

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Giordano da Silva Jobim

**DISPERSÃO DE POLUENTES: SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO
LAGO GUAÍBA**

Porto Alegre
julho 2012

Giordano da Silva Jobim

**DISPERSÃO DE POLUENTES: SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO
LAGO GUAÍBA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientadora: Edith Beatriz Camaño Schettini

Porto Alegre
julho 2012

Giordano da Silva Jobim

**DISPERSÃO DE POLUENTES: SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO
LAGO GUAÍBA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 4 de julho de 2012

Profa. Edith Beatriz Camaño Schettini
Dra. pelo Institut National Polytechnique de Grenoble, França
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Beluco (IPH/UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Alba Valeria Brandão Canellas (FURNAS S/A)
Ma. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Marcelo Giuliam Marques (IPH/UFRGS)
Dr. pela Université Laval, Canadá

Profa. Edith Beatriz Camaño Schettini (IPH/UFRGS)
Dra. pelo Institut National Polytechnique de Grenoble, França

Dedico este trabalho a meus pais, Ruy e Alda, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Profa. Edith Beatriz Camaño Schettini, orientadora deste trabalho. Seu apoio, carinho e dedicação forneceram a base mais sólida que eu poderia desejar para trilhar o Curso de Graduação.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt. Suas indicações foram imprescindíveis para o sucesso deste trabalho.

Agradeço aos colegas Gabriel Bernardes, Bruna Grochot e Édina Quissini, por sua contribuição inestimável durante a graduação.

Agradeço aos meus amigos, diversos que são, por fazerem parte da minha vida. Ao Loren, Sam, Bill e Audrey por reacenderem parte de minha infância.

Agradeço em especial ao Eng. Carlos Henrique Reis e Silva, pela confiança e torcida.

Agradeço à minha noiva, Fernanda, pelo amor dedicado ao longo de todos esses anos.

Agradeço ao meu irmão, Samuel, por sempre me forçar a buscar o meu melhor.

Agradeço aos meus pais, Ruy e Alda, por tudo.

Ambiente limpo não é o que mais se limpa e sim o que
menos se suja.

Chico Xavier

RESUMO

Esgotos, sanitário e industrial, são despejados nos corpos d'água muitas vezes sem qualquer tratamento, contaminando seu receptor direto e sendo transportados até sua dispersão ou deposição. O lago Guaíba recebe águas de diversos afluentes e, com elas, os rejeitos de grande parte do estado do Rio Grande do Sul, sendo assim fundamental compreender a dinâmica do Lago para prever e minimizar impactos ambientais. Visando simular o comportamento destes poluentes, realizou-se a modelagem numérica do Lago. Foram abordadas as características geográficas da região estudada, bem como as do indicador de poluição, sua importância e valores limites e as premissas básicas do modelo numérico escolhido. Foi feita ainda uma análise detalhada dos dados de entrada e a abordagem utilizada em sua obtenção. O resultado do estudo consistiu em um conjunto de mapas de dispersão capazes de representar o comportamento dos coliformes fecais despejados no lago Guaíba. A partir destes resultados elaborou-se um mapa com a localização e magnitude dos impactos ambientais. Constatou-se a necessidade de medidas corretivas, uma vez que fortes focos de contaminação foram detectados próximos à margem esquerda do Lago. Por fim, foi feita a análise do projeto atualmente em desenvolvimento por parte da prefeitura de Porto Alegre (Projeto Integrado Socioambiental), o qual se provou eficaz.

Palavras-chave: Lago Guaíba. Contaminação Hídrica. Dispersão de Poluentes. Modelagem Numérica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa.....	17
Figura 2 – Lago Guaíba.....	18
Figura 3 – Afluentes do lago Guaíba	19
Figura 4 – Bacias da Região Hidrográfica do Guaíba.....	21
Figura 5 – Padrão de ventos em Porto Alegre de 1995 até 2011.....	23
Figura 6 – Gráfico de Concentração de Coliformes do Rio Caí.....	39
Figura 7 – Gráfico de Concentração de Coliformes do Rio dos Sinos.....	39
Figura 8 – Gráfico de Concentração de Coliformes do Rio Gravataí.....	40
Figura 9 – Gráfico de Concentração de Coliformes do Rio Jacuí.....	40
Figura 10 – Sistemas de Esgoto Sanitário de Porto Alegre.....	42
Figura 11 – Localização dos Despejos de Efluentes no Lago Guaíba.....	44
Figura 12 – Evolução Temporal.....	50
Figura 13 – Influência do Vento.....	52
Figura 14 – Influência dos Afluentes.....	54
Figura 15 – Influência das Cidades Lindeiras.....	55
Figura 16 – Mapa de Classes.....	56
Figura 17 – Comparação dos Mapas de Classe.....	57
Figura 18 – Gráficos de Dispersão para a Simulação do Pisa.....	60
Figura 19 – Balneabilidade para o Pisa.....	61
Figura 20 – Importância do Pisa para Baixas Concentrações.....	62
Figura 21 – Importância do Pisa para Altas Concentrações.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela climatológica de Porto Alegre.....	24
Tabela 2 – Resumo dos Limites das Classes de Poluentes.....	31
Tabela 3 – Monitoramento dos Afluentes.....	38
Tabela 4 – Concentração Média de Coliformes por Afluente.....	41
Tabela 5 – Distribuição Populacional e Contribuição <i>per Capita</i> por SES.....	43
Tabela 6 – Consolidação dos Dados Antrópicos.....	45
Tabela 7 – Consolidação dos Dados de Vento.....	47
Tabela 8 – Comparação dos Resultados.....	58

LISTA DE SIGLAS

- UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- Fepam – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler
- UHE – Usina Hidrelétrica
- ICEA – Instituto de Controle do Espaço Aéreo
- OD – Oxigênio Dissolvido
- DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
- E. coli* – *Escherichia coli*
- Cetesb – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- NMP – Número mais provável
- SES – Sistema de esgoto sanitário
- PDE – Plano Diretor de Esgotos de Porto Alegre
- Pisa – Projeto Integrado Socioambiental
- RHG – Região Hidrográfica do Guaíba

LISTA DE SÍMBOLOS

- x – coordenada cartesiana (m)
- y – coordenada cartesiana (m)
- U – componentes do vetor velocidade nas direções x (m/s)
- V – componentes do vetor velocidade nas direções y (m/s)
- z – nível medido a partir de um plano de referência fixo (m)
- H – profundidade referida a partir de um plano de referência fixo (m)
- H – profundidade total (m)
- Ω – aceleração de Coriolis (m/s^2)
- τ_{sx} – componente da tensão de cisalhamento na superfície (Pa)
- τ_{sy} – componente da tensão de cisalhamento na superfície y (Pa)
- C_h – coeficiente de Chézy
- ε – coeficiente de dissipação turbulenta
- C – concentração integrada na vertical
- D_x – coeficiente de dispersão na direção x
- D_y – coeficiente de dispersão na direção y
- K – coeficiente de decaimento
- C_w – coeficiente de atrito do vento
- D_l – coeficiente de difusão longitudinal
- D_t – coeficiente de difusão transversal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	15
2.2.1 Objetivo Principal	15
2.2.2 Objetivo Secundário	15
2.3 PRESSUPOSTOS	15
2.4 DELIMITAÇÃO	16
2.5 LIMITAÇÕES	16
2.6 DELINEAMENTO	16
3 ÁREA DE ESTUDO	18
3.1 LAGO GUAÍBA	18
3.1.1 Rio Jacuí	20
3.1.2 Outros Afluentes	21
3.2 CLIMA	22
3.3 REGIME DE VENTOS	22
4 DESCARTE DE RESÍDUOS	26
4.1 INDICADORES	26
4.2 LIMITES	27
4.2.1 Classe 1	28
4.2.2 Classe 2	29
4.2.3 Classe 3	29
4.2.4 Classe 4	30
4.2.5 Balneabilidade	30
5 MODELAGEM	32
5.1 MODELO HIDRODINÂMICO	32
5.1.1 Equações	33
5.1.2 Resolução do problema	34
5.2 CARACTERÍSTICAS	34
6 DADOS DE ENTRADA	36
6.1 DADOS ANTRÓPICOS.....	36
6.1.1 Carga dos Afluentes	37
6.1.2 Carga de Esgotos	41

6.1.2.1 Porto Alegre.....	41
6.1.2.2 Guaíba e Barra do Ribeiro.....	44
6.1.2.3 Projeto Integrado Socioambiental – Pisa.....	46
6.2 DADOS NATURAIS.....	46
6.2.1 Vazões.....	46
6.2.2 Ventos.....	47
6.2.3 Outras Características.....	48
7 RESULTADOS.....	49
7.1 EVOLUÇÃO TEMPORAL.....	49
7.2 INFLUÊNCIA DO VENTO.....	51
7.3 INFLUÊNCIA DOS AFLUENTES.....	53
7.4 INFLUÊNCIA DAS CIDADES LINDEIRAS.....	54
7.5 MAPA DE CLASSES.....	55
7.6 COMPARAÇÃO COM TRABALHO ANTERIOR.....	57
7.7 ANÁLISE DO PISA.....	59
8 CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A questão do descarte dos resíduos, gerados pela mera existência humana nas dimensões atuais, torna-se progressivamente mais crítica. Isso porque o método atual de descarga dos contaminantes em corpos d'água é inadequado sempre que as quantidades despejadas superarem a sua capacidade de processar estes poluentes. Casos nos quais grandes cargas de resíduos orgânicos são lançadas sequencialmente e, muitas vezes, sem maiores precauções são comuns.

Os rios Caí e dos Sinos, por exemplo, tornam-se Classe 4¹ a partir de Cachoeirinha (RS) e Santa Cristina (RS), respectivamente, sendo, em ambos os casos, analisadas as quantidades de coliformes fecais por volume de água (LEITE et al., 1998, p. 3). O problema torna-se ainda mais complexo à medida que diversos poluentes não são processados naturalmente, acabando por gerar problemas que podem durar décadas, como o caso do Rio São Francisco, no trecho próximo a Três Marias (MG), que possui forte foco de contaminação por metais pesados ainda que as descargas de poluentes já estejam encerradas (AYER, 2011).

Enquanto não há solução satisfatória para o descarte de resíduos, tornam-se necessárias atitudes corretivas no sentido de reduzir os impactos gerados. Para tal, precisa-se conhecer o comportamento destes poluentes após a liberação no corpo receptor, considerando questões como a dispersão, evaporação, degradação biológica dentre outras, sendo estes fatores variáveis em função do poluente analisado. Usualmente, quando estes contaminantes são monitorados, eles o são a partir de medições pontuais, gerando uma série de dados de concentração por tempo. Porém, essas informações mostram muito pouco sobre o comportamento das concentrações de poluentes uma vez que não há dados sobre o comportamento prévio e posterior dos contaminantes.

Para contornar este problema, pode-se fazer uso de modelos para simular as ocorrências observadas e, dessa forma, obter dados mais completos para balizar uma possível tomada de decisão. Dentre os modelos existentes, a modelagem numérica torna-se particularmente

¹Na resolução n. 20 do Conama, art. 1., são definidos como corpos d'água de Classe 4 aqueles com quantidades excessivas de poluentes, adequados apenas para navegação, paisagismo e usos pouco exigentes (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986), conforme será explicado na página 30.

interessante por ser um método barato (havendo os dados necessários), rápido e, uma vez bem ajustado, preciso. Porém, como trata-se de uma simulação, os resultados não são gerais, e sim restritos à área estudada e às variáveis consideradas.

Para o presente estudo, foi definido como área de estudos o lago Guaíba. Foi simulado o despejo de coliformes em diferentes pontos do Lago com o intuito de obter resultados significativos do comportamento dos poluentes. Foram utilizados dados estimados, uma vez que o monitoramento das descargas de poluentes é ineficaz, inexistente ou não divulgado. A partir destas informações, pode-se concluir sobre a amplitude do impacto ambiental gerado, além de destacar os locais mais críticos de concentração destes poluentes.

O próximo capítulo trata das diretrizes do estudo, definindo os princípios norteadores da pesquisa. O capítulo 3 aborda área de estudos do trabalho discorrendo brevemente sobre as suas características geográficas e socioeconômicas, enquanto o capítulo 4 trata da forma de análise e consideração dos poluentes. O capítulo 5 apresenta o modelo hidrodinâmico e suas características, enquanto o capítulo 6 trata exclusivamente da descrição dos dados de entrada e dos esforços empregados em sua obtenção. O resultado das simulações numéricas está apresentado no capítulo 7, junto com sua análise, reservando o oitavo capítulo a conclusão do estudo.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: que impactos ambientais ocorrem no lago Guaíba devido aos despejos de esgoto sanitário oriundos das cidades do entorno e trazidos pelos afluentes principais?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é o mapeamento e análise, em termos de localização e magnitude, das concentrações de coliformes geradas no lago Guaíba devido ao despejo de esgoto sanitário nas condições atuais e sob diferentes hipóteses.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é a visualização do comportamento dos poluentes despejados no lago Guaíba em seu processo de dispersão em diferentes condições.

2.3 PRESSUPOSTOS

O trabalho tem por pressupostos que:

- a) o lago Guaíba tem seu comportamento compatível com o esperado para um corpo d'água bidimensional;
- b) no que tange o comportamento dos poluentes em processo de dispersão, os efeitos de maré não são relevantes.

2.4 DELIMITAÇÃO

O trabalho delimita-se à região abrangida pelo lago Guaíba, bem como às cidades vizinhas de Porto Alegre, Guaíba e Barra do Ribeiro.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a falta de dados confiáveis para valores das cargas de poluentes e vazões, de forma que foi necessário o uso de dados estimados ou de representatividade inadequada;
- b) locação dos pontos de despejo definida de forma simplificada;
- c) o uso do software IPH-A como única ferramenta de modelagem e simulação.

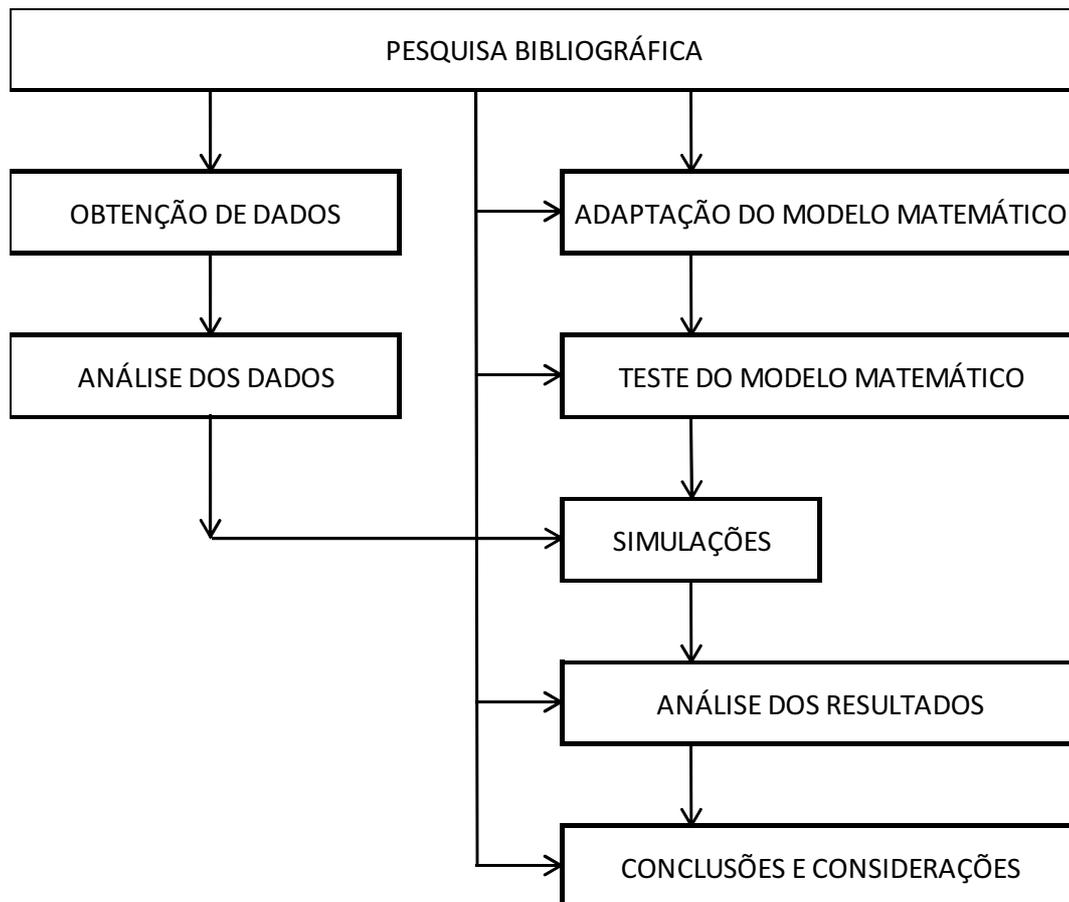
2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) análise e compilação dos dados existentes;
- c) adaptação e teste do modelo matemático;
- d) simulação;
- e) análise dos resultados obtidos;
- f) conclusão e considerações.

Primeiramente, a pesquisa bibliográfica teve como foco a obtenção de referências para os parâmetros que são utilizados como condições de contorno (ventos, vazões, carga de poluentes e outros). Após esta etapa, sua função foi fornecer dados para cada uma das etapas do processo.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

O primeiro passo do trabalho, portanto, levantou uma grande quantidade de dados referentes ao problema dos poluentes no lago Guaíba. Dentre estes, muitos definindo as características físicas do Lago, necessárias para a adequação do modelo numérico.

Realizou-se, então, um processo de conformação das informações obtidas com o formato desejado, de forma a converter, por exemplo, valores de concentrações de poluentes e vazões de rios em carga de poluentes. O processo de montagem do modelo ocorreu simultaneamente ao levantamento dos dados, e o teste do modelo coincidiu com a conversão das informações.

