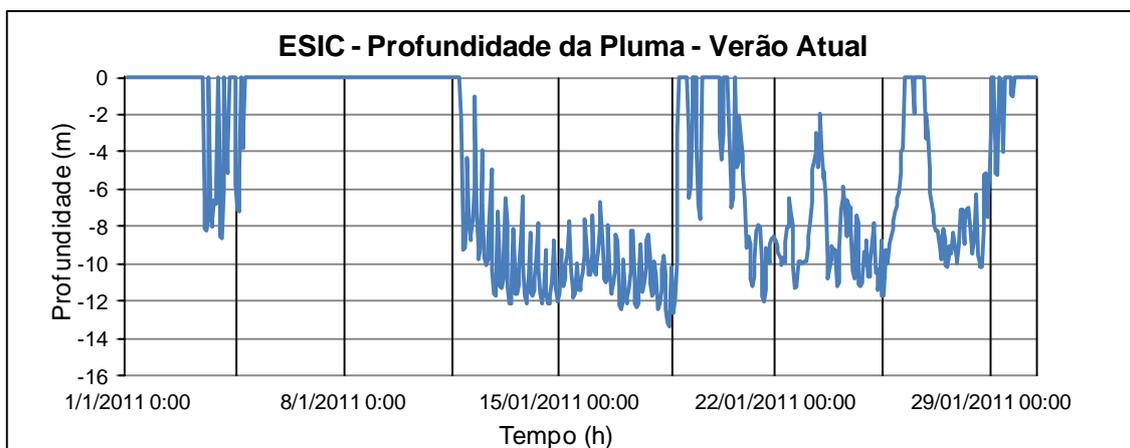
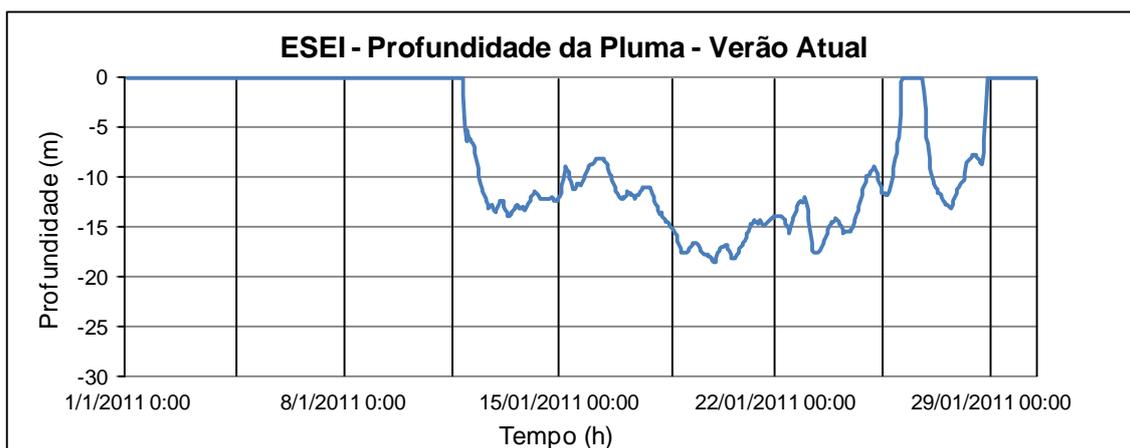
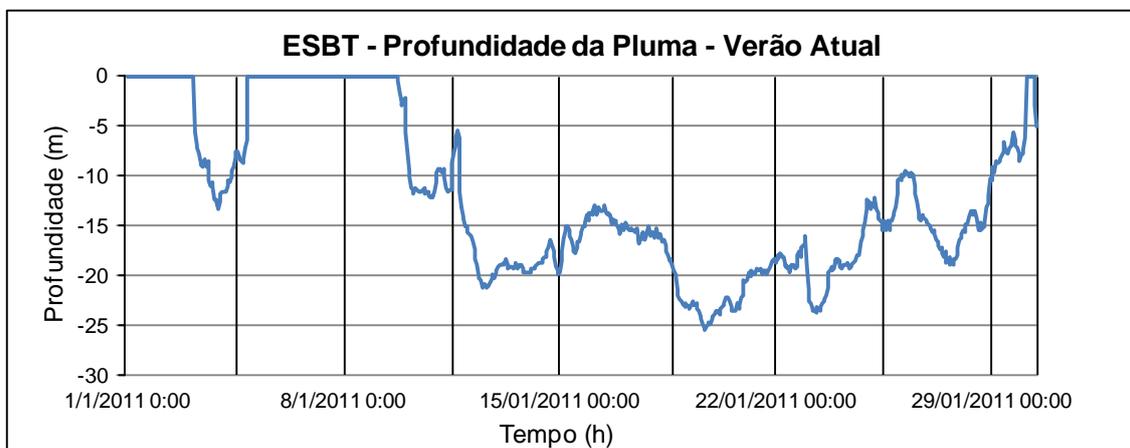


Gráfico 9: Variação temporal da profundidade do topo da pluma para o modelo de vazão atual de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

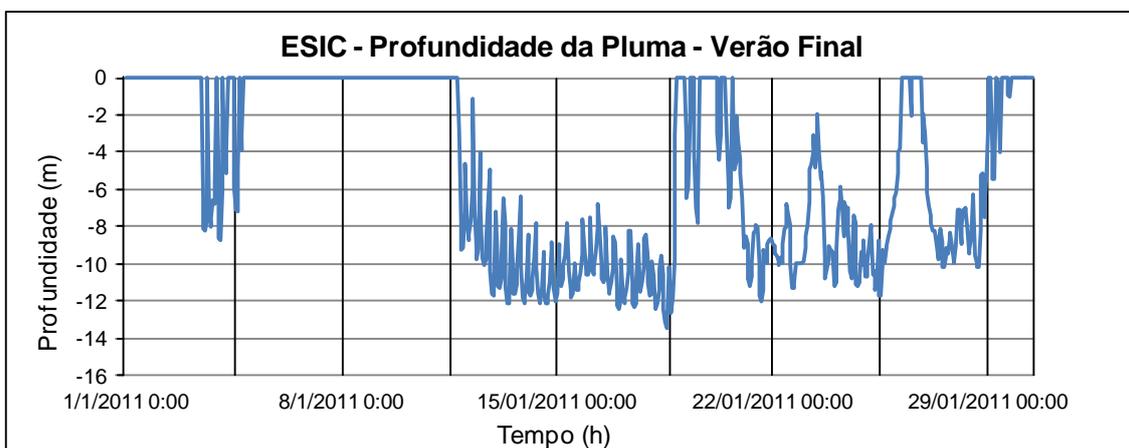
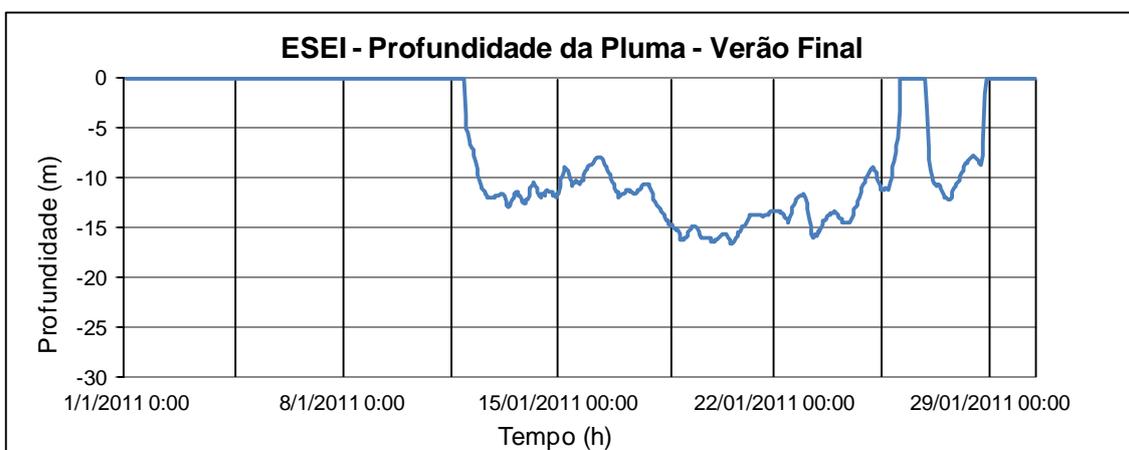
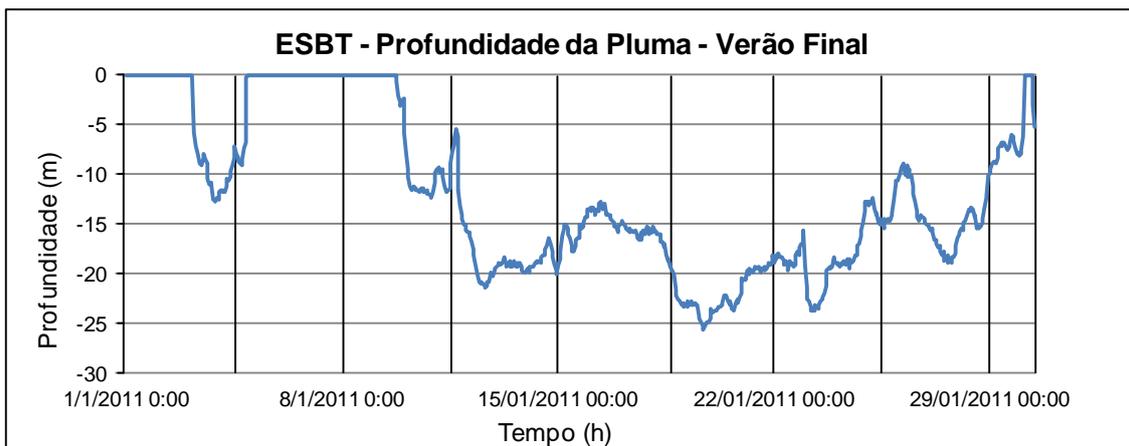


Gráfico 10: Variação temporal da profundidade do topo da pluma para o modelo de vazão final de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

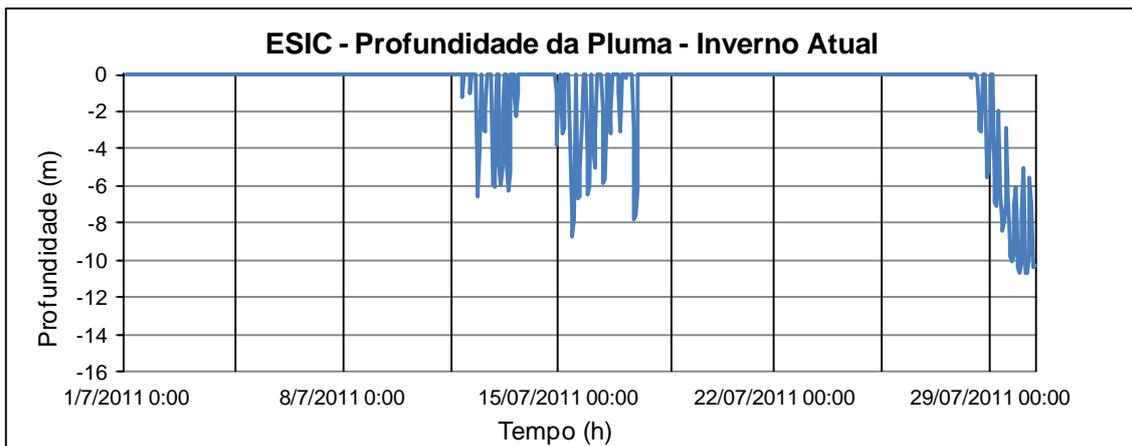
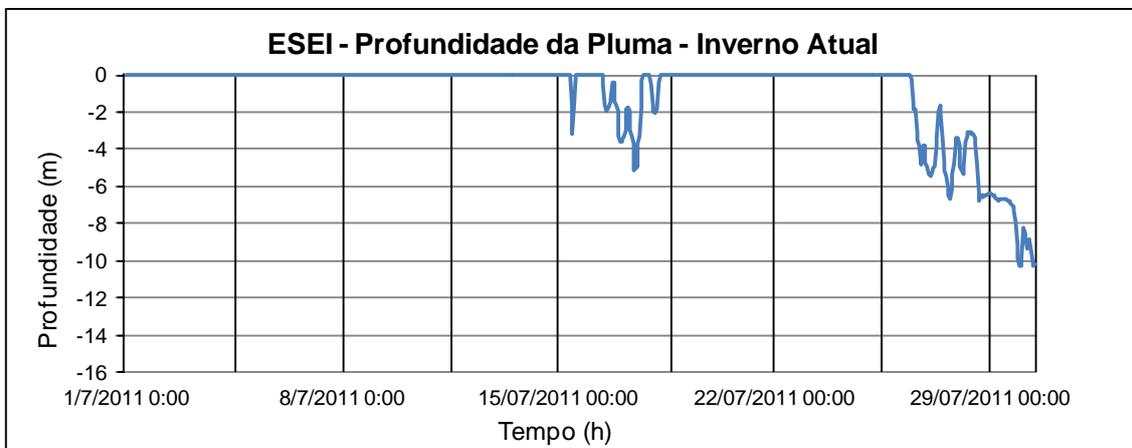
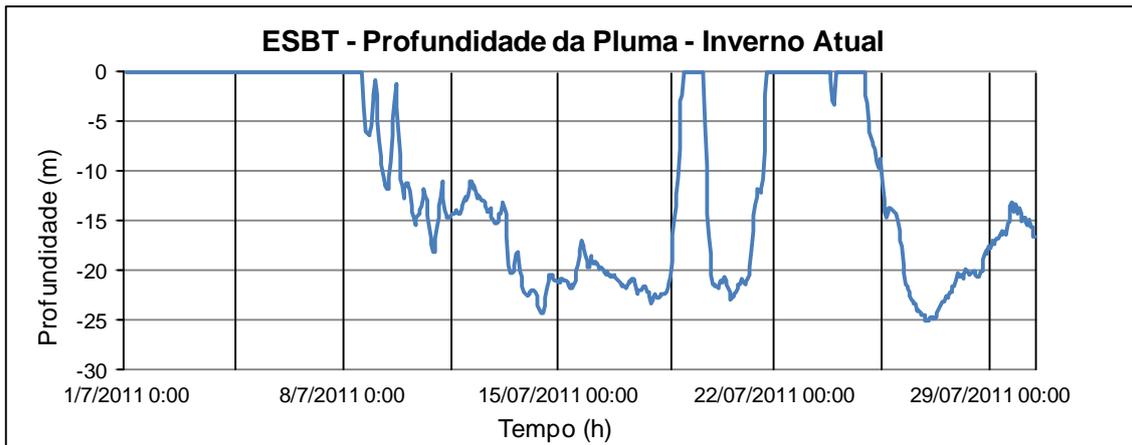


Gráfico 11: Variação temporal da profundidade do topo da pluma para o modelo de vazão atual de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

