

**DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
MODALIDADE PROFISSIONAL**

**CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE UMA LAGOA URBANA UTILIZANDO A  
MODELAGEM COMPUTACIONAL (MOHID): O CASO DA LAGOA DO VIGÁRIO**

**CARLOS HENRIQUE DE OLIVEIRA PRECIOSO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ**

**NOVEMBRO – 2010**

**CARLOS HENRIQUE DE OLIVEIRA PRECIOSO**

**CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE UMA LAGOA URBANA UTILIZANDO A  
MODELAGEM COMPUTACIONAL (MOHID): O CASO DA LAGOA DO VIGÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – **IFF** como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, área de concentração de Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento e Sustentabilidade.

**Orientador:** Prof. Dr. Jáder Lugon Júnior – **IFF**  
(Doutor em Modelagem Computacional – **IPRJ/**  
**UERJ**)

**CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ**  
**NOVEMBRO – 2010**

Dissertação intitulada **CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE UMA LAGOA URBANA UTILIZANDO A MODELAGEM COMPUTACIONAL (MOHID): O CASO DA LAGOA DO VIGÁRIO**, elaborada por **CARLOS HENRIQUE DE OLIVEIRA PRECIOSO** e apresentada publicamente à Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, na área de concentração Sustentabilidade Regional, na linha de pesquisa Desenvolvimento e Sustentabilidade, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – **IFF**.

Aprovada em 30 de Novembro de 2010.

Banca Examinadora:

---

Prof. Jader Lugon Júnior, D.Sc. – **IFF**

(Doutor em Modelagem Computacional – **IPRJ/UERJ**)

**Orientador**

---

Prof. José Augusto Ferreira da Silva, D.Sc. – **IFF**

(Doutor em Geografia – **UNESP**)

---

Prof. Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues, D.Sc. – **IPRJ/UERJ**

(Doutor em Oceanografia – University of New Castle Upon Tyne, **UK**)

Dedico este trabalho à minha mãe Ivani, à minha esposa Andréia, minhas filhas Larissa e Maria Clara, ao meu pai Arêncio (*in memorian*) e minha tia Genalda de Barros (*in memorian*).

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao bom Deus, primeiramente, pelas bênçãos e por sua infinita graça.

Aos meus amigos de curso, pela companhia e bons momentos que passamos juntos.

Ao meu amigo Cristiano Peixoto (LCA/UENF), sem o qual jamais concluiria meus trabalhos de campo e que tanto subsidiaram essa dissertação.

À Francine Kalas (IPRJ-UERJ), pela paciência, reciprocidade e parceria nos trabalhos – inclusive pela amizade (...), sem as quais não obteria êxito.

Ao Prof. Dr. Vicente de Paulo Santos Oliveira, pelo apoio incondicional, pela orientação, pelas sugestões à minha prática e suporte logístico à realização de meu trabalho de campo.

Ao Prof. Dr. Pedro Paulo Watts Rodrigues Gomes (IPRJ-UERJ) pela reciprocidade, suporte e orientação junto ao IPRJ-UERJ.

Ao Pró-Reitor de Extensão, Prof. Hélio Junior de Souza Crespo (Helinho), pelo reconhecimento de meu trabalho e atendimento as minhas solicitações.

À Prof<sup>a</sup>. Maria Inês Paes Ferreira pelo suporte e apoio à minha pesquisa de campo, por ter cedido os equipamentos que foram imprescindíveis à realização dos trabalhos.

Ao colega de Mestrado e diretor da UPEA-IFF, Rogério Burla, pela cessão dos equipamentos de medição e uso do laboratório.

Ao 5º Grupamento de Bombeiros Militar, em Campos dos Goytacazes/RJ, pelo incrível apoio logístico à realização da prática de campo, sem o qual jamais o realizaria dentro das normas de segurança em embarcações.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jader Lugon Júnior, pela orientação, pelo incentivo, pela ajuda, pela amizade – a qual aprendi a cultivar com zelo e satisfação –, e por me ter aberto as portas do mundo acadêmico e da pesquisa.

Ao Instituto Federal Fluminense – IFF, agradeço pela oportunidade de, novamente, fazer parte desta bela e reconhecida instituição, ao qual me alegro ter concluído esta nova etapa de minha vida acadêmica.

À Prefeitura de Campos, pelo programa de incentivo aos servidores municipais, sem o qual minha qualificação não seria tão exitosa.

Enfim, a todos que indiretamente contribuíram de alguma forma para a conclusão de minha dissertação.

“A mente que se abre a um novo conhecimento jamais torna ao seu estado original”.

**Albert Einstein**

## RESUMO

Os modelos computacionais têm sido largamente utilizados na geração de cenários e na tomada de decisões sob o prisma ambiental. Neste trabalho, o comportamento de parâmetros ambientais num corpo d'água lacustre impactado (Lagoa do Vigário/RJ) foi avaliado com auxílio da plataforma Mohid – que utiliza o método dos volumes finitos (MVF) para resolver problemas numéricos contínuos com a discretização de um domínio em malhas estruturadas, espacial e temporal, e permite a simulação de variáveis conservativas e não-conservativas. Os resultados experimentais juntamente aos mapas de dispersão gerados na interface gráfica GIS, permitiram um diagnóstico acerca da qualidade das águas da lagoa de forma satisfatória. Na interface GUI (*Graphical User Interface*), as simulações de diferentes cenários (descargas sanitárias e escoamento fluvial) nos pontos amostrados favoreceram a análise de consistência/coerência quanto aos parâmetros oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio (NTP) e temperatura.

**PALAVRAS CHAVES** – Qualidade da água, Modelagem ambiental, Mohid

## **ABSTRACT**

Computational models have been widely used in the generation of scenarios and decision making an environmental perspective. In this work, the behavior of environmental parameters in a lake impacted water body (Vigário Lake/ RJ) was evaluated with the aid of the platform Mohid - which uses the finite volume method (FVM) to solve problems with continuous numerical discretization of a field in structured grids, spatial, temporal, and allows the simulation of conservative variables and non-conservative. The experimental results together with dispersion maps generated in GIS graphical user interface, allowed a diagnosis about the quality of the lagoon water in a satisfactory manner. In the GUI, the simulations of different scenarios (sanitary discharges and river flow) at the points sampled favored model calibration for parameters dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD), nitrogen (TKN) and temperature.

**KEYWORDS** – Water quality, Environmental modeling, Mohid;

## LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas  
CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos  
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente  
CTA – Centro de Tecnologia Ambiental  
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio  
DQO – Demanda Química de Oxigênio  
DNOS – Departamento Nacional de Obras e Saneamento  
DZ – Diretrizes  
ETE – Estação de Tratamento de Esgotos  
EVP – Evapotranspiração Potencial  
ETR – Evapotranspiração Realizada  
EAR – Equações de Águas Rasas  
FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente  
FIRJAN – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro  
FMP – Faixa Marginal de Proteção  
GB – GigaBitz  
GIS – Geographical Information System  
GBM – Grupamento de Bombeiros Militar  
GPS – Global Position System  
GUI – Graphical User Interface  
HD – Hard Disk  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IDH – Índice de Desenvolvimento Humano  
IFF – Instituto Federal Fluminense  
IEF – Instituto Estadual de Florestas  
INEA – Instituto Estadual do Ambiente  
KCAL – quilocaloria  
LCA – Laboratório de Ciências Ambientais  
LAGEOP – Laboratório de Geoprocessamento  
SLAP – Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras  
LV – Lagoa do Vigário  
MMA – Ministério do Meio Ambiente

MOHID – Modelling Hydrodynamic System  
MVF – Método dos Volumes Finitos  
NT – Normas Técnicas  
NTU – Unidade Turbidez Nefelométrica (sigla inglês)  
NTP – Nitrogênio Orgânico Particulado  
OD – Oxigênio Dissolvido  
ONU – Organização das Nações Unidas  
pH – Potencial Hidrogeniônico  
PERH – Plano Estadual de Recursos Hídricos  
PNMA – Política Nacional de Meio Ambiente  
PNRH – Plano Nacional de Recursos Hídricos  
PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento  
PNSB – Programa Nacional de Saneamento Básico  
PMCG – Prefeitura Municipal de Campos dos Goytacazes  
SAGA – Sistema de Avaliação Geo-Ambiental  
SEMA – Secretaria Municipal de Meio Ambiente  
SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial  
SERLA – Superintendência Estadual de Rios e Lagoas  
SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente  
SINGREH – Sistema nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos  
RPS – Rio Paraíba do Sul  
TKN – Total Kjeldahl Nitrogen (sigla inglês)  
UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro  
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro  
UTM – Universal Transversor Mercator

## LISTA DE SÍMBOLOS

A – área

C – elemento químico carbono

Ch – coeficiente de Chezy

CO<sub>2</sub> – molécula de dióxido de carbono

C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> – molécula de glicose

K<sub>x</sub>, D<sub>x</sub> e K<sub>y</sub>, D<sub>y</sub> – coeficientes de dispersão turbulenta

H<sub>2</sub>O – molécula de água

dV/dt – derivada do volume em função da derivada do tempo

E<sub>o</sub> – evaporação inicial

I – infiltração

F – fontes e sumidouros

G – radiação

h – altura

H – elemento químico hidrogênio

H<sup>+</sup> e H<sup>-</sup> – íons hidrogênio positivo e negativo

xyz – coordenadas cartesianas

ΔV – variação de volume

Δt – variação do tempo

ΔW – variação de armazenamento de água

O – elemento químico oxigênio

P – precipitação

Q – vazão de água

V – volume

x<sup>1/2</sup> – raiz quadrada

OH<sup>-</sup> – dipólo de hidroxila

R<sup>2</sup> – raio ao quadrado

R – deflúvio das equações de balanço hídrico

t – tempo

T – temperatura

u e v – componentes longitudinal e transversal

% – percentual

± – mais ou menos

$\partial x$  – integral parcial de x

$\partial y$  – integral parcial de y

$< >$  – menor ou maior que

$\Delta$  – letra grega delta

$\partial$  – letra grega derronde (integração)

$\mu$  – letra grega mi (micro -  $10^6$ )

$\beta$  – letra grega beta

$\pi$  – letra grega pi (tem valor numérico de 3,14)

$\rho$  – letra grega rô (coeficiente)

## LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

cal/cm<sup>2</sup>/dia – caloria por centímetro quadrado por dia

cal/g.°C – caloria por grama graus Celsius

mg/L – miligramas por litro

m – metros

mm/mês – milímetros por mês

mL – mililitros

m/s – metros por segundo

m<sup>3</sup> – metros cúbicos

m<sup>3</sup>/s – metros cúbicos por segundo

m<sup>3</sup>/dia – metros cúbicos por dia

m<sup>3</sup>/mês – metros cúbicos por mês

°C – graus Celsius

kg – quilograma

kcal/mol – quilocaloria por molécula

km - quilometro

km<sup>2</sup> – quilometro quadrado

km<sup>3</sup> – quilometro cúbico

watts/m<sup>2</sup> – watts por metro quadrado

μM – micrômetros

μS/cm – microsiemens por centímetro

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Esquema de Compartimentos de um lago .....	8
<b>Figura 2</b> – Esquema das Estratégias de Controle de esgoto .....	16
<b>Figura 3</b> – Tipos de Lisímetros usados para medir evapotranspiração.....	27
<b>Figura 4</b> – Fluxograma de Processos de Modelagem em Recursos Hídricos.....	39
<b>Figura 5</b> – Imagem de Satélite dos Possíveis Caminhos do RPS.....	45
<b>Figura 6</b> – Mapa Geomorfológico do Município de Campos dos Goytacazes/RJ.....	47
<b>Figura 7</b> – Mapa Físico do RJ, modificado (a esquerda) com indicação da Lagoa do Vigário (porções norte e sul), no município de Campos dos Goytacazes / RJ (a direita)..	49
<b>Figura 8</b> – Imagem da lagoa do Vigário que ilustra sua proximidade com o rio Paraíba do Sul e lagoa do Taquarucu, ambas com a malha urbana envolvendo-a.....	50
<b>Figura 9</b> – Mapa de Uso de Solos do Entorno da lagoa do Vigário.....	52
<b>Figura 10</b> – Desenho Esquemático da Manilha na saída da lagoa do Vigário.....	59
<b>Figura 11</b> – Imagem editada do Google Earth com a definição estimada da bacia de drenagem da lagoa do Vigário.....	62
<b>Figura 12</b> – Representação Esquemática da lagoa do Vigário para um balanço hídrico..	63
<b>Figura 13</b> – Foto da equipe de trabalho de campo realizado na lagoa do Vigário.....	65
<b>Figura 14</b> – Composição de imagens dos equipamentos utilizados na medição instantânea de alguns parâmetros na lagoa do Vigário.....	67
<b>Figura 15</b> – Carta Batimétrica Editada da lagoa do Vigário, usada na Interface GIS da Plataforma Mohid.....	69
<b>Figura 16</b> – Distribuição Espacial dos Pontos de Batimetria na interface GIS do Mohid, para Construção do Terreno Digital.....	74
<b>Figura 17</b> – Domínio Discretizado com Grade Gerada, de 187 x 70, com passo 10 (tamanho de células), e Polígonos na interface GIS do Mohid.....	76
<b>Figura 18</b> – Distribuição Espacial das Estações de Amostragem de Parâmetros Mensurados (oxigênio), gerado na interface GIS da plataforma Mohid.....	78
<b>Figura 19</b> – Distribuição Espacial das Estações de Amostragem de Parâmetros Mensurados (condutividade), gerado na interface GIS da plataforma Mohid.....	80
<b>Figura 20</b> – Mapa com Locações dos Principais Pontos de Descarga e Fontes Poluidoras na lagoa do Vigário.....	82
<b>Figura 21</b> : Pontos Amostrados da lagoa do Vigario para DBO, OD, NTP e Temperatura, elaborado na interface GIS do Mohid.....	85