De posse do modelo numérico e dos dados de entrada, foram realizadas as simulações. Como resultado, obteve-se uma série de mapas de dispersão que, após devidamente analisados, serviram como base para as conclusões e considerações finais do trabalho.

3 ÁREA DE ESTUDO

A modelagem numérica não fornece resultados genéricos, uma vez que os modelos calculam a resposta de um sistema específico a um conjunto de condições pré-determinadas. Ela exige um trabalho de conformação do modelo, e, posteriormente, a entrada de dados referentes a um objeto de estudo específico. Neste caso, o foco da modelagem foi o lago Guaíba. Esse capítulo visa explorar com maiores detalhes as características desta Região.

3.1 LAGO GUAÍBA

O lago Guaíba (RS), ilustrado na figura 2, ocupa 496 km² e é o grande depositário das águas de sua bacia hidrográfica, que abrange uma área de 84.700 km² (30% do Estado do Rio Grande do Sul) e compreende mais de 250 municípios e, aproximadamente, 6,5 milhões de habitantes (NICOLODI, 2007).

Figura 2 – Lago Guaíba



(fonte: NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, [200-])

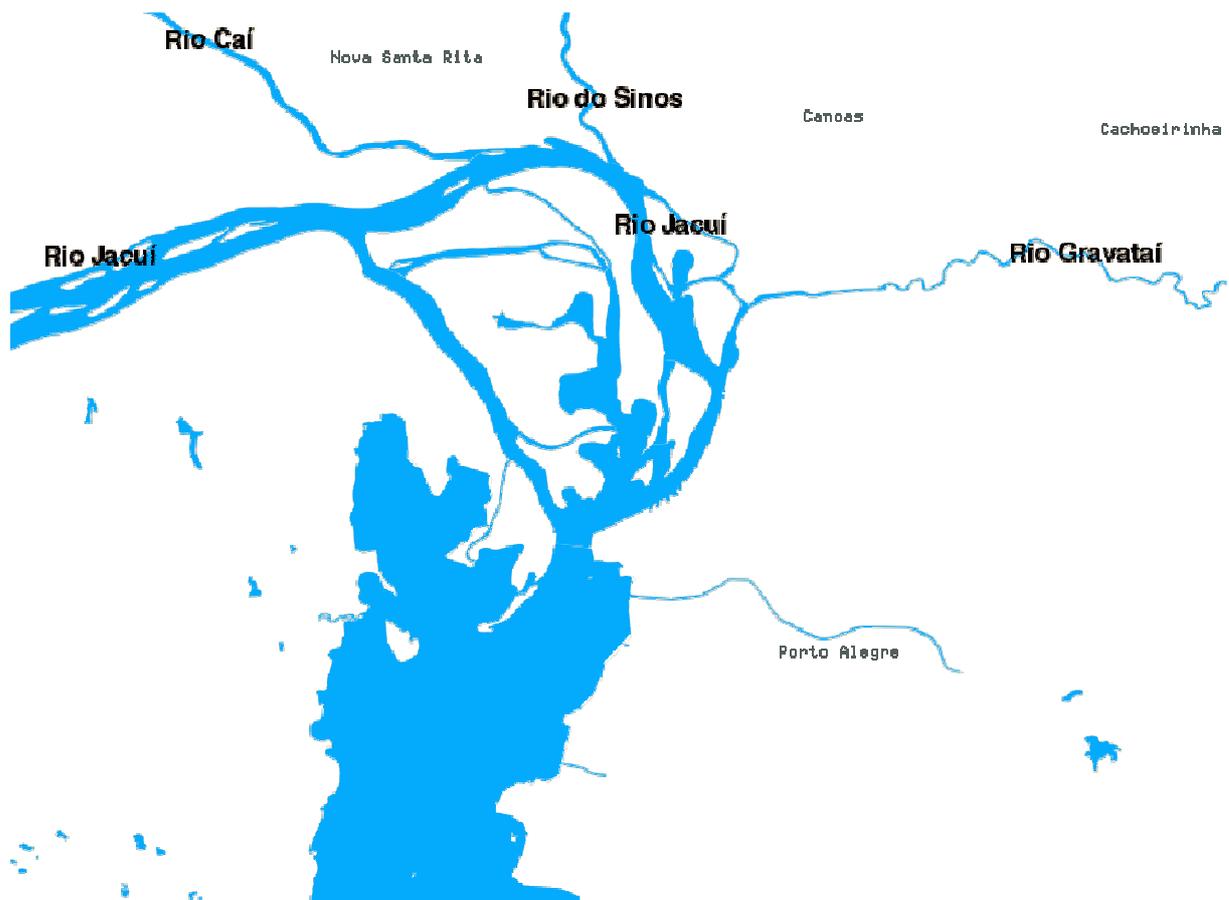
Ele banha os municípios de Porto Alegre, Eldorado do Sul, Guaíba, Barra do Ribeiro e Viamão, e seus principais afluentes são os rios Jacuí, Caí, dos Sinos e Gravataí. Sobre as dimensões do Lago, Lopes (2007, p. 10) acrescenta:

[...] [Ele possui] cerca de 50 km de comprimento por 12 km de largura média, sentido sudeste-noroeste e profundidades variando entre 5 e 6 metros. Nos sacos, as profundidades variam entre 2 e menos de 1 metro. No canal do Lago ocorrem bolsões com profundidades entre 20 e 60 metros no canal de navegação.

Ainda hoje há divergências sobre a classificação do corpo d'água, mas oficialmente ele é definido como lago. Algumas de suas características que o classificam como tal são particularmente importantes para este estudo, a saber (MENEGAT, 1999):

- a) o escoamento da água é bidimensional;
- b) cerca de 85% da água fica no reservatório por um grande período de tempo.

Figura 3 – Afluentes do lago Guaíba



(fonte: RIO GRANDE DO SUL, 2011)

No lago Guaíba desaguam quatro grandes rios, recebendo assim toda a sorte de resíduos que eles carreguem. Nos próximos tópicos, será feita uma breve consideração a respeito desses afluentes, ilustrados na figura 3.

3.1.1 Rio Jacuí

O rio Jacuí contribui com cerca de 85% da água do lago Guaíba, o que torna vital a compreensão de suas características para o entendimento das dinâmicas do Lago. A Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler² ([entre 2002 e 2011]) descreve-o da seguinte forma:

A bacia hidrográfica do rio Jacuí tem área de 71.600 km², que corresponde a 83,5% da área da região hidrográfica do Guaíba.

O rio Jacuí nasce no Planalto, nos municípios de Passo Fundo e Marau, e toda a sua área de drenagem caracteriza-se pelo uso intensivo do solo para agricultura e pecuária.

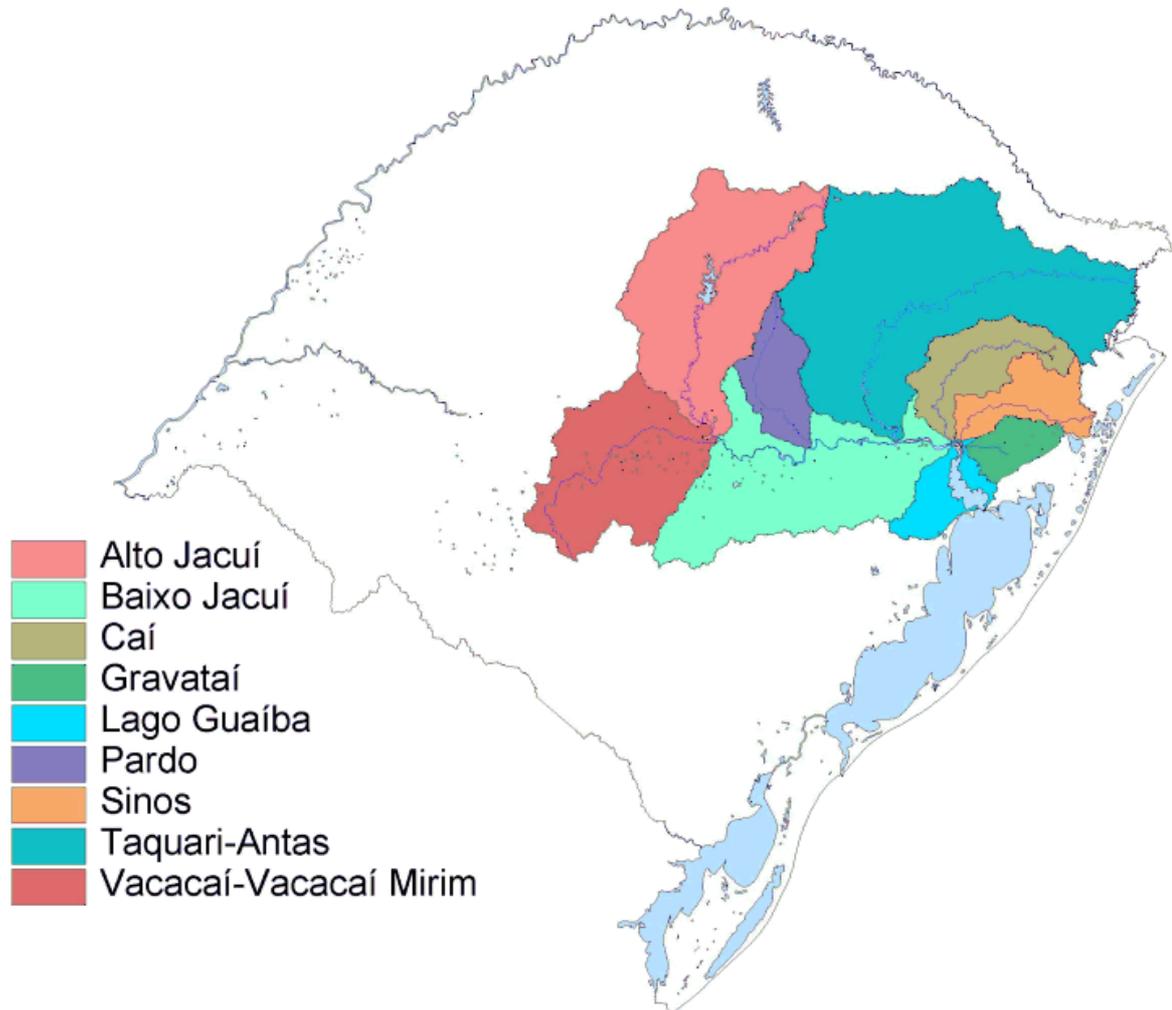
O seu trecho superior caracteriza-se também pelo aproveitamento energético, onde estão instaladas as usinas hidrelétricas (UHE) Ernestina, Passo Real, Salto do Jacuí, Itaúba e Dona Francisca.

O rio Jacuí tem suas principais nascentes localizadas no Planalto, cerca de 10 km a leste da cidade de Passo Fundo, numa altitude aproximada de 730 m. Seu comprimento total aproximado é de 710 km. Corre, na direita, o rio Jacuí-Mirim; muda para a direção sul até a Depressão Central, onde recebe as águas dos rios Vacacaí-Mirim e Vacacaí na margem direita. Daí toma a direção oeste-leste, com a denominação de Baixo Jacuí recebe a contribuição do rio Taquari na margem esquerda, e percorrendo cerca de 300 km até sua foz, com a formação do Delta do Jacuí, onde desembocam os rios Gravataí, Sinos e Caí.

O rio Jacuí recebe as águas de diversos rios que compõem a região hidrográfica do Guaíba (RHG), conforme mostra a figura 4. Pode-se perceber claramente a contribuição de três bacias hidrográficas durante o curso do Rio: a do rio Pardo, a dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim e a dos rios Taquari e Antas. Cada um destes descarrega no rio Jacuí, além de sua vazão em água, toda a carga de esgotos provenientes das cidades em seus cursos.

² A Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (Fepam) é uma instituição vinculada à Secretaria Estadual do Meio Ambiente (RS), sendo responsável pelo licenciamento ambiental no Rio Grande do Sul.

Figura 4 – Bacias da Região Hidrográfica do Guaíba



(fonte: RIO GRANDE DO SUL, 2012)

3.1.2 Outros Afluentes

Os rios dos Sinos, Caí e Gravataí contribuem em menor grau para a dinâmica do lago Guaíba, sendo responsáveis por aproximadamente 7,5%, 5% e 2,5% das descargas do Lago, respectivamente. Sua contribuição em poluentes é, entretanto, extremamente significativa uma vez que os três rios figuram entre os dez mais poluídos do Brasil (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010).

3.2 CLIMA

O clima da região é definido como subtropical úmido (tipo Cfa) pela classificação de Köppen, sendo as chuvas bem distribuídas durante o ano e as temperaturas médias do mês mais quente superiores a 22°C (NICOLODI, 2007). A temperatura média do ar é 19,4°C e, para o período entre 1912 e 1997, a precipitação anual média foi de 1324 mm (LIVI³, 1998 apud NICOLODI, 2007).

3.3 REGIME DE VENTOS

Schubert et al.⁴ (2002 apud NICOLODI, 2007, p. 4) resumiu as condições que determinam o comportamento dos ventos na região de estudo:

No escoamento atmosférico sobre o Rio Grande do Sul prevalecem os efeitos ditados pela dinâmica entre o anticiclone subtropical Atlântico, os intermitentes deslocamentos de massas polares e a depressão barométrica do nordeste da Argentina. O anticiclone subtropical Atlântico é um centro de altas pressões sobre o Oceano Atlântico que se localiza em torno de 30°S; sendo fonte de massas de ar quente e úmido, transportadas pelo vento nordeste. Os anticiclones de origem polar geralmente se deslocam para o norte transportando massas de ar frio e seco. A passagem de sistemas frontais é mais frequente durante o inverno, possuindo período médio de 6 dias. Já a depressão barométrica do nordeste da Argentina é uma área quase permanente de baixas pressões, geralmente estacionária a leste dos Andes, cuja posição anual média é de aproximadamente 29°S, 66°W. Esta depressão é causada pelo bloqueio da circulação geral atmosférica imposto pela parede montanhosa dos Andes e acentuada pelo intenso aquecimento das planícies de baixa altitude da região.

Existem diversos estudos acerca dos padrões de ventos no Rio Grande do Sul, começando pelos estudos de Coussirat de Araújo, em 1930, passando pelos trabalhos de José Alberto Moreno, nos anos 60, Fernando Pohlmann Livi, nos anos 90 e culminando pela elaboração, em 2002, do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (NICOLODI, 2007).

Além destes estudos, ainda há um extenso banco de dados de medições climatológicas disponibilizado na internet pelo Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA)⁵. Ele contém

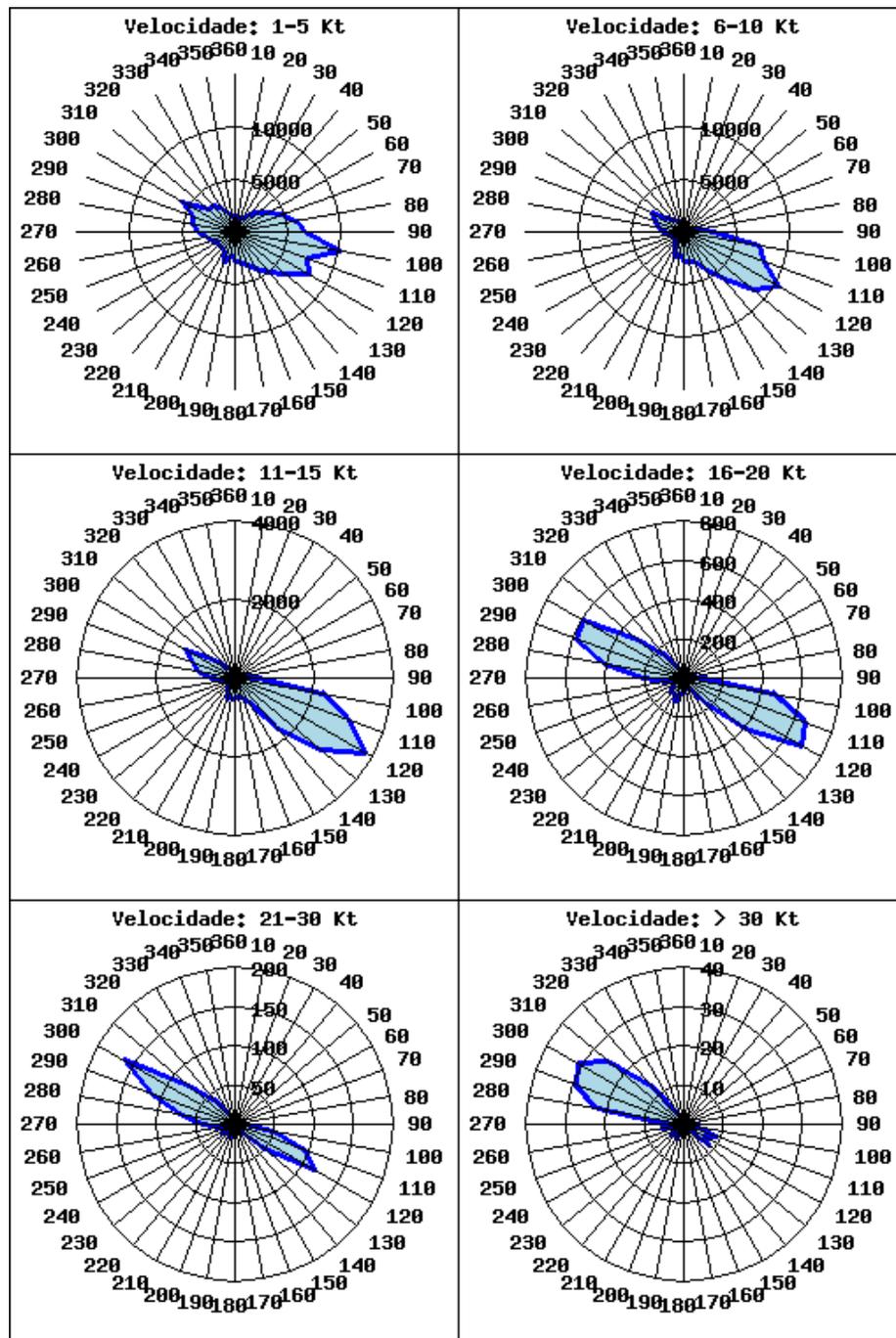
³ LIVI, F. P. Elementos do clima : o contraste de tempos frios e quentes. In: **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1999. p. 73-78.