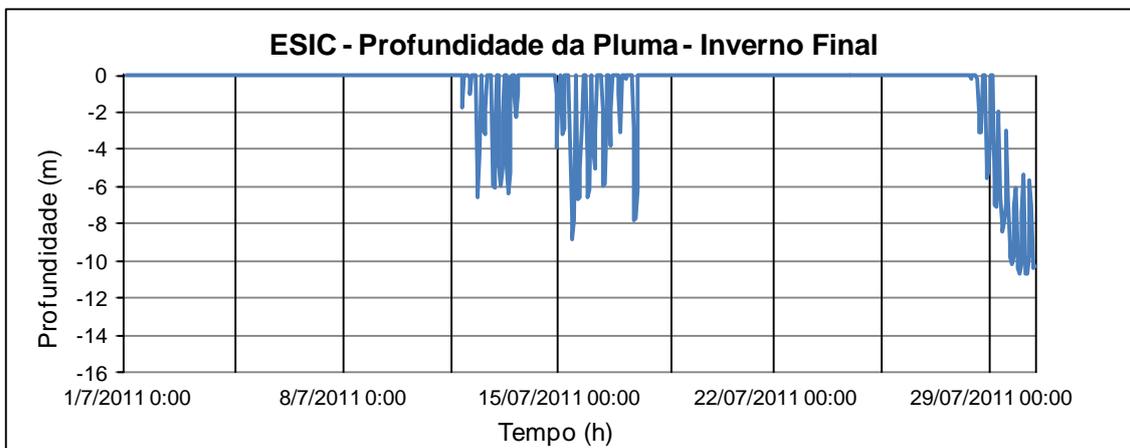
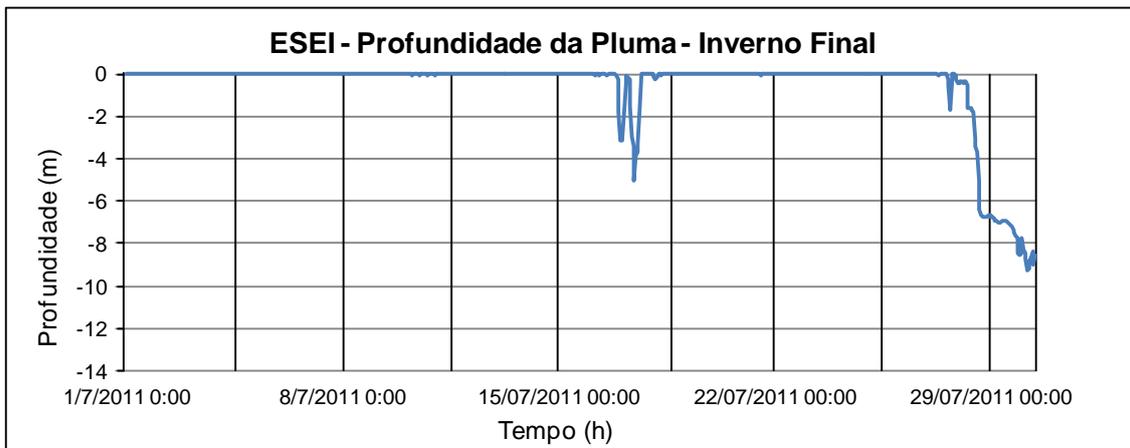
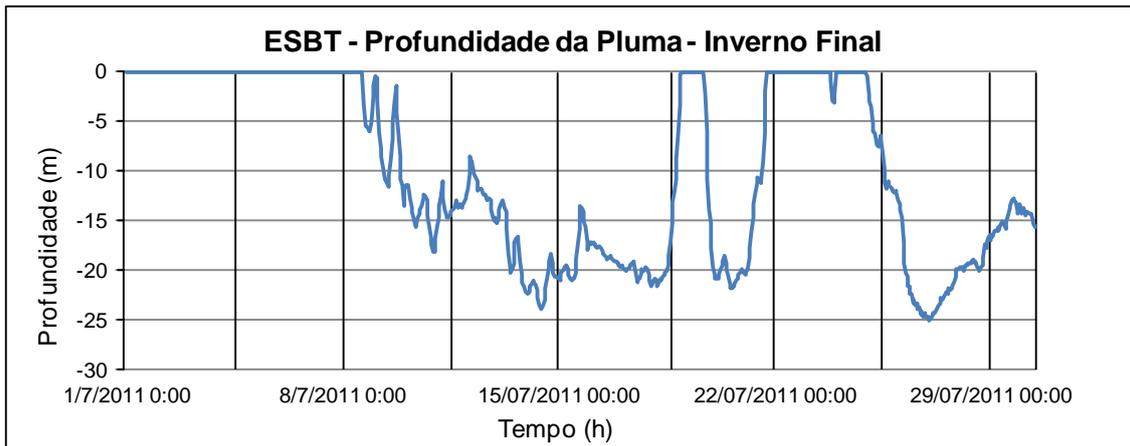


Gráfico 12: Variação temporal da profundidade do topo da pluma para o modelo de vazão final de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

As diferenças mais significativas em relação à profundidade da pluma são entre os resultados de inverno e verão. Como já explicado anteriormente, tais diferenças são em função da estratificação da coluna d'água e se tornam visíveis nos gráficos. Os resultados de inverno apresentam plumas emergentes em uma par-

cela muito maior do tempo se comparados com os resultados de verão, quando a pluma chega a ficar mais do que 25 metros submersa.

Espessura do Campo Afastado

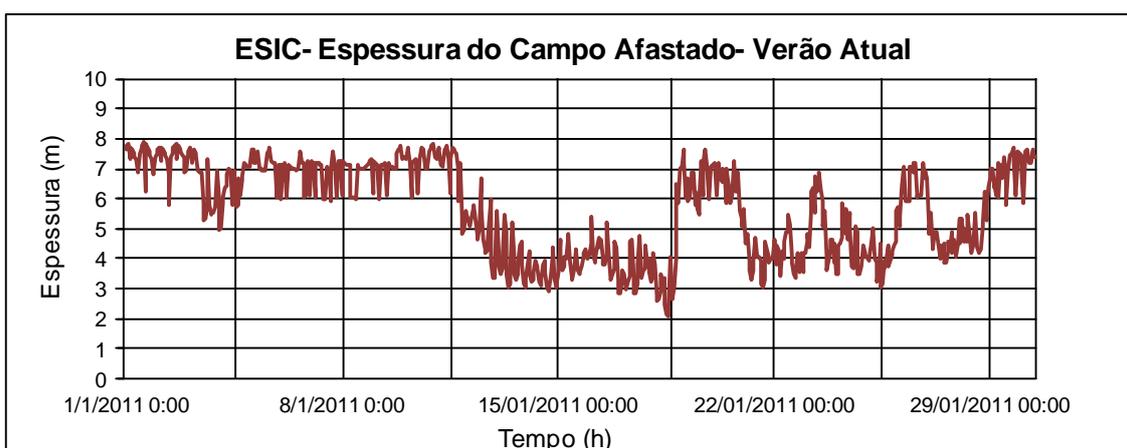


Gráfico 13: Variação temporal de espessura da pluma para o modelo de vazão atual de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

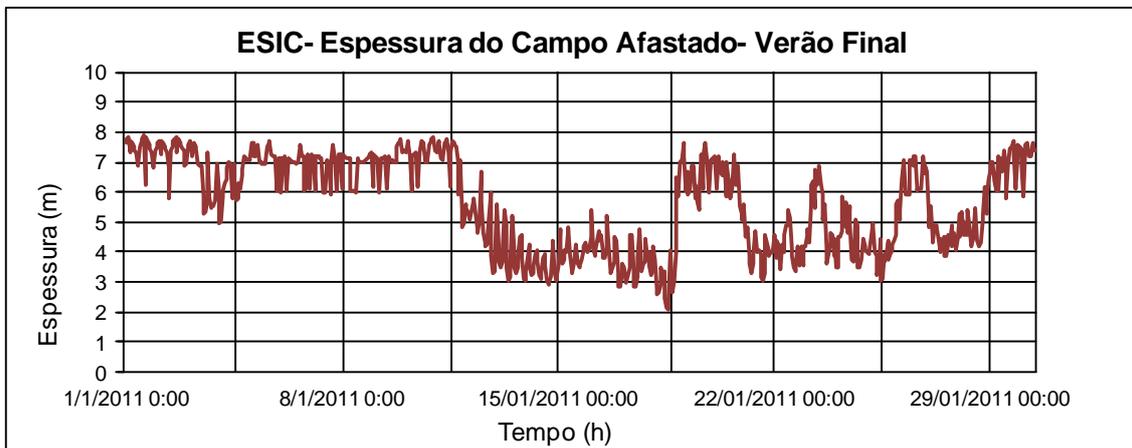


Gráfico 14: Variação temporal de espessura da pluma para o modelo de vazão final de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

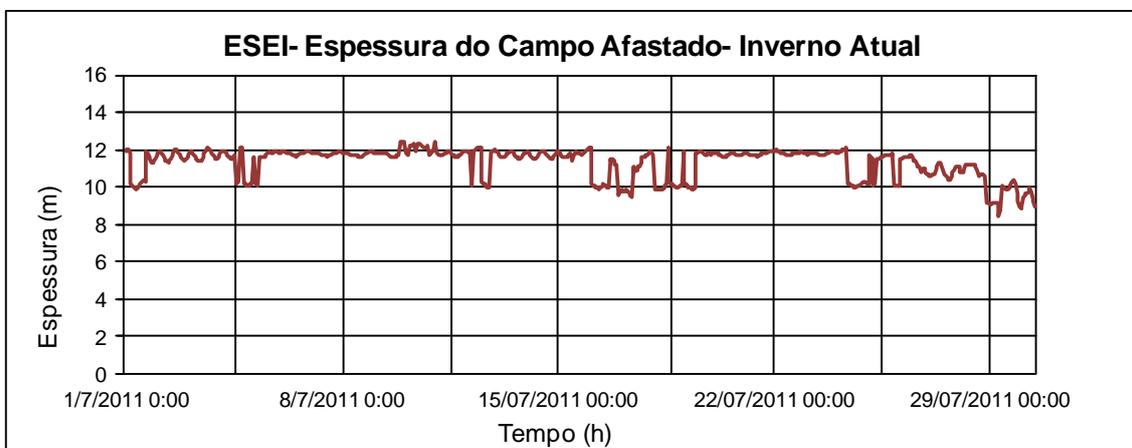


Gráfico 15: Variação temporal de espessura da pluma para o modelo de vazão atual de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

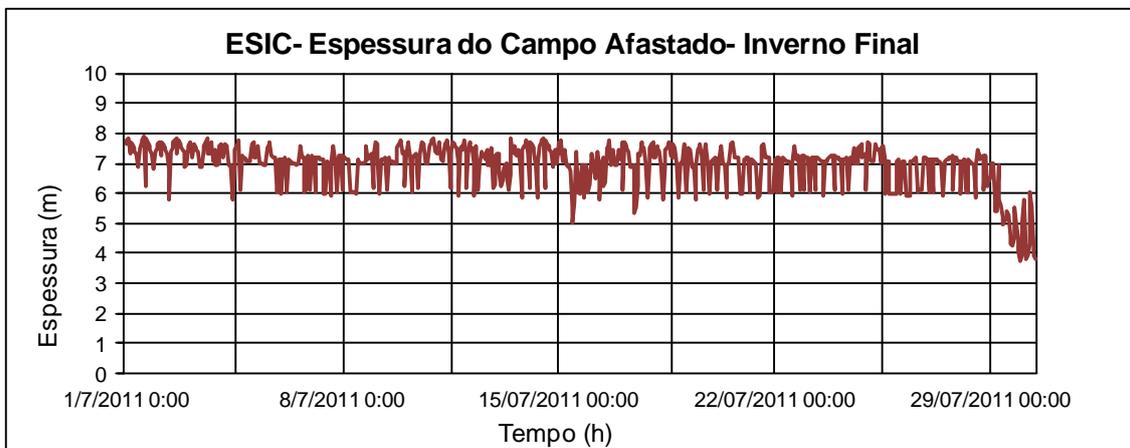
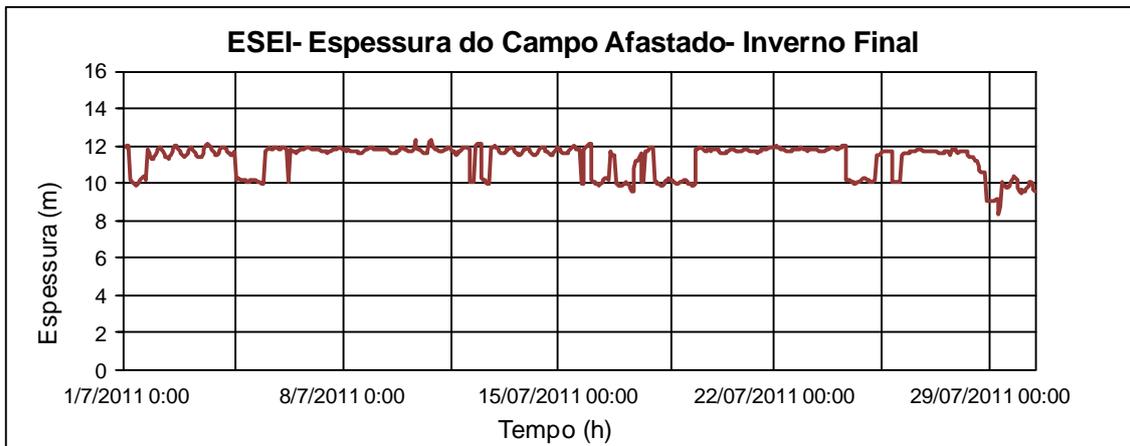


Gráfico 16: Variação temporal de espessura da pluma para o modelo de vazão final de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

A espessura varia de acordo com a hidrodinâmica do local e com a profundidade do tubulação difusora. Através dos gráficos percebe-se que a espessura no ESBT é maior, o que é explicado pela profundidade de projeto, 45 metros, grande em relação a profundidade dos outros emissários. No ESIC onde a espessura é a menor entre os três emissários, a profundidade é de 16 metros.

A espessura afetará diretamente a exposição dos microorganismos aos raios solares, ou seja, uma maior espessura diminuirá o decaimento.

Varição do T90

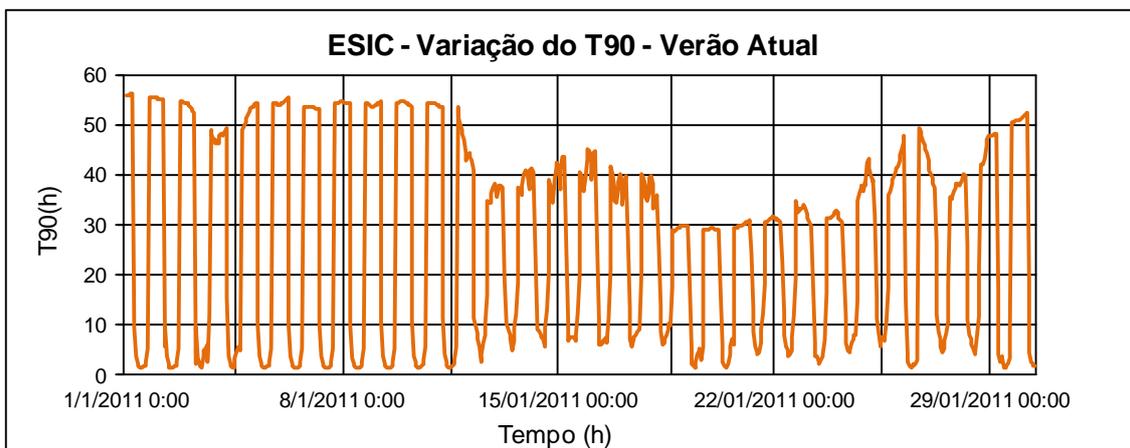
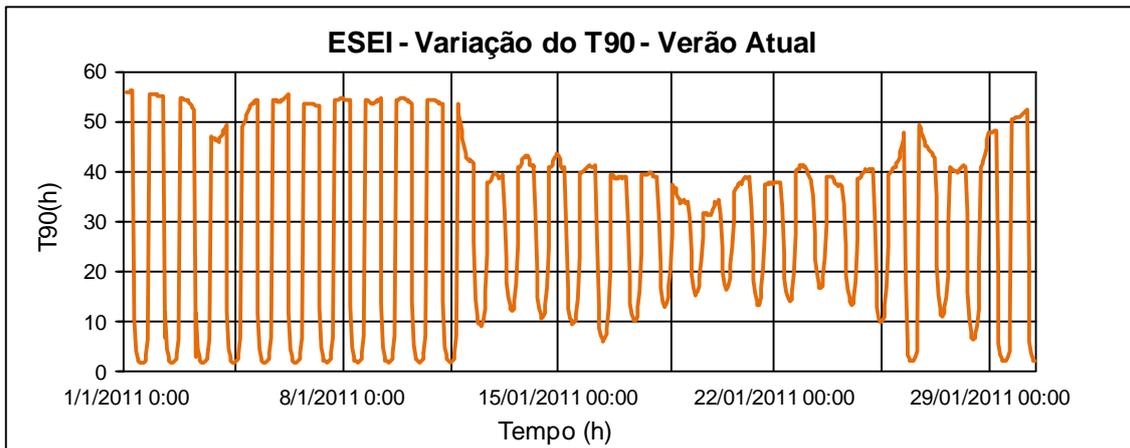
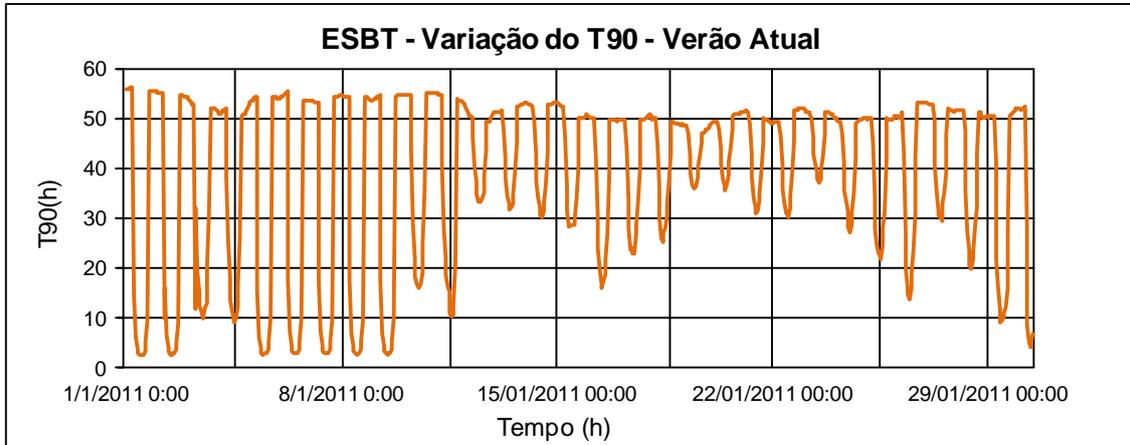


Gráfico 17: Variação temporal do parâmetro T_{90} no centro da pluma para o modelo de vazão atual de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