<b>Figura 22</b> – Fotos da Vegetação Flutuante presente na lagoa do Vigário, onde se vê espécies conhecidas por gigoga/aguapé e taboa.....	88
<b>Figura 23</b> – Terreno Digital da Batimetria da lagoa do Vigário, gerado na interface GIS da plataforma Mohid (versão 2002), em 31/10/2010.....	90
<b>Figura 24</b> – Distribuição Espacial da Condutividade na lagoa do Vigário, gerado na interface GIS da plataforma Mohid (versão 2002), em 31/10/2010.....	92
<b>Figura 25</b> – Simulação da Descarga de Efluentes com Predominância do Comportamento da DBO.....	95
<b>Figura 26</b> – Simulação da Descarga de Efluentes com Predominância do Comportamento do OD.....	97
<b>Figura 27</b> – Simulação da Descarga de Efluentes com Predominância do Comportamento do Nitrogênio Total .....	98
<b>Figura 28</b> – Simulação da Descarga de Efluentes com Predominância do Comportamento da Temperatura.....	99

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Fatores relacionados com a urbanização de ambientes naturais .....	18
<b>Tabela 2</b> – Síntese dos elementos definidores da Resolução CONAMA No 357/2005 enquadramento de usos e parâmetros de águas doces.....	31
<b>Tabela 3</b> – Síntese do Padrão de Eficiência de Remoção de DBO para Dimensionamento de Unidades de Tratamento de Esgotos.....	33
<b>Tabela 4</b> – Síntese do Padrão de Eficiência para Dimensionamento de Unidade de Tratamento de Esgotos Sanitários de Varias Atividades Comercias e Industriais com Cozinha.....	33
<b>Tabela 5</b> – Síntese do Padrão de Eficiência para Dimensionamento de Unidade de Tratamento de Esgotos Sanitário de Varias Atividades Comerciais e Industriais sem Cozinha.....	34
<b>Tabela 6</b> – Síntese do Padrão de Concentração Máxima de Matéria Orgânica (DBO ou RNFT) Permitidas para o Lançamento de Efluentes Líquidos Residenciais em Corpos D'água.....	34
<b>Tabela 7</b> – Localização dos pontos amostrados na Lagoa do Vigário.....	66
<b>Tabela 8</b> – Resultados obtidos para os parâmetros OD (mg.L-1), DBO (mg.L-1), NTP (mg.L-1), Temperatura (°C), pH e Condutividade ( $\mu\text{S.cm}^1$ ) na Lagoa do Vigário.....	68
<b>Tabela 9</b> – Cálculo do Balanço Hídrico da lagoa do Vigário no mês de Maio/2010....	71
<b>Tabela 10</b> – Cálculo do Balanço Hídrico da lagoa do Vigário no Mês de Junho/2010...	72
<b>Tabela 11</b> – Característicos dos Efluentes e Descargas na Simulação.....	83
<b>Tabela 12</b> – Tabela de Comparação de Dados Amostrados e Simulados (Coerência)..	100

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE SIMBOLOS</b> .....	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiv
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xvi
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	6
<b>2.1. Objetivo Geral</b> .....	6
<b>2.2. Objetivos Específicos</b> .....	6
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	7
<b>3.1. Corpos Lacustres (Águas Lênticas)</b> .....	7
<b>3.2. O Regime de Funcionamento dos Lagos</b> .....	9
<b>3.3. Eutrofização e Antropização: Aspectos da Degradação Ambiental</b> .....	11
<b>3.4. As Variáveis Limnológicas</b> .....	18
3.4.1. Variáveis Físicas.....	18
3.4.2. Variáveis Físico-químicas.....	20
<b>3.5. O Balanço Hídrico</b> .....	22
<b>3.6. Os Parâmetros Legais de Águas Superficiais no Brasil</b> .....	29
3.6.1. O Parâmetro Nacional CONAMA.....	29
3.6.2. O Parâmetro Estadual INEA-RJ.....	31
<b>4. A MODELAGEM COMPUTACIONAL</b> .....	37
<b>4.1. Conceitos de Modelagem Computacional</b> .....	37
<b>4.2. Modelagem e Previsão</b> .....	40
<b>4.3. Sistema de Modelagem MOHID</b> .....	40
4.3.1. Descrição do Sistema.....	41
<b>5. ÁREA DE ESTUDO</b> .....	45
<b>5.1. Histórico da Região Aluvial do Norte Fluminense</b> .....	45
<b>5.2. Localização e Características da lagoa do Vigário</b> .....	48

<b>5.3. Características Específicas e Gerais</b> .....	49
5.3.1. Características do Entorno.....	50
5.3.2. Características Bióticas e Abióticas da lagoa do Vigário.....	54
<b>6. METODOLOGIA</b> .....	56
<b>6.1. Estratégia Inicial de Desenvolvimento</b> .....	56
<b>6.2. Trabalho de Campo</b> .....	57
6.2.1. Determinação da Vazão do Exutório para o Balanço Hídrico.....	58
6.2.2. Definição e Caracterização da Micro-bacia da lagoa do Vigário.....	60
6.2.3. Medições dos Parâmetros Físicos e Físico-químicos.....	63
<b>6.3. Balanço Hídrico da lagoa do Vigário</b> .....	70
<b>6.4. Implementação do Modelo Computacional</b> .....	73
6.4.1. Método para Implementação da Interface Gráfica GIS.....	73
6.4.2. Construção da Simulação na Interface GUI (Simulador).....	81
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	87
<b>7.1. Resultados das Amostras de Campo</b> .....	87
7.1.1. Diagnóstico para a Qualidade das Águas na lagoa do Vigário.....	87
7.1.2. Considerações sobre o Balanço Hídrico na lagoa do Vigário.....	88
<b>7.2. Análise dos Parâmetros Amostrados Através Interface Gráfica GIS</b> .....	89
<b>7.3. Resultados da Simulação Através da Interface GUI</b> .....	94
7.3.1. Cenário .....	94
<b>8. CONCLUSÃO E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	104
<b>8.1. Conclusões</b> .....	104
<b>8.2. Sugestões para Trabalhos Futuros</b> .....	105
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	107

## 1. INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais é a base para o desenvolvimento da sociedade. Durante muito tempo, esta afirmação não foi vista com a importância que realmente representa, pois a crença de que esses recursos seriam inesgotáveis custou à humanidade a destruição de florestas, extermínio de animais e plantas, além da poluição das águas e do ar (MACHADO, 2006).

O crescimento de centros urbanos, comerciais e industriais, que por muitas décadas se realizou de forma desordenada e sem um planejamento adequado, mostra hoje suas consequências. Os efeitos da atividade humana na poluição de águas, solo e ar são atualmente temas de discussão e estudo em diversos centros de pesquisa. Todo esse conhecimento – ainda em aquisição, gerou maior conscientização sobre os riscos de que a civilização humana corre caso os recursos naturais existentes não sejam adequadamente preservados (MACHADO, 2006).

Machado (2006) relata que no III Fórum Mundial das Águas, realizado em março de 2003, em Quioto, no Japão, foi divulgado um estudo com previsões aterradoras, feitas pela Organização das Nações Unidas (ONU). Segundo ele, o estudo alerta que entre 2 e 8 bilhões de pessoas poderão sofrer com a falta de água potável ou com saneamento básico inadequado até a metade do século XXI.

Estima-se que a quantidade total de água na Terra, em torno de 1.386,0 milhões/m<sup>3</sup>, tem permanecido praticamente constante durante os últimos 500 milhões de anos. Desse total, apenas 0,27%, ou seja, 93.100 km<sup>3</sup>, representa o volume de água doce do planeta, correspondente aos rios e lagos, formas de armazenamento mais acessíveis ao uso humano, e aos ecossistemas. A exploração do potencial hídrico subterrâneo, em aquíferos profundos, apesar de apresentar uma reserva hídrica cem vezes superior a dos rios e lagos, constitui uma atividade de risco que exige tecnologia avançada de investigação hidrogeológica e perfuração de poços, de altíssimo custo, para a captação de águas subterrâneas em lençóis a mais de 1.000 m de profundidade (SHIKLOMANOV, 1997, *apud* MACHADO, 2006).

Estima também que, atualmente, a demanda anual de água no mundo seja de 3.940 km<sup>3</sup>, representando menos de 10% do volume total disponível. Sendo assim, em nível global, não haveria escassez hídrica, porém, a má distribuição espacial e temporal da água, somada à distribuição demográfica irregular na Terra, faz com que algumas regiões sofram permanentemente com a falta de água. A escassez de água potável se deve a uma série de fatores: econômicos, geográficos, demográficos, entre outros. Além destes fatores, observa-

se também um número alarmante de rios cujas águas tornaram-se impróprias para o uso devido ao despejo de efluentes industriais e domésticos (SHIKLOMANOV, 1997, *apud* MACHADO, 2006).

Quase a totalidade da água utilizada para servir ao abastecimento público e industrial é proveniente dos rios. Com relação a estes recursos hídricos, a possibilidade de escassez de água tem se mostrado cada vez maior e consequências já podem ser percebidas por parte da população do planeta. Algumas regiões convivem diariamente com a suspensão parcial do abastecimento de água potável. Cerca de um quarto da população mundial não tem acesso à água adequada ao consumo humano. Pesquisas realizadas em 1985 pela Organização Mundial da Saúde revelaram que 97% dos habitantes de países industrializados tinham acesso à água tratada; já nos países em desenvolvimento este índice caía para 35 %. O Brasil tem uma situação privilegiada em termos de água, com 13,7 % da água doce disponível no planeta e dois terços do maior aquífero subterrâneo do mundo, o aquífero Guarani. Isto significa uma disponibilidade de água 80 % maior que a do Canadá e a da China, e duas vezes maior que a dos Estados Unidos (SHIKLOMANOV, 1997, *apud* MACHADO, 2006).

O país também passa por mudanças sócio-econômicas importantes, que convergem para uma redução das desigualdades econômicas regionais e, conseqüentemente, eventual deslocamento das pressões de consumo para novas regiões hidrográficas (GEO Brasil/MMA, 2007).

Segundo o censo 2010 do Instituto Brasileiro de Estatística e Geografia –IBGE, o país abriga uma população de 190,7 milhões de habitantes. Ao longo dos últimos anos, o crescimento demográfico tem diminuído o ritmo, devido à urbanização (81% dos brasileiros vivem em cidades) e à industrialização, além de incentivos à redução da natalidade. Em termos de Índice de Desenvolvimento Humano o país ocupava em 2004 a 69ª posição em 177 países, com um IDH de 0,792 (GEO Brasil/MMA, 2007).

Ainda segundo o Ministério do Meio Ambiente – MMA<sup>1</sup>, a concentração populacional no Sudeste se reflete também na atividade econômica e na renda: “com 11% do território brasileiro, a região concentra cerca de 43% da população e 56% do poder de compra do país, enquanto a região Norte, que corresponde a 45% do território nacional, detém 8% da população brasileira e apenas 4,5% do poder de compra”.

---

1 Ministério do Meio Ambiente – MMA, órgão do poder executivo federal responsável implementação e execução da política nacional de meio ambiente – PNMA, na esfera federal, segundo diretrizes fixadas na lei federal nº 6.938/81;

Todavia, essa concentração tem se reduzido nos últimos anos, com o PIB<sup>2</sup> brasileiro tendo registrado crescimento mais acelerado nas regiões Norte e Nordeste, sendo que a primeira possui os maiores volumes de recursos hídricos disponíveis, e a segunda os menores, que são utilizados muitas vezes em níveis críticos. Tal descentralização das atividades produtivas poderá afetar também os fluxos migratórios, alterando os perfis demográficos existentes. Mesmo com rendimentos econômicos relativamente elevados em termos nacionais, sua distribuição desigual impede que a cobertura dos serviços de saneamento no Brasil seja elevada entre as populações pobres, que proporcionalmente pagam mais pela água potável: segundo o Relatório do Desenvolvimento Humano 2006 do PNUD, no Brasil a parcela de 20% da população mais rica goza de um acesso à água e saneamento em níveis comparáveis aos dos países ricos, enquanto os 20% dos mais pobres registram taxas de cobertura mais baixas do que no Vietnã. Se há uma correlação entre cobertura e inclusão social, as perspectivas futuras são positivas, já que o país vem registrando nos últimos anos uma redução na desigualdade, como resultado dos programas sociais adotados pelo governo. A perspectiva de inclusão de novos consumidores significa maior utilização de recursos hídricos e maior geração de efluentes, entre outros impactos (GEO Brasil/MMA, 2007).

Ainda segundo o Ministério do Meio Ambiente, as regiões Sul e Sudeste contam com boas disponibilidades de água, razoavelmente bem distribuídas ao longo do ano. Apesar disso, enfrentam problemas decorrentes das características do processo de rápida urbanização do Brasil. Estima-se que as cidades brasileiras aumentaram sua população em 110 milhões de pessoas nos últimos 60 anos, sendo que a metade dos moradores urbanos está concentrada em apenas 23 regiões metropolitanas; estes aglomerados urbanos tendem a manter seus impactos sobre os recursos hídricos mesmo no atual cenário, de redução da taxa anual de crescimento urbano do País. As pressões caracterizam-se pela sobreposição de problemas como poluição doméstica e industrial; ocupação irregular de encostas, alagados, várzeas e beiras de rios; e enchentes em cidades de grande e médio porte. O resultado é o comprometimento dos mananciais de abastecimento, com escassez de disponibilidade hídrica em qualidade adequada (GEO Brasil/MMA, 2007).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB 2000), elaborado numa parceria entre o Ministério das Cidades e o IBGE, no Brasil, apenas 33,5% dos domicílios são atendidos por rede geral de coleta de esgotos. No caso, o atendimento chega a níveis baixíssimos na região norte, com apenas 2,4%. dos domicílios atendidos, seguidos pela

---

2 Produto Interno Bruto – PIB, é a soma bruta de todas as riquezas produzidas por um país.

região nordeste (14,7%), centro-oeste (28,1%) e sul (28,1%). A região sudeste é a que apresenta melhores índices de atendimento de coleta de esgoto (53,0%). Portanto, Devens (2008) *apud* Sousa (2009) conclui que somente a definição de marcos regulatórios mais restritivos e a construção de estações de tratamento de esgotos (ETE's) permitirão melhorar paulatinamente a qualidade dos recursos hídricos.