⁴ SCHUBERT, C.; AMARANTE, O. A. C. do; SILVA, S. J. L. da. **Atlas eólico**: Rio Grande do Sul. Porto Alegre: SEMC, 2002.

⁵ O **ICEA** é a organização do Comando da Aeronáutica que tem por finalidade capacitar recursos humanos e realizar pesquisas e desenvolvimentos no âmbito do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro.

séries temporais referentes não só a ventos, mas também a umidade, precipitação, pressão, temperatura dentre outros. A figura 5 representa graficamente a frequência e direção de incidência de ventos em Porto Alegre no período de 1995 até 2011. As velocidades estão dadas em nós (Kt), a direção em graus (onde 360° representa a direção norte) e a quantidade total de incidências no período está dada em unidades.

Figura 5–Padrão de ventos em Porto Alegre de 1995 até 2011



(fonte: BRASIL, 2011)

Visualiza-se claramente o predomínio do vento leste-sudeste para baixas velocidades, e do vento oeste-noroeste para velocidades maiores. Porém, o número de medições para ventos acima de 15 nós foi muitas vezes menor do que para velocidades menores. Portanto, apenas os gráficos da figura não são suficientes para a compreensão da questão, uma vez que existem dados sobre o total de ocorrências, mas faltam informações descrevendo como elas se distribuem.

Analisando as tabelas climatológicas do Aeroporto Salgado Filho (BRASIL, 2007), percebe-se a ocorrência do vento oeste-noroeste durante o mês de julho e, em menor grau, no mês de maio (tabela 1). As colunas 1 e 2 fornecem os dados referentes aos ventos predominantes médios do período, no formato direção (graus)/ velocidade (nós).

Tabela 1– Tabela climatológica de Porto Alegre

1981 a 1990														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mês	1º vento predominante	2º vento predominante	Temperatura média	Média das temperaturas máximas	Média das temperaturas mínimas	Temperatura máxima	Dia e ano da temperatura máxima	Temperatura mínima	Dia e ano da temperatura mínima	Umidade relativa média	QFE médio	Quantidade total de precipitação	Quantidade máxima diária de precipitação	Dia e ano da quantidade máxima de precipitação
JAN	100/08	090/07	25,3	30,7	21	40	16/86	10	19/90	73	1.010	88,1	35,1	10/87
FEV	100/07	090/07	25,5	30,9	21,2	38,4	15/86	13	27/89	75	1.012	118,0	36,8	13/81
MAR	100/07	090/06	23,8	29,3	19,5	39	21/88	7	28/90	76	1.013	94,9	42,8	16/86
ABR	100/06	090/06	20,9	25,8	16,7	36	09/89	6	09/88	83	1.015	118,8	30,5	02/90
MAI	090/05	270/06	16,9	22,2	12,7	33,2	13/82	1	26/88	83	1.015	118,0	30,8	13/87
JUN	270/06	280/06	14,1	19,3	10,2	40	21/81	-1	02/88	85	1.017	150,5	20,3	15/82
JUL	090/05	100/06	14,4	19,5	10,4	33,5	25/87	-1	10/88	83	1.014	111,1	12,9	06/84
AGO	090/06	100/06	15,8	21	11,6	35	24/88	0	29/90	80	1.018	127,2	16,6	15/87
SET	100/07	090/07	17	21,8	13,1	34,6	16/82	2	03/88	80	1.017	126,8	19,2	11/90
OUT	100/07	090/07	19,9	25,5	15,3	37,2	14/85	5	17/88	77	1.014	127,4	37,4	19/90
NOV	100/08	110/08	22,2	27,6	17,6	41	15/85	9	01/89	75	1.012	129,3	38,5	08/87
DEZ	100/08	110/08	23,8	29,5	19	38,6	01/87	11	22/89	72	1.011	82,6	25	31/83

(fonte: BRASIL, 2007)

Portanto, fica claro que existe um comportamento sazonal para o regime de ventos. Nicolodi (2007, p. 32) relaciona essas variações com as estações do ano:

Estas variações sazonais podem ser explicadas, em parte, pela ação dos dois tipos de sistemas de alta pressão que atuam na região. No verão, quando o gradiente barométrico é mais acentuado, os ventos sopram com mais constância e regularidade. No outono, verifica-se um equilíbrio entre os valores barométricos no Atlântico e no território gaúcho, ocasionando uma diminuição da movimentação das massas de ar.

Já no inverno, a área de alta pressão desloca-se para norte e predomina no interior do continente outra área de altas pressões, aumentando a tendência a ventos de W e NW. Na primavera permanece o regime misto de ventos dos quadrantes W e E (quando considerados apenas os 4 principais quadrantes), com predomínio dos últimos. Esta é a estação mais ventosa do ano, especialmente nos meses de setembro e outubro.

Os ventos menos frequentes são, portanto, os mais intensos. Isso dificulta a definição de qual o vento mais influente para a dinâmica do Lago. Para este estudo, foram considerados os seis tipos de vento apresentados na figura 5 e, posteriormente, feita a análise de suas influências.

4 DESCARTE DE RESÍDUOS

O problema do descarte de resíduos não é novo. Uma vez que detritos são resultado não somente da produção humana, mas de sua mera existência, eles existem, em maior ou menor grau, onde quer que exista vida. Existe uma certa capacidade do meio-ambiente de processar e dissipar a grande maioria destes compostos, porém com a progressiva urbanização e industrialização os volumes produzidos assumiram proporções muito acima desse limite.

Um estudo completo de todos os tipos de poluentes seria impraticável, de modo que foram focados aqueles decorrentes do despejo de esgoto sanitário que é um dos mais significativos (em torno de 130 l/pessoa/dia). Este capítulo trata dos pontos principais para o presente estudo sobre este tema.

4.1 INDICADORES

Primeiramente, precisa-se definir algum parâmetro como indicador da presença do poluente em questão. Para a análise de esgoto sanitário, a questão mais significativa é o potencial patogênico da contaminação e, dessa forma, o fator mais relevante é a presença de micro-organismos.

Dentre os indicadores utilizados para detecção de contaminação por esgoto sanitário, os coliformes fecais são amplamente utilizados pela rapidez e simplicidade da análise. Cerqueira e Horta (1999, p. 1242) defendem que o nome da variável analisada deveria ser coliforme termotolerante e contestam seu uso como indicador de contaminação fecal em ambientes aquáticos:

Coliformes Totais não são, definitivamente, parâmetro de avaliação das condições sanitárias de ambientes aquáticos. Devido à sua simplicidade de processamento e larga documentação de uso esse parâmetro deve continuar sendo aplicado em avaliações dos processos de tratamento e da integridade das unidades de distribuição dos sistemas de abastecimento. Coliformes Termotolerantes, anteriormente assumidos como fecais, não é parâmetro sensível para uma avaliação criteriosa da exposição de ambientes aquáticos à poluição fecal, humana e animal. Nesse sentido, uma vasta documentação técnico-científica sustenta a utilização da espécie *Escherichia coli* (*E. coli*). O teste convencional para a determinação de coliformes termotolerantes (ex-fecais) mostra-se inviável devida à dificuldade em se manter a variação máxima de 0,2°C nas estufas e banho-marias e inespecífico considerando

que engloba espécies ambientais dos gêneros *Klebsiella* e *Enterobacter*. Dessa forma recomenda-se a utilização de coliformes para avaliação de processo de tratamento e da *E. coli* como parâmetro de avaliação bacteriológica da água na fonte. É aconselhável a inclusão de parâmetros microbiológicos auxiliares como Clostrídios sulfito-redutores e Colifagos para otimizar o controle da qualidade da água dos sistemas de abastecimento.

Já a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) define-os e sugere seu uso da seguinte forma (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009, p. 28-29):

[Coliformes termotolerantes] São definidos como microrganismos do grupo coliforme capazes de fermentar a lactose a 44-45°C, sendo representados principalmente pela *Escherichia coli* e, também por algumas bactérias dos gêneros *Klebsiella*, *Enterobacter* e *Citrobacter*. Dentre esses microrganismos, somente a *E. coli* é de origem exclusivamente fecal, estando sempre presente, em densidades elevadas nas fezes de humanos, mamíferos e pássaros, sendo raramente encontrada na água ou solo que não tenham recebido contaminação fecal. Os demais podem ocorrer em águas com altos teores de matéria orgânica, como por exemplo, efluentes industriais, ou em material vegetal e solo em processo de decomposição. Podem ser encontrados igualmente em águas de regiões tropicais ou sub-tropicais, sem qualquer poluição evidente por material de origem fecal. Entretanto, sua presença em águas de regiões de clima quente não pode ser ignorada, pois não pode ser excluída, nesse caso, a possibilidade da presença de microrganismos patogênicos.

Os coliformes termotolerantes não são, dessa forma, indicadores de contaminação fecal tão bons quanto a *E. coli*, mas seu uso é aceitável para avaliação da qualidade da água. São disponíveis métodos rápidos, simples e padronizados para sua determinação, e, se necessário, as bactérias isoladas podem ser submetidas a diferenciação para *E. coli*. Além disso, na legislação brasileira, os coliformes fecais são utilizados como padrão para qualidade microbiológica de águas superficiais destinada a abastecimento, recreação, irrigação e piscicultura.

A contaminação fecal representa um problema sério de saúde pública, uma vez que transforma o corpo d'água contaminado em um vetor para o espalhamento de patógenos como, por exemplo, cólera, febre tifóide, gastroenterite, hepatite A, poliomielite e outras tantas. Sua importância é exemplificada através de estudos como Bendati et al. (2000), no qual foram monitorados diversos indicadores de poluição, mas o mapa final de qualidade das águas foi baseado unicamente na análise da concentração de coliformes.

4.2 LIMITES

A existência de indicadores de poluição não representa muito sem a existência de parâmetros de controle. Porém, esse controle depende do uso desejado para o corpo d'água, uma vez que

as condições exigidas para um ponto de balneabilidade são completamente diferentes daquelas esperadas para um canal da navegação.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) define diferentes classificações para os corpos d'água, separando-os pelas possibilidades de uso de acordo suas condições de segurança. As classes (apenas para águas doces), restrições e limites estão descritas a seguir.

4.2.1 Classe 1

São águas doces de Classe 1 aquelas destinadas (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986, art. 1.):

- a) ao abastecimento doméstico após tratamento simplificado;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho);
- d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao Solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película;
- e) à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas á alimentação humana.

Para o indicador anteriormente referido nesse trabalho, as condições necessárias para o enquadramento são (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986, art. 4.):

coliformes: para o uso de recreação de contato primário deverá ser obedecido o art. 26.⁶ desta Resolução. As águas utilizadas para a irrigação de hortaliças ou plantas frutíferas que se desenvolvam rentes ao Solo e que são consumidas cruas, sem remoção de casca ou película, não devem ser poluídas por excrementos humanos, ressaltando-se a necessidade de inspeções sanitárias periódicas. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 200 coliformes fecais por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 5 amostras mensais colhidas em qualquer mês; no caso de não haver na região meios disponíveis para o exame de coliformes fecais, o índice limite será de 1.000 coliformes totais por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 5 amostras mensais colhidas em qualquer mês;

⁶ O art. 26. trata das condições referentes à balneabilidade (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986).

4.2.2 Classe 2

São águas doces de Classe 2 aquelas destinadas (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986, art. 1.):

- a) ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário (esqui aquático, natação e mergulho);
- d) à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas;
- e) à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.

Os limites de coliformes fecais para este enquadramento são (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986, art. 5.):

coliformes: para uso de recreação de contato primário deverá ser obedecido o art. 26.desta Resolução. Para os demais usos, não deverá ser excedido uma limite de 1.000 coliformes fecais por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 5 amostras mensais colhidas em qualquer mês; no caso de não haver, na região, meios disponíveis para o exame de coliformes fecais, o índice limite será de até 5.000 coliformes totais por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 5 amostras mensais colhidas em qualquer mês;

4.2.3 Classe 3

São águas doces de Classe 3 aquelas destinadas (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986, art. 1.):

- a) ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional;
- b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;
- c) à dessedentação de animais.

Para este enquadramento, os limites de coliformes são (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986, art. 6.):

número de coliformes fecais até 4.000 por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 5 amostras mensais colhidas em qualquer mês; no caso de não haver, na região, meios disponíveis para o exame de coliformes fecais, índice limite será de até 20.000 coliformes totais por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 5 amostras mensais colhidas em qualquer mês;

4.2.4 Classe 4

São águas doces de Classe 4 aquelas destinadas (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986, art. 1.):

- a) à navegação;
- b) à harmonia paisagística;
- c) aos usos menos exigentes.

O Conama não estabelece limite superior para a presença de coliformes para esta classe (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986, art. 6.).

4.2.5 Balneabilidade

No que concerne as condições de balneabilidade, o Conama define os seguintes limites (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986, art. 26.):

- a) EXCELENTE (3 estrelas) : Quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das 5 semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo, 250 coliformes fecais por 100 mililitros ou 1.250 coliformes totais por 100 mililitros;
- b) MUITO BOAS (2 estrelas): Quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das 5 semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo, 500 coliformes fecais por 100 mililitros ou 2.500 coliformes totais por 100 mililitros;
- c) SATISFATÓRIAS (1 estrela): Quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das 5 semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo 1.000 coliformes recais por 100 mililitros ou 5.000 coliformes totais por 100 mililitros;
- d) IMPRÓPRIAS: (...) não enquadramento em nenhuma das categorias anteriores, por terem ultrapassado os índices bacteriológicos nelas admitidos.

As informações anteriores estão condensadas na tabela 2:

Tabela 2 – Resumo dos Limites das Classes de Poluentes

	Categoria	Limite Superior (org/100ml)
Usos Diversos	Classe 1	200
	Classe 2	1000
	Classe 3	4000
	Classe 4	> 4000
Balneabilidade	Excelente	250
	Muito Boas	500
	Satisfatórias	1000
	Impróprias	> 1000

(fonte: elaborado pelo autor)

5 MODELAGEM

Dentre os diferentes métodos possíveis para a obtenção de informações sobre o comportamento de um sistema, a modelagem assume um papel de destaque. Isso porque permite a obtenção de resultados adequados tanto sobre o momento presente como para diferentes cenários – futuros ou de interesse. Porém, sua precisão está limitada pela capacidade do modelo de representar de forma fiel a realidade e pela qualidade das informações com as quais ele for alimentado. Para este estudo, será utilizado o software IPH-A, desenvolvido pelo prof. Alejandro Borche Casallas, da UFRGS. Este capítulo considerará brevemente as características mais relevantes deste método para o presente estudo.

5.1 MODELO HIDRODINÂMICO

A modelagem de sistemas hidrodinâmicos é complexa, de forma que o apoio de ferramentas computacionais é indispensável. O sistema IPH-A se insere neste contexto como compilador e simulador do comportamento hidrodinâmico de um sistema, levando em consideração questões referentes ao escoamento da água e ao transporte de massa através dela. O funcionamento básico do software pode ser resumido da seguinte forma (CASALAS, 1996, p. 1):

O sistema IPH-A pode ser usado no estudo de corpos de água em que as dimensões horizontais sejam fortemente predominantes sobre as dimensões verticais e no qual as componentes horizontais da velocidade possam ser descritas por valores médios na vertical. Em cada elemento da malha de cálculo são determinadas, durante o tempo de simulação, as variações de velocidade e de nível. Essas variações são obtidas em função das modificações que ocorrem nas condições de contorno estabelecidas nas fronteiras abertas (vazão ou nível) e da intensidade do vento que atua na superfície. Para o caso de transporte e difusão de contaminantes é utilizada, em cada iteração, a equação de advecção-difusão, obtendo-se a variação da concentração em cada elemento. Esta variação é calculada a partir do campo de velocidades, das variações de concentração nas fronteiras abertas e dos valores desta nos pontos em que o material poluente é despejado.

O método utilizado pelo sistema IPH-A, para a resolução numérica das equações que definem o escoamento, é baseado na técnica de diferenças finitas, semi-implícita de direções alternadas. As equações da continuidade e dinâmica, previamente integradas na vertical, consideram a perda de carga junto ao fundo, a ação do vento na superfície, a força de Coriolis e a difusão turbulenta. O mesmo método de direções alternadas porém explícito com interpolação exponencial é utilizado para solução numérica da equação de advecção-difusão.

A condição de aplicação do modelo a corpos d'água com dimensões verticais muito inferiores às horizontais se encaixa perfeitamente no caso de estudo. Não por acaso, o lago Guaíba é um dos exemplos dados para a utilização do software (CASALAS, 1996). Ressalta-se ainda a aplicabilidade do modelo ao Lago pela sua utilização em trabalhos como Paz et al. (2005) e Schwarzbach et al. (1997).