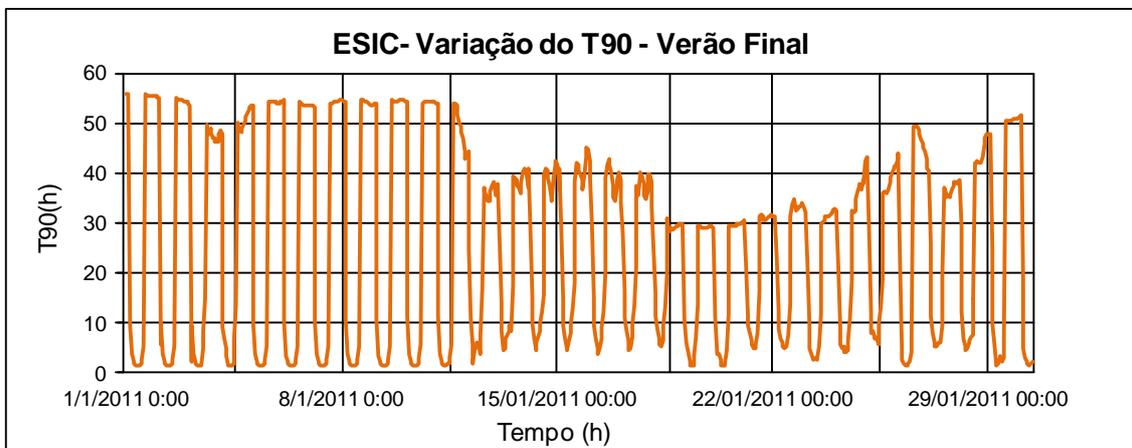
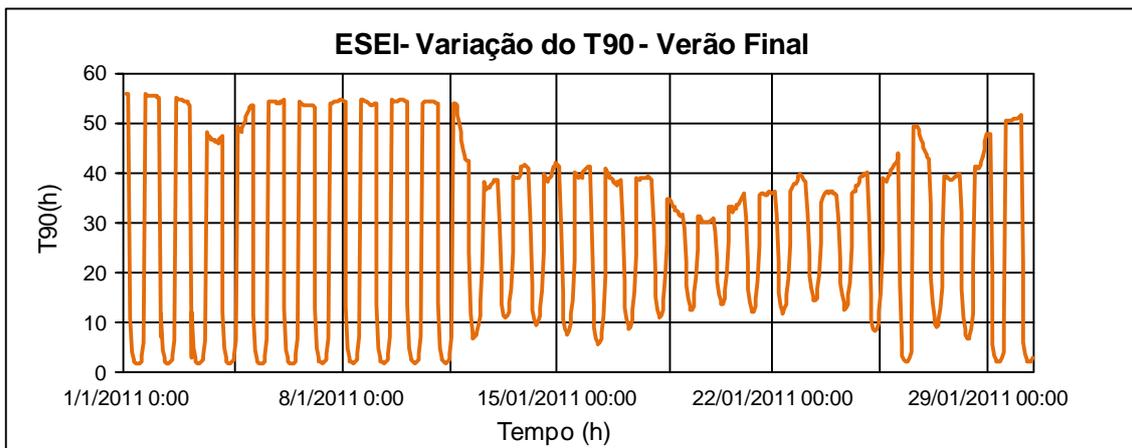
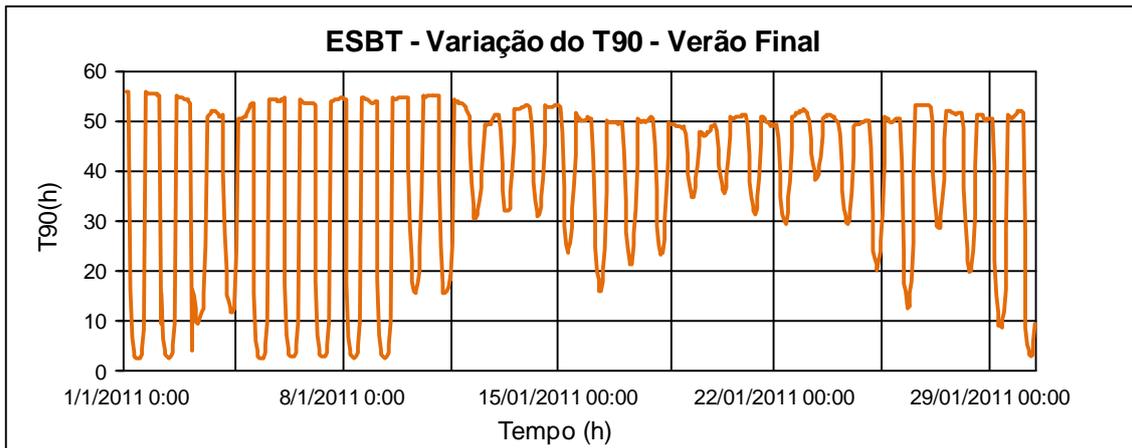


Gráfico 18: Variação temporal do parâmetro T_{90} no centro da pluma para o modelo de vazão final de verão nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

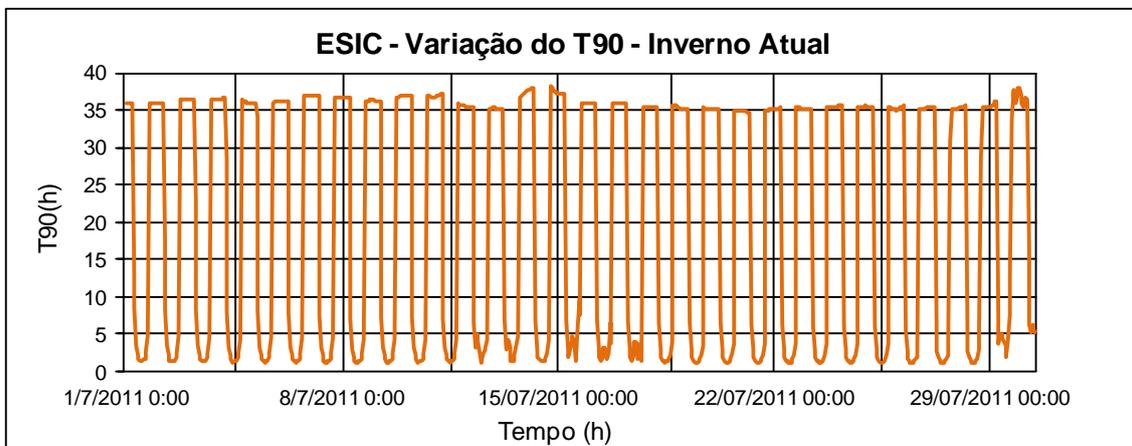
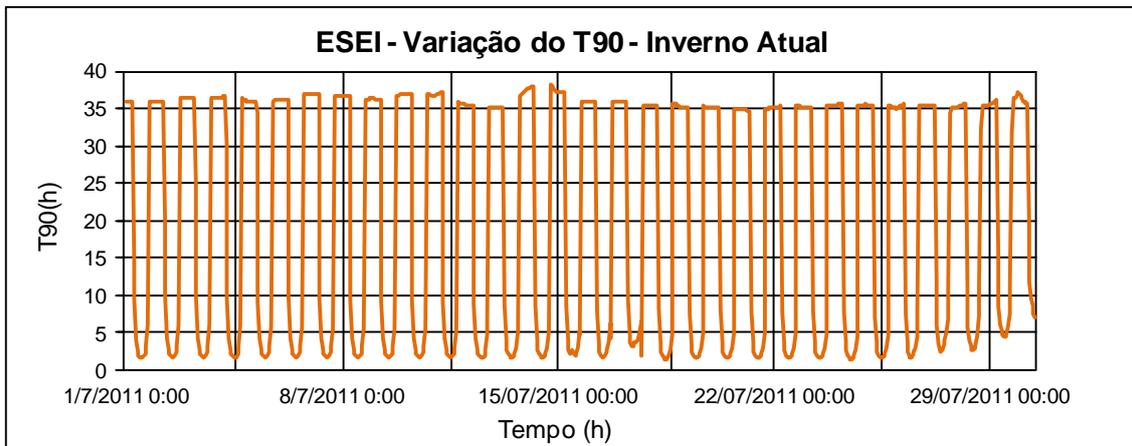
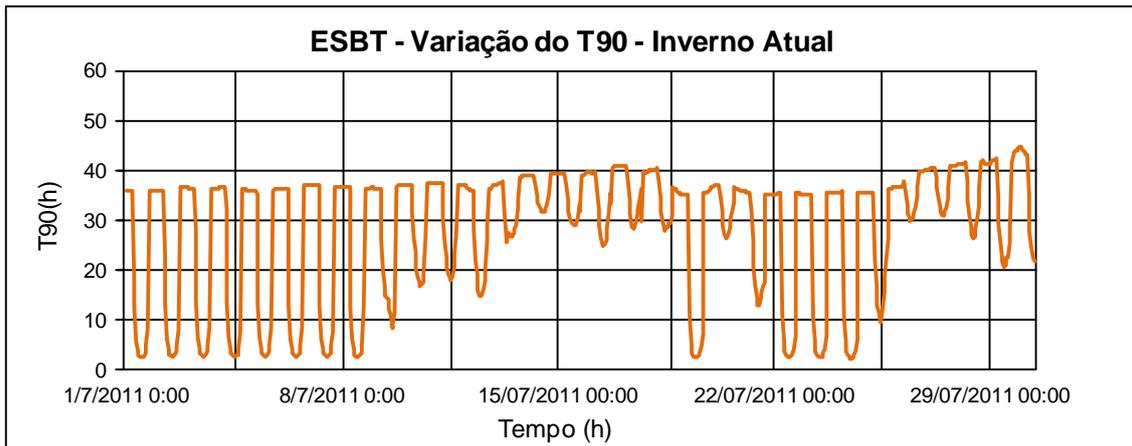


Gráfico 19: Variação temporal do parâmetro T_{90} no centro da pluma para o modelo de vazão atual de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

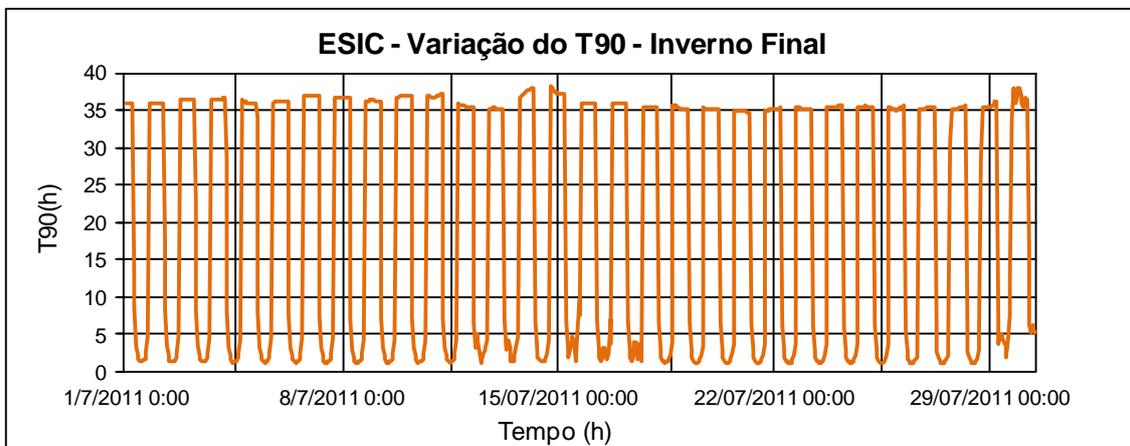
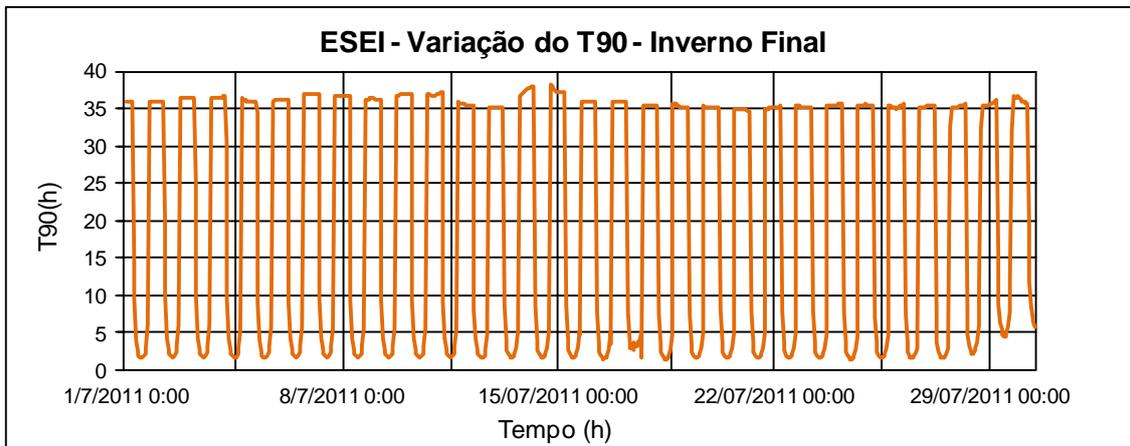
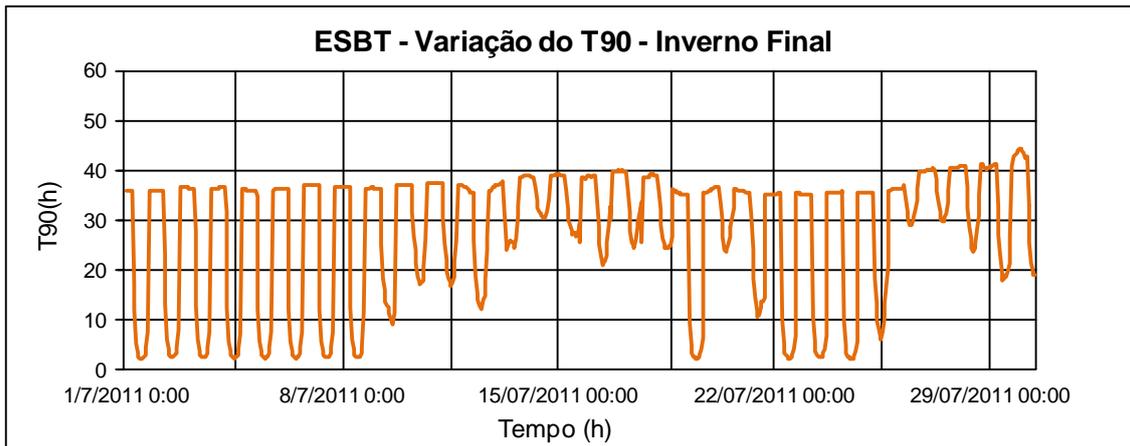


Gráfico 20: Variação temporal do parâmetro T_{90} no centro da pluma para o modelo de vazão final de inverno nos emissários ESBT, ESEI e ESIC.

Como o T_{90} varia principalmente com a intensidade da radiação solar é possível ver em seu gráfico variações diárias de seu valor. O mínimo acontece ao meio dia e o máximo durante a noite. O valor de T_{90} é afetado por variações na profundidade da pluma, o que pode ser percebido ao comparar os gráficos, quando a profundidade é maior o T_{90} mínimo é maior também.

6.2.2 Plumas

Os resultados do modelo lagrangeano foram retirados do modo de apresentação da situação da pluma de efluentes gerada por todas as fontes poluentes estudadas neste trabalho.

Um relatório completo de todos os momentos e situações climáticas, de maré, temporais e variáveis que levam às conclusões finais deste trabalho seria extenso e exaustivo. Logo, foi feita uma escolha metodológica de quais resultados serão apresentados neste item.

A análise da influência do lançamento de efluentes por estas fontes na balneabilidade das praias, objetivo principal da modelagem feita, é observada nas figuras apresentadas a seguir e ficará bem mais clara na apresentação dos resultados do modelo probabilístico mais adiante.

Então, foi determinada como metodologia para apresentação de resultados chave para o entendimento da dispersão natural das plumas a comparação entre situações contrastantes no que diz respeito às principais variáveis que influenciam no resultado lagrangeano: incidência de radiação solar, vazão lançada pelas fontes poluentes, situação da maré, estação do ano e altura do topo da pluma.

Desta forma, estes resultados são complementares aos gráficos de campo próximo que estão apresentados juntamente, de forma que são exatamente as variáveis apresentadas nestes gráficos que influenciam fortemente nas diferenças observadas nas figuras.

Não é possível isolar diversas variáveis para realizar a análise da influência de uma em separado. Por isso, será observado que em cada momento, além da principal análise, será possível notar atuação direta de outro(s) fator(es).

As diferenças entre as estações do ano e entre a vazão atual e final de lançamento de efluentes poderiam ser notadas na comparação de situações entre todas as variáveis. Logo, elas foram tratadas de forma paralela, para que fossem explicitadas, mas estivessem inerentes à análise dos outros parâmetros, de verificação não tão trivial ou intuitiva quando se pensa sobre dispersão de plumas.

Poderá ser claramente percebido que as plumas geradas pelas fontes poluentes pontuais nas praias são não só menores, mas também menos dispersas, devido à menor movimentação das correntes na região mais próxima da costa e à

menor vazão lançada por estas fontes em relação aos emissários. Por isso, nossas análises serão baseadas, neste primeiro momento, apenas nas plumas de concentração de poluentes geradas pelos emissários. O efeito dos lançamentos pontuais nas praias será mais facilmente percebido e analisado nos resultados do modelo probabilístico.