A Resolução N° 357/2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA<sup>3</sup>, combinada com as Leis Federais N° 6.939/81 e N° 9.433/97, que versam respectivamente sobre a Política Nacional de Meio Ambiente – PNMA e a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, estabelecem que a água é um bem natural, difuso e dotada de valor econômico. No caso, poder público e usuários observariam as diretrizes estabelecidas para a conservação da sua qualidade e da quantidade, inclusive dos seus mananciais. Infelizmente, no Brasil, o esforço pelo acompanhamento dessa qualidade e quantidade, com a fixação de normas e critérios, inclusive com a aplicação de penalidades aos poluidores, tem sido muito infértil, o que tem gerado problemas crônicos a corpos hídricos e à população diretamente ligada a eles.

Em decorrência destas dificuldades é que surge a necessidade de aplicar instrumentos modernos de análise e acompanhamento da qualidade das águas via modelos computacionais e/ou formulações matemáticas capazes de facilitar o monitoramento e prever impactos ambientais. Além disso, tais tecnologias disponíveis e aperfeiçoadas tornam simples a compreensão de problemas ambientais e a dão suporte aos gestores públicos à elaboração de políticas ambientais e intervenção no sentido de mitigar e/ou recompor o ambiente degradado.

Nesse trabalho, propõem-se a aplicação de um modelo computacional denominado Mohid (*Modeling Hydrodynamic System*), desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa (Portugal) – em parceria com a empresa MARETEC, a fim de modelar o comportamento espaço-temporal de poluentes na lagoa do Vigário, que se baseia na análise de um sistema que envolve, principalmente, o transporte de massa com base em simulações em computador. No caso, o Mohid é um plataforma computacional que possui sua estrutura baseada em uma formulação matemática (numérica) denominada Método dos Volumes Finitos – MVF.

Segundo Telles (2009), alguns autores como Malalasekera e Versteeg (1995) e Maliska (2004) abordam em suas obras o uso de técnicas de Dinâmica de Fluidos

---

3 O Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA é a instância colegiada do Sistema Nacional de Meio Ambiente – SISNAMA, composto por governo e entidades civis, nos moldes da lei federal nº 6.938/81, e tem por objetivo assessorar o poder público nas questões ambientais nacionais;

Computacional para aplicação hidrológica, ou seja, na solução de problemas físicos de transporte de massa (poluentes), escoamento de fluidos e transferência de calor em corpos hídricos.

Especificamente, a área de estudo escolhida é a lagoa do Vigário, situada na área urbana do distrito de Guarus, no Município de Campos dos Goytacazes, e reconhecida por toda a população, pesquisadores, estudantes e autoridades como uma lagoa extremamente degradada devido o lançamento de esgotos provenientes de residências – lançamentos diretos no espelho d'água –, comércios, galerias e *run off* de escoamento superficial.

A relevância deste trabalho se apoia em 2 (dois) motivos principais:

i) pela importância que a lagoa do Vigário tem no contexto da população de Guarus e entorno; sendo uma lagoa que recebe as águas oriundas de uma bacia de drenagem de pouco mais de 2 km<sup>2</sup> – por que existem vários bairros no entorno –, e estratégica para a infraestrutura de macrodrenagem da região, inclusive, para as atividades de pesca esportiva, de subsistência, lazer da população de entorno e manutenção da fauna e flora local; e,

ii) pela importância sanitária e ambiental, já que ela recebe toda a carga de poluentes orgânicos e inorgânicos via lançamentos diretos e difusos, com consequências negativas na saúde dos moradores do entorno, na estética do espelho d'água, na redução de biodiversidade, e na segurança – devido aos problemas de cheias sazonais.

A análise de consistência e/ou coerência das simulações foi feita através da comparação dos resultados gerados pelo modelo e os parâmetros amostrados no campo (Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Nitrogênio Total e temperatura).

Os resultados desse trabalho servirão como ferramentas de apoio à discussão e implementação da gestão pública em prol da lagoa do Vigário – gestão que implica no acompanhamento da quantidade e da qualidade das águas e dos efluentes que ela recebe – inclusive, como base ao desenvolvimento de outros trabalhos técnicos e acadêmicos.

Por fim, salienta-se que o objetivo dessa dissertação não é a de aplicar formulações matemáticas para prever ou descrever o *status quo* de um corpo hídrico, mas sim o de aplicar uma ferramenta computacional metodológica à previsão e construção de um cenário que caracterizem a qualidade ambiental de um corpo hídrico lacustre tendo em vista sua difusão para trabalhos futuros e sua aplicação como tecnologia à gestão ambiental local.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Aplicar um modelo computacional que permita estudar e caracterizar os níveis atuais de poluentes lançados na lagoa do Vigário, distrito de Guarus, no Município de Campos dos Goytacazes/RJ, através de trabalho de campo e simular um cenário de intervenção.

### **2.2. Específicos**

- i. caracterizar ambientalmente a lagoa, mediante a análise e comparação de dados reais e simulados dos efeitos de poluentes orgânicos lançados;
- ii. implementar e fazer a análise de consistência/coerência de um modelo computacional, baseado na plataforma Mohid;
- iii. construir um cenário da intervenção antrópicas e discutir os aspectos antrópicos, sanitários, ambiental e urbano;
- iv. inferir sobre os resultados da aplicação do modelo computacional Mohid como instrumento de análise ambiental de um recurso hídrico.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Corpos Lacustres (Águas Lênticas)

Segundo Odum & Barret (2007), os ecossistemas aquáticos de água doce podem ser classificados em três grupos:

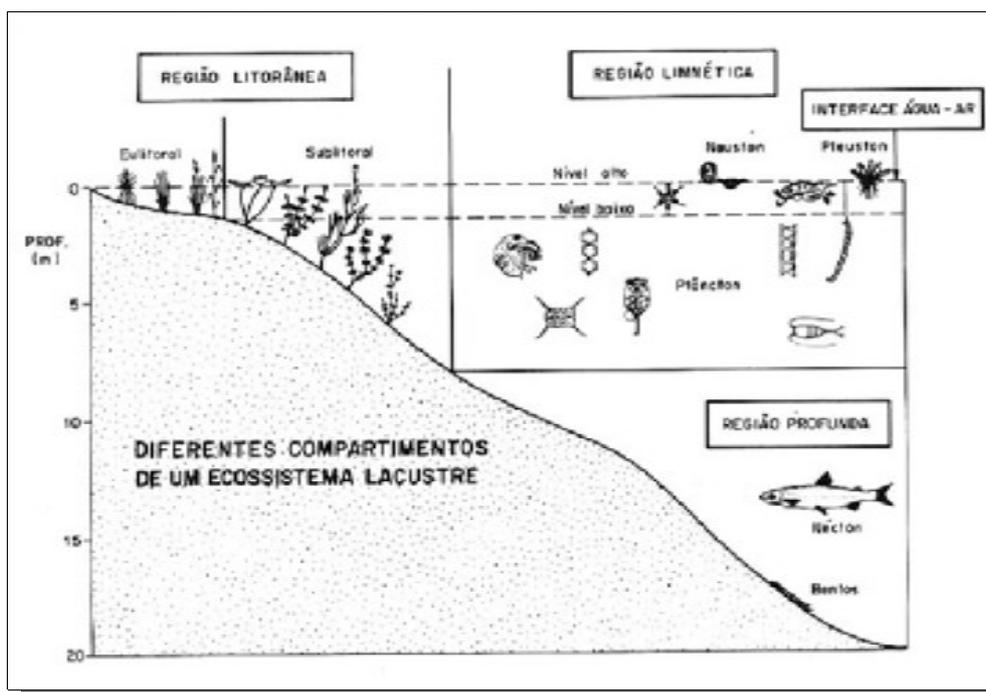
- “i) Ecossistemas de águas paradas ou lênticos: lagos e lagoas;*
- ii) Ecossistemas de águas correntes ou lóticos: fontes, riachos e rios;*
- iii) Terras úmidas, onde os níveis de água flutuam para cima e para baixo, de forma sazonal: brejos e pântanos”;*

Ainda segundo Odum & Barret (2007) os ambientes de água doce ocupam pequena área sobre a superfície do globo terrestre, mas sua importância para os seres humanos é maior do que sua área relativa devido a três razões:

- “i) são fontes de água barata para as atividades domésticas e industriais;*
- ii) os depósitos de água doce são o gargalo do ciclo hidrológico;*
- iii) os ecossistemas de águas doces fornecem sistemas terciários de disposição de resíduos mais convenientes e econômicos.”*

Esteves (1998) afirma que lagos ou lagoas de águas doces que se formam por isolamento de meandros de rios que percorrem planícies são chamados de lagos de ferradura ou meandrícos. Estes são corpos hídricos mais comuns no território brasileiro.

Esteves (1998) divide os compartimentos de um lago em região litorânea, região limnética ou pelágica, região profunda e interface água-ar, conforme a Figura 1.



**Figura 1** – Esquema de Compartimentos de um lago, segundo Esteves (1998).

A região litorânea é a que está diretamente em contato com o ecossistema terrestre adjacente, sendo influenciado por ele. É chamado de ecótono, ou região de transição entre a terra e a água. Por isso, trata-se de um compartimento repleto de nichos ecológicos e cadeias alimentares, onde a fonte de energia é a biomassa vegetal viva ou morta. Essa região também apresenta todos os níveis tróficos, ou seja, os produtores primários, os consumidores e os decompositores. E é nessa região onde, geralmente, se desenvolvem as macroalgas e outras plantas superiores.

Na região limnética ou pelágica são encontrados os plânctons e os néctons. Os plânctons (zooplânctons e fitoplânctons) são comunidades constituídas por bactérias e algas unicelulares e pluricelulares e os néctons são formados, geralmente, por comunidades de peixes.

A região profunda caracteriza-se pela ausência de organismos fotoautotróficos, devido a não penetração da luz. Ela é totalmente dependente da produção de matéria orgânica produzidas nas regiões litorânea e limnética. A comunidade presente nesta região é a bentônica, formada por crustáceos, moluscos e larvas de insetos.

Já a região de interface água-ar é habitada por nêustons e plêustons, constituídas por bactérias, fungos e algas. A existência dessa comunidade se deve exclusivamente a tensão superficial da água.

No caso da lagoa do Vigário, segundo Lannes (2002), a profundidade não ultrapassa 2 (dois) metros, sendo ela uma lagoa rasa. Assim, a compartimentalização na lagoa do Vigário, ou seja, a formação de estratos limnológicos praticamente não ocorre, devido à mistura causada pelos ventos. Então não existe, como no exemplo da Figura 1, uma região profunda na lagoa do Vigário, até mesmo devido as suas características de formação em solos do terciário.

### 3.2. O Regime de Funcionamento dos Lagos

Odum & Barret (2007) também aduzem que a vida na lagoa varia de poucas semanas a meses, para lagoas sazonais, e de anos a centenas deles, para as lagoas maiores. Diz que estes ecossistemas modificam-se com o tempo a taxas mais ou menos inversas, proporcionais ao tamanho e profundidade de cada uma.

Quanto a sua ecologia topológica Odum & Barret (2007) falam que a zonation e estratificação de grandes lagoas são características fundamentais para sua biodiversidade. Dizem ser possível distinguir uma zona litoral com vegetação enraizada, uma zona limnética de águas abertas dominadas pelo plâncton, uma zona profunda – de águas profundas contendo somente heterótrofos – e uma zona bentônica dominada por organismos de habitat profundo.

*“As zonas litorais e limnéticas tem uma produtividade de  $P/R > 1$ ; a zona profunda tem  $P/R < 1$ ; e a profundidade compensada,  $P/R = 1$ . As formas de vida existentes numa lagoa são constituídas de plânctons (organismos livres flutuantes como as diatomáceas), néctons (organismo que nadam livremente, peixes), bentos (organismos de habitat profundo, como os moluscos), nêustons (organismos de superfície, como as aranhas d’água) e periftons (organismos que se anexam, como os pólipos)”.*

Em regiões temperadas, relatam Odum & Barret (2007), que é comum que lagos se tornem termicamente estratificados durante o verão e o inverno, de acordo com o esfriamento ou aquecimento das águas. Explicam que a parte superior da lâmina d’água, denominada epilímnio, torna-se temporariamente isolada das águas mais frias e mais profundas, o hipolímnio, por um termóclino, que age como uma barreira para a troca de materiais. E como consequência, o fornecimento de oxigênio no hipolímnio e de nutrientes

no epilímnio pode diminuir. É durante a primavera e outono que ocorre a mistura térmica das águas, ou seja, quando o corpo d'água se aproxima da mesma temperatura (Odum & Barret, 2007).

São nessas viradas sazonais que ocorrem um incremento de fitoplânctons<sup>4</sup>, pois os nutrientes de fundo se tornam disponíveis na zona fótica – parte iluminada do lago. A zona eufótica é a parte não iluminada do lago, habitada por fitoplânctons (Odum & Barret, 2007).

Para o caso da lagoa do Vigário poder-se-ia dizer, segundo Santos (2007), que a lagoa é eutrófica, devido ao grande teor de nutrientes que entra e circula nas águas, e também quanto à sua produtividade primária ser elevada.

Outro fator interveniente que merece destaque, sendo um dos assuntos mais debatidos e estudados pelos limnólogos, é o metabolismo de um corpo lacustre.

Esteves (1998) descreve brevemente as etapas desse metabolismo lacustre, dividindo-as em produção, consumo e decomposição. Ele fala que a produção dentro de um ecossistema lacustre é realizado por todos os micro-organismos que sintetizam matéria orgânica a partir do gás carbônico, de sais minerais e energia proveniente da radiação solar, considerando a equação  $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 675 \text{ kcal}^5$ , que é igual a  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ . Esses organismos são chamados de produtores primários e estão localizados principalmente na zona eufótica – parte iluminada, do lago. Já no compartimento límnic os principais produtores são as algas, ou seja, macrófitas aquáticas e bactérias. Parte dessa produção é usada para a manutenção de seu próprio metabolismo, e a outra na produção de biomassa. Essa biomassa constitui fonte de energia para todas as cadeias alimentares do ecossistema (ESTEVES, 1998).

É importante salientar que existem dois tipos de produtores primários, muito importante para o ecossistema lacustre. No caso, são os produtores primários fotoautotróficos – que utilizam energia solar para sintetizar a matéria orgânica –, e os produtores primários quimiotróficos – que utilizam a energia das reações de oxidação e redução da matéria orgânica.