5.1.1 Equações

O sistema IPH-A utiliza duas equações básicas para descrever o transporte e difusão de contaminante em um escoamento bidimensional de pouca profundidade, a saber: as equações do escoamento (fórmula 1) e a equação de transporte de massa (fórmula 2) (CASALAS, 1996, p. 2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - \Omega V + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C_h^2 H} - \frac{\tau_{sx}}{\rho H} - \epsilon \nabla^2 U &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \Omega U + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{C_h^2 H} - \frac{\tau_{sy}}{\rho H} - \epsilon \nabla^2 V &= 0 \quad (\text{fórmula 1}) \\ \frac{\partial(z)}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} &= 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(CH)}{\partial t} + \frac{\partial(CHU)}{\partial x} + \frac{\partial(CHV)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - KHC \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

U, V componentes do vetor velocidade nas direções x e y, respectivamente;

z nível medido a partir de um plano de referência fixo;

h profundidade referida a este plano;

H profundidade total (H = h + z);

Ω aceleração de Coriolis;

τ_{sx}, τ_{sy}	componentes da tensão de cisalhamento na superfície;
C_h	coeficiente de Chézy;
ε	coeficiente de dissipação turbulenta;
C	concentração integrada na vertical;
D_x, D_y	coeficientes de dispersão nas direções x e y, respectivamente;
K	coeficiente de decaimento.

5.1.2 Resolução do problema

A resolução do problema ocorre da seguinte forma, nas palavras de Casalas (1996, p. 3):

Para cada direção, num primeiro momento, é obtido o campo de velocidades e a seguir, é resolvida a equação de advecção-difusão. Em cada intervalo de tempo, o cálculo é realizado em duas etapas: primeiro é efetuado em cada linha o cálculo do nível ZU e da componente U da velocidade através da resolução de um sistema linear tridiagonal pelo método de dupla varredura. A seguir, também, linha por linha e de forma análoga, são calculadas as concentrações. A segunda etapa consiste na determinação das componentes V das velocidades, de novos níveis ZV e das concentrações repetindo para as colunas o mesmo tipo de cálculo realizado para as linhas na primeira etapa.

O esquema de resolução para a modelação da circulação baseia-se no esquema proposto originalmente por Lendertsee (1967,1970), porém com algumas modificações. Por exemplo, as batimetrias são informadas nos mesmos pontos onde são calculadas as componentes da velocidade.

Para a solução da equação de advecção-difusão foi implementado um esquema numérico explícito. A técnica utilizada é a da interpolação exponencial no sentido do escoamento, análoga à proposta por Leonard(1977,1988) de interpolação quadrática no sentido do fluxo, e que permite melhorar de forma considerável o tratamento dos termos de advecção em presença de gradientes de concentração elevados.

5.2 CARACTERÍSTICAS

O aplicativo tem algumas características dignas de nota, enunciadas pelo autor. A respeito dos dados de entrada ele afirma (CASALAS, 1996, p. 3-4):

Para a implementação de um modelo de circulação são necessários os seguintes dados de entrada:

- a) configuração geométrica (contorno e batimetria);
- b) condições de contorno para cada simulação (níveis ou velocidades nas fronteiras abertas e intervalo de tempo em que são fornecidos);

- c) intervalo de tempo de cálculo, tamanho da malha, rugosidade do fundo, constante de atrito do vento, coeficiente de viscosidade turbulenta, nível inicial e latitude;
- d) velocidade e direção do vento em cada instante para toda a área de simulação ou, em casos de grandes corpos de água, em diferentes pontos, para que o modelo obtenha mediante interpolação o valor da tensão de cisalhamento em cada elemento da malha.

Se for necessária a simulação da dispersão de um contaminante deverão ainda ser fornecidas as seguintes informações:

- a) concentração inicial;
- b) indicação do tipo de condição de contorno em cada elemento da fronteira aberta e, caso necessário, informação do valor da concentração ao longo do tempo de simulação;
- c) valor dos coeficientes de difusão longitudinal e transversal assim como o coeficiente de decaimento (T90 para o caso de coliformes);
- d) localização das fontes, quantidade e concentração do poluente despejado.

Casalas (1996, p. 4) ainda lista os coeficientes e parâmetros de ajuste que devem ser utilizados caso as condições de contorno não sejam constantes, dentre eles o coeficiente de Chézy (Ch), o coeficiente de dissipação turbulenta (ϵ) e o coeficiente de decaimento (K). Os parâmetros de ajuste devem ser analisados cuidadosamente e sua aplicação considerada para cada caso individualmente.

6 DADOS DE ENTRADA

As informações necessárias para a realização da simulação numérica são bastante diversas, exigindo diferentes esforços para sua obtenção. Por simplificação, os dados foram divididos em antrópicos e naturais, sendo que os antrópicos consistem nas descargas de poluentes (localização e magnitude), e dos naturais fazem parte as vazões, regime de ventos e as características do Lago. A análise detalhada de cada um destes fatores é o foco deste capítulo.

6.1 DADOS ANTRÓPICOS

Objetivamente, para uma análise de dispersão de poluente, os únicos dados antrópicos relevantes são os despejos de poluentes. Introduzindo no modelo numérico a localização e o potencial poluidor das descargas, resta apenas observar a interação desses elementos com as características inerentes ao escoamento.

No Rio Grande do Sul, especialmente na região do lago Guaíba, três órgãos governamentais são responsáveis pelo monitoramento ambiental: o Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre (DMAE) – responsável pelo esgoto de Porto Alegre, a Companhia Rio-Grandense de Saneamento (Corsan) – encarregada das emissões das outras cidades do entorno, e a Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA), através da Fepam, que cuida do licenciamento ambiental.

Apesar de todas as fontes de entrada de poluentes no lago Guaíba estarem sob a tutela de alguma organização, o monitoramento se mostrou ineficiente. A Corsan não apresentou qualquer controle sobre o esgoto gerado nas cidades sob sua tutela, o DMAE apresenta suas informações de forma incompleta e o monitoramento realizado pela Fepam é, no mínimo, insipiente. Para uma compreensão da dimensão da questão, bem como da metodologia para obtenção desses dados, cada ponto será analisado separadamente. Será ainda apresentado o Projeto Integrado Socioambiental (Pisa), o que ele representa e no que se baseia.

6.1.1 Carga dos Afluentes

Os rios que deságuam no lago Guaíba trazem consigo os contaminantes de oito regiões hidrográficas, comportando centenas de municípios e milhões de pessoas. Porém, é evidente que o esgoto lançado nesses afluentes não chega instantaneamente ao Lago. O tempo de duração do transporte desses poluentes pode levar vários dias, dependendo das características geográficas do rio em questão, de forma que os organismos presentes na descarga inicial chegam ao lago Guaíba já em processo de degradação.

Sendo assim, para a obtenção de dados de coliformes nessas condições são necessárias medições diretamente na foz dos afluentes, de forma a obter a concentração de coliformes que efetivamente chega ao Lago. Os rios, porém, são fortemente afetados pelas condições climáticas, sofrendo variações significativas em seu regime de escoamento ao longo do ano. Além disso, a concentração de coliformes é representada pela quantidade provável de organismos em um volume definido de água. Sendo assim, e assumindo que o esgoto sanitário é relativamente indiferente a alterações climáticas, fica claro que os valores medidos podem sofrer distorções significativas. Em outras palavras, um incremento na vazão de um rio devido a um evento climático isolado diminui proporcionalmente a concentração de coliformes, não por uma redução nos poluentes, mas por um acréscimo do volume de água.

Portanto, para reduzir as distorções introduzidas pela metodologia, necessita-se de um conjunto expressivo de dados. As medições devem ser frequentes e em grande número, possibilitando a elaboração de séries temporais e, com elas, informações valiosas na forma de médias e desvio-padrão.

O monitoramento realizado pela Fepam para estes parâmetros decididamente não se encaixa nessas condições, conforme mostra a tabela 3. Dos pontos de coleta, apenas um de cada afluente encontra-se localizado na foz. A distância entre a coleta e o lago Guaíba torna esses pontos de monitoramento pouco representativos. Sendo assim, as informações relevantes para o presente estudo ficam limitadas àquelas medidas em um único ponto, e, em três dos cinco rios, este monitoramento é realizado trimestralmente.

A confiabilidade da amostra de dados é, portanto, bastante baixa, mas ela se mostra ainda menor pela forma como estes são disponibilizados. A Fepam não apresenta as informações na forma como são obtidas, mas sim após tratamento estatístico, na forma de médias anuais e em

forma de gráficos. A necessidade de interpretar os gráficos reduz ainda mais a representatividade dos dados, uma vez que se mostra uma nova fonte de imprecisão em um sistema já bastante fragilizado.

Tabela 3 – Monitoramento dos Afluentes

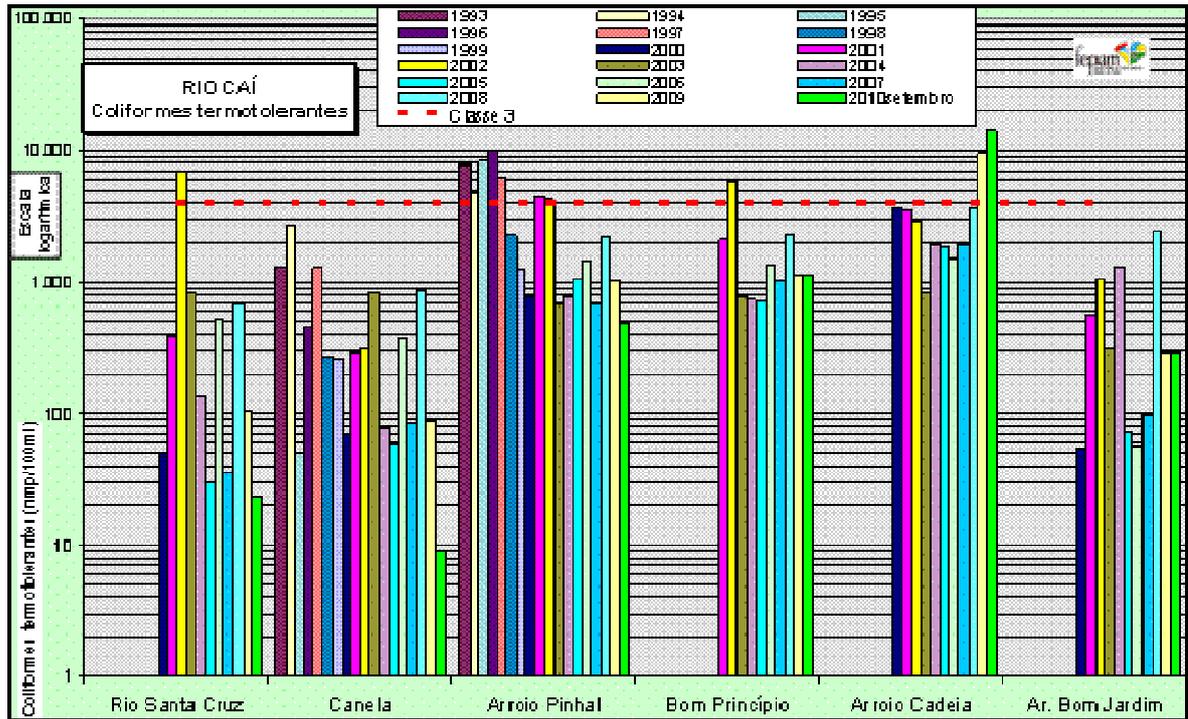
Corpo Hídrico	Nº de Pontos	Frequência de Coleta
Gravataí	05	mensal
Sinos	10	mensal
Caí	06	trimestral
Taquari-Antas	08	trimestral
Jacuí	09	trimestral

(fonte: FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER, 2012a)

Mesmo com suas limitações, o monitoramento periódico da Fepam é o mecanismo mais seguro para obtenção das informações necessárias. Ele foi utilizado considerando que as medições trazem, ao menos, informações relevantes no que tange a ordem de grandeza das descargas. Foram considerados como representativos os dados referentes à tomada mais recente, exceto para o rio Jacuí. A exceção deve-se à grande vazão do Rio, uma vez que uma pequena variação na concentração de coliformes representa uma grande diferença no número de organismos despejados. Para ele, o valor utilizado foi uma média ponderada dos valores médios dos últimos quatro anos (sendo o peso relativo de cada ano inversamente proporcional ao tempo decorrido desde a tomada).

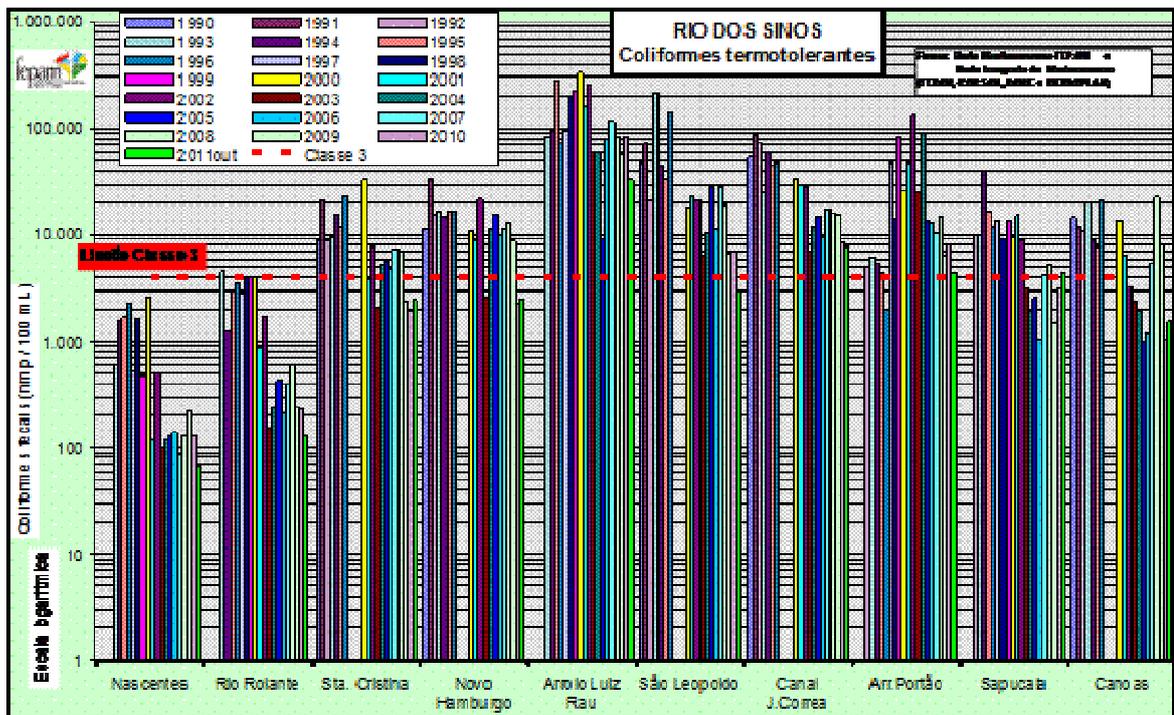
A figuras 6 a 9 mostram os gráficos disponibilizados pela Fepam, enquanto a tabela 4 apresenta a leitura feita, com os dados utilizados como valores médios de concentração para cada um dos rios, sendo que, em todos, a unidade de medida de coliformes é NMP/100 ml (número mais provável de organismos por amostra de 100 mililitros).

Figura 6 – Gráfico de Concentração de Coliformes do Rio Cai



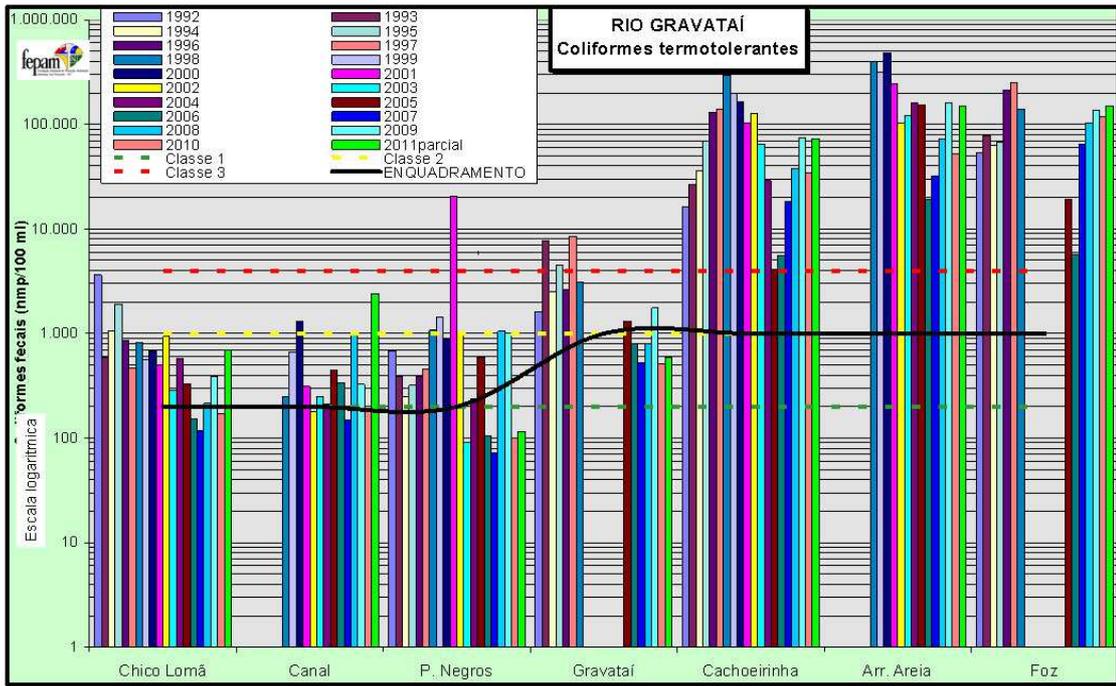
(fonte: FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER, 2012b)