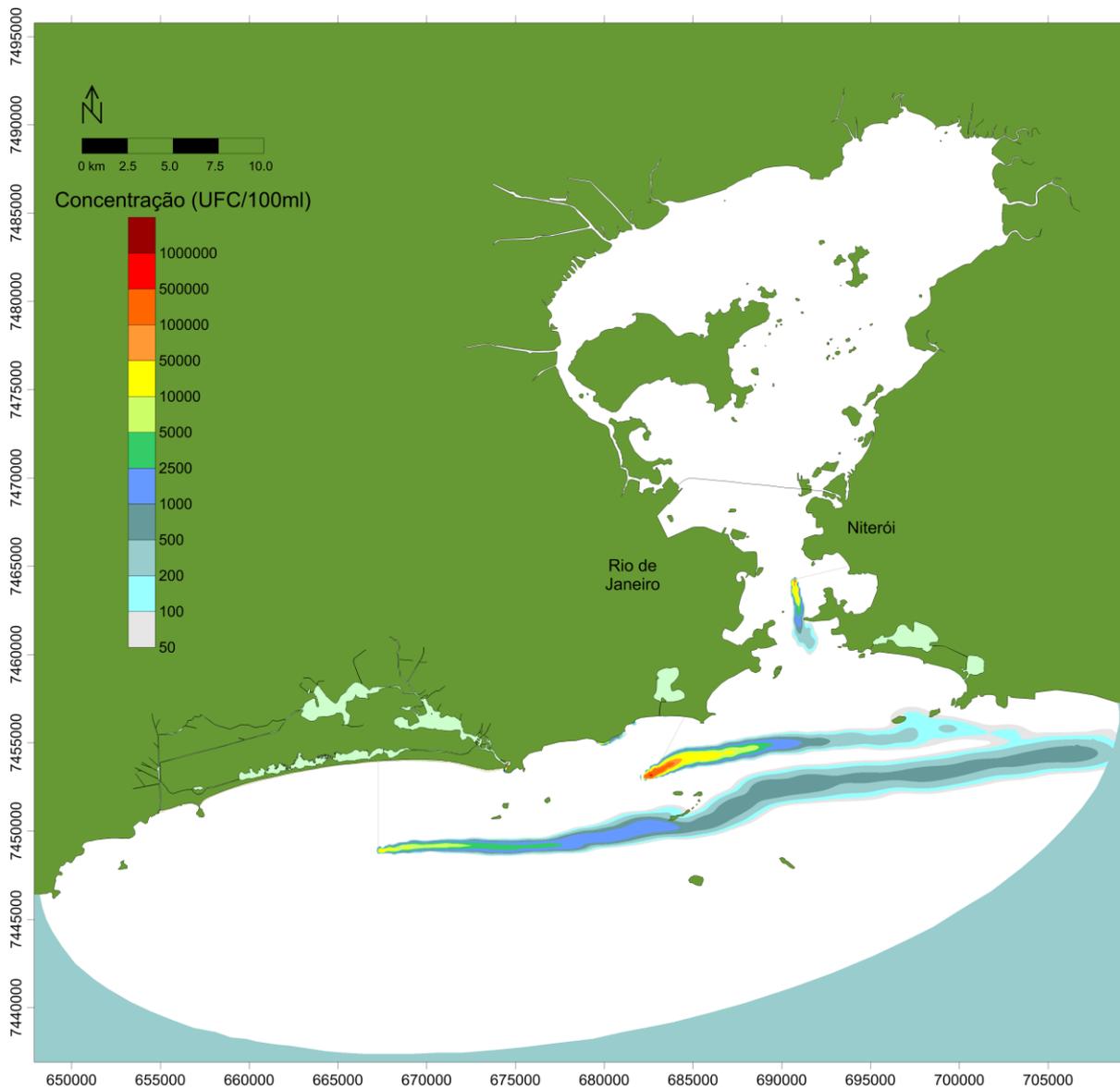


Figura 18: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), com meia-maré vazante de quadratura, no dia 10 de janeiro, às 15 horas, em situação de verão com vazões atuais.

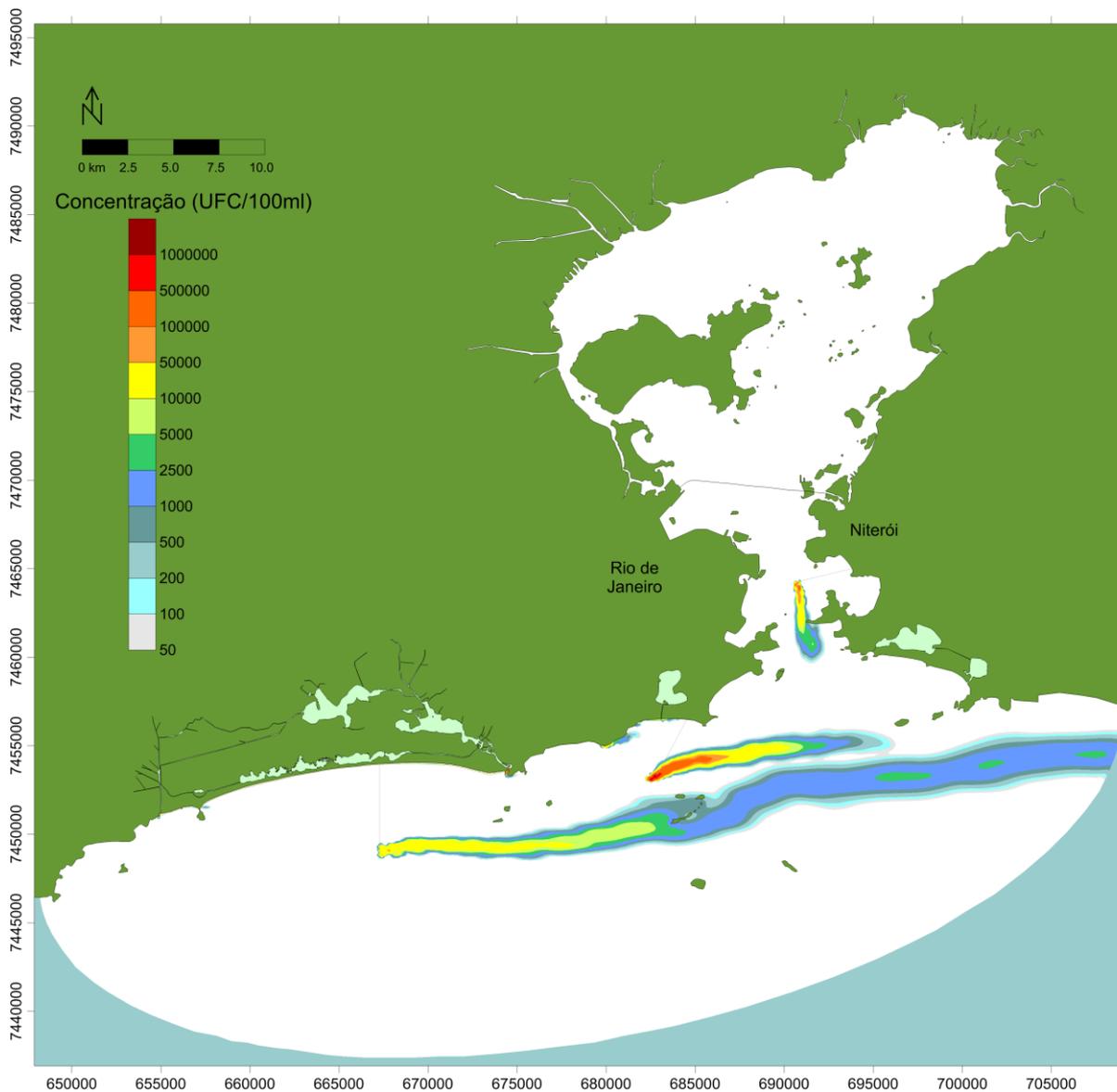


Figura 19: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), com meia-maré vazante de quadratura, no dia 10 de janeiro, às 15 horas, em situação de verão com vazões finais.

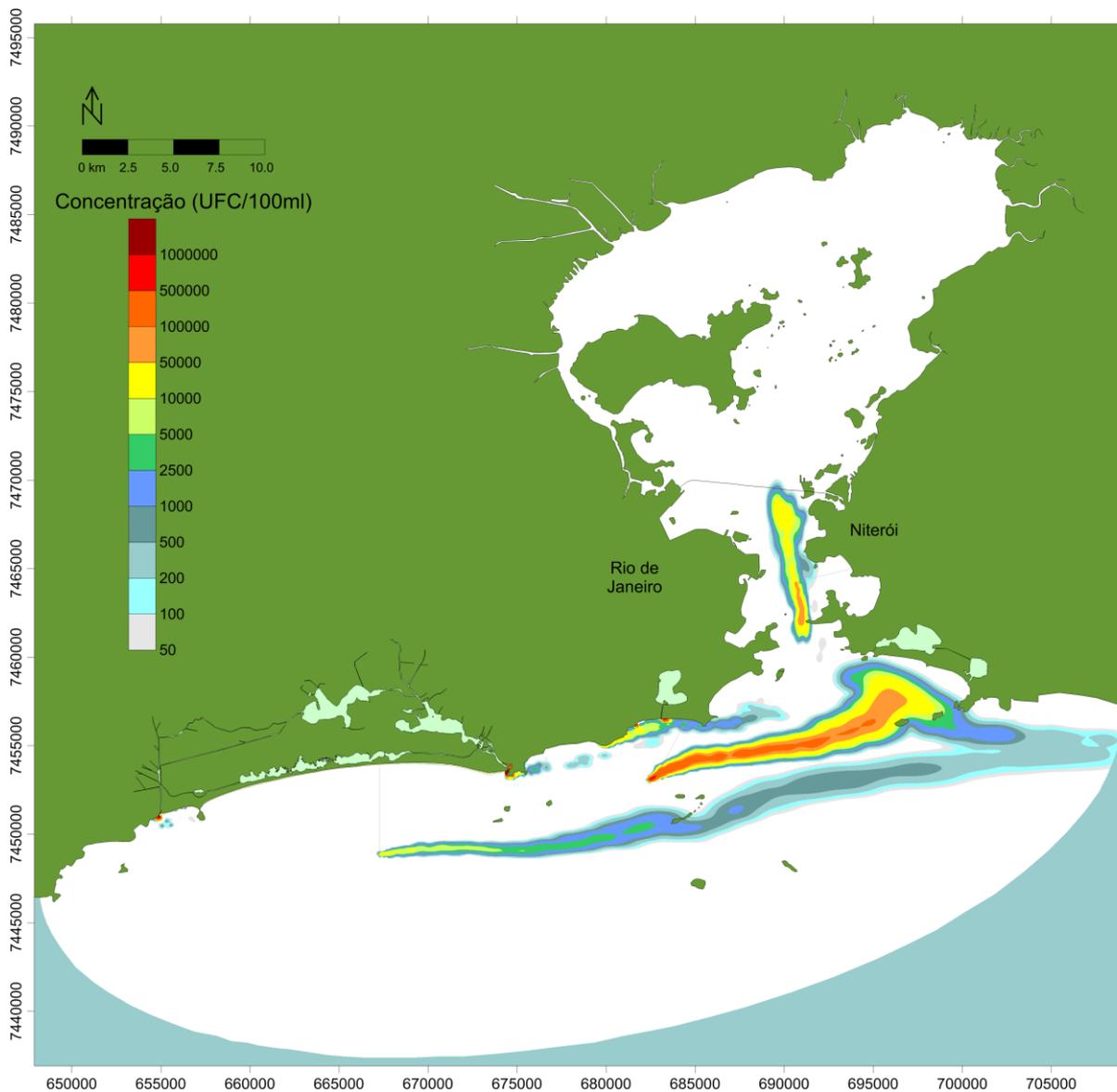


Figura 20: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinas de colimetria), com meia-maré vazante de quadratura, no dia 11 de janeiro, às 03 horas, em situação de verão com vazões atuais.

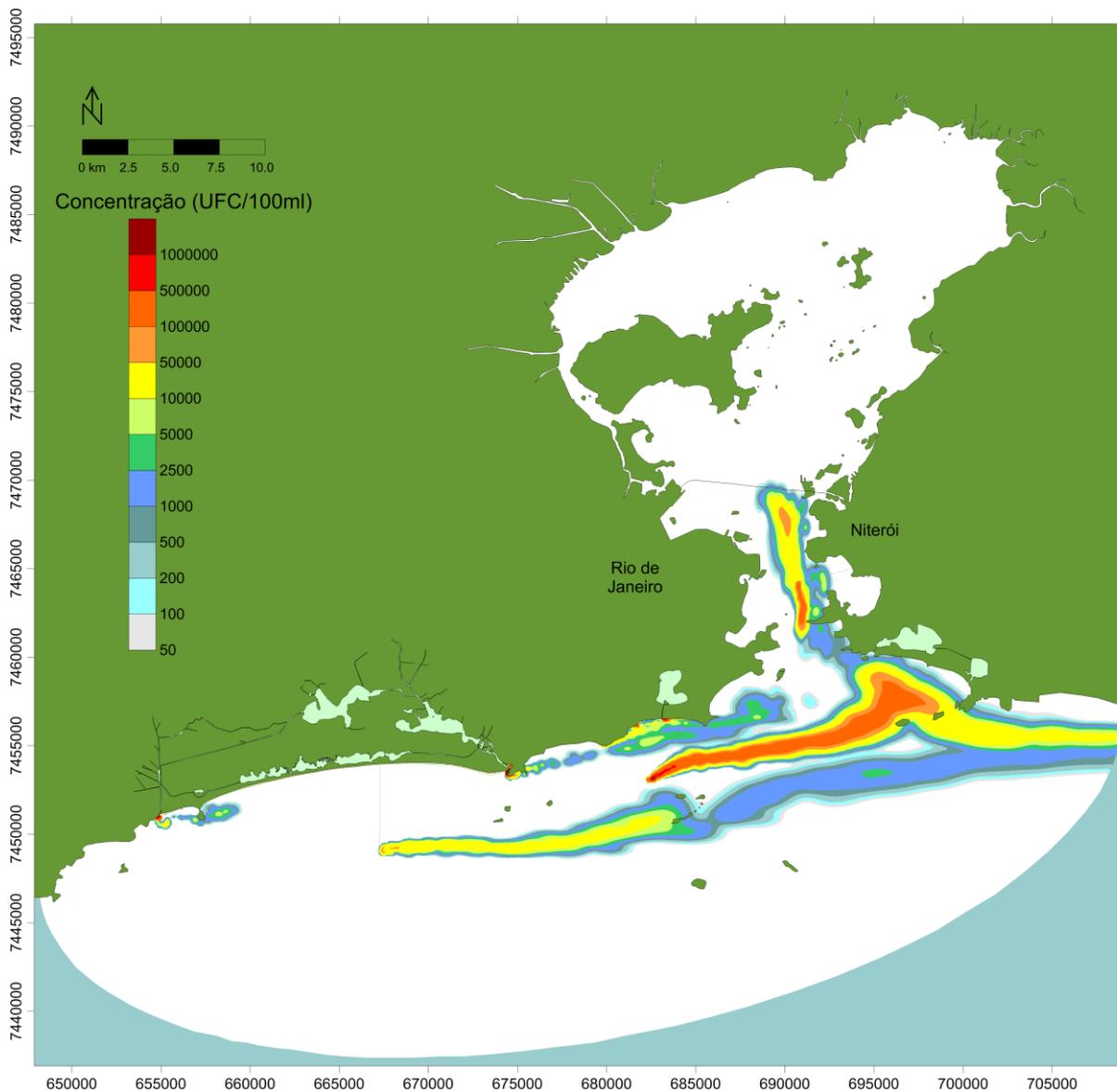


Figura 21: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), com meia-maré vazante de quadratura, no dia 11 de janeiro, às 03 horas, em situação de verão com vazões finais.

O principal objetivo desta primeira seção de resultados do modelo lagrangeano é mostrar a diferença na colimetria devido à variação do horário do dia analisado.

A interferência da radiação solar no processo de decaimento bacteriano já pôde ser verificada nos gráficos que demonstraram como o T_{90} varia ao longo do dia.

A partir da análise destes gráficos, já era esperado que, em horários de maior incidência de radiação solar, a pluma de poluentes fosse menor. Este efeito fica evidente e magnificado nos momentos escolhidos para apresentação do resultado, já que, às 15 horas, o poluente já está sujeito à essa exposição há um bom tempo, agilizando o decaimento e resultando na situação colimétrica apresentada.

Já no momento escolhido correspondente às 03 horas, percebe-se uma pluma muito mais extensa, já que a radiação solar está em níveis mais baixos há um bom tempo, aumentando o T_{90} , ou seja, elevando o tempo necessário para o decaimento bacteriano e possibilitando o acúmulo do efluente, carregado pela movimentação hidrodinâmica de modo a configurar a situação de distribuição vista na figura correspondente.

A comparação foi feita sempre em condições de maré igualitárias e na mesma estação (verão). Desta forma, com as quatro figuras apresentadas, temos duas análises evidentes, relacionando a variação de dois parâmetros, compatíveis com os prognósticos teóricos explicados neste trabalho.