Outra etapa do metabolismo lacustre é o consumo, pois dela os organismos consumidores se valem para obter energia direta ou indireta – a partir da matéria orgânica sintetizada pelos produtores primários. Esses consumidores, que utilizam diretamente a biomassa vegetal são os herbívoros – consumidores primários ou de primeira ordem – dos quais fazem parte os peixes, os zooplânctons e insetos aquáticos. Também há, por

---

4 Fitoplânctons são organismos vivos microscópicos de origem vegetal que tem na água seu habitat natural;

5 A kilocaloria (Kcal) é uma unidade física de medida da energia, e equivale a 1000 calorias;

consequente, os consumidores secundários e terciários, ou seja, aqueles que obtêm energia através dos consumidores primários. Esses são os carnívoros, representados por algumas espécies de peixes e microcrustáceos planctônicos. Já nos sedimentos do lago, existem os organismos detritívoros, que se alimentam de restos de plantas e animais, formando a comunidade bentônica (ESTEVES, 1998).

Por fim, a última etapa de um metabolismo aquático é a decomposição da matéria orgânica, produzida por produtores primários. Ela é realizada por fungos e bactérias, que realizam a decomposição da matéria orgânica e a converte em sais minerais, H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>.

Esteves (1998) relata que os três processos do metabolismo lacustre não ocorrem isoladamente, mas de maneira integrada, com alto grau de interdependência.

O referido autor assevera que em regiões de clima temperado é possível observar o predomínio do processo de produção sobre o de consumo e decomposição. Noutros casos, geralmente em regiões tropicais, observa-se a predominância do processo de decomposição e consumo.

No tocante a lagoa do Vigário, estudos realizados por Lannes (2004) e Santos (2007) apontam que a produtividade primária é predominantemente fitoplanctônica e há elevado processo de oxidação em suas águas.

### **3.3. Eutrofização e Antropização: Aspectos da Degradação Ambiental**

A eutrofização é o enriquecimento do meio aquático com nutrientes, causando o crescimento de organismos e plantas aquáticas, tanto planctônicas quanto aderidas, que podem atingir níveis tais que sejam causadores de interferências aos usos desejáveis do corpo d'água. Normalmente, o maior fator de preocupação são as algas, cujo crescimento depende do aporte de nutrientes como nitrogênio e fósforo. Quando a concentração dos nutrientes é elevada, tem-se também a elevação da concentração de algas no meio aquático – que pode chegar a níveis tais que cause problemas aos vários usos previstos para o corpo d'água. Em condições de elevada eutrofização, as algas poderão atingir superpopulações, no evento denominado floração das algas. A eutrofização pode também ter como resultado a proliferação de macrófitas, especialmente o aguapé.

Braga *et al* (2005) diz que a eutrofização manifesta-se por aumento da produtividade biológica de um lago, sendo observado a proliferação de algas e outros vegetais aquáticos devido a maior quantidade de nutrientes disponíveis. No caso, os nutrientes mais importantes para a ocorrência da eutrofização são o fósforo e o nitrogênio.

Ele diz também que outras características favorecem o processo de eutrofização nos lagos de região tropical, como a radiação solar e a temperatura, o fato de serem rasos, sua morfologia – que permite maior tempo de residência das águas – a região litorânea extensa, entre outros.

Ainda segundo Braga *et al* (2005) os lagos podem ser classificados de acordo com sua produtividade biológica, da seguinte forma:

- i. oligotróficos – lagos com baixa produtividade biológica e baixa concentração de nutrientes;
- ii. eutróficos – lagos com produção vegetal excessiva e alta concentração de nutrientes; e,
- iii. Mesotróficos – lagos com características intermediárias entre oligotrófico e eutrófico.

A eutrofização pode ser natural ou artificial, ou seja, quando natural se deve a um processo lento e contínuo, resultante do aporte de nutrientes trazidos via escoamento superficial (*run off*) que erodem e lavam a superfície da bacia – é também conhecido como “envelhecimento natural” de um lago; quando artificial, se deve indubitavelmente à ação do homem – antrópicas, culturais e artificiais – que importam no lançamento de nutrientes de diversas origens (esgotos domésticos, industriais e fertilizantes agrícolas) nos lagos. Chama-se esse envelhecimento artificial de “envelhecimento precoce” (ESTEVES, 1998).

Para Esteves (1998) a eutrofização é considerada uma reação em cadeia de causas e efeitos bem evidentes, cuja característica principal é a quebra da estabilidade do ecossistema lacustre, ou seja, a “homeostasia<sup>6</sup>”. Com a quebra deste equilíbrio pela eutrofização artificial o ecossistema passa a produzir mais matéria orgânica do que pode consumir e decompor, alterando drasticamente o metabolismo do ecossistema lacustre.

Uma das características de uma lagoa eutrofizada – ou fertilizada, é a presença de vegetação aquática tanto na coluna d'água como na região litorânea. Isto se deve ao aumento de produção primária com o aporte de nutrientes, elevando a quantidade de biomassa – principalmente macrófitas aquáticas –, nos compartimentos lacustres.

Além do efeito de superpopulação de macrófitas aquáticas, a baixa quantidade de oxigênio na coluna d'água, utilizado para oxidar a matéria orgânica, compromete a diversidade de espécies ictiológicas (peixes) do lago – espécies de peixes mais exigentes – fixando uma comunidade adaptada àquele ambiente.

---

6 *Homeostasia* de um ecossistema lacustre é o equilíbrio existente entre a produção de matéria orgânica e o seu consumo e a decomposição;

Outro efeito indesejável da eutrofização, causada principalmente por efluentes sanitários, é a ausência de balneabilidade das lagoas e lagos, principalmente os ditos urbanos. Além da estética indesejável das águas o contato de pessoas e animais é totalmente impróprio, o que pode acarretar, inclusive, na veiculação de doenças.

Os principais efeitos indesejáveis da eutrofização, ora relatados são (BRANCO, 1978; BRANCO E ROCHA, 1979; VON SPERLING, 2005):

- Problemas estéticos e recreacionais → Diminuição do uso da água para recreação, balneabilidade e redução geral na atração turística devido a frequentes florações das águas, crescimento excessivo da vegetação, distúrbios com mosquitos e insetos, eventuais maus odores; e, eventuais mortandades de peixes.
- Condições anaeróbias no fundo do corpo d'água → O aumento da produtividade do corpo d'água causa uma elevação da concentração de bactérias heterotróficas que se alimentam da matéria orgânica das algas e de outros microrganismos mortos, consumindo oxigênio dissolvido do meio líquido. No fundo do corpo d'água predominam condições anaeróbias devido à sedimentação da matéria orgânica e à reduzida penetração do oxigênio nestas profundidades, bem como à ausência de fotossíntese (ausência de luz). Com a anaerobiose, predominam condições redutoras, com compostos e elementos no estado reduzido:
  1. o ferro e o manganês encontram-se na forma solúvel, trazendo problemas ao abastecimento de água;
  2. o fosfato encontra-se também na forma solúvel, representando uma fonte interna de fósforo para as algas;
  3. o gás sulfídrico pode causar problemas de toxicidade e maus odores.
- Eventuais condições anaeróbias no corpo d'água como um todo → Dependendo do grau de crescimento bacteriano, pode ocorrer, em períodos de mistura total da massa líquida (inversão térmica) ou de ausência de fotossíntese (período noturno), mortandade de peixes e reintrodução dos compostos reduzidos em toda a massa líquida, com grande deterioração da qualidade da água. Como as algas se concentram na superfície em excesso, elas impedem a penetração da luz, indispensável para a fotossíntese, e dificultando, desta forma, a consequente produção de oxigênio, mesmo nas horas iluminadas do dia.
- Eventuais mortandades de peixes → A mortandade de peixes pode ocorrer em função de:
  1. anaerobiose;

2. toxicidade por amônia. Em condições de pH elevado (frequentes durante os períodos de elevada fotossíntese, em consequência da retirada da acidez carbônica), a amônia apresenta-se em grande parte na forma livre ( $\text{NH}_3$ ), tóxica aos peixes, ao invés de na forma ionizada ( $\text{NH}_4^+$ ), não tóxica.
  - Maior dificuldade e elevação dos custos de tratamento da água → A presença excessiva de algas afeta substancialmente o tratamento da água captada no lago ou represa, dada a necessidade de:
    1. remoção da própria alga;
    2. remoção de cor;
    3. remoção de sabor e odor;
    4. maior consumo de produtos químicos;
    5. lavagens mais frequentes dos filtros;
  - Problemas com o abastecimento de águas industriais → Elevação dos custos para o abastecimento de água industrial devido a razões similares às anteriores, e também aos depósitos de algas nas águas de resfriamento.
  - Toxicidade das algas → Rejeição da água para abastecimento humano e animal em razão da presença de secreções tóxicas de cianobactérias ou cianotoxinas, por apresentarem um grau de toxicidade ao organismo animal.
  - Modificações na qualidade e quantidade de peixes de valor comercial.
  - Redução da navegabilidade e da capacidade de transporte → O crescimento excessivo de macrófitas enraizadas interfere na navegabilidade, aeração e capacidade de transporte do corpo d'água, podendo comprometer o sistema de drenagem urbana e ocasionar inundações e enchentes na área de abrangência da bacia hidrográfica.

No tocante as estratégias de controle que são usualmente adotadas, elas podem ser classificadas em duas categorias bem amplas (VON SPERLING, 1995):

- Medidas preventivas (atuação na bacia hidrográfica, controlando as fontes externas): controle do esgoto; controle da drenagem pluvial, incluindo a questão dos resíduos sólidos; e, controle do uso do solo na bacia, sobretudo quanto à utilização abusiva de adubos na agricultura e pecuária.
- Medidas corretivas (atuação no lago ou represa)
  1. processos mecânicos;
  2. processos químicos;
  3. processos biológicos;

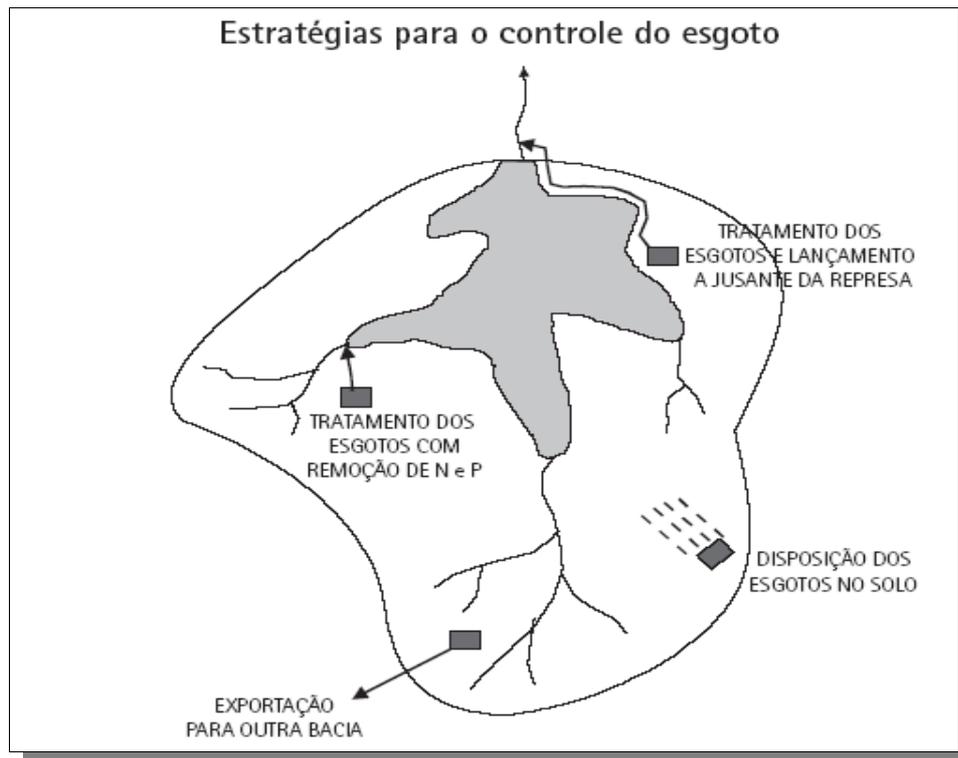
Em referência à lagoa do Vigário, Lannes (2002) assevera em seus estudos que a lagoa passa por um período de envelhecimento precoce – termo técnico usado para eutrofização –, em razão da existência de grandes quantidades de matéria orgânica em decomposição e a disponibilização de nutrientes que favorecem o crescimento de macroalgas em detrimento da manutenção da qualidade da água e da biodiversidade.

Para Von Sperling (1995), as medidas corretivas, que implicam em uma atuação diretamente no corpo hídrico, não são cobertas. Já as medidas preventivas podem incluir estratégias relacionadas ao esgoto ou a drenagem pluvial. Quanto ao uso excessivo de adubos na bacia hidrográfica, os autores falam tratar-se de uma questão de educação, de normatização, de fiscalização e de vigilância. Assim, os autores resumem as duas medidas:

1. Controle do esgoto: tratamento do esgoto com remoção de nutrientes; tratamento convencional do esgoto e lançamento à jusante da represa; exportação do esgoto para outra bacia hidrográfica, que não possua lagos ou represas, seguida por tratamento convencional do esgoto; e, infiltração do esgoto no terreno (se a água do aquífero sob o terreno for utilizada para consumo humano há necessidade de tratamento com remoção de nitrogênio).

2. Controle da drenagem pluvial: controle do uso e ocupação do solo na bacia; faixa verde ao longo da represa e tributários; e, construção de barragens de contenção.

Na Figura 2, vemos as estratégias para o controle urbano de esgoto, segundo Von Sperling (2002).



**Figura 02** – Esquema das estratégias de controle de esgoto (VON SPERLING, 1995).

Nas cidades, as mudanças evidenciadas após a década de 1970, especificamente pelo crescimento das cidades médias brasileiras (entre 100 e 500 mil habitantes), devido ao crescimento populacional e ao êxodo, mantiveram um nível expressivo de concentração populacional nas áreas metropolitanas, outrora existente até esse período. No entanto, o expansionismo crescente das cidades medias favoreceu a emergência de um modelo de urbanização em que a população se distribui de forma menos concentrada, ainda que continuasse a se aglomerar nas metrópoles (ANDRADE e SERRA, 1998).