Figura 7 – Gráfico de Concentração de Coliformes do Rio dos Sinos



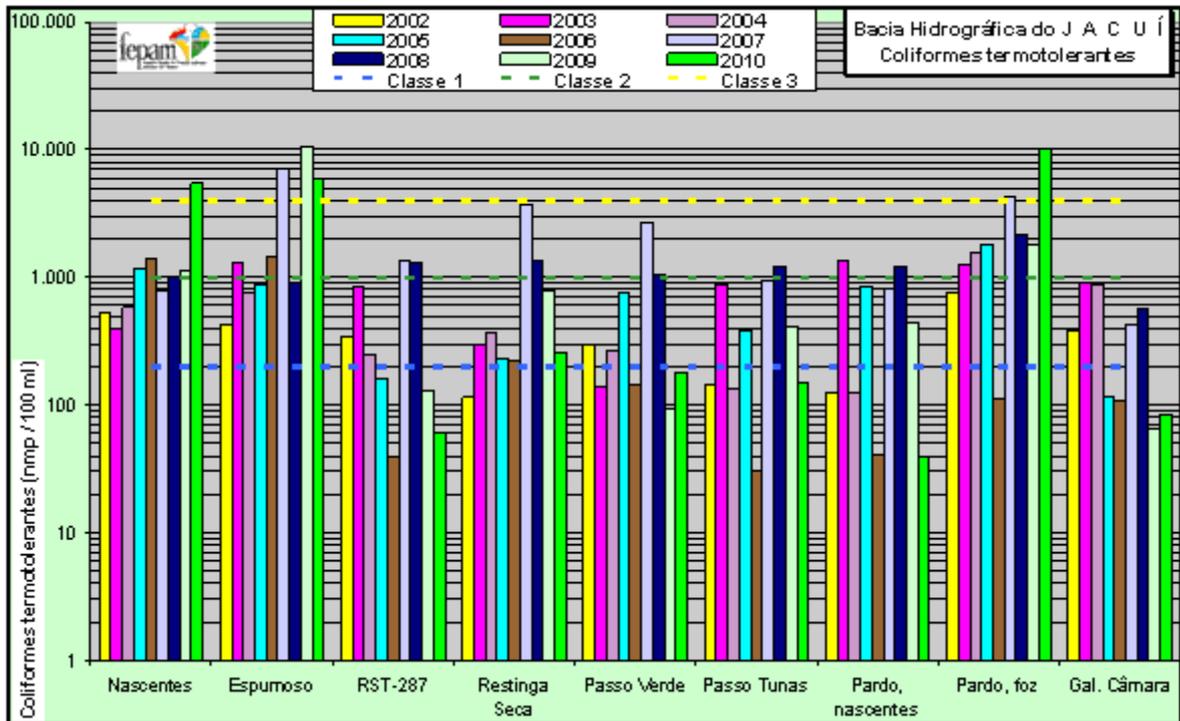
(fonte: FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER, 2012c)

Figura 8 – Gráfico de Concentração de Coliformes do Rio Gravataí



(fonte: FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER, 2012d)

Figura 9 – Gráfico de Concentração de Coliformes do Rio Jacuí



(fonte: FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER, 2012e)

Tabela 4 – Concentração Média de Coliformes por Afluente

Bacia	NMP/100 ml
Gravataí	150000,00
Sinos	1100,00
Caí	300,00
Jacuí	200,00

(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2 Carga de Esgotos

A consideração dos esgotos gerados pelas cidades vizinhas ao Lago exigiu uma abordagem completamente diferente da empregada nos afluentes. Para o presente estudo, foram consideradas três cidades no entorno do lago Guaíba: Porto Alegre, Guaíba e Barra do Ribeiro.

6.1.2.1 Porto Alegre

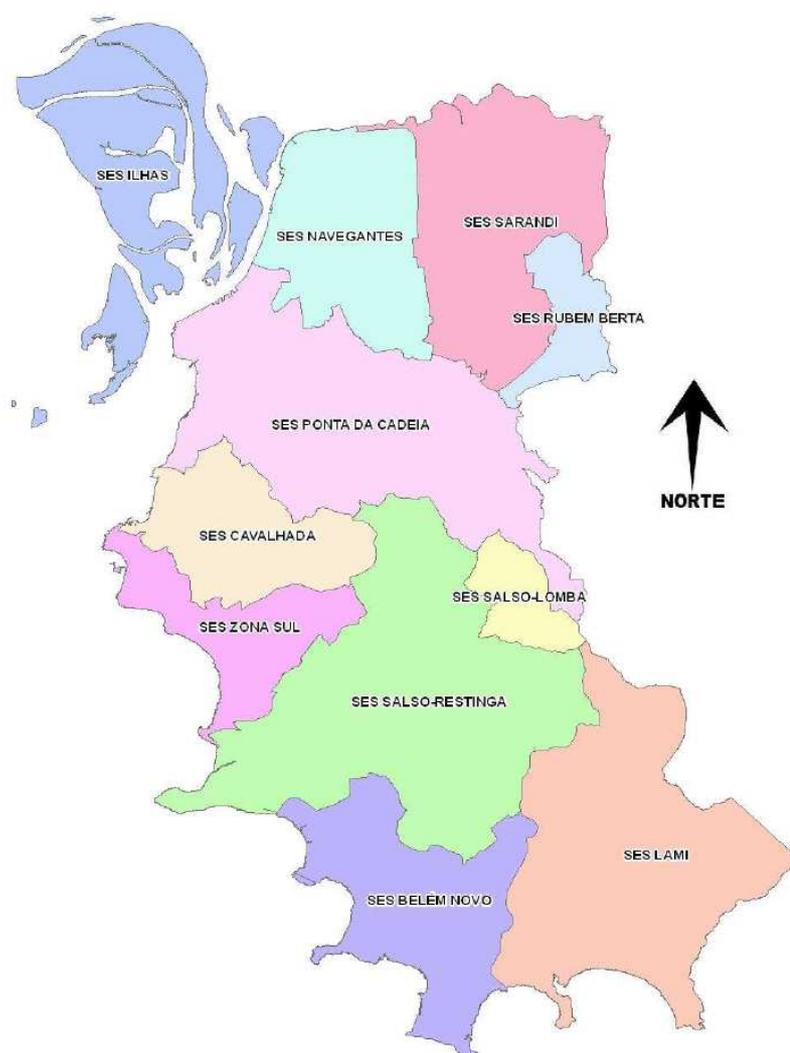
De responsabilidade do DMAE, Porto Alegre é a maior responsável pela contaminação do lago Guaíba devido ao despejo de esgoto sanitário. Isso se deve à combinação de alguns fatores, dentre eles o contingente populacional expressivo, a proximidade com o Lago (de forma que os contaminantes chegam intactos às águas) e o baixo nível de tratamento. No Plano Diretor de Esgotos de Porto Alegre (PORTO ALEGRE, 2010) (doravante, PDE) consta que a capacidade atual de tratamento dos efluentes da cidade é de apenas 27%.

Salvo poucas exceções, não há qualquer monitoramento sobre as condições dos despejos no Lago. Além disso, diversas informações cruciais são indicadas superficialmente ou simplesmente omitidas, conforme alguns exemplos que serão dados no decorrer do capítulo.

Por outro lado, é possível estimar a quantidade de poluentes gerada por Porto Alegre relacionando valores médios consagrados na literatura com a população atual residente na cidade. Isto porque a proximidade da cidade com o Lago impede a degradação do esgoto, de forma que se podem considerar as descargas não tratadas como esgoto bruto.

O PDE, apesar de não fornecer os dados necessários para a simulação, apresenta informações importantes para a sua estimativa. Primeiramente ele divide a cidade em onze sistemas de esgoto sanitário (SES), conforme a figura 10. Destes, dois (SES Sarandi e SES Rubem Berta) tem seus efluentes despejados no rio Gravataí (PORTO ALEGRE, 2010). Uma vez que os contaminantes desse Rio são monitorados diretamente na foz, estes sistemas foram descartados da análise de Porto Alegre.

Figura 10 – Sistemas de Esgoto Sanitário de Porto Alegre



(fonte: PORTO ALEGRE, 2010)

O PDE apresenta ainda duas informações valiosas: o número de pessoas habitando cada SES e a contribuição *per capita* de esgotos da cada região, sendo a última baseada no consumo médio de água por zona. Ambos os dados estão condensados na tabela 5.

Tabela 5 – Distribuição Populacional e Contribuição *per Capita* por SES

SES	Habitantes	Contribuição per capita (l/s)
Belém Novo	14.665	112,7
Cavahada	163.957	122,3
Lami	10.303	66,8
Navegantes	175.459	223,6
Ponta da Cadeia	528.284	176,9
Rubem Berta	64.359	102,7
Salso-Lomba	10.632	67,5
Salso-Restinga	140.534	81
Sarandi	263.490	113,6
Zona Sul	99.444	133,5
Ilhas	6.480	144,5
Total / Média	1.477.607	122,28

(fonte: PORTO ALEGRE, 2010)

A consideração da população de Porto Alegre como 1.477.607 habitantes é, no entanto, exagerada. Dados do censo de 2007 apontam que a cidade tem 1.420.667 moradores (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2007), de forma que os números projetados pelo DMAE sofreram um ajuste. Por fim, o PDE ainda define, como NMP para a concentração de coliformes fecais em uma amostra de esgoto bruto, 10^7 org/100 ml, e como contribuição média *per capita* de esgoto 130 l/dia, valores adotados como padrão para este trabalho.

Conforme dito anteriormente, observou-se a tendência de omissão de certas informações críticas nos documentos confeccionados pelo DMAE. O PDE informa que 27% do esgoto de Porto Alegre é tratado, mas não quais são os SES responsáveis por esse serviço. Como cada estação de tratamento de esgoto trabalha com taxas de remoção de coliformes diferentes, não há como inferir com segurança o resultado desse tratamento. Ainda mais grave é a ausência de informações referentes aos pontos de despejo no Lago. Apesar de informar a população contribuinte de cada SES, não há qualquer referência ao destino final dos efluentes.

Para evitar a introdução de novas fontes de erros, o percentual de esgoto tratado foi dividido de forma igualitária entre os SES e a taxa de remoção de coliformes considerada como 100%. Em termos práticos, 27% do total de esgoto bruto foi removido do cálculo. Já os pontos de despejo foram deduzidos analisando os mapas do PDE, sendo locados, quando possível, junto à foz de arroios importantes. A figura 11 apresenta a localização estimada dos despejos de Porto Alegre, Guaíba e Barra do Ribeiro.

Figura 11 – Localização dos Despejos de Efluentes no Lago Guaíba



(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2.2 Guaíba e Barra do Ribeiro

A definição das contribuições das cidades de Guaíba e Barra do Ribeiro foi simples. A Corsan, responsável pelo saneamento das cidades, praticamente não realiza a coleta e,

portanto, o tratamento dos esgotos. Sendo assim, para a projeção da magnitude das descargas foi utilizada a mesma metodologia aplicada em Porto Alegre. Já a locação foi definida como a foz do principal arroio de cada cidade, conforme mostrado na figura 11. A população de cada município foi obtida através do censo de 2007 do IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2007), sendo de 93.578 habitantes para Guaíba e 11.478 habitantes para Barra do Ribeiro. Sabe-se que nem todo o esgoto produzido por estes municípios é lançado no Lago, sendo utilizadas fossas sépticas, sumidouros e outros sistemas secundários. A inexistência de dados sobre esses despejos resultou em sua desconsideração para o presente estudo.

A tabela 6 sintetiza as informações referentes aos dados antrópicos, relacionando as contribuições *per capita* consideradas com a população de cada região. A contribuição percentual não inclui os contaminantes trazidos pelos afluentes.

Tabela 6 – Consolidação dos Dados Antrópicos

		Contribuição per Capita(l/dia)	Esgoto lançado (l/s)	Contribuição (%)
P O R T O A L E G R E	Belém Novo	112,7	18,39	0,84
	Cavallhada	122,3	223,14	10,25
	Lami	66,8	7,66	0,35
	Navegantes	223,6	436,58	20,06
	Ponta da Cadeia	176,9	1039,96	47,78
	Salso-Lomba	67,5	7,99	0,37
	Salso-Restinga	81	126,67	5,82
	Zona Sul	133,5	147,73	6,79
	Ilhas	144,5	10,42	0,48
Guaíba		130	140,80	6,47
Barra do Ribeiro		130	17,27	0,79
TOTAL			2176,61	100,00

(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2.3 Projeto Integrado Socioambiental - Pisa

Atualmente, a Prefeitura de Porto Alegre está desenvolvendo as primeiras etapas do Projeto Integrado Socioambiental (Pisa), o qual tem por um dos objetivos garantir a balneabilidade do lago Guaíba. Fica bastante clara, ao observar a tabela 6, a grande influência dos SES Ponta da Cadeia, contribuindo com quase 50% do total de contaminantes lançados diretamente no Lago. Baseado nisso, o Pisa consiste em transportar todo o esgoto atualmente lançado entre o emissário da Ponta da Cadeia e a praia de Ipanema⁷ para uma estação de tratamento no bairro Serraria. Dessa forma, os despejos realizados pelos SES Ponta da Cadeia, Cavalhada e Zona Sul seriam encerrados. A importância do tema motivou uma consideração sobre a eficácia do Projeto, que será apresentada no decorrer do estudo.

6.2 DADOS NATURAIS

Os dados naturais formam o cerne do modelo, sendo os elementos responsáveis por permitir a modelagem do comportamento hidrodinâmico do Lago. Eles são fortemente influenciados pelas variações climáticas, e assim demonstram comportamento sazonal. Os próximos tópicos visam apresentar claramente cada um destes parâmetros.

6.2.1 Vazões

Nenhuma variável afeta tão diretamente as características do escoamento no lago Guaíba como as vazões dos seus afluentes. Variações neste parâmetro impactam diretamente na velocidade das águas, que, por sua vez, define a direção e a dispersão dos poluentes.

Conforme referido no capítulo 3, o rio Jacuí é elemento de maior importância neste quesito, sendo sua contribuição média anual acima de 1600 m³/s. Os outros rios, somados, chegam a aproximadamente 220 m³/s (média anual). A vazão média anual do lago Guaíba é de 1889 m³/s (RIO GRANDE DO SUL, 2007).

Testes iniciais mostraram que o modelo não trabalha corretamente quando utilizados valores médios de vazão para os afluentes menos relevantes, uma vez que os efeitos de remanso

⁷Na figura 11, a praia de Ipanema encontra-se junto ao SES Zona Sul.

gerados pelo rio Jacuí bloqueiam as águas destes rios menores. Uma simplificação foi, portanto, necessária para o funcionamento do modelo numérico. Os rios Caí, Gravataí e dos Sinos, bem como os arroios que deságuam no Lago foram definidos como fontes de contaminantes, ou seja, pontos de despejo de contaminantes de vazão nula. Visando manter as condições hidrodinâmicas do sistema, essas águas foram acrescidas às vazões do rio Jacuí, e esta igualou a vazão média do lago Guaíba. Desta forma, as condições de contorno utilizadas foram: vazão de entrada (na foz do rio Jacuí) como $1889 \text{ m}^3/\text{s}$ e nível de saída em Itapuã de 1 m sobre o plano de referência.

6.2.2 Ventos

Analisando a figura 5, pode-se perceber um predomínio de ventos de baixa velocidade. Porém, ventos de maiores velocidades tem impacto mais relevante nas dinâmicas do Lago. A dificuldade de estabelecer graus de importância para as variáveis frequência/intensidade determinou a simulação de diversas condições. Para cada intervalo de velocidade (em nós) foi definida a direção mais recorrente, e calculados os vetores de velocidade nos eixos X e Y (conforme definidos na figura 11). O resumo dos dados está apresentado na tabela 7.

Tabela 7 – Consolidação dos Dados de Vento

Velocidade (kt)	Velocidade (km/h)	Direção (graus)	Velocidade (km/h)	
			X	Y
2,5	4,63	170	-4,56	0,80
7,5	13,89	150	-12,03	6,95
12,5	23,15	150	-20,05	11,58
17,5	32,41	330	28,07	-16,21
25	46,30	330	40,10	-23,15
32	59,26	330	51,32	-29,63

(fonte: elaborado pelo autor)

6.2.3 Outras Características

Dentre as outras variáveis inseridas no modelo estão dados batimétricos (já presentes no software IPH-A) e determinados valores importantes para caracterizar a interação entre alguns elementos, como os coeficientes de Chézy (que representa a relevância da rugosidade do leito do Lago), de atrito do vento e de dispersão do poluente.

As características únicas de cada corpo de água tornam a definição de alguns coeficientes uma tarefa bastante complexa, uma vez que eles são sensíveis a diferentes fatores em intensidades que podem variar conforme esses fatores se relacionam. Em alguns casos, os parâmetros precisam ser estimados ou obtidos através de ensaios de campo.

Schwarzbach et al. (1997) realizaram estudos na baía de Ipanema, no lago Guaíba, e obtiveram diversos valores que, para o presente estudo, serão considerados como adequados e aplicáveis a toda a área de estudo. Os parâmetros se traduzem nos seguintes coeficientes:

- a) atrito do vento (C_w): $1,5 \cdot 10^{-6}$;
- b) dissipação turbulenta (ϵ): $10 \text{m}^2/\text{s}$;
- c) Chézy (C_h): 40;
- d) difusão longitudinal (D_l): $10 \text{m}^2/\text{s}$;
- e) difusão transversal (D_t): $5 \text{m}^2/\text{s}$;
- f) decaimento T90 (K): 48h(coliformes).