A outra análise é a da diferença obtida nas plumas derivadas do lançamento de vazões de poluentes atuais e das vazões finais de projeto das fontes.

Neste caso, a expectativa era bem mais trivial e, ao observar as figuras, percebe-se o aumento das plumas vindo de todas as fontes quando passamos para a condição de vazão final.

De qualquer forma, vemos que, para este caso de estudo, a variação de vazão é até menos significativa do que a variação ao longo do dia devido à radiação solar.

A grande pluma derivada do lançamento do Emissário Submarino de Ipanema, comparativamente maior que a dos outros emissários é consequência,

também, do fato de sua pluma não estar submersa e, portanto, menos exposta à radiação. Mas esta análise ficará mais clara com a apresentação dos próximos resultados.

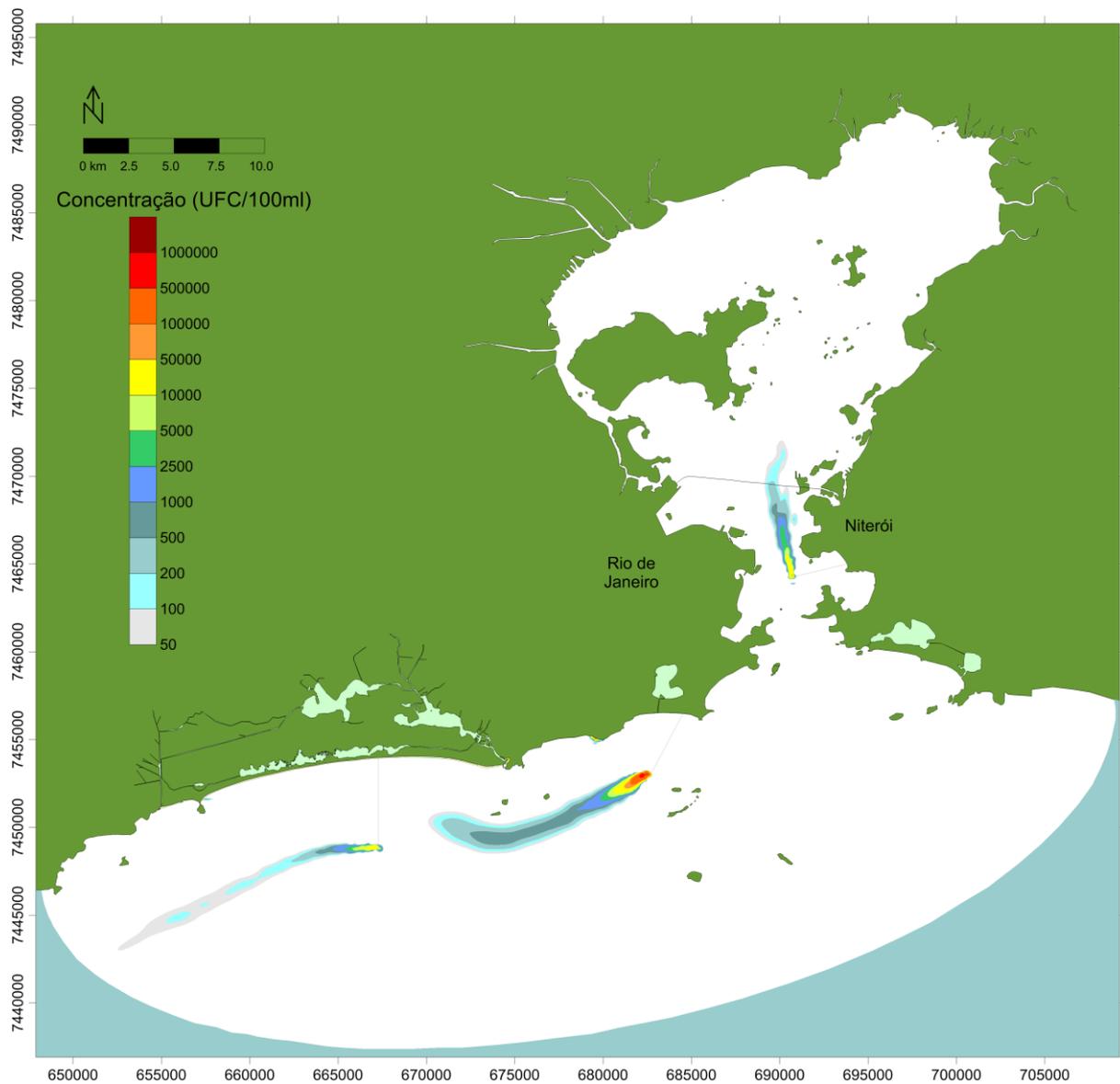


Figura 22: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em preamar de sizígia, com plumas emersas em situação de inverno com vazões atuais.

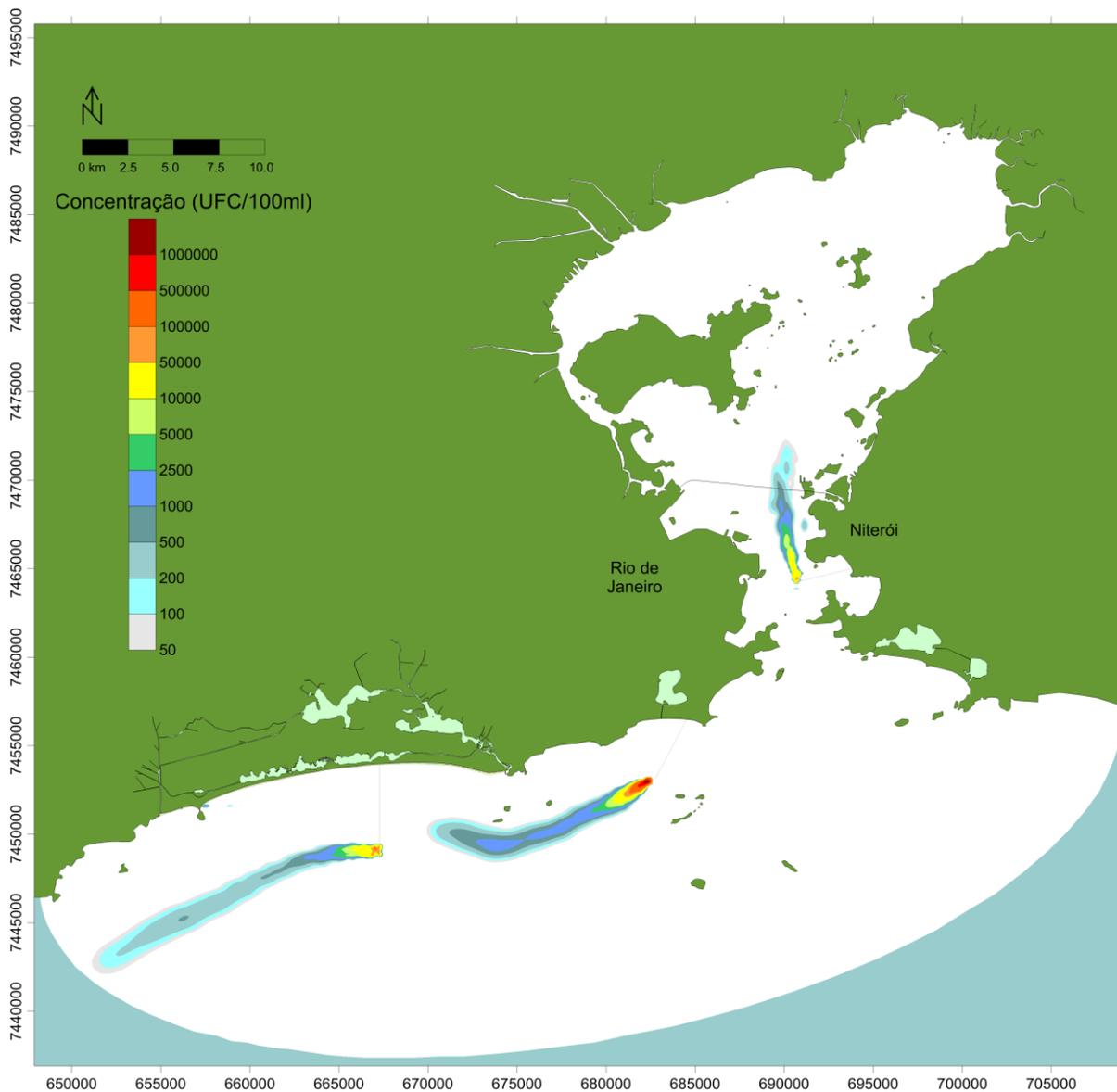


Figura 23: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em preamar de sizígia, com plumas emersas em situação de inverno com vazões finais

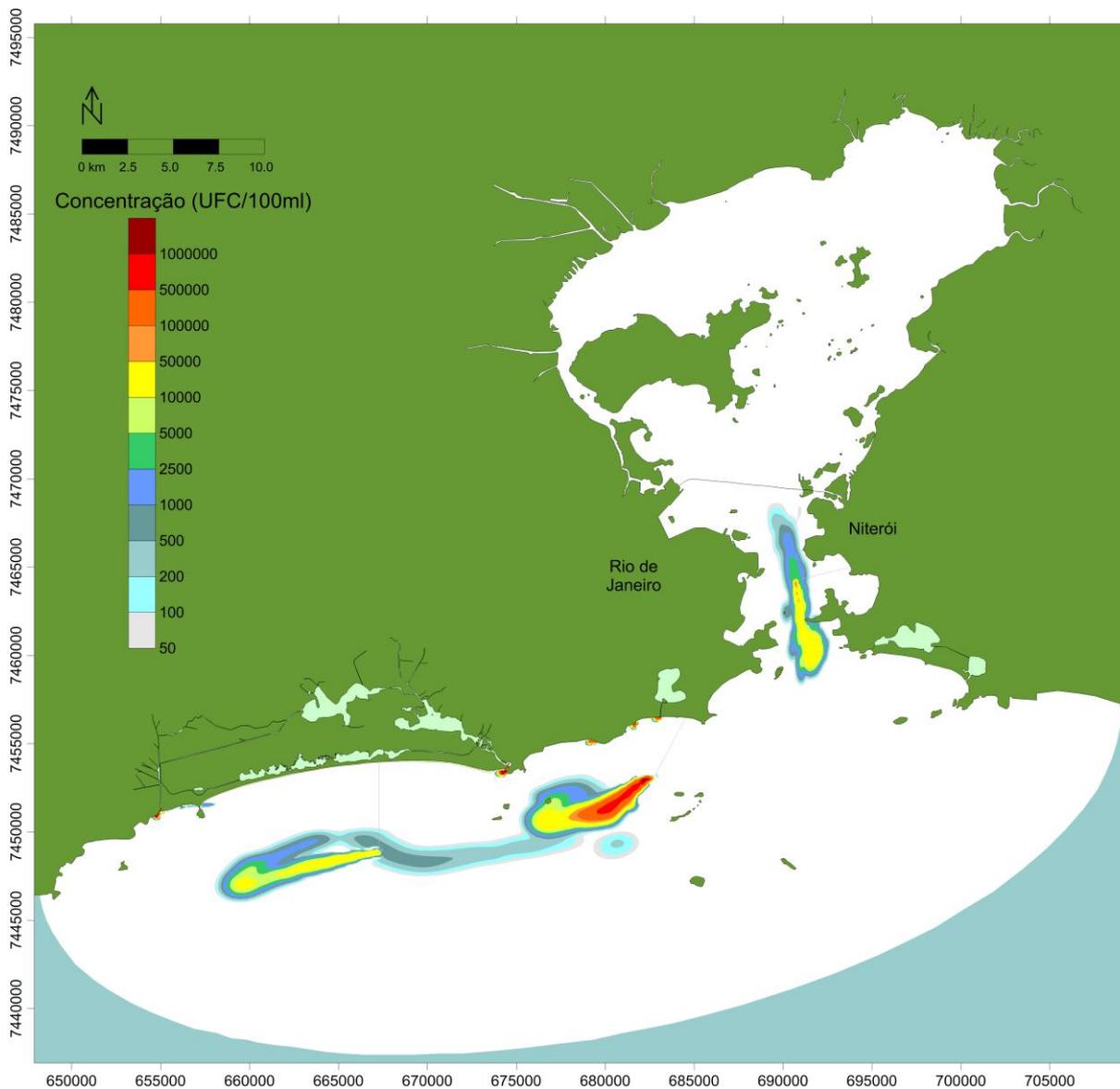


Figura 24: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em preamar de sizígia, com plumas não emersas em situação de inverno com vazões atuais

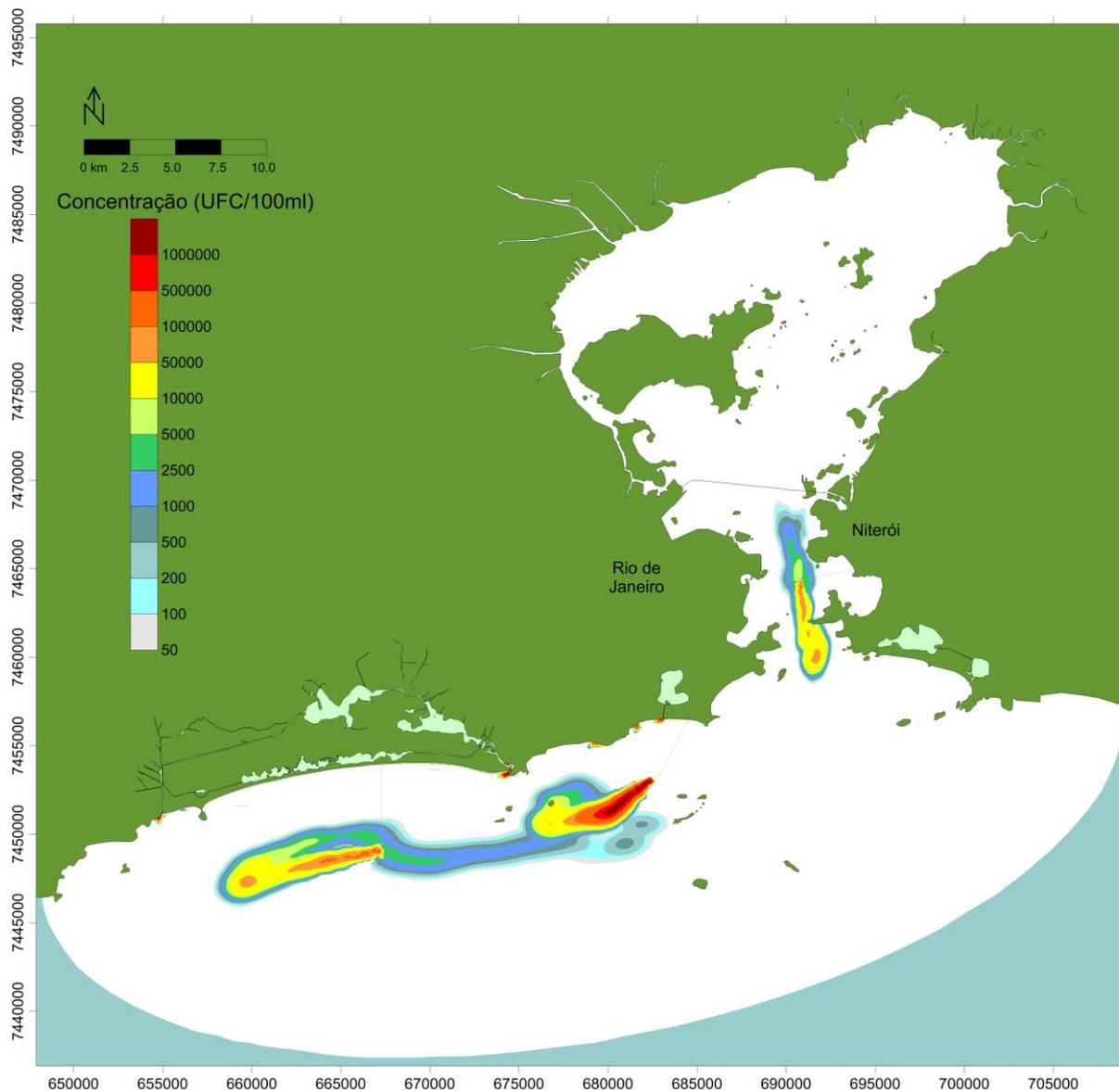


Figura 25: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em preamar de sizígia, com plumas não emersas em situação de inverno com vazões finais.

Depois de verificadas as diferenças na pluma decorrentes da variação de radiação solar incidente, confirma-se a adequação do modelo ao esperado pois é um parâmetro determinante no decaimento bacteriano e, conseqüentemente na gravidade de influência do lançamento de poluentes na qualidade da água marinha.

Torna-se necessária, então, uma análise de como a profundidade da pluma no mar influencia na chegada desta radiação ao poluente. Desta forma poderemos perceber que, além da hora do dia, questões hidrodinâmicas que regulem o posicionamento vertical da pluma no local também são determinantes para a situação resultante no que diz respeito à colimetria.

Para realizar esta análise, foram considerados momentos de igual situação de maré (preamar de sizígia) e com o mesmo horário do dia (14 horas). Foram escolhidos momentos de inverno, já que existe variação de profundidade da pluma entre as estações, como foi explicado anteriormente. Desta forma, visou-se garantir a solidez das conclusões tiradas em relação a este parâmetro.