Dessa maneira, o Brasil apresenta um adensamento regional e uma concentração populacional em grandes e médias áreas urbanas, em especial nos espaços ocupados por regiões metropolitanas e naquelas em que se encontram os maiores índices de industrialização, onde convivem, ao mesmo tempo, ricos e pobres e os conflitos inerentes à discrepância entre suas existências (MONTE-MOR, 2004).

Além da dimensão física devidamente reconhecida como intrínseca ao ambiente, existe uma pluralidade de processos – culturais, sociais, biológicos, políticos e econômicos – que se relacionam entre si e com este espaço concreto, no qual interferem, o que amplia – segundo os autores, a noção de ambiente. Isto, para abrigar também o homem social, os impactos que provocam sobre este e o referido espaço, criado com o intuito de ser socializado e transformado, ou seja, a cidade (MOTA, 2003. *apud* SOUZA, 2010).

Segundo Pedlovisk e Almeida (2006), o processo de ocupação na região da lagoa do Vigário se deu em razão dos contrastes sociais das décadas de 80 e 90, que obrigaram a população de baixa renda a migrar e ocupar espontaneamente as áreas indesejáveis e pouco valorizadas pelo mercado imobiliário. Geralmente, a precariedade das moradias estavam associadas à proximidade com a lagoa, e revelavam um forte indicio de exclusão social, onde a baixa instrução (grau de escolaridade), a baixa renda familiar, a elevada massa de desempregados, a ausência de serviços e/ou equipamentos públicos e os riscos inerentes à proximidade com a lagoa eram características singulares da população do entorno.

O processo de urbanização provoca alterações em todo o espaço físico, pois sua capacidade de degradação aparente parece ser inesgotável. Isto, segundo Souza (2010) e Mota (2003), acarreta em impactos no ambiente natural e na vida do seres humanos, conforme destacado na Tabela 1 (Pág. 18).

Não obstante, conseguiu-se constatar na lagoa do Vigário – quando se realizou o trabalho de campo, especificamente nas margens, o forte processo de eutrofização por qual passa esse corpo hídrico, haja vista que os elementos identificadores citados neste item e na literatura foram amplamente observados. Este elementos são a presença maciça de vegetação aquática fixa e flutuante – macrófitas como a taboa [*Tipha dominguensis*] e a gigoga/aguapé [*Eichhornia crassipes*] –, lançamento difuso de efluentes orgânicos nas margens, elevada turbidez da águas, reduzida diversidade de ictiofauna (o acara e a traíra são os peixes predominantes, devido sua resistência à poluição), ocupação das margens por construções irregulares, presença de lixo doméstico variado, criadouros domésticos de porcos, cavalos e galinhas e etc.

<b>Elementos do meio</b>	<b>Fatores relacionados com a urbanização</b>	<b>Principais processos/efeitos</b>
Clima	Radiação solar; Temperatura; Velocidade e direção dos ventos; Precipitação; Umidade; Camadas Atmosféricas.	Efeito "estufa"; Ilhas de calor; Desumidificação.
Relevo e Solo	Natureza do solo; Cobertura vegetal do solo; Intensidade e duração das chuvas; Declividade do relevo; Usos do solo.	Impermeabilização ; Contaminação; Erosão; Movimentos de massa; Subsidência.
Hidrografia	Precipitação; Evapotranspiração; Quantidade de líquido escoado; Infiltração da água; Consumo; Nível de lençol freático.	Desregulação do ciclo hidrológico; Enchentes; Poluição de mananciais; Contaminação de aquíferos.
Vegetação	Cobertura vegetal do solo.	Desmatamento; Redução da diversidade; Plantio de espécies inadequadas.
Fauna	Abrigo; Alimentação; Reprodução; Proteção.	Redução da diversidade; Proliferação da fauna urbana; Zoonoses.
Homem	Aspectos demográficos; Usos do solo; Atividades e meios produtivos; Níveis de educação, saneamento e saúde; Infra-estrutura; Comunicação e transporte; Habitação; Aspectos culturais; Áreas de valor histórico-cultural	Estresse; Doenças urbanas (infecciosas, degenerativas, mentais); Violência urbana.

**Tabela 1** – Fatores relacionados com a urbanização de ambientes naturais (MOTA, 2003).

### 3.4. As Variáveis Limnológicas

#### 3.4.1. Variáveis Físicas

Num corpo lacustre as interações existentes entre o meio aquático e atmosférico são bastante dinâmicas. E não bastasse tantas variações, o meio aquático é o organismo que tem nele o seu *habitat*<sup>7</sup> sofrem conjuntamente as variações da água devido as suas características intrínsecas, pela radiação solar, turbidez, temperatura, condutividade elétrica, direção e intensidade dos ventos e pressão atmosférica.

<sup>7</sup> Segundo Odum & Barret (2007), *habitat* é o local dentro de um ecossistema onde um determinado organismo ou grupo encontra as condições ideais para viver, alimentar-se e reproduzir-se;

A água possui propriedades químicas e físicas bastante estudadas e muito conhecidas atualmente. Por exemplo, seu ponto de fusão a 1 atm é de 0 °C; seu ponto de ebulição de 100 °C; a capacidade calorífica a 1 cal/g.°C; seu calor de vaporização a 100 °C que é de 9,71 kcal/mol, que para efeitos práticos significa que a água tem a propriedade de absorver grandes quantidades de calor sem alterar bruscamente sua temperatura (ESTEVEES, 1998).

Outra propriedade é a *tensão superficial*, criada pelo arranjo das moléculas da água na interface com o ar. Esse arranjo molecular cria uma película delgada na superfície por coesão interna e que faz as moléculas serem atraídas para o interior, criando assim um filme superficial compacto e capaz de suportar pequenos pesos sem se romper (ESTEVEES, 1998).

A *viscosidade* é a capacidade da água oferecer resistência aos movimentos dos organismos e das partículas nela presentes. Ela é função da temperatura e de sais dissolvidos. Em lagos de água doce é insignificante a influencia da viscosidade sobre a temperatura, pois à medida que a temperatura aumenta, a viscosidade diminui (ESTEVEES, 1998).

A *densidade* da água é, como para toda a substancia, a relação entre sua massa e o volume que ocupa. A 4 °C a densidade considerada padrão é de 1 g/cm<sup>3</sup>. Os principais fatores que influenciam na densidade são a salinidade, a temperatura e a pressão (ESTEVEES, 1998).

A *radiação solar* no meio aquático é a principal fonte de energia dos processos bióticos e abióticos num ecossistema, seja ele aquático ou terrestre. Especificamente, no meio aquático, a alteração inicial que a radiação sofre na água é a mudança de direção, isto é, ela refrata – devido a redução da velocidade – e depois de absorvida, transformada noutras formas de energia como a química (fotossíntese) e calorífica (aquecimento da água). Outra parte da radiação sofre o fenômeno da dispersão, que é o “choque” da radiação com partículas dissolvidas em suspensão no meio líquido. Ela sofre, no meio líquido o fenômeno da absorção e da dispersão, cujo somatório é chamado de atenuação da radiação. Esta atenuação é exponencial ao longo da coluna d'água, e é devida à quantidade de material em suspensão (ESTEVEES, 1998).

Outro efeito da radiação solar na coluna d'água é o fenômeno da estratificação térmica, assim chamado devido à distribuição de temperaturas por camadas causadas pelo vento e pelo movimento de fluxos ascendentes e descendentes num lago. Invariavelmente, em lagos rasos, como os lagos tropicais, não ocorre muito este fenômeno, entretanto, há de se considerar que as características físicas, químicas e biológicas dos estratos térmicos de um lago são bem diferentes.

A *turbidez* é a medida de capacidade da água em dispersar a radiação solar. Em termos quantitativos, este fenômeno pode ser expresso em coeficientes de dispersão ou numa unidade empírica, como a unidade nefelométrica (NTU). Praticamente, a turbidez é o oposto da transparência da água. O instrumento usado para medir a turbidez é o turbidímetro. Geralmente, os principais responsáveis pela turbidez da água, e também pela dispersão da radiação, são as partículas suspensas como as bactérias, fitoplânctons, detritos orgânicos e inorgânicos. Em menor proporção, estão os compostos dissolvidos (ESTEVES, 1998).

A *condutividade elétrica* de uma solução ou meio é a capacidade desta em conduzir a corrente elétrica, donde, quanto maior for a concentração de íons, maior será a condutividade elétrica. A condutividade elétrica é expressa em Siemens.cm<sup>-1</sup> e, a da água em condições naturais, pode ser expressa em microSiemens.cm<sup>-1</sup> (μS.cm<sup>-1</sup>) (ESTEVES, 1998).

Sabe-se que além da temperatura, o pH pode ter grande influência sobre a condutividade elétrica. Num ecossistema aquático, a presença de substâncias orgânicas podem influenciar nos valores da condutividade, assim como também podem revelar informações sobre o metabolismo e fenômenos da bacia de drenagem. Consideramos assim, a condutividade elétrica como uma variável importante pois possibilita conhecer a magnitude da concentração iônica, a produtividade primária (redução de valores) e a decomposição (elevação de valores), detectar as fontes poluidoras e as diferenças geoquímicas.

A condutividade elétrica da água pode variar de acordo com a temperatura e a concentração total de substâncias ionizadas dissolvidas. Em águas cujos valores de pH se localizam nas faixas extremas (pH>9 ou pH<5), os valores de condutividade são devidos apenas às altas concentrações de poucos íons em solução, dentre os quais os mais frequentes são o H<sup>+</sup> e OH<sup>-</sup> (ESTEVES, 1998).

#### 3.4.2. Variáveis Físico-Químicas e Químicas

Ecologicamente falando, o *oxigênio dissolvido* (OD) é uma variável extremamente importante. Ele é necessário para a respiração da maioria dos organismos que habitam o meio aquático e, geralmente, se reduz ou desaparece quando a água recebe grandes quantidades de substâncias orgânicas biodegradáveis encontradas no esgoto doméstico, em certos resíduos industriais, no vinhoto e outros efluentes. Os resíduos orgânicos despejados nos corpos d'água são decompostos por microorganismos que se utilizam do oxigênio na

respiração. Assim, quanto maior a carga de matéria orgânica, maior o número de microorganismos decompositores e, conseqüentemente, maior o consumo de oxigênio. A morte de peixes em rios e lagos poluídos se deve, muitas vezes, à ausência de oxigênio e não à presença de substâncias tóxicas (CARMOUZE, 1998).

A solubilidade deste gás na água depende de fatores como a pressão e a temperatura. No caso, com a redução da pressão e a elevação da temperatura, ocorre a diminuição e solubilização do oxigênio. A difusão do oxigênio na coluna d'água se dá por transporte de massas d'água. O padrão de distribuição do oxigênio se dá ao inverso do gás carbônico, ou seja, num dia sol, onde o fenômeno é evidente, enquanto ocorre um grande consumo de gás carbônico ocorre a produção de oxigênio na zona “iluminada”, devido a fotossíntese. Na zona “escura”, acontece o contrário, ou seja, uma alta produção de gás carbônico e consumo de oxigênio devido a atividade microbiana. Dessa atividade ocorre a degradação da matéria orgânica e a produção de sedimento de fundo nos lagos.

Nos lagos rasos, segundo Esteves (1998), que são maioria no Brasil, a concentração de matéria orgânica aliada às altas temperaturas, é fator primordial para desoxigenação da água. Essa concentração de matéria orgânica sobre a dinâmica do oxigênio em lagos rasos, é mais visível nos períodos de chuvas ou forte ventos; ou chuvas frias, forte e duradouras.

Ainda diz Esteves (1998) que são nos lagos rasos que se observam as maiores amplitudes de variação de oxigênio dissolvido na superfície, especialmente nos períodos de cheias – em que há maior aporte de matéria orgânica e revolvimento do sedimento – onde a concentração de oxigênio dissolvido atinge valores muito baixos.

Pode-se considerar o *oxigênio dissolvido* (OD) como um dos indicadores de estado trófico de lagos para fins de avaliação ambiental, inclusive, da eutrofização deste.

O *pH*, ou potencial hidrogeniônico, resume-se como a basicidade ou acidez de uma solução que é expressa em concentrações de íons  $H^+$ . O *pH* é considerado uma das variáveis mais difíceis de se inferir devido a vários fatores que o influencia. Em geral, o *pH* é influenciado pela concentração de íons  $H^+$  originados da dissociação do ácido carbônico – que gera valores baixos de *pH*, e das reações de íons carbono e bicarbonato com a molécula de água, que elevam o *pH* para faixa alcalina (ESTEVES, 1998).

As medidas de *pH* são de extrema utilidade, pois fornecem inúmeras informações a respeito da qualidade da água. Às águas superficiais possuem um *pH* entre 4 e 9. As vezes são ligeiramente alcalinas devido à presença de carbonatos e bicarbonatos. Naturalmente, nesses casos, o *pH* reflete o tipo de solo por onde a água percorre. Em lagoas com grande população de algas, nos dias ensolarados, o *pH* pode subir muito, chegando a 9 ou até mais.

Isso porque as algas, ao realizarem fotossíntese, retiram muito gás carbônico, que é a principal fonte natural de acidez da água. Geralmente um pH muito ácido ou muito alcalino está associado à presença de despejos de esgotos domésticos ou industriais. A determinação do pH pode ser feita através do método eletrométrico, utilizando-se para isso um pHmetro<sup>8</sup> digital.

A *demanda bioquímica de oxigênio* (DBO) pode ser definida como a quantidade de oxigênio necessária para que os microorganismos, em seus processos metabólicos, possam estabilizar a matéria orgânica carbonácea via processos bioquímicos, e isso importa no consumo de oxigênio dissolvido na água. Ela é um parâmetro muito importante para se avaliar o grau de poluição de um corpo hídrico. No caso, a estabilização completa da matéria orgânica demora, em termos práticos, vários dias – cerca de 20 dias ou mais para esgotos domésticos. Entretanto, para evitar que o teste de laboratório ficasse sujeito a uma grande demora, e para permitir comparação de diversos resultados, são efetuadas algumas padronizações, tais como proceder à análise no 5º dia. Este resultado do quinto dia pode então ser correlacionado com o consumo total final e é conhecido como teste de DBO<sub>5</sub> (VON SPERLING, 2005).