7 RESULTADOS

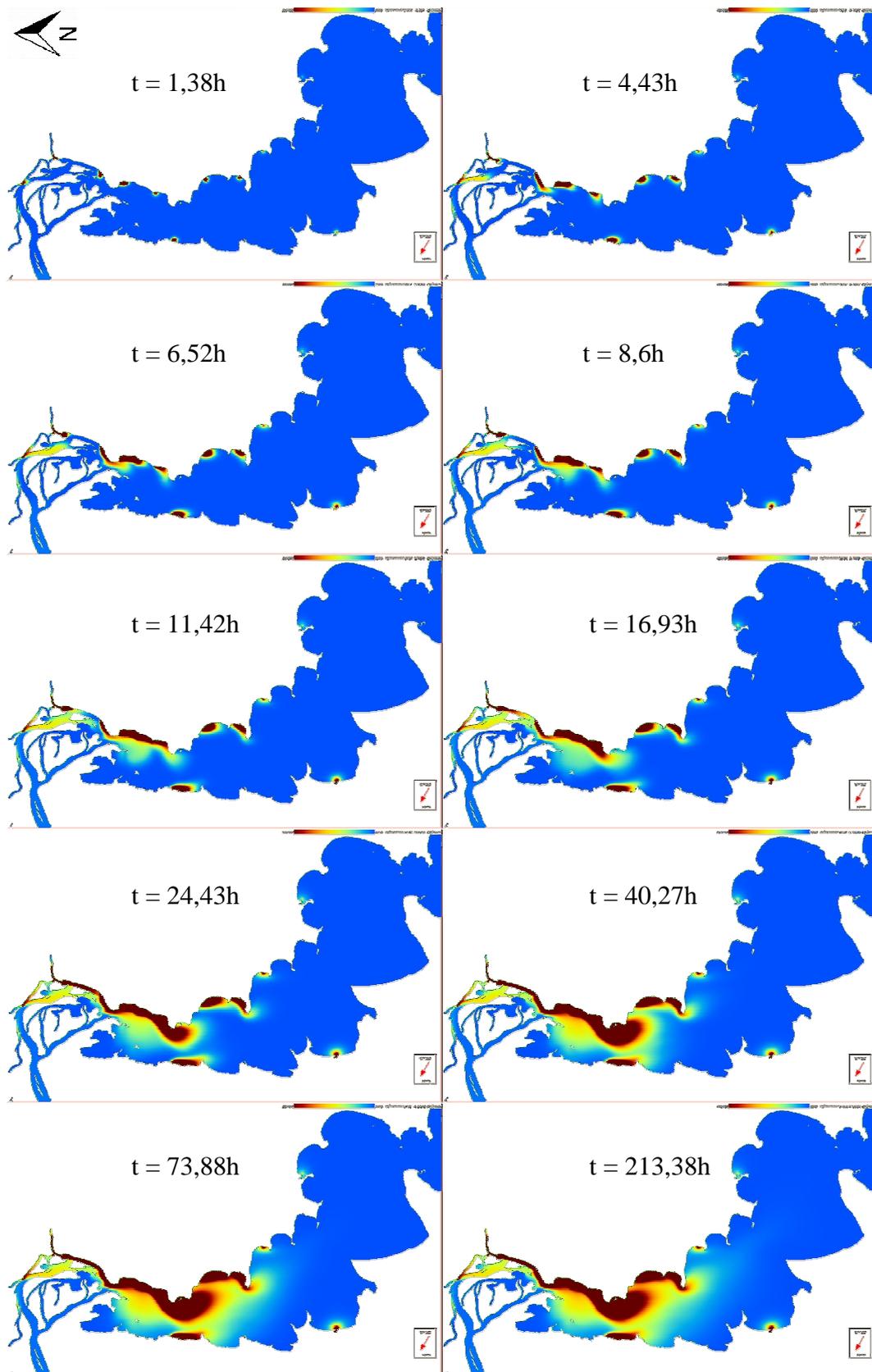
Para avaliar o grau de contaminação no lago Guaíba, foi realizada a simulação numérica da dispersão de bactérias coliformes. O código de cálculo utilizado foi o software IPH-A (CASALAS, 1996).

Aplicando os dados descritos nos capítulos anteriores no modelo numérico tem-se por resultado mapas com a representação gráfica do comportamento dos indicadores de contaminação. Ao longo deste capítulo serão apresentadas diversas simulações, cada qual com seus objetivos e características. Primeiramente será mostrado como se ocorre o processo de dispersão, detalhadamente, através do tempo. Em seguida serão apresentados os mapas referentes aos diferentes regimes de vento, seguidos por uma comparação, em termos de alcance e magnitude, entre os contaminantes oriundos dos afluentes principais e aqueles despejados diretamente no Lago pelas cidades no entorno. Posteriormente será analisado o mapa de classes representativo das condições atuais do lago Guaíba, bem como uma comparação destes resultados com os obtidos por um estudo anterior. Finalizando será apresentada a projeção das alterações decorrentes da implantação do Projeto Integrado Socioambiental.

7.1 EVOLUÇÃO TEMPORAL

Uma das vantagens do uso da modelagem numérica é a capacidade do método de representar não apenas a condição final do sistema, mas também todas as etapas intermediárias entre as condições iniciais e a estabilidade final. A figura 12 apresenta esse desenvolvimento, onde o cada mapa apresenta o tempo necessário para que o Lago atinja o estado representado. O vento utilizado foi o leste-sudeste de velocidade 23,15 km/h, escolhido por apresentar a maior intensidade dentre os ventos do quadrante mais frequentemente observado na região do Lago. A escala de concentrações está limitada a 4000 org/100 ml para facilitar a observação dos pontos mais críticos da área estudada, e a análise da dispersão de baixos níveis de concentração será feita posteriormente.

Figura 12 – Evolução Temporal



Concentração: 0,00  4000 org/100 ml

(fonte: elaborado pelo autor)

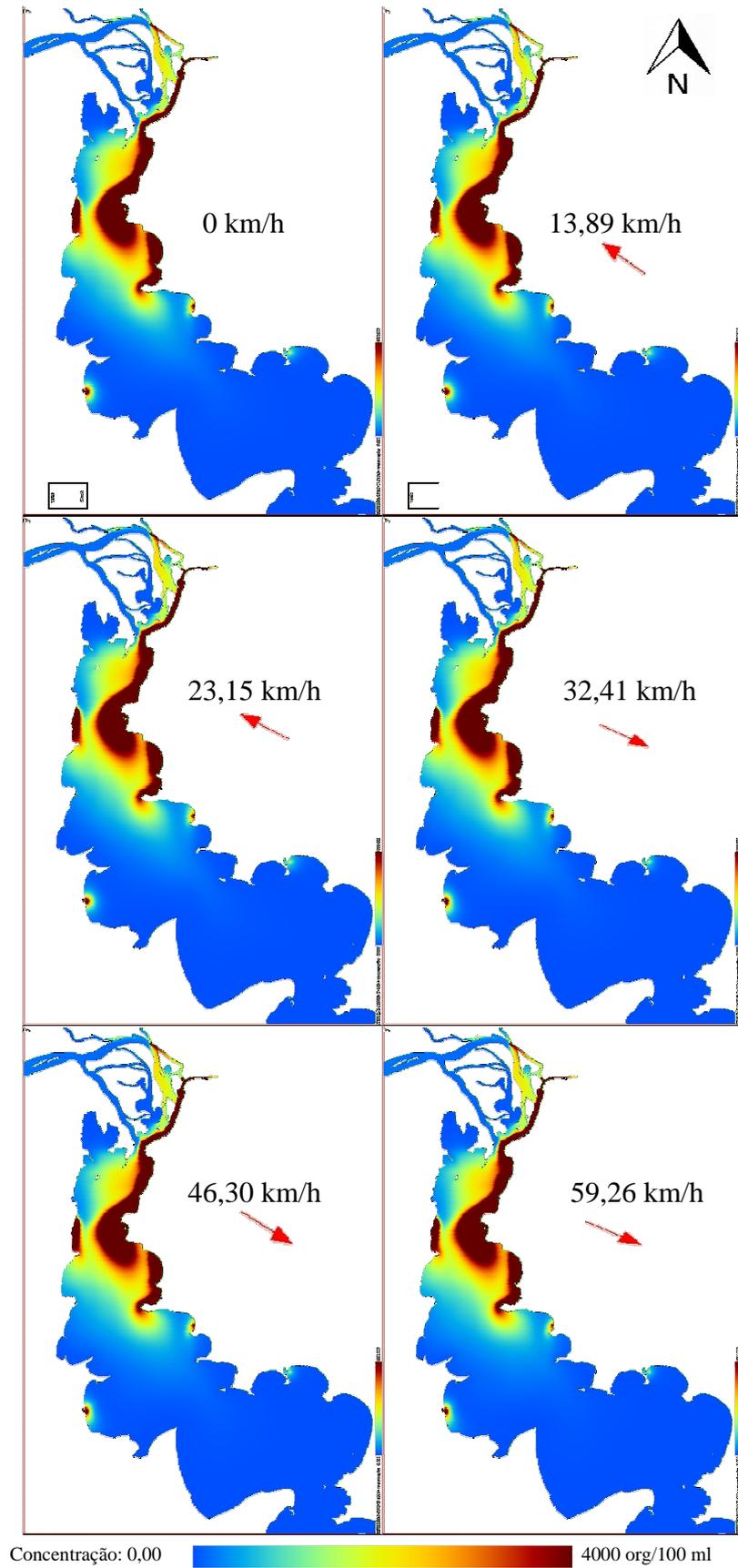
Observa-se, inicialmente, que a concentração de coliformes se torna progressivamente constante com o passar do tempo. Essa condição torna a definição do tempo necessário para a estabilização do sistema dependente do limite de aceitação do observador. Para a completa estabilidade, o tempo necessário seria próximo a 400 horas, porém a diferença na concentração de coliformes entre esta medida e a realizada com 200 horas é praticamente nula. Exemplificando, o valor calculado para concentração de coliformes – em um ponto próximo ao centro do Lago – para a condição simulada na figura 12 foi de 173,907 org/100 ml quando $t = 213,38h$, e 173,91 org/100 ml para $t = 430,7h$, uma variação de 0,0017%. Para este estudo, tal grau de precisão não é necessário, sendo consideradas como concluídas as simulações que ultrapassarem 200 horas.

7.2 INFLUÊNCIA DO VENTO

Dentre as condições naturais do sistema, a única grandeza considerada variável foi o vento. No intuito de explicitar a influência deste fenômeno na dispersão dos poluentes foi realizada uma série de simulações, na qual todos os valores foram mantidos constantes, a exceção do vento. A figura 13 mostra o resultado destas simulações. Foram considerados os cinco ventos mais intensos da tabela 7, sendo o vento de 4,63 km/h substituído pela consideração de uma situação de vento nulo visando estabelecer um referencial. A seta vermelha indica a direção do vento, e novamente a escala está limitada a 4000 org/100 ml.

Comparando os mapas qualitativamente não se percebe diferença entre as três primeiras condições (vento nulo, 13,89 km/h e 23,15 km/h). A partir da quarta condição começam a surgir pequenas diferenças nos gráficos, sendo possível perceber um aumento progressivo no grau de dispersão conforme ventos mais intensos são considerados. Essa variação se manifesta nos mapas através da expansão das áreas com altas concentrações, ao mesmo tempo em que os limites destas áreas se tornam menos nítidos.

Figura 13 – Influência do Vento



(fonte: elaborado pelo autor)

Mesmo os mapas mais diferenciados, porém, são bastante semelhantes. Para efeito de localização dos pontos críticos essas variações são muito pouco significativas. Outros estudos já haviam concluído que ventos de baixa intensidade não influenciam o comportamento do Lago. Em seu trabalho sobre a dinâmica do lago Guaíba, Paz et al. (2005, p. 8-9) afirmam:

A distribuição espacial do módulo da velocidade do escoamento foi praticamente idêntica em instantes de tempo distintos, independente da direção do vento no instante considerado (...). Observam-se (...) dois mapas de velocidades muito semelhantes, embora sejam referentes a instantes de tempo nos quais a direção do vento oscilava em torno de direções aproximadamente opostas. Conclui-se que a ação do vento não teve papel de destaque no padrão de circulação da água no lago Guaíba, devido à pequena intensidade do vento considerado, predominando a influência da vazão dos rios formadores e da oscilação do nível na Lagoa dos Patos.

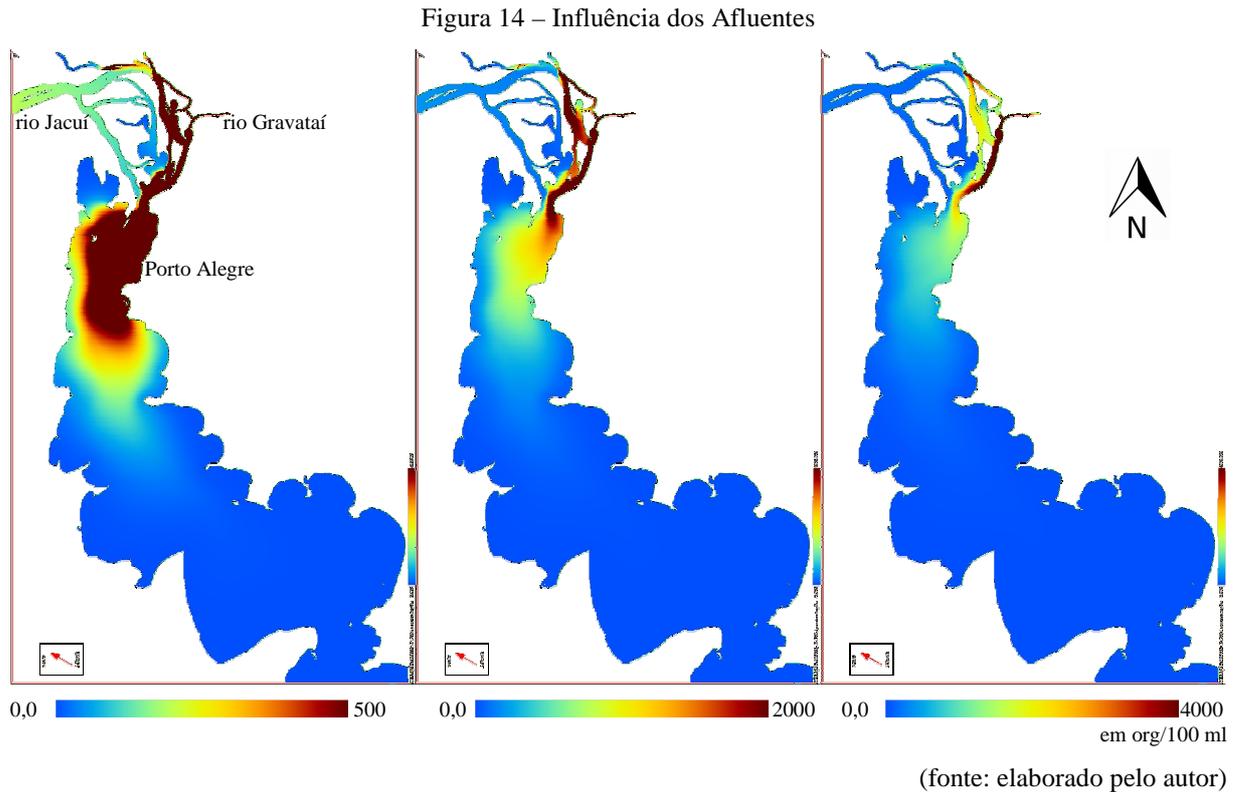
Somada a essa baixa significância está a dificuldade na consideração desse fator. Cada condição de vento acrescentada à análise demanda uma nova simulação. Sendo assim, para considerar as condições levantadas na tabela 7, cada hipótese exigiria seis simulações ao invés de apenas uma. Isto posto, não foi encontrada justificativa para o empenho de uma grande quantidade de esforços para um resultado marginalmente superior.

As próximas análises, portanto, estarão restritas a uma única condição de vento.

7.3 INFLUÊNCIA DOS AFLUENTES

Esta simulação teve por objetivo explicitar o grau de relevância dos contaminantes trazidos pelos afluentes. Para tanto, retirou-se toda a carga de esgotos despejada diretamente pelas cidades do entorno, restando apenas como poluidores os rios Jacuí, Caí, Gravataí e dos Sinos. A figura 14 apresenta o mapa de dispersão para essa condição, sendo as escalas limitadas a 500, 2000 e 4000 org/100 ml, no intuito de representar mais claramente o comportamento dos contaminantes em diferentes níveis de concentração. Para esta simulação, foi utilizado o vento leste-sudeste de 13,89 km/h.

Os mapas apresentam duas informações, essencialmente. Primeiramente, apesar do péssimo estado em que se encontram os rios dos Sinos e Gravataí, os afluentes não são responsáveis pelos pontos mais críticos. O terceiro mapa mostra claramente a inexistência de áreas classe 4 no Lago, sendo a toxicidade das águas dos rios mais poluídos diluída pelo rio Jacuí ainda em seu Delta.