Os momentos foram escolhidos de forma a retratar situações onde a pluma estivesse emergente e outras com profundidade elevada.

As profundidades de topo da pluma para os momentos escolhidos foram: para os momentos de pluma emergente, os três emissários estão com o topo de suas plumas na superfície (profundidade 0); para os momentos de pluma não emergente, a profundidade em Icaraí é de 10,66 metros, na Barra da Tijuca, de 13,68 metros e em Ipanema de 10,25 metros. A variação de profundidade entre os momentos de vazão atual e final são desprezíveis.

Mais uma vez, conforme esperado pela parte teórica, a diferença da contaminação entre os momentos de pluma emergente e não emergente ficou bastante clara no resultado. A menor taxa de decaimento bacteriano para os casos onde a pluma está aprisionada em maiores profundidades leva a uma persistência temporal e acúmulo de poluente na região de estudo.

Assim como na análise dos resultados anteriores, podemos perceber o aumento das plumas nos casos de vazão final, como era de se esperar.

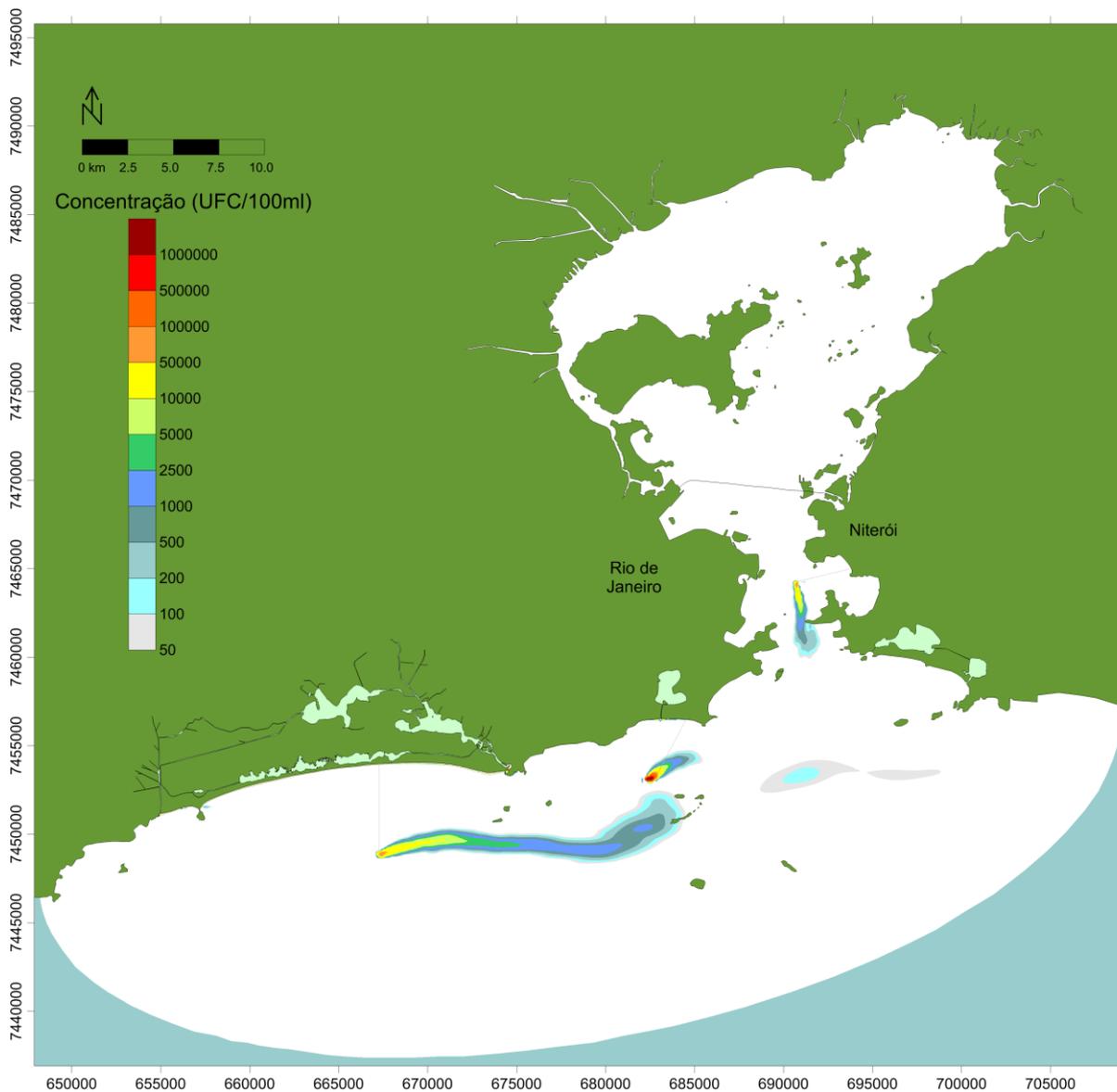


Figura 26: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em meia-maré vazante de sizígia, em situação de inverno com vazões atuais.

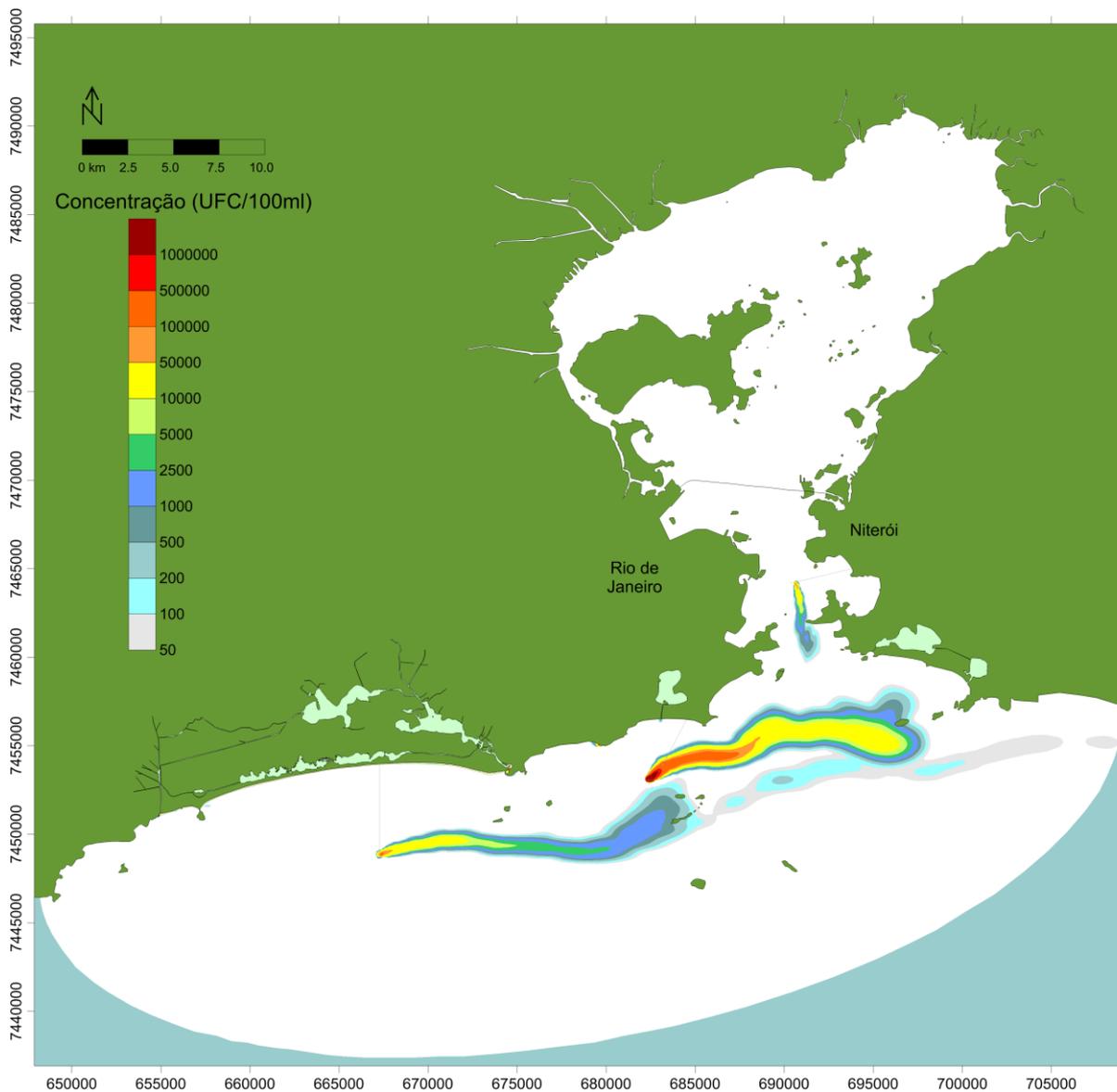


Figura 27: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em meia-maré vazante de sizígia, em situação de verão com vazões atuais.

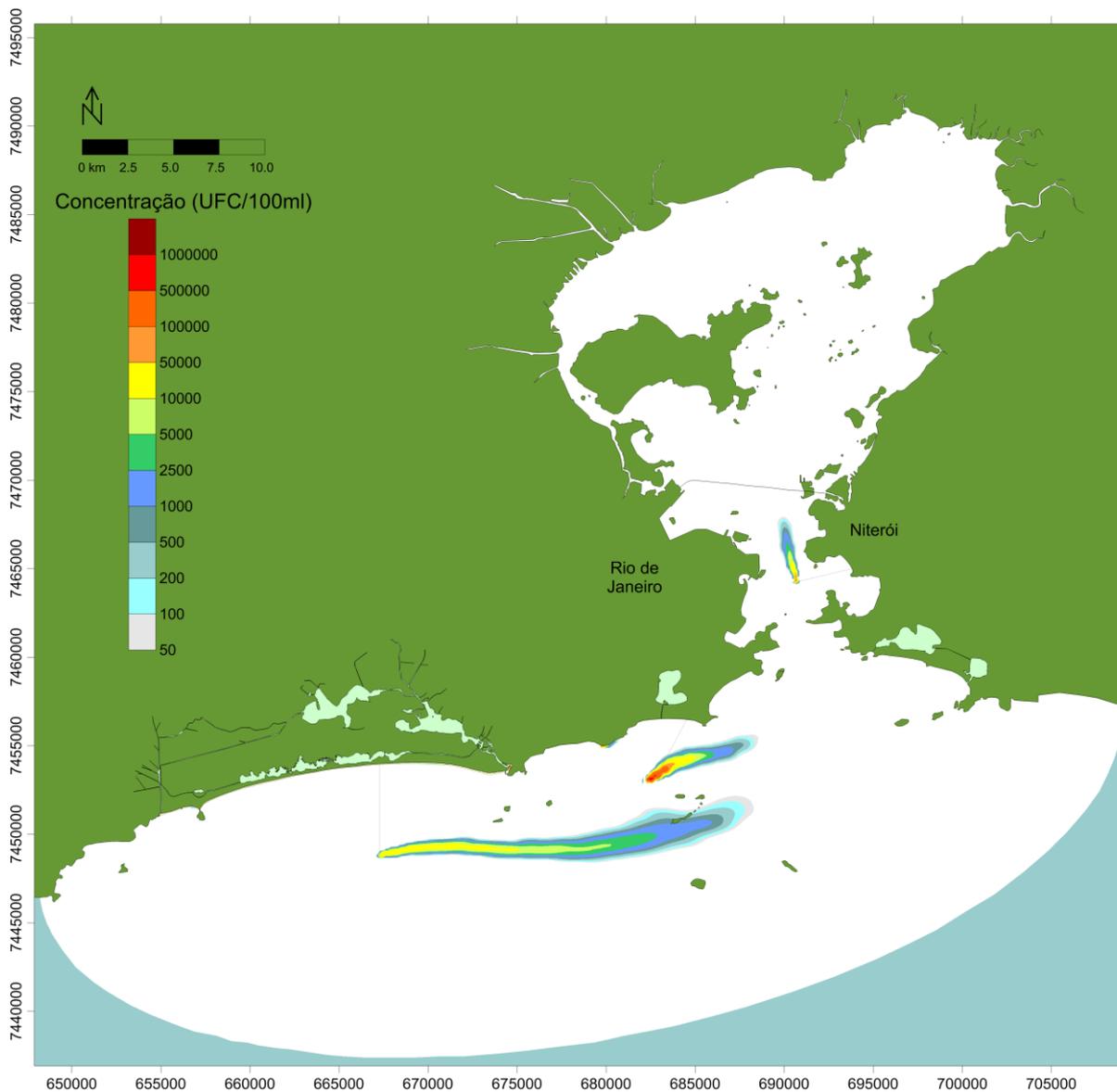


Figura 28: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em meia-maré enchente de quadratura, em situação de inverno com vazões atuais.

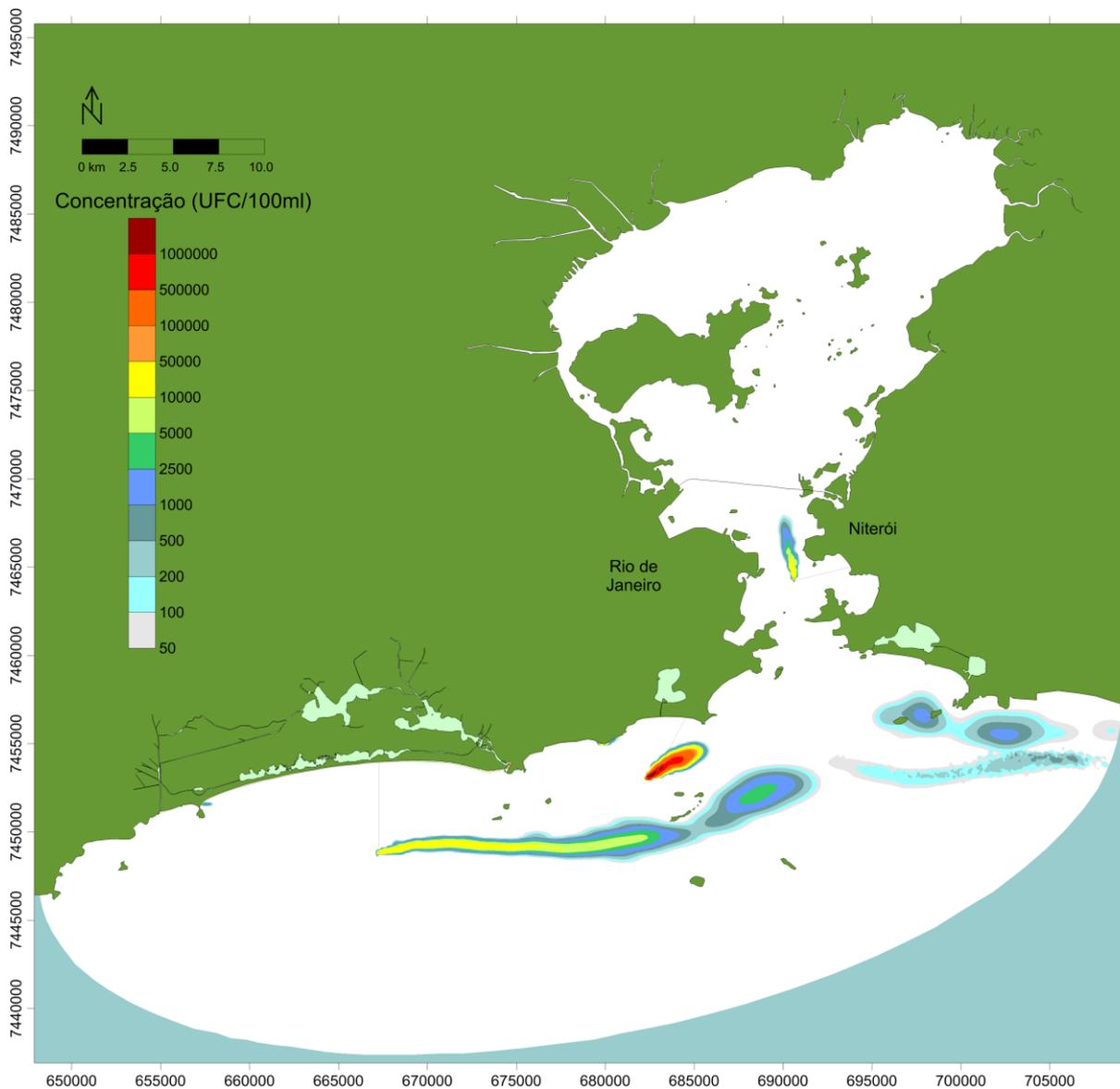


Figura 29: Figura representativa da pluma de concentração de poluentes (isolinhas de colimetria), em meia-maré enchente de quadratura, em situação de verão com vazões atuais.

Por fim, os últimos quatro resultados mostrados nos trazem duas comparações importantes para entendimento das influências no decaimento bacteriano e formação de plumas de poluentes na área de estudo.

A primeira diz respeito à variação da maré. Este parâmetro não está tão relacionado com o decaimento bacteriano em si, mas sim com a movimentação hidrodinâmica que acaba por definir a distribuição dos poluentes em sua região vizinha.