O teste de *demanda química de oxigênio* (DQO) mede o consumo de oxigênio ocorrido em função da oxidação química da matéria orgânica. Este teste gasta de 2 a 3 horas para ser realizado e envolve a utilização de um agente oxidante forte. Ele se baseia-se no fato de que todos os compostos orgânicos, com poucas exceções, podem ser oxidados pela ação de um agente oxidante forte em meio ácido. Uma das limitações entretanto é o fato de que o teste não diferencia matéria orgânica biodegradável e matéria orgânica não biodegradável, a primeira determinada pelo teste de DBO. A vantagem é o tempo de teste, realizado em poucas horas, enquanto o teste de DBO requer no mínimo 5 dias – período de incubação (CARMOUZE, 1998).

### **3.5. O Balanço Hídrico**

O balanço hídrico de uma bacia ou micro-bacia hidrográfica é um importante instrumento de previsão de quantidade de massa presente, ou que entra e sai, de um dado corpo hídrico.

Para Lima (1986), a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema geomorfológico aberto, e como tal ela se encontra, mesmo quando não perturbada, em

---

8 A foto do pHmetro está disposta no capítulo 6 desta dissertação.

contínua flutuação, num estado de equilíbrio transaccional ou dinâmico. Ou seja, a adição de energia e a perda de energia do próprio ecossistema encontram-se sempre em delicado balanço. Desse modo, a área da bacia hidrográfica tem influência sobre a quantidade de água produzida como deflúvio. A forma e o relevo, no entanto, atuam sobre a taxa ou sobre o regime dessa produção de água, assim como a taxa de sedimentação. O caráter e a extensão dos canais (padrão de drenagem) afetam a disponibilidade de sedimentos, bem como a taxa de formação do deflúvio. Muitas dessas características físicas da bacia hidrográfica, por sua vez, são, em grande parte, controladas ou influenciadas pela sua estrutura geológica.

Ponce (1989) *apud* Facco (2008), descrevem que para uma bacia hidrológica ser considerada pequena deverá apresentar algumas ou todas as seguintes propriedades: a precipitação pode ser considerada como uniformemente distribuída no espaço e no tempo, sobre toda a bacia; a duração das tormentas geralmente excede o tempo de concentração da bacia; a geração de água e sedimentos se dá principalmente pelo escoamento nas vertentes; e os processos de armazenamento de fluxo concentrado na calha dos cursos d'água são pouco importantes.

Estudos hidrológicos em pequenas bacias resultam em estimativa de parâmetros característicos ou comparações através de testes estatísticos. Logo a precisão e representatividade dos resultados dependem, em primeiro lugar, da extensão do período de observação. Cada estudo poderá abranger um conjunto diferente de variáveis e processos monitorados, mas de forma geral, os elementos como precipitação, interceptação, evapotranspiração, águas superficiais, águas subterrâneas, infiltração, erosão e sedimentação, qualidade de água e dados climáticos devem ser considerados (FACCO, 2008).

É importante lembrar que a bacia hidrográfica constitui um sistema físico extremamente complexo, em geral com diferentes propriedades físicas heterogêneas e variáveis no tempo. Qualquer tentativa de representá-la através de um modelo matemático, por mais complexo e detalhado que seja, constitui sempre uma aproximação da realidade. A sua adequação ao problema estudado só pode ser julgada pelo confronto dos resultados calculados com as observações de campo (SANTOS *et al.*, 2007).

Segundo Feitosa & Filho *et al* (1997) o balanço hídrico obedece ao princípio físico da conservação de massa, ou o princípio da continuidade, segundo o qual – em um sistema qualquer, a diferença entre as entradas e as saídas é igual à variação ( $dS/dt$ ) do armazenamento dentro do sistema. No caso, o balanço hídrico para um sistema pode ser representado pela seguinte equação diferencial básica:

$$dS/dt = P - R \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde:

P – precipitação, ou entrada, por unidade de tempo;

R – deflúvio, ou saída, por unidade de tempo; e,

dS/dt – variação no armazenamento dentro do sistema por unidade de tempo.

Mas Feitosa & Filho *et al* (1997) também afirmam que, na prática, pode ser um engano considerarmos simples a equação  $P-R=dS/dt$ , pois, nem sempre, seus termos podem ser facilmente ou adequadamente quantificados. Eles estendem o tema e asseveram que, para uma dada região, a equação básica para o balanço hídrico pode ser escrita da seguinte forma:

$$P - ETR - R - I = \Delta S \quad (\text{Eq. 02})$$

Onde:

P – precipitação;

ETR – evapotranspiração real;

R – deflúvio;

I – infiltração; e,

$\Delta S$  – Variação do volume de água.

Vão mais além os autores supramencionados quando falam que, para estudos locais, é sempre possível fazer estimativas confiáveis, diferente dos estudos regionais. Geralmente, a quantificação em nível regional é mais grosseira.

Para Tucci *et al* (2007) o balanço hídrico possibilita determinar a evaporação com base na equação de continuidade de um lago ou reservatório. No caso, a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$dV/dt = I - Q - E_o.A + P.A \quad (\text{Eq. 03})$$

Onde:

V – volume de água contido;

t – tempo;

Q – vazão de saída do reservatório (Exutório);

$E_o$  – evaporação;

$P$  – precipitação sobre o lago ou reservatório; e,

$A$  – a área do lago ou reservatório.

Segundo Porto & filho (1986) a relativa constância da evaporação média anual resulta da interação de numerosas variáveis que a condiciona e dá dupla limitação, de um lado pelo “poder de evaporar” da atmosfera e de outro, pela quantidade de água disponível – altura de precipitação.

A constância da evaporação média anual para zonas relativamente homogêneas levou ao estabelecimento de fórmulas empíricas, relacionando-as com elementos meteorológicos de mais fácil determinação. Os mais importantes e mais facilmente elementos acessíveis são a temperatura média anual  $T$  do ar e a precipitação  $P$  que representa a disponibilidade de água do solo e sua saturação.

Porto & Filho apresentam a fórmula de M. Coutagne, ou equação, para determinar a evaporação média de uma certa região através dos dados de precipitação média e temperatura média disponíveis. Então, evaporação pode ser obtida através da seguinte equação:

$$EVP = P - cP^2 \quad (\text{Eq. 04})$$

Onde:

$$c = 1 / (0,8 + 0,14 T) \quad (\text{Eq. 05})$$

Em que:

$P$  – precipitação, em mm;

$T$  – temperatura, em °C;

$c$  – constante adimensional.

Tucci *et al* (2007) também diz que a equação do balanço hídrico para estimar a evaporação é teoricamente precisa, pois ela está embasada no princípio da conservação de massa.

Tucci *et al* (2007) releva, além disso, que a evapotranspiração (EVT) é considerada como a perda de água pelo reservatório ou lago através da evaporação do solo ou

transpiração das plantas. Ele alega que o solo, as plantas e a atmosfera podem ser considerados como componentes de um sistema físico inter-relacionado e dinâmico no qual os vários processos de fluxo são interligados como elos de correntes. Assevera que a quantidade de água transpirada diariamente é grande em relação às trocas de água na planta, em curtos períodos, mas em regime permanente. Ele distingue a evaporação em duas categorias: Evapotranspiração Potencial (EVT<sup>9</sup>) que é quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa e completamente coberta por vegetação de porte baixo e bem suprida de água, e, Evapotranspiração Real (EVR), que é a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. No caso, a evapotranspiração real (EVR) é igual ou menor que a evapotranspiração potencial, ou seja,  $EVR < EVT$ .

Para Tucci *et al* (2007) as informações sobre a evapotranspiração real são muito difíceis em obter, pois demandam um longo tempo de observação – e são onerosas, ao passo que a evapotranspiração potencial pode ser obtida via modelos baseados em leis físicas e relações empíricas, mais rápida e confiavelmente. Entretanto, sendo um processo complexo e extremamente dinâmico, que envolve organismos vivos, como o solo e a planta, é muito difícil estabelecer um valor exato de evapotranspiração real (EVR). Mas ao conjugar inúmeros fatores e informações associados ao conceito de evapotranspiração potencial (EVP) nos é permitido obter estimativas confiáveis na maioria dos casos.

Os autores também apresentam formas e procedimentos usualmente empregados para se medir ou estimar a evapotranspiração. São eles:

- Lisímetros – é um procedimento direto e mais correto para determinar a evapotranspiração. Os lisímetros são equipamentos constituídos de um reservatório de 1 m<sup>3</sup>, provido de um sistema de drenagem e instrumental de medição (Figura 3);

---

9 Convencionou-se nesse trabalho de dissertação atribuir à evapotranspiração potencial e à evapotranspiração real as siglas EVP e EVR;



**Figura 3** – Tipos de Lisímetros usados para medir evapotranspiração.  
**Fonte:** Obtido e editado de [www.meted.ucar.edu](http://www.meted.ucar.edu), 2010.

- Medida de umidade do solo – é um procedimento direto onde há sucessivas medidas da umidade do solo que permitem, por diferença, estabelecer um valor de evapotranspiração quando não há precipitação e/ou irrigação. Aplica-se a este método a equação:

$$\Delta W / w = ET + Pp \quad (\text{Eq. 06})$$

onde,  $\Delta W$  é a variação do armazenamento d'água para um perfil de solo (mm), ET é a evapotranspiração (mm/di), Pp é a percolação d'água abaixo do sistema radicular (mm/dia) e t é o tempo;

- Medida baseada na temperatura – é um método baseado em antigas expressões para estimar evapotranspiração potencial, via temperatura do ar. A mais conhecida é a equação de Thornthwaite e Blaney-Criddle<sup>10</sup>. No caso, a equação

$$EVT = Fc.16.(10.T/I)a \quad (\text{Eq. 07})$$

<sup>10</sup> Segundo Tucci *et al* (2007), Blaney-Criddle é um método descrito por Kijne (1978), e foi desenvolvido nos EUA para estimativas de uso consuntivo em regiões semiáridas, baseado na suposição de que a disponibilidade de água para a planta não era um fator limitante;

baseia-se em dados de escoamento e precipitação, feitas nos Estados Unidos da América (EUA), e os correlaciona com a temperatura, onde EVT é a evapotranspiração potencial para 30 dias (mm/mês), T é a temperatura (°C), e Fc é o fator de correção em função da latitude e mês do ano.

- Medida baseada na radiação – é um método desenvolvido com base radiação solar, sendo mais confiável, principalmente em situações em que a advecção possa ser desprezada. É traduzido pela equação de Jensen & Haise (1973) – descrita por Kijne (1978). A equação é a seguinte:

$$EVT = (0,025 \cdot T + 0,08) \cdot G / 59 \quad (\text{Eq. 08})$$

onde: EVP é a evapotranspiração potencial (mm/dia), T é a temperatura do ar (°C) e G é a radiação incidente de onda curta ( $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ )<sup>11</sup>.

- Medida combinada – o método combinado é baseado na equação de Penman, que é uma alternativa para cálculo de evaporação de superfícies livre de água e para estimar a evapotranspiração potencial. A equação de Penman é:

$$E_i = 0,35 (1 + w/160) \cdot (e_s - e_a) \quad (\text{Eq. 09})$$

O método combinado é indiscutivelmente o melhor método para medir a evapotranspiração potencial, mas sua precisão não prescinde da radiação efetiva.

- Medida pelo Balanço Hídrico – este método é usado para calcular a evapotranspiração em intervalos superiores a 1 (uma) semana, devido a falta de todas as variáveis envolvidas. Geralmente, os dados envolvidos são a vazão e a precipitação, donde se aplica a seguinte equação para uma bacia:

$$V_t = V_o + (P - Q - EVP) \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. 10})$$

onde  $V_t$  e  $V_o$  são o armazenamento total de umidade na bacia no final e no início do intervalo de tempo  $\Delta t$ ; P, Q e EVP são respectivamente a precipitação, a vazão e a evapotranspiração no período. Utilizando-se essa expressão para intervalos superiores a 1 (uma) semana, 1 (um) mês ou 1 (um) ano, pode-se quantificar a evapotranspiração de uma bacia.

<sup>11</sup> Unidade de medida física da radiação solar, convencionada no Sistema Internacional de Medidas (SI);

### 3.6. Os Parâmetros Legais de Águas Superficiais no Brasil

Após a edição da Lei Federal Nº 9.433/97, a chamada “Lei das Águas”, o país ganhou um marco na regulação dos recursos hídricos, apesar da vigência da Lei Federal Nº 6.938/81 que fixa as diretrizes nacionais da política de meio ambiente.

Mesmo com a edição da “Lei das Águas”, em 1997, ainda não existiam regulamentos técnicos, ou seja, normas, padrões, instruções e/ou limites, que fixassem as condições de manejo e uso desse bem tão imprescindível à vida – a água. Foi no ano de 2007, em nível nacional, que o Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA<sup>12</sup> editou a Resolução Nº 357/2005 que dispôs sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, estabelecendo as condições e padrões de lançamento de efluentes.

Na mesma linha da esfera federal, alguns estados brasileiros se sobressaíram e fixaram normas e padrões ambientais para o uso e manejo dos recursos hídricos de domínio estadual, principalmente, quanto ao uso consuntivo da água por indústrias e pelas atividades agrícolas de monocultura. Outro fato que pesou para esse sentido foi o licenciamento ambiental dessas atividades, inclusive, a da gestão dos recursos hídricos estaduais.

Não diferente, o órgão ambiental do estado do Rio de Janeiro, o Instituto Estadual do Ambiente – INEA-RJ<sup>13</sup>, sucessor da extinta Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente – FEEMA, também fixou padrões de uso e manejo dos recursos hídricos estaduais para fins de estabelecimento da qualidade ambiental através de Normas Técnicas (NT) e Diretrizes Ambientais (DZ), utilizadas até hoje como parâmetro em seu processo de monitoramento e licenciamento ambiental. Neste caso a DZ 215/2007, 202/1986 e 205/1987 são aplicadas à qualidade dos lançamentos de efluentes domésticos e industriais nos corpos d'água.

#### 3.6.1. O Parâmetro Nacional CONAMA

No Brasil a legislação específica que cuida da gestão das águas é a Lei Federal Nº 9.433/97, que foi um marco da regulação de uso desse bem. Antes, tal assunto era tratado de forma esparsa por regulamentos que não atribuíam à água valor econômico e social. Assim,

---

12 O CONAMA é um órgão consultivo do governo brasileiro, de formação paritária – governo, sociedade e setor produtivo – criado pela Lei Federal Nº 6.938/81, e tem como função assessorar o poder público na formulação e implementação da Política Nacional de Meio ambiente;

13 O INEA-RJ foi criado pela Lei Estadual Nº 5.101/2007 e incorporou a FEEMA, o IEF e a SERLA e suas atribuições específicas em um único órgão gestor;

a lei supra, baseada na gestão da água por unidade de bacia, com valor econômico estabelecido e regras definidoras para usuários norteou o setor no país.