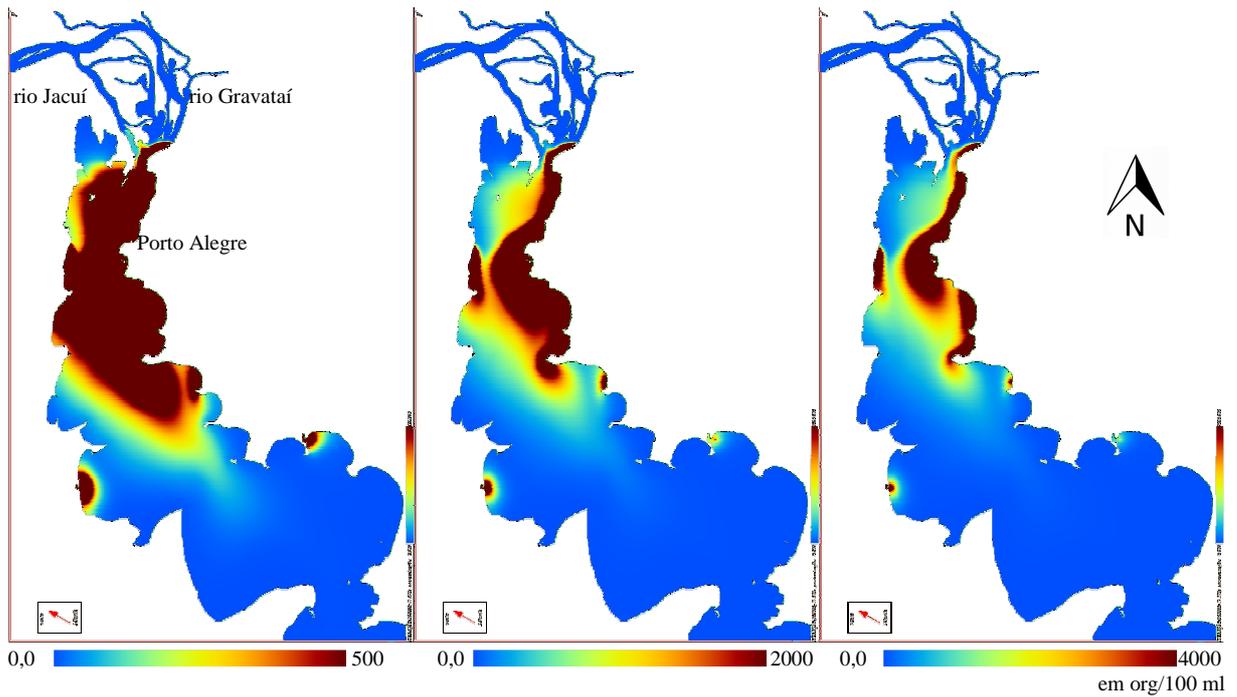
A segunda informação diz respeito ao alcance dos coliformes. Concentrações mais baixas se espalham aproximadamente até o centro do Lago. Conclui-se, portanto, que apesar de isoladamente os afluentes não formarem áreas classe 4, eles são danosos a ponto de tornar metade do Lago classe 2.

7.4 INFLUÊNCIA DAS CIDADES LINDEIRAS

Após isolar a contaminação gerada pelos afluentes, foi realizada uma simulação considerando apenas o esgoto diretamente despejado no Lago pelas cidades a suas margens. Na figura 15 está representado o resultado, novamente limitando as escalas a 500, 2000 e 4000 org/100 ml e utilizando o vento leste-sudeste de 13,89 km/h.

As diferenças entre estes mapas e os da figura 14 são evidentes: o impacto do esgoto lançado pelas cidades no entorno do Lago tem maior espalhamento e apresenta tendência de formar pontos de concentrações extremamente altas. Comparando a figura 15 com os mapas da figura 13, fica bastante clara a forte relação entre a situação atual do Lago e os despejos efetuados especialmente por Porto Alegre e Guaíba.

Figura 15 – Influência das Cidades Lindeiras



(fonte: elaborado pelo autor)

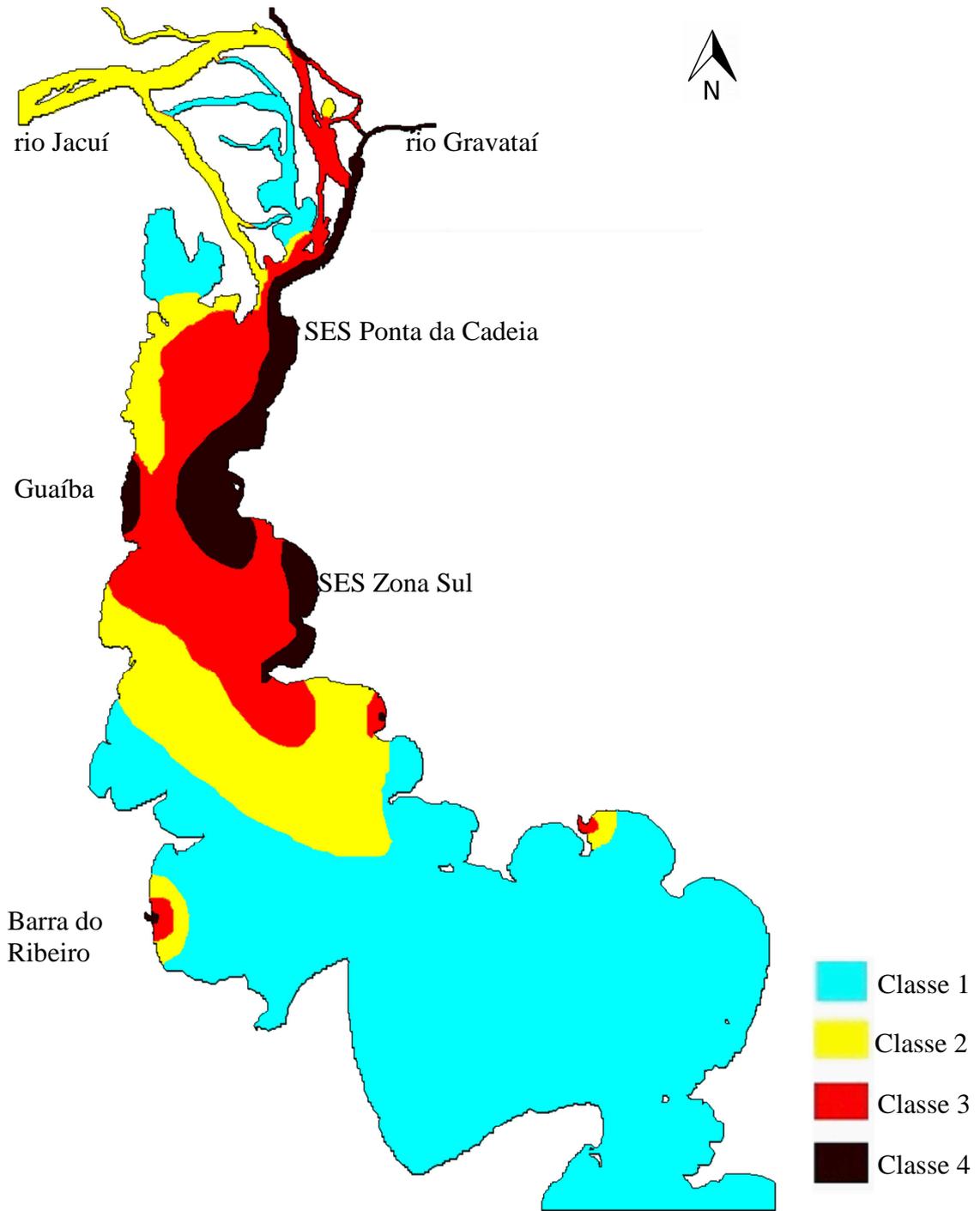
7.5 MAPA DE CLASSES

De posse de todos os mapas anteriores foi possível traçar um mapa demarcando os limites de abrangência de cada uma das classes definidas pelo Conama. Para tanto, gerou-se três mapas, cada qual estabelecendo um dos três limites (200, 1000 e 4000 org/100 ml) e, a partir deles, traçou-se as isolinhas de concentração. O resultado está demonstrado na figura 16.

Esse mapa condensa as informações anteriores, representando a qualidade das águas (no quesito coliformes) do lago Guaíba em toda sua extensão. Novamente percebe-se facilmente a presença marcante dos esgotos de Porto Alegre nessa contaminação, refletida na distribuição das áreas classe 4 predominantemente junto à margem esquerda do Lago.

No entanto fica bastante clara a capacidade do Lago de se regenerar da contaminação por coliformes. Apesar de receber cargas intensas e ininterruptas de bactérias, o lago Guaíba deságua na Lagoa dos Patos com índices de coliformes próximos a zero.

Figura 16 – Mapa de Classes



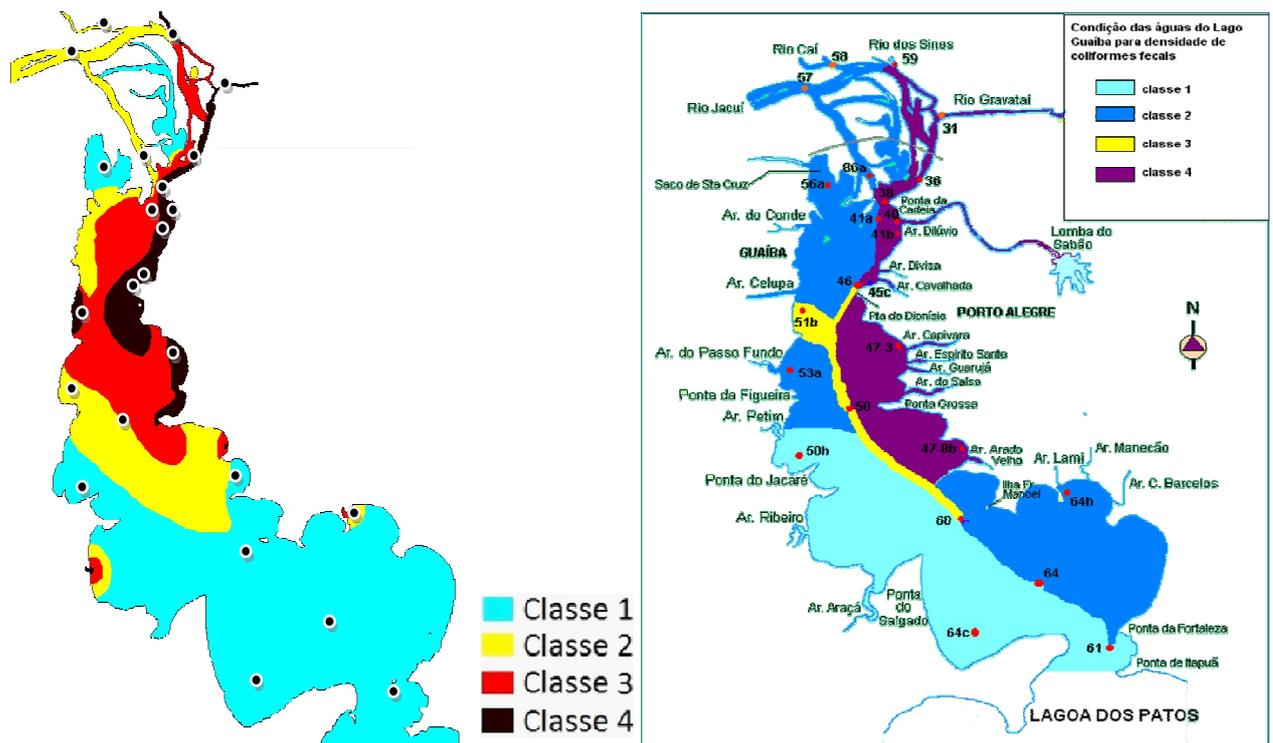
(fonte: elaborado pelo autor)

7.6 COMPARAÇÃO COM TRABALHO ANTERIOR

O caráter diferenciado da abordagem do trabalho torna a verificação dos resultados uma tarefa complexa. As tentativas anteriores de modelar o comportamento do Lago não levam em consideração a dispersão de poluentes, e os estudos a respeito da contaminação do lago Guaíba são raros e tratam de análises em pontos isolados.

Apesar das diferenças, o trabalho realizado por Bendati et al. (2000) foi definido como comparativo. Trata-se de um estudo sobre a qualidade das águas do lago Guaíba composto de 192 medições em 24 diferentes pontos. Após o tratamento estatístico deste conjunto de dados, os autores traçaram um mapa de qualidade das águas, apresentado na figura 17 ao lado do mapa de classes confeccionado pelo presente estudo para fins de comparação.

Figura 17 – Comparação dos Mapas de Classe



(fonte: elaborado pelo autor)⁸

Observando os dois mapas, ficam claras diversas diferenças – muitas delas devido à forma de abordagem da questão. O método do levantamento pontual de dados fornece informações

⁸ Imagem elaborada pelo autor com subsídios de Bendati et al. (2000).

relevantes nos pontos medidos, mas exige interpolações e ajustes muitas vezes grosseiros na determinação destas para as áreas entre os pontos. O resultado são incongruências, como as interfaces entre classes 1 e 3 (próximo ao ponto 50h – Ponta do Jacaré) e entre classes 2 e 4 (ponto 41a – foz do rio Jacuí) que, naturalmente, não correspondem à situação real. Da mesma forma, a ausência de pontos de tomada de dados próximos à Barra do Ribeiro ocasionou a completa ignorância do foco de contaminação presente lá. Por outro lado, o fato de o ponto 56a ser observado como classe 2 sugere o despejo de esgoto diretamente no Saco de Santa Cruz, informação ignorada na elaboração das simulações. Da mesma forma, a medição do ponto 47-8b (foz do arroio Arado Velho) como classe 4 sugere fortemente um erro na locação dos despejos da SES Belém Novo.

Dessa forma, conclui-se que enquanto o modelo numérico está sujeito a erros especialmente devidos aos dados de entrada, o método de medições pontuais falha na percepção de pontos distantes dos considerados, além de existir a possibilidade de erros na medição. Além disso, no caso do estudo comparativo, não são mencionados os critérios usados na definição das classes nas áreas entre os pontos de medição.

A tabela 8 apresenta as classes medidas pelo estudo e as calculadas pelo modelo numérico. Quatro das 24 medições foram removidas da comparação por se encontrarem em pontos limites entre classes diferentes, dificultando sua inserção em uma análise quantitativa.

Tabela 8 – Comparação dos Resultados

Ponto	Medição Pontual	Modelo Numérico	Ponto	Medição Pontual	Modelo Numérico
31	4	4	41b	4	4
36	4	4	45c	4	4
38	4	4	47-3	4	4
40	4	4	47-8b	4	1
46	3	4	50h	1	1
57	2	2	53a	2	2
58	2	2	56a	2	1
59	4	4	64c	1	1
60	2	1	64h	2	2
61	2	1	86a	2	2

(fonte: elaborado pelo autor)

Em 15 dos 20 pontos comparados, as definições coincidiram. Consideradas as diferenças na forma de abordagem e a grande incerteza com relação aos dados de entrada do modelo numérico, o resultado foi considerado satisfatório, uma vez que a maioria dos pontos definidos pelas medições teria a classe corretamente prevista pelo modelo adotado.

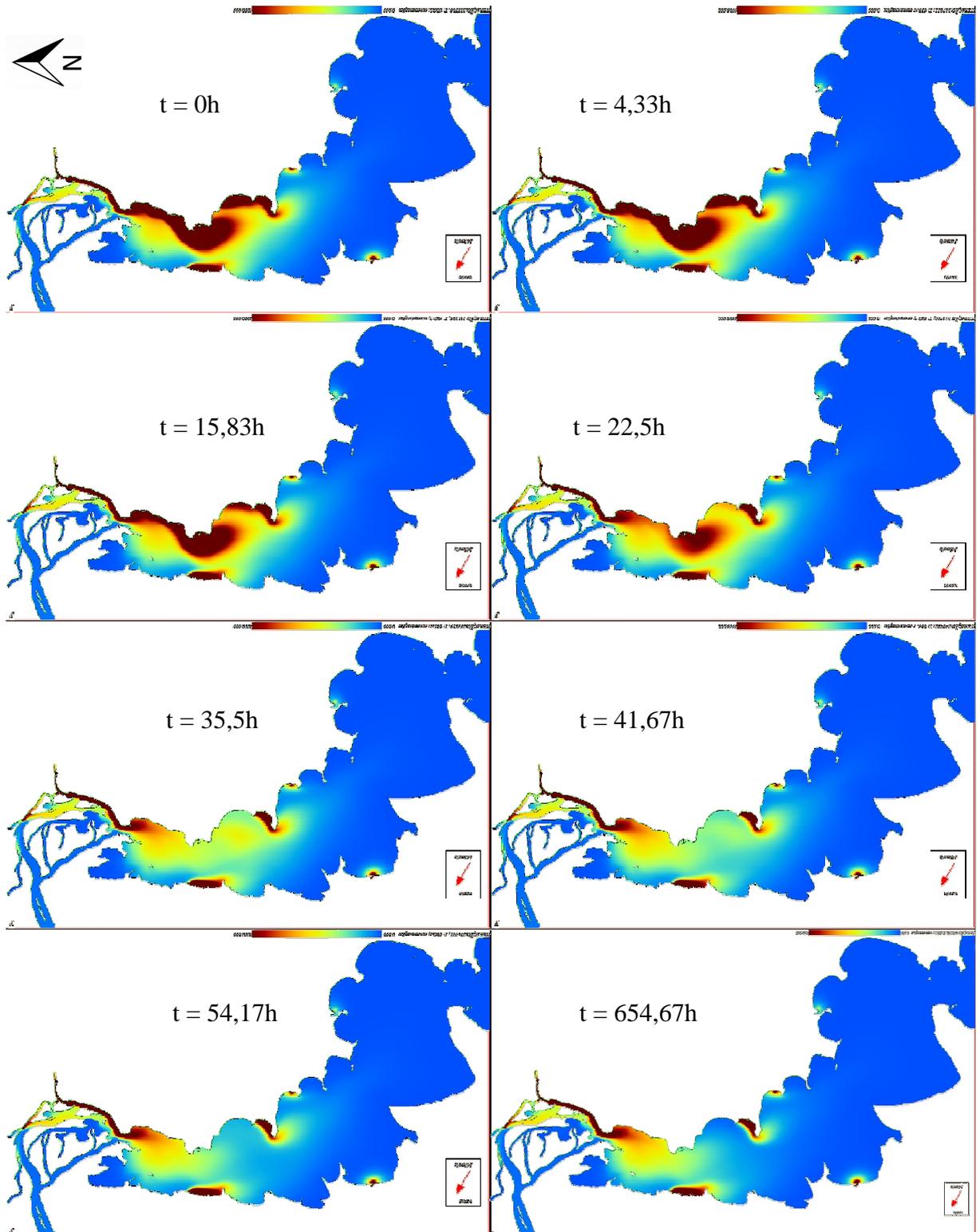
7.7 ANÁLISE DO PISA

O objetivo da prefeitura de Porto Alegre com o Pisa consiste em encerrar as descargas do SES Ponta da Cadeia, Cavalhada e Zona Sul. Para visualizar o comportamento do Lago sob essas novas condições foi realizada uma simulação que teve como condição inicial a condição de estabilidade alcançada na simulação para o vento leste-sudeste, com velocidade de 13,89 km/h. A figura 18 mostra os resultados obtidos para estas condições, sendo a escala limitada a 4000 org/100 ml.