Foram pegos dois momentos antagônicos no que diz respeito ao ciclo de maré: uma meia-maré enchente de quadratura e uma meia-maré vazante de sizígia. Buscou-se, assim, mostrar como a forma da pluma varia entre estas condições.

Pode ser visto que, pelo posicionamento da pluma ser decorrente do somatório de movimentações que ocorrem ao longo do tempo que leva ao momento escolhido, a resposta nem sempre será tão clara e notória como quando comparamos os outros parâmetros. De qualquer forma, pode-se perceber nos momentos com situação de verão, principalmente perto do emissário de Ipanema (por este estar com pluma maior, decorrente de maior profundidade desta neste ponto), que na sizígia a movimentação é mais brusca, espalhando a pluma de forma mais consistente.

A segunda comparação que pode ser feita nestes resultados é da diferença da situação da qualidade da água entre verão e inverno em um mesmo momento, com as mesmas vazões.

E neste ponto é importante dizer que a diferença notada entre as duas estações nada mais é do que consequência de todos os parâmetros para os quais estas têm distinção. E o maior exemplo disso já foi analisado, que é a profundidade da pluma. Como já foi explicado, em situação de verão, o poluente fica aprisionado em maior profundidade, comprometendo o decaimento e criando maiores plumas.

Por isso, percebe-se com maior clareza a diferença entre a colimetria no inverno e no verão, confirmando a teoria de que esta seria basicamente uma consolidação dos parâmetros analisados anteriormente. Desta forma, foram verificadas as consistências de todas as teorias quanto a influências na colimetria, podendo-se passar para a análise direta de impacto dos lançamentos de poluentes estudados na balneabilidade das praias.

Até agora, pôde ser percebido, através dos resultados apresentados, as configurações padrões das plumas estudadas em momentos de diferentes situações climáticas e hidrodinâmicas.

Porém, por serem resultados representativos apenas de um certo momento, não conseguem transmitir o sentido de continuidade e impossibilitam a análise mais correta da influência do lançamento de poluentes na qualidade da água das praias.

Isto também porque, conforme explicando anteriormente, nestes resultados momentâneos, é muito difícil ter uma visão apurada sobre os efeitos dos lançamentos das fontes que não são emissários.

Além disso, estes resultados não nos permitem analisar a chegada das plumas nas praias, já que tirar conclusões acerca deste aspecto baseadas apenas em poucos momentos seria no mínimo negligente.

Logo, para apresentar de forma mais adequada, foi escolhida a apresentação dos resultados do modelo probabilístico. Serão mostradas figuras com plumas proporcionas à porcentagem do tempo na qual a concentração de *Escherichia coli*) fica acima de 800 UFC/100ml. Este foi o valor escolhido porque é o máximo permitido em praia para que esta não seja considerada imprópria para banho.

Com isso, é possível analisar quais praias estão tendo sua qualidade de água prejudicada pelos lançamentos estudados e qual fonte é responsável por essa deterioração.

Os resultados serão apresentados para os quatro modelos, possibilitando verificar as diferenças das plumas entre estações (verão e inverno) e entre a situação atual de vazões e as finais programadas em projeto dos emissários.

Estes resultados são diretamente relacionáveis, não apenas com as avaliações de influências de parâmetros feitas até agora, mas com as informações de balneabilidade apresentadas, o que levará às conclusões finais para cumprimento dos objetivos descritos.

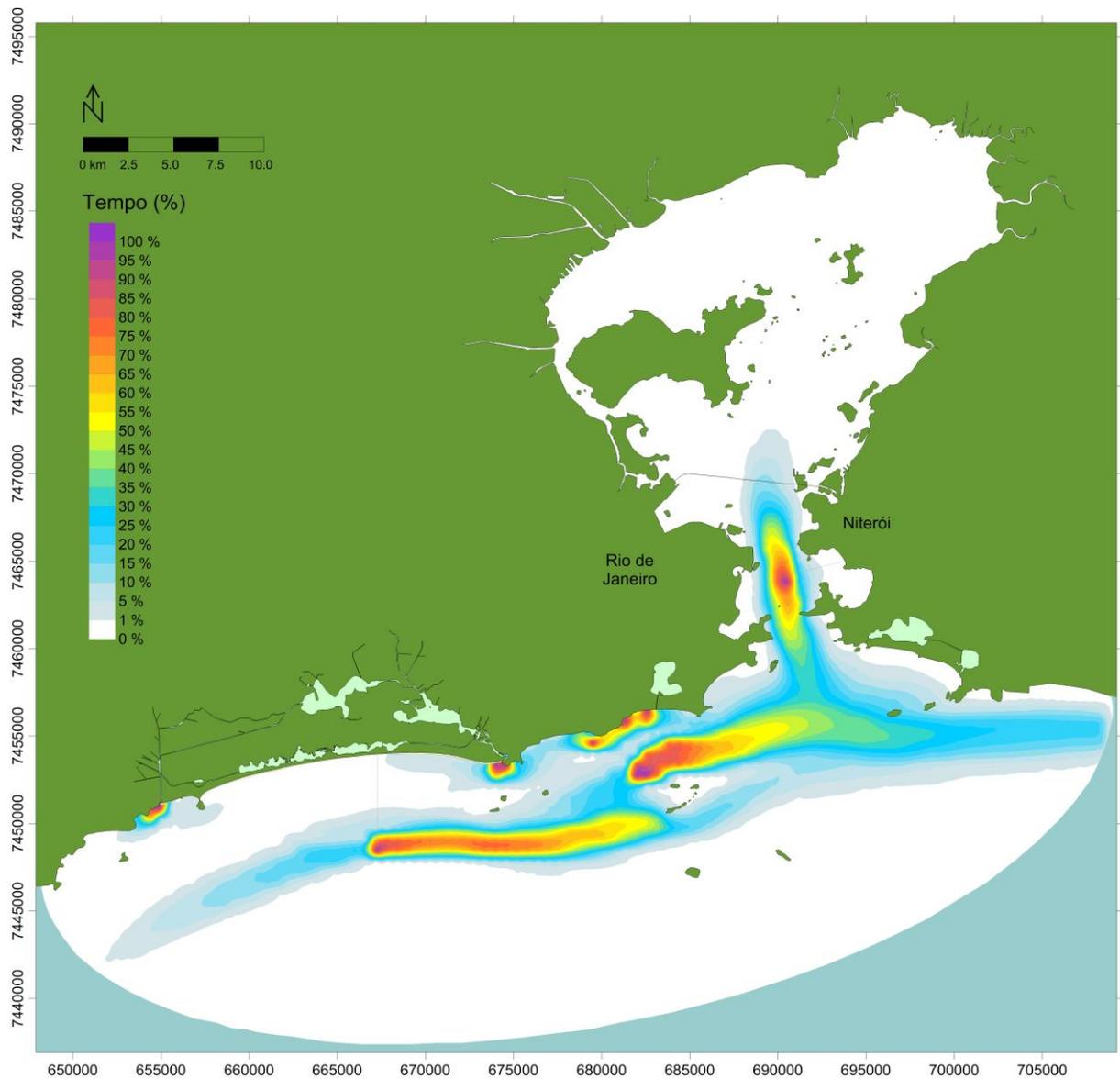


Figura 30: Figura representativa da porcentagem do tempo, ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de verão com vazões atuais.

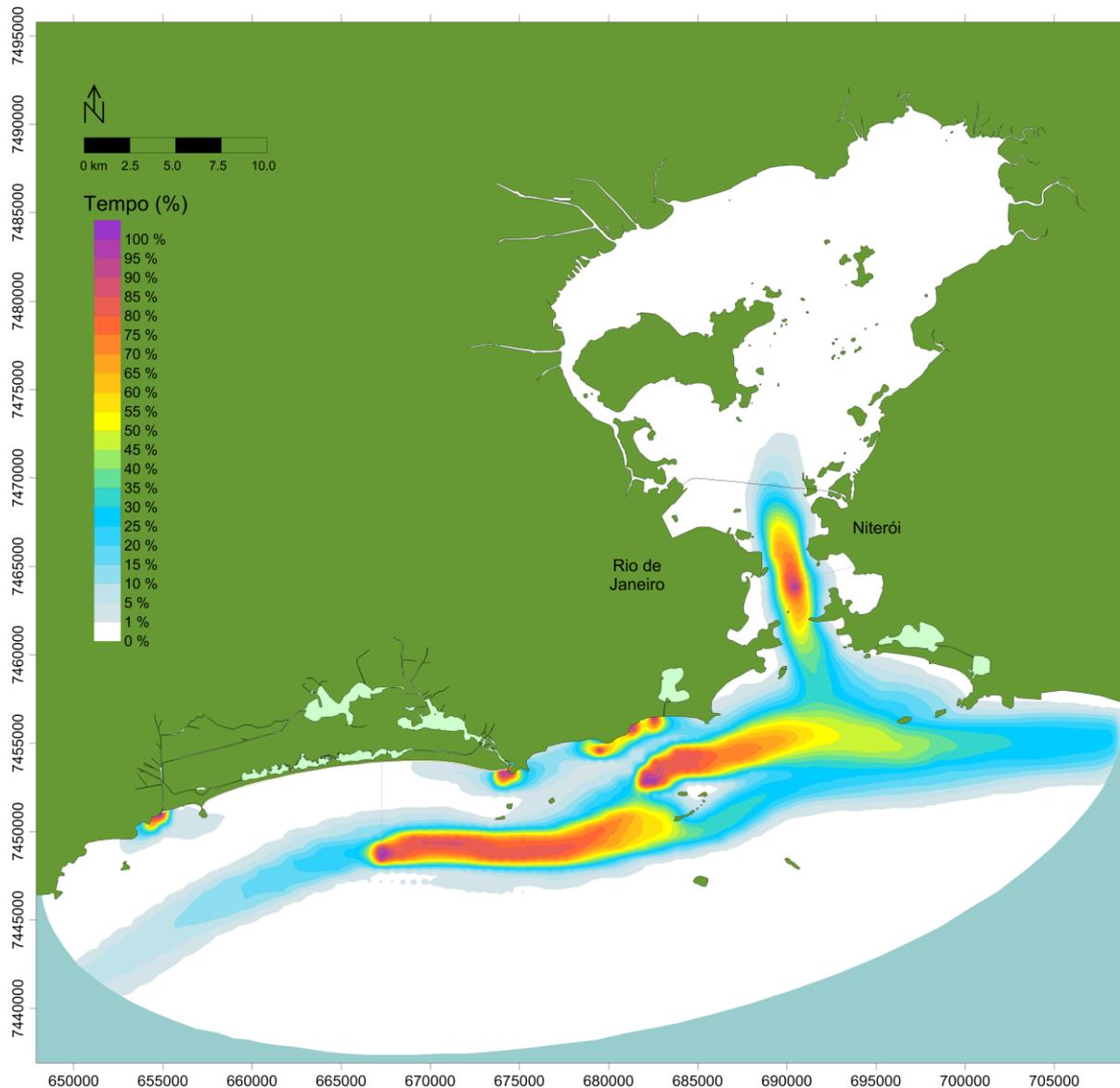


Figura 31: Figura representativa da porcentagem do tempo, ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de verão com vazões finais.

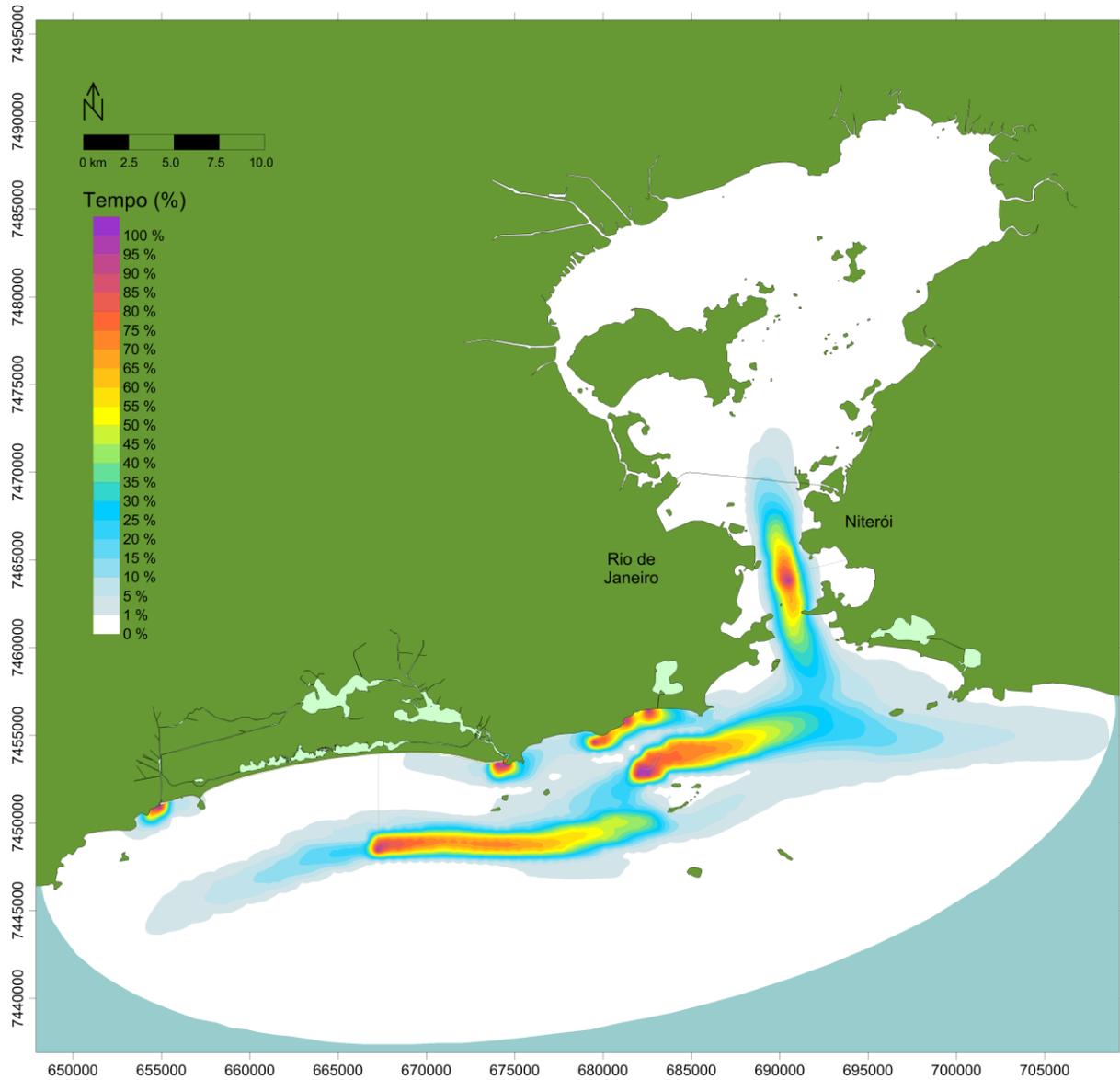


Figura 32: Figura representativa da porcentagem do tempo, ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de inverno com vazões atuais.

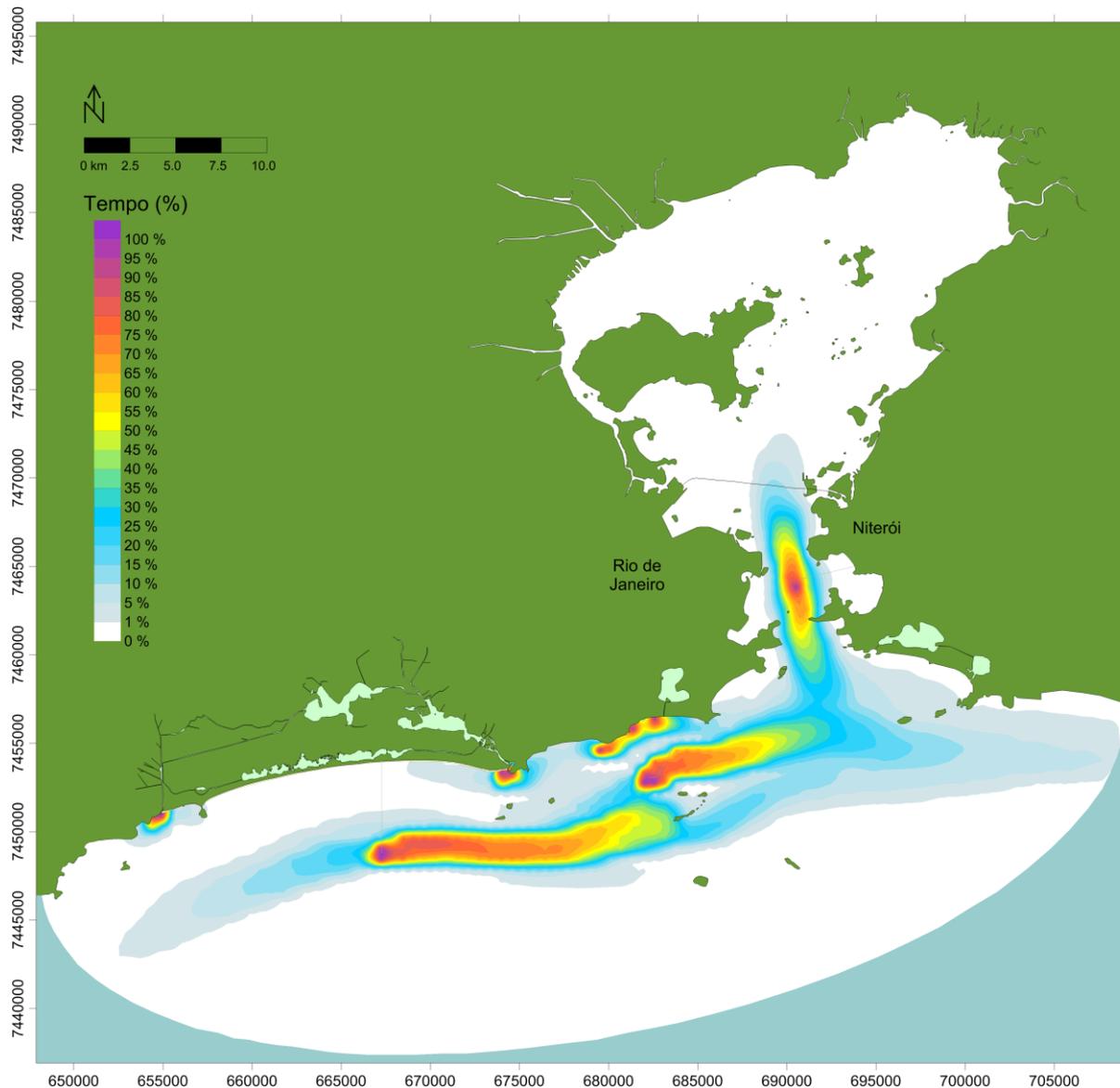


Figura 33: Figura representativa da porcentagem do tempo, ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de inverno com vazões finais.