Embora com o advento da Lei Federal Nº 9.433/97, que num contexto mais amplo defina as formas de uso e contrapartida dos usuários – dentro de um sistema regulador baseado em decisões de comitês de bacia – ainda havia a necessidade de regulamentar parâmetros específicos de uso e disposição, tipificados na forma de uso, demanda, lançamentos, qualidade de lançamentos, tipo de usuários, classificação e qualidade das fontes.

Foi neste sentido que o Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA editou a Resolução Nº 357/2005, que *“dispõe sobre a classificação de corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamentos de efluentes, e dá outras providências”*, definindo, em caráter mais técnico e específico, o enquadramento para fins de uso, os padrões de lançamento, a qualidade e os parâmetros ambientais dos corpos d'água.

No caso particular deste trabalho, é importante perceber que a Resolução supra classifica os corpos de água doce, quanto ao seu uso, em: i) Classe Especial, ii) Classe 1; iii) Classe 2; iv) Classe 3, e v) Classe 4.

Na Tabela 2 é ilustrada uma síntese dos elementos definidores da Resolução CONAMA Nº 357/2005.

<b>Quadro Resumido</b> <b>Classificação de Corpos de Água Doce e Parâmetros da Resolução CONAMA N° 357/2005</b>	
<b>Classes</b>	<b>Características/Parâmetros/Limites</b>
<i>Classe Especial</i> – águas destinadas ao consumo humano [...], à preservação do equilíbrio natural de comunidades aquáticas e preservação de ambientes aquáticos e unidades de conservação.	Devem ser mantidas as condições naturais do corpo d'água.
<i>Classe 1</i> – águas destinadas ao consumo humano, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário [...], à irrigação de hortaliças e frutas [...], à proteção de comunidades aquáticas em terras indígenas.	Ausência de efeito tóxico a organismos, de óleos e graxas, materiais flutuantes, substâncias com gosto ou odor, resíduos sólidos objetáveis, corantes de fontes antrópicas; até 200 coliformes termotolerantes por mL, DBO5 até 3 mg/L, OD maior 6 mg/L, turbidez até 40 NTU, pH entre 6,0 a 9,0.
<i>Classe 2</i> – águas destinadas ao consumo humano, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário [...], à irrigação de hortaliças e frutas [...], à aquicultura e à atividade de pesca.	Ausência de efeito tóxico a organismos, de óleos e graxas, materiais flutuantes, substâncias com gosto ou odor, resíduos sólidos objetáveis, corantes de fontes antrópicas; até 200 coliformes termotolerantes por mL, DBO5 até 5 mg/L, OD maior 5 mg/L, turbidez até 100 NTU, fósforo total até 0,030 mg/L, clorofila até 30 µg/L.
<i>Classe 3</i> – águas destinadas ao consumo humano [...], à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras, à pesca amadora, à recreação de contato secundário e à dessedentação de animais.	Ausência de efeito tóxico a organismos, de óleos e graxas, materiais flutuantes, substâncias com gosto ou odor, resíduos sólidos objetáveis, corantes de fontes antrópicas; até 2500 coliformes termotolerantes por mL, DBO5 até 10 mg/L, OD maior 4 mg/L, turbidez até 100 NTU, pH de 6,0 a 9,0, clorofila até 60 µg/L.
<i>Classe 4</i> – águas destinadas à navegação, e a harmonia paisagística.	Ausência de materiais flutuantes, inclusive espumas não naturais; odor e aspecto não objetáveis; tolerância iridescente a óleos e graxas; ausência de substâncias sedimentáveis [...]; fenóis totais até 1,0 mg/L; OD superior a 2,0 mg/L; e pH de 6,0 a 9,0.

**Tabela 2** – Síntese dos elementos definidores da Resolução CONAMA N° 357/2005 – enquadramento de usos e parâmetros de águas doces.

**Fonte:** Adaptado pelo autor.

### 3.6.2. O Parâmetro Estadual INEA-RJ

No âmbito dos estados a constituição federal define que os recursos hídricos de domínio estadual devem ser regulados pelos próprios entes federados. No Rio de Janeiro, a Lei Estadual N° 3.239/1999 instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos – PERH e criou o Sistema Estadual de Gerenciamento dos Recursos Hídricos – SINGREH, em obediência e Constituição Estadual. Esta lei veio de encontro a regulamentação jurídica do setor e à pacificação dos conflitos de usuários, fundada na relação usuário-poluidor-pagador, definida na Lei das Águas – Lei Federal N° 9.433/1997.

Embora a Resolução CONAMA Nº 357/2005 defina, em nível nacional, parâmetros e enquadramento do uso das águas, os estados, através de seus organismos ambientais ou de recursos hídricos, obedecendo aos mandamentos consagrados na Constituição Federal e Estadual, também definem – por atos e normas – os padrões e critérios de uso das águas em seus domínios.

Assim, no estado do Rio de Janeiro, a extinta Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente – FEEMA, sucedida pelo Instituto Estadual do Ambiente – INEA-RJ<sup>14</sup>, editou inúmeras regulamentações de enquadramento e qualidade das águas interiores, atendendo também aos princípios do sistema estadual de licenciamento ambiental (SLAP), criado pelo Decreto-Lei Estadual Nº 134/1975. No caso, a lei estadual que dispõe sobre a política estadual de recursos hídricos e que define as regiões hidrográficas no estado é a Lei Estadual Nº 3.239/1999<sup>15</sup>.

Em 1986, a FEEMA editou a NT 202-R.10/1986<sup>16</sup> (Estabelece Critérios e Padrões de Lançamentos de Efluentes Líquidos), afim de estabelecer os critérios e os padrões de lançamento de efluentes líquidos em corpos d'água, conferindo maior rigidez ao controle da poluição orgânica no estado. Esta norma técnica define assim os critérios e padrões de lançamento: i) pH entre 5,0 e 9,0, ii) temperatura < 40° C, iii) materiais sedimentáveis até 1,0 ml/L, iv) materiais flutuantes ausentes, v) cor ausente, vi) óleos e graxas – minerais até 20 mg/L e vegetais e gorduras animais até 30 mg/L.

A DZ 215.R-4/2007 (Controle de Carga Orgânica Biodegradável em Efluentes Líquidos de Origem Sanitária em atividades não industriais) é extremamente relevante quando define, no caso, a eficiência de remoção de carga orgânica (DBO<sup>17</sup>) em kg.DBO/dia e em percentual (%). As tabelas 3, 4, 5 e 6 da DZ 215.R-4/2007 definem o dimensionamento de unidades de tratamento que devem preconizar a eficiência mínima de remoção de DBO.

As Tabelas 3, 4, 5 e 6 ilustram uma síntese dos elementos definidores da DZ 215.R-4/2007 (Controle de Carga Orgânica Biodegradável em Efluentes Líquidos de Origem

---

14 O Instituto Estadual do Ambiente – INEA/RJ, criado pela Lei Estadual Nº 5.101/2007, reuniu as três instituições ambientais vinculadas à Secretaria de Estado do Ambiente – SEA do Estado do Rio de Janeiro, no caso, a Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente – FEEMA, a Superintendência Estadual de Rios e Lagoas – SERLA e a Fundação Instituto Estadual de Florestas – IEF, absorvendo, inclusive, suas atribuições.

15 Toda a legislação ambiental e de recursos hídricos do Estado do Rio de Janeiro, consultada para este trabalho, está disponível no site [www.inea.rj.gov/legislação](http://www.inea.rj.gov/legislação).

16 As Normas Técnicas – NT's e Diretrizes – DZ's, que instruem os procedimentos para contenção da poluição orgânica, instituídas pela extinta FEEMA, permanecem válidas atualmente.

17 A demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO pode ser definida como a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente nos esgotos *in natura*, lançados nos corpos d'água, de origem residencial, comercial e industrial.

Sanitária em atividades industriais e não industriais), constantes nas tabelas 3, 4, 5, e 6 da referida DZ.

A Tabela 3 dispõe sobre os limites de remoção (eficiência) de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) para estações de tratamento de esgotos (ETE) de um modo geral, enquanto a Tabela 4 define os limites de redução de demanda bioquímica de oxigênio (BDO) para atividades comerciais (não industriais) mais específicas.

<b>Tabela 4 - Eficiência de Remoção para Dimensionamento de Unidade de Tratamento</b>	
Carga Orgânica Bruta (kg.DBO/dia) (C)	Eficiência Mínima de Redução de DBO (%)
$C \leq 5$	30
$5 < C \leq 25$	65
$25 < C \leq 80$	80
$C > 80$	85

**Tabela 3** – Síntese do Padrão de Eficiência de Remoção de DBO para Dimensionamento de Unidades de Tratamento de Esgotos.

**Fonte:** Adaptado pelo Autor.

<b>Tabela 5 - Eficiência de Remoção para Dimensionamento de Unidade de Tratamento de Esgotos Sanitários de Atividades Industriais, Estabelecimentos Comerciais e Canteiros de Obras – Atividades Não Industriais com Cozinha (Contribuição/Pessoa = 0,050 kg.DBO/dia)</b>			
Carga Orgânica Bruta Total (C) kg.DBO/dia	Número de Funcionários	Eficiência Mínima de Remoção de DBO (%)	Tipologia da Tecnologia Adotada
$C \leq 5$	Até 100	30	Fossa Séptica
$5 < C \leq 25$	de 101 a 500	65	Fossa Séptica + Filtro Anaeróbio
$25 < C \leq 80$	de 501 a 1.500	80	Reator de Manta de Lodo + Biofiltro Aerado
$C > 80$	acima de 1.500	85	Lodos Ativados

**Tabela 4** – Síntese do Padrão de Eficiência para Dimensionamento de Unidade de Tratamento de Esgotos Sanitários de Várias Atividades Comerciais e Industriais com Cozinha.

**Fonte:** Adaptado pelo Autor.

Na Tabela 5 é aplicada, no caso, para a construção de estações de tratamento de esgotos (ETE's) de atividades industriais que lançam seus efluentes em coleções hídricas. Percebe-se que, existe um critério de padrões de lançamento aplicado à cada tipologia de atividade, sendo ela residencial, comercial e/ou industrial.

<b>Tabela 6 - Eficiência de Remoção para Dimensionamento de Unidade de Tratamento de Esgotos Sanitários de Atividades Industriais, Estabelecimentos Comerciais e Canteiros de Obras – Atividades Não Industriais sem Cozinha (Contribuição/Pessoa = 0,025 kg.DBO/dia)</b>			
Carga Orgânica Bruta Total (C) kg.DBO/dia	Número de Funcionários	Eficiência Mínima de Remoção de DBO (%)	Tipologia da Tecnologia Adotada
$C \leq 5$	Até 200	30	Fossa Séptica
$5 < C \leq 25$	de 201 a 1000	65	Fossa Séptica + Filtro Anaeróbio
$25 < C \leq 80$	De 1001 a 3000	80	Reator de Manta de Lodo + Biofiltro Aerado
$C > 80$	acima de 3000	85	Lodos Ativados

**Tabela 5** – Síntese do Padrão de Eficiência para Dimensionamento de Unidade de Tratamento de Esgotos Sanitário de Várias Atividades Comerciais e Industriais sem Cozinha.

**Fonte:** Adaptado pelo Autor.

Já a na Tabela 6 observa-se os limites de concentração de matéria orgânica (em DBO) para lançamentos sanitários residenciais.

<b>Tabela 7 – Concentrações Máximas de Matéria Orgânica (Em DBO e RNFT) Permitidas Para o Lançamento de Efluentes Sanitários de Atividades Residenciais</b>					
Carga Orgânica Bruta Total (C) kg.DBO/dia	Concentrações Máximas em DBO e RNFT (ou SST) (mg/L)				
	<b>Padrão de Residência</b>				
	Alto	Médio Região Metropolitana	Médio Interior	Baixo Conjuntos Habitacionais	Baixo Ocupação Desordenada
$C \leq 5$	170	180	210	260	280
$5 < C \leq 25$	85	100	110	130	140
$25 < C \leq 80$	60	60	60	60	60
$C > 80$	40	40	40	40	40

**Tabela 6** – Síntese do Padrão de Concentração Máxima de Matéria Orgânica (DBO ou RNFT) Permitidas para o Lançamento de Efluentes Líquidos Residenciais em Corpos D'água.

**Fonte:** Adaptado pelo Autor.

Desde a década de 70, o Estado do Rio de Janeiro esteve na vanguarda quanto ao estabelecimento de padrões ambientais, sendo referencia inclusive para os órgãos federais. No caso de algumas normas, vemos que elas são anteriores a Resolução CONAMA Nº 357/2005 e até mesmo à Lei Federal Nº 6.938/1981 que instituiu a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de aplicação, e à Lei Federal Nº 9.433/97 (Lei das Águas).

Percebe-se que o século 21 inaugurou uma preocupação iminente com a poluição da água, haja vista os problemas recorrentes de anúncio de crise mundial de água e da própria ameaça global de mudanças climáticas. Com essa preocupação, surgiram discussões que levaram a sociedade e governos a estabelecer critérios de usos dos seus recursos hídricos. As resoluções e normas no âmbito federal<sup>18</sup> e estadual<sup>19</sup>, no Brasil, revelam essa preocupação, assim como sua integração com demais políticas governamentais setoriais, como saúde, educação, economia e etc. A poluição ambiental, no aspecto geral, é onerosa e traz inúmeros malefícios à saúde; por isso a razão de combater-la na sua origem.

Numa abordagem resumida, observa-se que, atualmente, os padrões e as normas brasileiros existem e são considerados os melhores do mundo, contudo, pelo que se vê e se discute – principalmente nos meios de comunicação e acadêmicos – é o total desrespeito à vida e aos recursos hídricos, em detrimento da saúde e do ambiente natural, vilipendiados diariamente com o despejo de esgotos *in natura* de todas as origens em nossas coleções hídricas.