Observando os mapas da figura 18, percebe-se que após 35h as áreas mais críticas já apresentam forte reação, limitando os focos com classe 4 aos pontos realmente próximos aos despejos.

Como os limites de balneabilidade estabelecidos pelo Conama ficam mal representados pela escala adotada, este aspecto é focado na figura 19, onde a primeira imagem limita a observação a 250 org/100 ml (condição de balneabilidade excelente), a segunda a 500 org/100 ml (condição muito boa) e a última a 1000 org/100 ml (condição satisfatória). A seta indica a localização da praia de Ipanema, no município de Porto Alegre, como referência de utilização do lago Guaíba para lazer. O vento utilizado foi o mesmo da simulação anterior: leste-sudeste de velocidade 13,89 km/h.

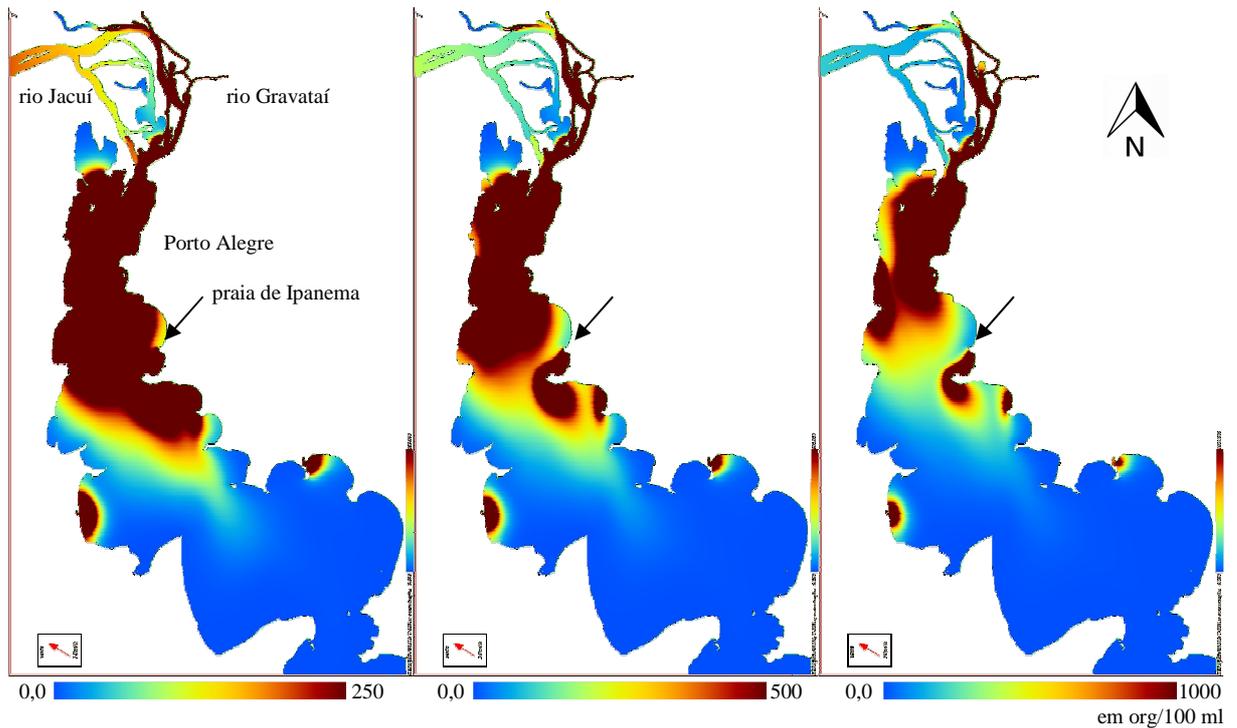
Figura 18 – Gráficos de Dispersão para a Simulação do Pisa



Concentração: 0,00  4000 org/100 ml

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Balneabilidade para o Pisa



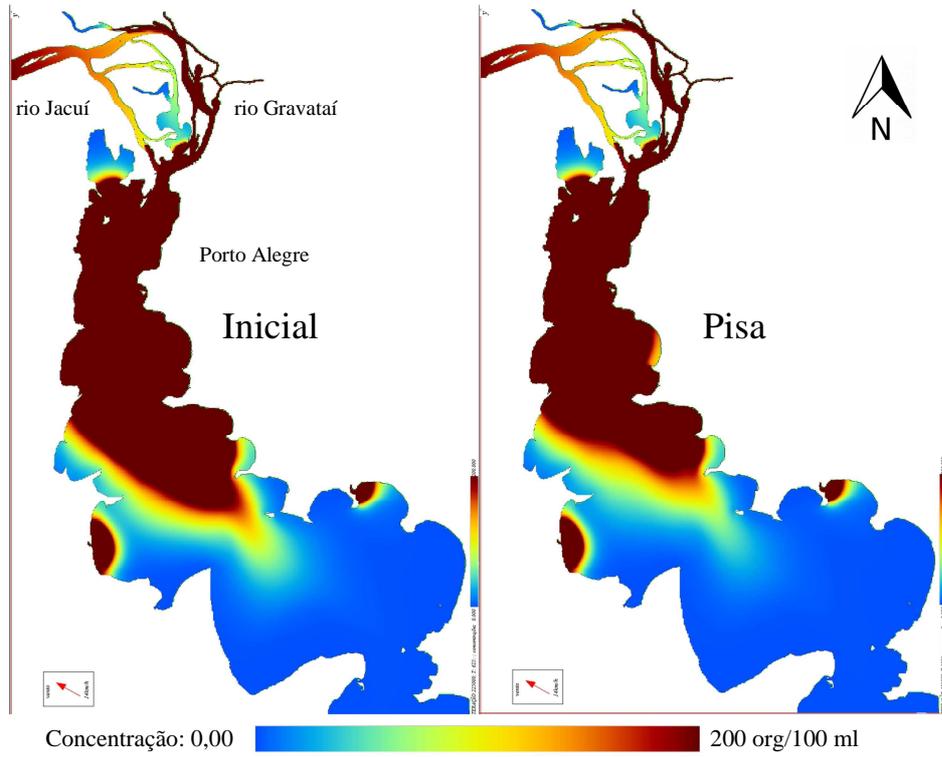
(fonte: elaborado pelo autor)

Pode-se ver que, de fato, uma melhor condição de balneabilidade para a praia de Ipanema foi alcançada, ainda que não nas condições consideradas ideais. A concentração de coliformes estabilizou entre 100 e 450 org/100 ml ao longo da Praia, estando esta, portanto, próxima do limite entre os níveis Muito Bom e Satisfatório do Conama.

De forma geral, o impacto dessas obras no Lago como um todo é extremamente positivo. A figura 20 compara os mapas de dispersão antes e após a implantação do Pisa limitando a escala a 200 org/100 ml. A comparação dos mapas mostra uma redução na área afetada pelos contaminantes, diminuindo seus impactos na parte sul do Lago.

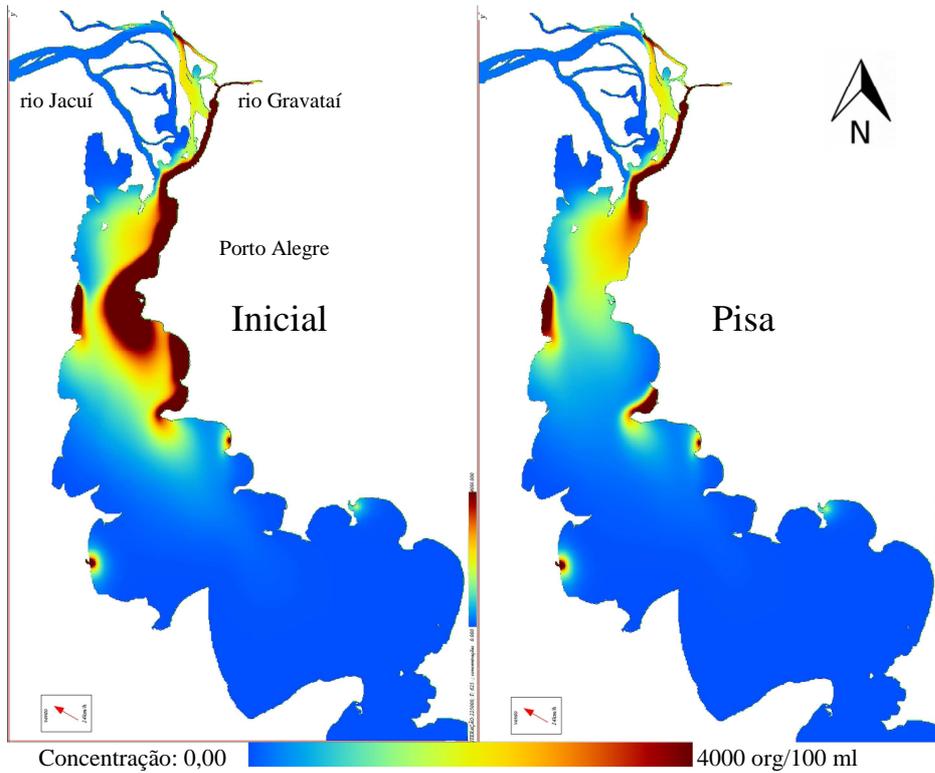
A figura 21 apresenta a mesma situação que a figura 20, mas através de uma escala limitada a 4000 org/100 ml. Os mapas mostram que, apesar da influência do Projeto não ser tão marcante para baixas concentrações, ela se destaca fortemente na redução das áreas classe 4. Em outras palavras, do ponto de vista da balneabilidade da praia de Ipanema, o Projeto é satisfatório. Por outro lado, no que concerne ao Lago como um todo, o Pisa se mostra uma solução extremamente eficaz, reduzindo significativamente as concentrações de coliformes mais danosas ao Lago.

Figura 20 – Importância do Pisa para Baixas Concentrações



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 – Importância do Pisa para Altas Concentrações



(fonte: elaborado pelo autor)

8 CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos por este estudo, constatou-se a situação crítica na qual se encontra grande parte do lago Guaíba, no que concerne a contaminação por esgoto sanitário e ainda referente à qualidade do monitoramento ambiental nele realizado. Apesar da inexistência de um conjunto de dados confiáveis, foi possível observar a significativa contribuição do esgoto de Porto Alegre na geração de pontos com altíssimas concentrações de coliformes, mas que o espalhamento desses organismos em quantidades menos nocivas (próximas a 200 org/100 ml) não reflete a mesma dependência.

Foi confeccionado um mapa de classes, indicando a situação atual do lago Guaíba no que concerne a qualidade de suas águas – no quesito contaminação por coliformes fecais. Este mapa pode ser utilizado como base para outros estudos, assim como para auxiliar na definição de pontos de coleta para monitoramento da qualidade das águas.

Percebeu-se, ainda, a fraca atuação do vento como fator de variação no comportamento hidrodinâmico. Mantendo os parâmetros e variáveis constantes para estas simulações e analisando o comportamento da dispersão perante a variação do vento, pode-se concluir que o mesmo não tem influência significativa na dispersão de coliformes no lago Guaíba. Nas condições consideradas, a condição de estabilidade foi alcançada após, aproximadamente, 200 horas a partir do início dos despejos.

No que concerne à contaminação por bactérias, o lago Guaíba apresentou grande potencial regenerativo, desaguando na Lagoa dos Patos praticamente livre de coliformes, apesar das cargas expressivas e ininterruptas às quais é sujeito.

Por fim, a previsão dos impactos referentes à implantação do Pisa – Projeto Integrado Socioambiental – foi bastante positiva, esperando-se uma forte redução das áreas altamente contaminadas (Classe 4), uma diminuição, ao menos parcial, do espalhamento da concentração de bactérias *E. coli*. (até Classe 2) e, ainda, propiciar condições adequadas de balneabilidade para a praia de Ipanema. Portanto, o Projeto é uma ferramenta valiosa na transformação do panorama do Lago.

REFERÊNCIAS

- AYER, F. Contaminação por metais pesados ameaçam o Rio São Francisco. **Estado de Minas**. 7 fev. 2011. Não paginado. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2011/02/07/interna_gerais,208208/contaminacao-por-metais-pesados-ameacam-o-rio-sao-francisco.shtml>. Acesso em: 11 set. 2011.
- BENDATI, M. M.; SCHWARZBACH, M. S.; MAIZONAVE, C. R. M.; BITTENCOURT, L.; BRINGHENTI, M. Avaliação da qualidade da água do Lago Guaíba (Rio Grande do Sul, Brasil) como suporte para a gestão da bacia hidrográfica. CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL 27. 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2000.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **Tabelas Climatológicas**. Rio de Janeiro, RJ, 2007. TCA 105-7. Disponível em: <<http://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=2695>>. Acesso em: 16 nov. 2011.
- _____. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **Sistema de geração e disponibilização de informações climatológicas**. Disponível em: <<http://clima.icea.gov.br/clima/index.php>>. Acesso em: 16 nov. 2011.
- CASALAS, A. B. **IPH-A aplicativo para modelação de estuários e lagoas**: manual de utilização do sistema. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, 1996.
- CERQUEIRA, D. A.; HORTA, M. C. de S. Coliformes Fecais não existem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL 20.1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1999. p.1239-1244. Disponível em <<http://www.geocities.ws/profberti/19.html>>. Acesso em: 16 nov. 2011.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem**. São Paulo, SP, 2009. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/agua/aguas-superficiais/variaveis.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2011.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 020**, de 18 de junho de 1986. Dispõe da classificação, segundo seus usos preponderantes, em nove classes, das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. Brasília, DF, 1986. Não paginado. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=43>>. Acesso em: 11 set. 2011.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER. **Qualidade das águas da bacia hidrográfica do rio Jacuí**. Porto Alegre, RS, [entre 2002 e 2011]. Não paginado. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_jacui/jacui.asp>. Acesso em: 16 nov. 2011.
- _____. **Monitoramento dos afluentes do lago Guaíba**. Porto Alegre, RS, 2012a. Não paginado. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/monitor_agua.asp>. Acesso em: 17 maio 2012.

_____. **Monitoramento do rio Caí.** Porto Alegre, RS, 2012b. Não paginado. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_cai/cai.asp>. Acesso em: 17 maio 2012.

_____. **Monitoramento do rio dos Sinos.** Porto Alegre, RS, 2012c. Não paginado. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_sinos/sinos.asp>. Acesso em: 17 maio 2012.

_____. **Monitoramento do rio Gravataí.** Porto Alegre, RS, 2012d. Não paginado. Disponível em: http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_gravatai/gravatai.asp. Acesso em: 17 maio 2012.

_____. **Monitoramento do rio Jacuí.** Porto Alegre, RS, 2012e. Não paginado. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_jacui/jacui.asp>. Acesso em: 17 maio 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Contagem Populacional 2007.** Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, 2007.

_____. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável.** Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências/IBGE, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/ids2010.pdf>>. Acesso em: 14 maio. 2012.

LEITE, E. H.; HAASE, J.; PINEDA, M. D.; SILVA, M. L. C.; COBALCHINI, M. S. Qualidade dos recursos hídricos superficiais da bacia do Guaíba: subsídio para o processo de enquadramento. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS. 1998, Gramado. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 1998, p. 1-7. Disponível em: <<http://usuarios.multimania.es/singreh/Web/S44/109.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2011.

LOPES, F. F. **Monitoramento ambiental da bacia hidrográfica do Lago Guaíba – RS – Brasil, através da utilização de diferentes metodologias aplicadas a taxocenoses de peixes.** 2006. 228 f. Tese (Doutorado em Biologia Animal) – Programa de Pós-Graduação em Biologia Animal, Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MENEGAT, R. (Coord.). **Atlas Ambiental de Porto Alegre.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1999.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION.[200-]. Disponível em: <http://www.popa.com.br/whereweare/patos_guaiba_poa_0802.jpg> Acesso em: 15 mar. 2012.

NICOLODI, J. L. **O padrão de ondas no lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação.** 2007. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PAZ, A. R.; REIS, L. G. M.; LIMA, H. V. C. Uso de modelagem hidrodinâmica visando a segmentação de corpos d'água rasos para Enquadramento: o caso do Lago Guaíba (RS). In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 16., 2005, João Pessoa. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2005. Disponível em:

<http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/Paz_et_al_SBRH_2005a.pdf> Acesso em: 25 mar. 2012.

PORTO ALEGRE. Departamento Municipal de Água e Esgoto. **Plano Diretor de Esgotos**. 5. ed. Porto Alegre, 2010.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul**: Relatório Síntese da Fase A – RSA Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007. Disponível em: <http://www.perh-rs.com.br/downloads/download.php?arq=RS_documento_completo.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2012.

_____. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Mapas e Geoprocessamento**. Disponível em: <<http://enola.procergs.com.br/i3geo/aplicmap/geral.htm?p0mcpjd0u41vo47hh7dv6sbkm5#anacor>>. Acesso em: 16 nov. 2011.

_____. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Pró-Guaíba. **RS com divisão das Bacias da RHG**. Disponível em: <http://www.proguaiba.rs.gov.br/mapas/pages/BACIAS_JPG.htm>. Acesso em: 14 mar. 2012.

SCHWARZBACH, M. S. R.; CASALAS, A. B.; LERSCH, E. C.; HOFFMANN, C. X. Aplicação do modelo IPH-A, de correntologia e transporte de poluentes, a baía de Ipanema. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. **Resumos...** Rio de Janeiro: Abes, 1997. p. 238.