Os resultados do modelo probabilístico se mostram coerentes com todas as análises anteriores.

Primeiramente, fazendo a comparação entre as duas estações, percebe-se que a pluma do verão é maior, devido ao aprisionamento desta em maiores profundidades, pelo processo de estratificação explicado.

Além disso, obviamente, as plumas em situação de vazões finais são maiores do que as atuais.

O modelo probabilístico traz, porém, novas perspectivas sobre a dispersão dos poluentes. A mais aparente é a presença das plumas mais visíveis nas praias próximas aos lançamentos pontuais costeiros. Isto prova que estas fontes estão diretamente relacionadas com os problemas de qualidade da água conhecidos da população.

Por outro lado, percebe-se que as plumas decorrentes dos lançamentos dos emissários muito raramente chegam à costa, excetuando-se a de Icaraí, que toca com constância em partes da costa niteroiense. Esta avaliação é ligeiramente mais complicada na costa carioca, pois, em alguns locais, torna-se difícil fazer a separação da pluma por fonte.

O resultado será apresentado de modo mais aproximado nas áreas das praias mais à frente, de modo a dar suporte às conclusões finais.

Fica claro também a predominância da movimentação hidrodinâmica no sentido leste-oeste para correntes costa-fora, enquanto a dispersão da pluma do emissário de Icaraí, situado na boca de entrada da Baía de Guanabara, é bem mais equilibrada verticalmente, sendo relacionada com as situações de maré enchente e vazante. Ela é, também, mais alongada, devido às maiores velocidades presentes neste ponto, pelo estrangulamento da seção na entrada da Baía.

7. Conclusão

Os dados de balneabilidade do INEA mostraram, cf. seção 3.6, que praias tanto do Rio de Janeiro, quanto de Niterói apresentam problemas de qualidade de água, principalmente no verão.

Considerando a premissa conhecida de que o lançamento de esgoto não é a única fonte de poluição da costa fluminense e a Baía de Guanabara tem um histórico longo de maus cuidados em termos ambientais, devemos considerar, que as praias localizadas dentro da Baía já teriam sua balneabilidade prejudicada, mesmo se as fontes estudadas não existissem. Esta consideração baseia-se na maior dificuldade de renovação da água interior deste corpo, haja vista a comparativamente pequena seção de troca com o oceano.

Por outro lado, as praias diretamente viradas para o mar aberto só terão problemas de qualidade de água constantes justificados pelo lançamento rotineiro de poluentes. O que nos leva à primeira análise conclusiva: a quais fontes poluentes a degradação da qualidade da água das praias de mar aberto do Rio de Janeiro é relacionada?

A Figura 34 foi elaborada para ilustrar de forma mais clara a situação das praias da Zona Sul do Rio de Janeiro. Ela indica objetivamente que praias como a do Leblon, que fica boa parte da estação (neste caso analisamos a situação de verão) classificada como imprópria para banho, não sofrem grande influência do lançamento de esgoto pelos emissários submarinos, mas sim das fontes pontuais costeiras. No caso do Leblon, há uma sinergia dos efeitos do lançamento dos canais do Jardim de Alah e da Av. Visconde de Albuquerque.

Embora possam ser percebidos vestígios de impacto da emissão pelo emissário de Ipanema, mesmo estes são questionáveis, já que nos pontos de contato das plumas de duas fontes, fica difícil estabelecer limites de posicionamento entre estas.

No caso das praias de dentro da Baía, como explicado e esperado, estas não sofrem qualquer influência significativa da pluma do emissário de Icaraí, exceto pela área do Aeroporto Santos Dumont e da ponta da costa da Urca. Portanto, seus problemas de balneabilidade não estão relacionados, pelo menos diretamente, com o lançamento de esgoto por este emissário. Estes problemas estão ligados à péssima qualidade da água já existente na Baía, consequência do passivo ambiental local.

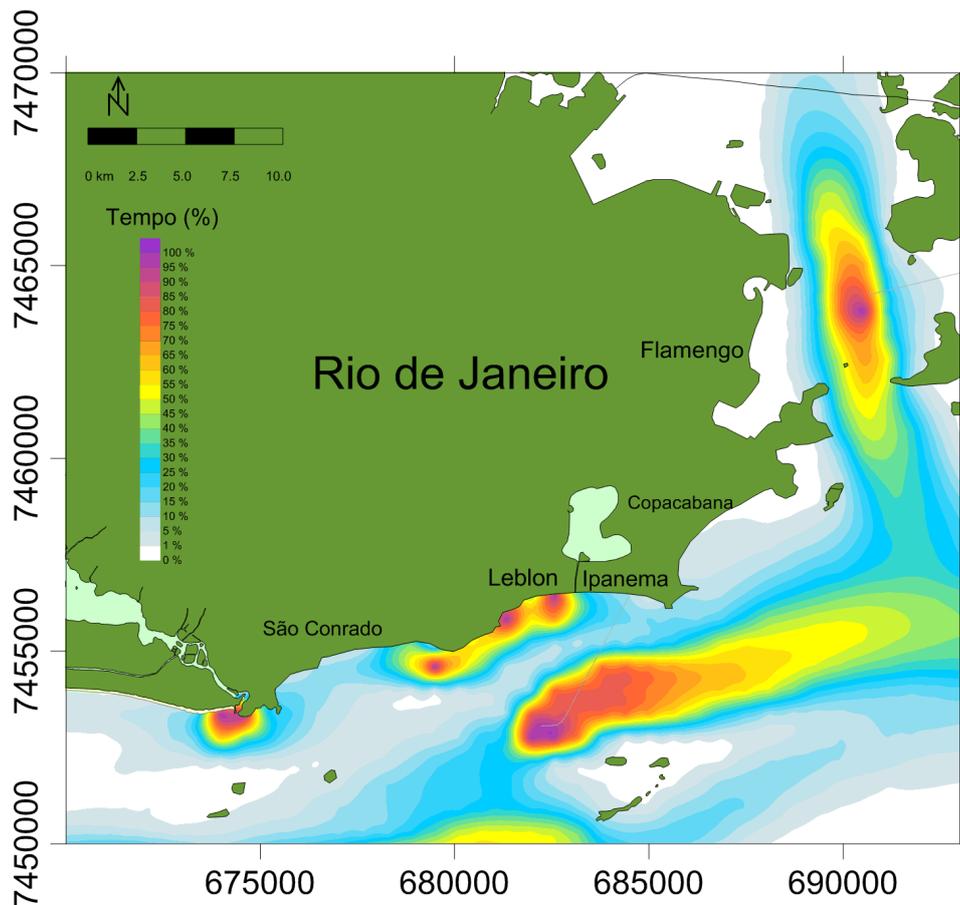


Figura 34: Figura aproximada, das praias do Rio de Janeiro, da representação da porcentagem do tempo ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de verão com vazões atuais.

Já a Figura 35 foi feita de modo a mostrar o resultado do modelo probabilístico de forma aproximada para as praias de Niterói.

Neste caso, percebe-se que há uma influência mais significativa, porém ainda pequena, do lançamento de esgoto pelo emissário de Icaraí na qualidade da água das praias. Isto pode ser verificado principalmente nas proximidades das praias de Gragoatá, Itaipu, Itacoatiara e na ponta da praia de Charitas, locais aonde a pluma de poluentes chega à costa em uma porcentagem maior de tempo.

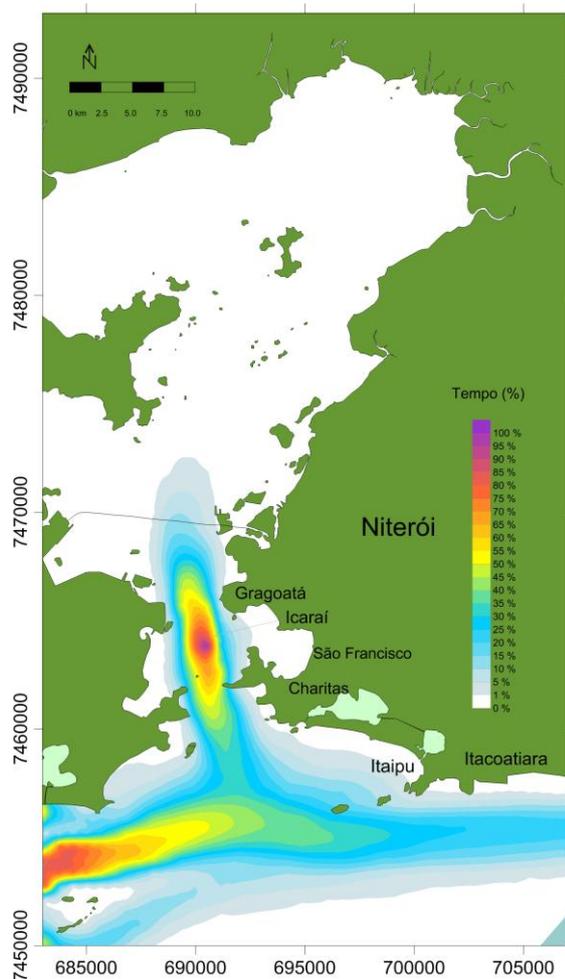


Figura 35 : Figura aproximada, das praias de Niterói, da representação da porcentagem do tempo ao longo do mês de simulação, na qual a concentração de E. Coli fica acima de 800 NFU/100ml, valor que configura a situação de imprópria para banho das praias, em situação de verão com vazões atuais.

Mesmo assim, ao confrontar essas conclusões com os dados de balneabilidade apresentados neste trabalho, percebe-se que o lançamento feito pelo emissor não pode ser responsável por todos os problemas de balneabilidade observados pelo INEA.

Isto pode ser explicado, tanto pelo fato de a maior parte das praias analisadas serem no interior da Baía de Guanabara, o que significa que são consequências de todo o histórico de degradação desta área, quanto pela possível presença de outros lançamentos pontuais nestas regiões, que não são legalizados ou conhecidos e não foram incluídos neste estudo.

Logo, podemos chegar, com resultados confiáveis a respostas para as perguntas levantadas como objetivo deste trabalho:

Pode-se dizer, com certa precisão, baseado nas modelagens feitas, que o lançamento de poluentes pelos emissários submarinos não interfere de forma determinante na balneabilidade das praias, principalmente quando analisamos a cidade do Rio de Janeiro. A eficácia dos emissários submarinos estudados varia de acordo com os parâmetros de projeto de cada um, mas adotando o indicador primordial (para a análise em questão) como sendo a dispersão dos poluentes a ponto de não comprometer a balneabilidade das praias, pode-se determinar que estes cumprem com o papel desejado.

Quanto aos lançamentos costeiros pontuais, estes devem ser acompanhados e monitorados de forma rígida, já que podem ser considerados como influências muito significativas na degradação da qualidade das águas das praias analisadas. O monitoramento e controle poderiam ajudar enormemente na melhoria da balneabilidade, principalmente das praias de mar aberto.

A grande distância entre os emissários se mostrou suficiente para que não sejam observados efeitos de interferência entre as plumas destes. No caso das fontes costeiras, por outro lado, observa-se o acúmulo de poluentes, que degradam a qualidade da água das praias em níveis mais elevados do que os que seriam obtidos em análises pontuais.

Por fim, como esperado, os parâmetros que influenciam no decaimento bacteriano foram determinantes nas variações nas plumas de contaminantes. A incidência de radiação solar se provou a mais significativa de todas. Logo, é extremamente indicado que estudos de balneabilidade ocorram em momentos de baixa incidência solar sobre o poluente: como visto, no verão e durante a madrugada. Desta forma, obtém-se os resultados relacionados com a pior taxa de decaimento, evitando conclusões errôneas sobre a balneabilidade e a influência de fontes poluentes sobre ela.

8. Referências

- AMORIM, M. S. N., 2010, *Investigação da influência do emissário submarino da Barra da Tijuca no seu entorno através do monitoramento de parâmetros de pH, salinidade, HPA's e carbono orgânico total*. Rio de Janeiro – RJ, PUC.
- CEDAE, 2012, *Programa de Saneamento da Barra da Tijuca, Recreio dos Bandeirantes e Jacarepaguá – PSBJ*. Disponível em: <<http://www.cedae.com.br/>>. Acesso em 20 de outubro de 2012
- CONAMA, Resolução nº 274 de 29 de novembro de 2000, Dispõe sobre os padrões de balneabilidade das águas.
- CONAMA, Resolução nº 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*.
- CONAMA, Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011, *Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA*.
- DE SOUSA E SILVA, M. G., 2011, *Otimização do Emissário do Rio Vermelho, Salvador – BA, via Modelagem Computacional*. Trabalho de Conclusão de Curso. Rio de Janeiro - RJ, UFRJ.
- DHN, Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2012. Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/dhn/chm/images/cartas/1501.html>>. Acesso em 03 de setembro de 2012.
- DUARTE, F. T., PEIXOTO, R. S., 2012, *Estudo da Influência dos Processos Sedimentológicos do Canal do Mangue no Porto do Rio de Janeiro com Auxílio da Modelagem Computacional*. Trabalho de Conclusão de Curso. Rio de Janeiro - RJ, UFRJ.
- FEITOSA, R. C., 2007, *Acoplamento de modelos de campo próximo e campo afastado com cinética de decaimento bacteriano variável – aplicações em emissários submarinos*. Rio de Janeiro - RJ, COPPE/UFRJ.

- FEITOSA, R. C., ROSMAN, P. C., 2007, *Emissários Submarinos de Esgoto: Aspectos de Qualidade da Água e Modelagem Computacional. Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. Capítulo1. ABRH. Fundação COPPETEC.
- GONÇALVES, F. B.; SOUSA, A. P., 2007, *Disposição Oceânica de Esgotos Sanitários – História, Teoria e Prática*. 1ªed. Rio de Janeiro – RJ, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES.
- INEA, Instituto Estadual do Ambiente, 2012, Balneabilidade das Praias. Disponível em:< <http://www.inea.rj.gov.br/fma/balneabilidade-praias.asp?cat=75>>. Acesso em 10 de novembro de 2012.
- LEI Nº 6.938, 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*.
- MACHADO, B. V., & DA SILVA, R. M., 2010, *Análise da Influência da Baía da Guanabara na Qualidade da Água das Praias Oceânicas Adjacentes através da Modelagem Computacional*. Trabalho de Conclusão de Curso. Rio de Janeiro - RJ, UFRJ.
- ROSMAN, P. C., 2009, *Modelagem Computacional para Suporte ao Monitoramento e Gestão Ambiental da Área de Influência do Emissário Submarino da Barra da Tijuca, RJ*. Rio de Janeiro – RJ, Fundação COPPETEC
- ROSMAN, P. C., 2012, *Referência Técnica do SisBaHiA®*. Rio de Janeiro - RJ, Fundação COPPETEC.
- SAMPAIO, M., 2003, *Estudo da Circulação Hidrodinâmica 3D e Troca de Massas d'Água da Baía de Guanabara*. Rio de Janeiro – RJ, UFRJ.
- SIQUEIRA, L. F., QUEIROZ, R. S., 2012, *Estudo para Revitalização do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu com Auxílio da Modelagem Computacional*. Trabalho de Conclusão de Curso. Rio de Janeiro – RJ, UFRJ.
- SPERLING, M. V., 2005. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. Belo Horizonte – MG, UFMG.
- TIAN, X., Roberts, P.J. TIAN, X., ROBERTS, P.J.W., DAVIERO, G.J., 2006, “Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers. IV: Stratified Flowing Water” ”Journal of Hydraulic Engineering, v.132, n. 4.