Especificamente a lagoa do Vigário, ligada ao sistema hídrico do Taquaruçu, por meio do canal Vigário, percebe-se que o problema aqui resumido também lhe é comum. Ou seja, como em todas as grandes e médias cidades, a ausência de um planejamento estratégico no que diz respeito à proteção dos mananciais e do saneamento básico, desdobra-se em prejuízos sociais e ambientais bastante sérios à comunidade, comprometendo a qualidade de vida e demandando elevados recursos públicos à busca de uma alternativa ou solução imediata.

Felizmente, em pleno século 21, percebe-se que a dicotomia ambiental traduzida em problemas com a poluição das águas e doenças humanas está despertando a consciência da sociedade e de nossas autoridades brasileiras para o enfrentamento dessas questões.

No que tange as normas do INEA-RJ, especificamente as Tabelas 3, 4, 5 e 6 da DZ 215.R-4/2007, vê-se o estabelecimento de padrões de lançamento de carga orgânica nos corpos hídricos no estado, já que essa é uma das formas mais comuns de poluição. Especificamente para este trabalho, a Tabela 6, que ilustra a Tabela 7 da DZ 215.R-4/2007,

---

18 No âmbito federal, existem órgão reguladores e normativos do uso e estabelecimentos de padrões de qualidade d'água, com base na Leis Federais Nº 9.433/1997 e 6.938/1981. O Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA e o Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, são órgãos colegiados de assessoramento do Ministério do Meio Ambiente/MMA, com jurisdição nacional. Especificamente à Lei Federal Nº 9.433/1997, a Agencia Nacional de Águas – ANA é o órgão responsável pela regulação do setor no Brasil.

19 No âmbito do Estado do Rio de Janeiro, o Instituto Estadual do Ambiente – INEA-RJ, sucessor da Fundação Estadual de Engenharia do Meio ambiente – FEEMA (Lei Estadual Nº 5.101/2007), e o Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH, são os organismos, executivo e colegiado, que definem as regras do setor. Consultar em [www.inea.rj.gov.br](http://www.inea.rj.gov.br).

representa de melhor forma os padrões de emissão de carga orgânica – traduzidas em demanda bioquímica de oxigênio – DBO, aprovadas principalmente para lançamentos de agrupamentos residenciais, mais comuns no entorno da lagoa do Vigário.

## **4. A MODELAGEM COMPUTACIONAL**

### **4.1. Conceitos de Modelagem Computacional**

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade. Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra e prever alterações futuras nos ecossistemas.

Os processos ambientais no mundo real são geralmente bastante complexos e são tipicamente tridimensionais e dependentes do tempo. Esta complexidade pode incluir comportamentos não lineares e componentes estocásticos sobre múltiplas escalas de tempo e espaço. Pode-se haver um entendimento qualitativo de um processo particular, mas o entendimento quantitativo pode ser limitado. A possibilidade de expressar os processos físicos como um conjunto de equações matemáticas detalhadas pode não existir, ou as equações podem ser muito complexas, exigindo simplificações para seu uso (Steyaert, 1993).

Além disso, limitações computacionais ou a maneira na qual as equações matemáticas são convertidas em processos numéricos discretos, levam à parametrização de processos complexos em escalas muito detalhadas que podem não ser explicitamente representadas no modelo. Em alguns casos, esses conjuntos de equações podem ser vistos como uma coleção de hipóteses que conectam entradas e saídas do sistema. Esse conjunto de equações parametrizadas representa a melhor aproximação do modelador para explicar esses processos, considerando todas essas restrições. Entretanto, é importante reconhecer que um modelo ambiental é, no melhor caso, apenas uma representação dos processos do mundo real (Steyaert, 1993). Um mesmo processo pode ser representado de diferentes maneiras, sendo algumas mais apropriadas para determinados casos. Assim, não existe um modelo único que seja o melhor e sim, pode existir aquele que melhor descreve um fenômeno.

De maneira geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Os parâmetros mantêm seu valor inalterado durante todo o processo estudado. Assim, um parâmetro possui o mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que ele não possa variar espacialmente. Por outro lado, as variáveis podem mudar ao longo do tempo que o modelo estiver sendo executado.

Para Santos Fernandes (2005), um sistema operacional não se resume a um modelo numérico com previsões diárias. Um sistema operacional deve ser entendido como uma

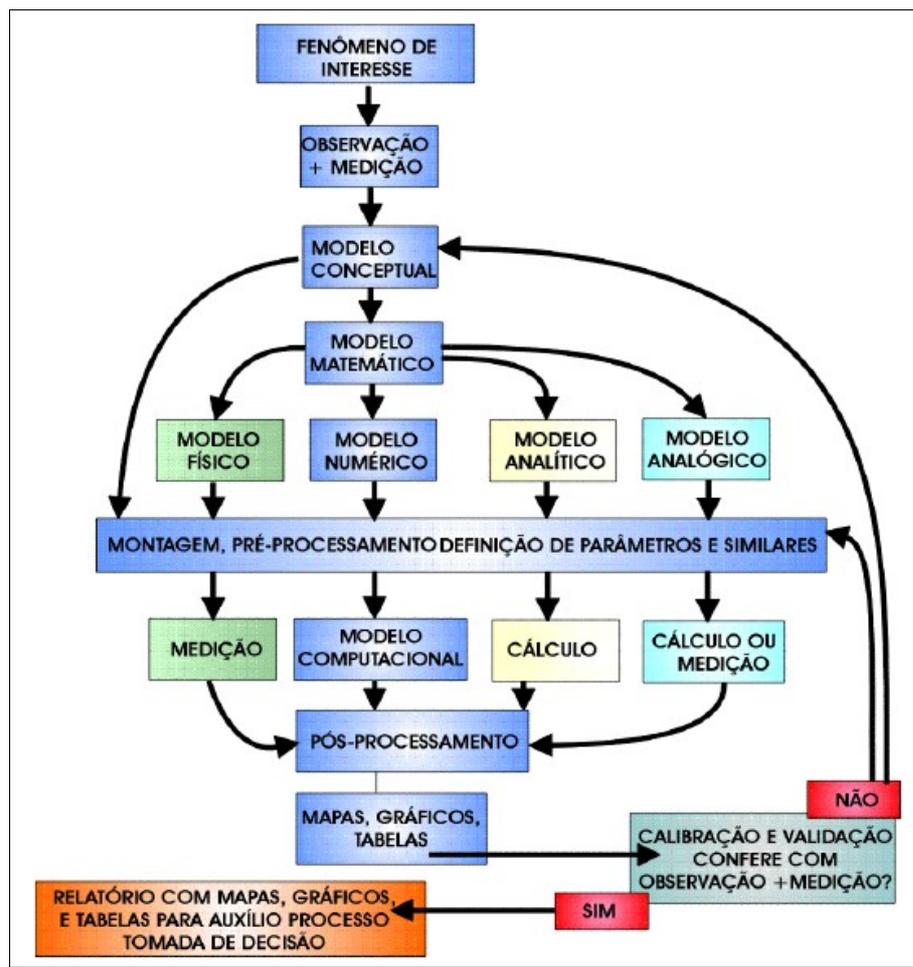
infra-estrutura de modelos acoplados, um conjunto de dados de entrada, incluindo batimetrias a condições iniciais, e uma rede de monitorização automática, incluindo detecção remota, embarcações, boias e etc., todos integrados num modelo operacional. Através de uma aplicação, bases de dados para armazenamento de medidas e previsões, mecanismos e ferramentas de validação das diferentes fontes de informação, esse conjunto de informação e resultados é disponibilizado em formato útil para os utilizadores finais.

Amaral (2003) fala que foi a partir da década de 1960, que o cenário dos computadores vem se modificando, e de forma acelerada. Isto possibilitou a enorme evolução das técnicas matemáticas descritivas (simulação) e normativas ou prescritivas (otimização).

Também afirma Amaral (2003) que os modelos de simulação matemática em recursos hídricos têm hoje aplicação irrestrita em diversas áreas, como na quantificação dos processos do ciclo hidrológico, na análise da qualidade das águas em rios, reservatórios e nos aquíferos subterrâneos, nos processos hidráulicos do escoamento em rios, mares e subsolo e nos modelos ambientais e meteorológicos.

Os modelos de simulação fornecem a resposta de um sistema a um conjunto de informações de entrada, que incluem regras de decisão, permitindo ao decisor examinar as consequências de diversos cenários de um sistema existente ou de um sistema em projeto (AMARAL, 2003).

Amaral (2003) apresenta um fluxograma que representa o processo da modelagem, sendo o relatório final o item mais importante em estudos, projetos ou gestão ambiental, pois isso é o que contém as informações que integram e auxiliam o processo de tomada de decisões (ROSMAN, 2001 e AMARAL, 2003).



**Figura 4** – Fluxograma de Processos de Modelagem em Recursos Hídricos (AMARAL, 2003).  
 Fonte: Amaral, 2003.

Um sistema de modelação operacional pode gerar uma vasta lista de diferentes produtos e serviços. Esses produtos envolvem diversas escalas temporais, não só futuras, mas também presentes e passadas.

Santos Fernandes (2005) enumera uma série de produtos que podem ser gerados pela modelagem computacional. São eles:

- Procura e resgate;
- Evolução de derrames de petróleo;
- Potenciais “*blooms*” de algas tóxicas;
- Transporte e dispersão de partículas e distribuição de massas de água (ovas e larvas de peixes, contaminantes, matéria suspensa, águas dos rios);
- Clima “costeiro” (correntes, turbulência, temperatura, salinidade, ondas, nível do mar, vento, temperatura do ar);
- Produção primária (aparecimento/magnitude/distribuição de diatomáceas e flagelados);

- Eutrofização (nutrientes e oxigênio);
- Transporte de nutrientes e de material em suspensão;
- Padrões de transporte e diluição de descargas potencialmente poluídas;
- Clima “costeiro” (correntes, turbulência, temperatura, salinidade, ondas, nível do ar, vento, temperatura do ar);
- Produzir e atualizar longas séries temporais do clima de meios aquáticos, e variabilidade de ecossistemas (especialmente ao nível dos níveis tróficos mais baixos);
- Demonstrar o estado potencial de climas costeiros, ou regionais, e estado e variabilidade de ecossistema, face a hipotéticos futuros cenários climáticos;
- Quantificar os efeitos de diferentes cenários de gestão nos ambientes costeiros (nomeadamente ao nível produção primária, eutrofização, e transporte de nutrientes).

Mais além, Santos Fernandes (2005) fala que, para produtos e serviços gerados por um sistema operacional, é possível estabelecer uma lista bem mais exaustiva de interesses e comunidades envolvidas.

## **4.2. Modelagem e Previsão**

Para assegurar a componente de modelagem, foi necessário o recurso a uma filosofia de integrada, capaz de simular todos os processos físicos e físico-químicos num sistema lacustre, visando caracterizar sua degradação ambiental e construir cenários de avaliação. Contudo, mais do que isso, é vantajosa a adoção de ferramentas capazes de considerar a troca de informação através de interfaces comuns entre diferentes sistemas físicos e onde os processos simulados possam ser diferentes. Recorreu-se assim ao sistema de modelagem computacional Mohid, originalmente desenvolvido no Instituto Superior Técnico – IST, em Lisboa, Portugal, desde 1985. Este modelo, para além das suas potencialidades, tem sido largamente aplicado à área em estudo (adaptado de SANTOS FERNANDES, 2005).

## **4.3. Sistema de modelagem Mohid**

O desenvolvimento deste sistema iniciou-se na década dos 80, vindo a ser objeto de sucessivos aperfeiçoamentos na sequência da sua aplicação em diferentes projetos, científicos e tecnológicos. Hoje em dia pode ser classificado com um dos mais elaborados

entre os sistemas existentes deste tipo, diante a sua inovação face a descrição vertical e a sua programação robusta e confiável (SANTOS FERNANDES, 2005).

#### 4.3.1. Descrição do Sistema

O sistema de modelação Mohid permite a adoção de uma filosofia de modelação integrada já referida, não só de processos (físicos e biogeoquímicos), mas também de diferentes escalas (possibilitando a utilização de modelos encaixados) e sistemas (estuários + bacias hidrográficas), graças à adoção de uma filosofia de programação orientada por objetos. Esta filosofia, utilizada na programação do modelo torna a sua utilização, tal como a sua expansão, muito robusta (MIRANDA *et al.*, 2000. *apud* SANTOS FERNANDES, 2005).

Este tipo de programação tem provado ser uma método muito útil no desenvolvimento de programas complexos, em especial para aqueles que têm por objectivo simular problemas “do mundo real”, como é o caso da modelação de processos marinhos ou estuarinos (SANTOS FERNANDES, 2005).

Este modelo é programado em ANSI Fortran 95, garantindo a independência do sistema Mohid face ao sistema operativo em qual se pretende executar o modelo (Windows, Linux, Unix e etc.) e uma fácil implantação do código em qualquer ambiente. Embora a linguagem FORTRAN 95 não seja uma OOL (*Object Oriented Language*), os módulos de FORTRAN podem funcionar como classes de uma normal OOL, em que os objetos são criados a partir das classes. A comunicação entre os diferentes módulos que compõem o sistema é feita numa base de cliente/servidor garantindo assim o encapsulamento da informação de cada módulo (Duffy, 1995 *apud* SANTOS FERNANDES, 2005).

Segundo o autor, o tempo de execução do programa – ou tempo simulado *versus* o tempo da unidade central de processamento –, varia em função da malha de cálculo e do passo de tempo utilizado. A possibilidade de correr os vários módulos que compõem o sistema Mohid com passos de tempo diferentes, permite ao utilizador obter resultados em reduzido espaço de tempo. Todo o modelo utiliza a alocação dinâmica da memória, tornando-se assim mais versátil, podendo para qualquer tipo de simulação sempre ser utilizado o mesmo executável do programa. Com esta filosofia de programação também é possível utilizar uma metodologia de “modelos encaixados” de tal modo que o número de modelos encaixados que o utilizador pode definir é ilimitado. Na realidade, esta escolha está limitada à capacidade de cálculo disponível (SANTOS FERNANDES, 2005)

Atualmente, diz o autor, que o sistema Mohid é um conjunto de diversas ferramentas numéricas, agrupado em três grandes grupos: **(i) Mohid Water, (ii) Mohid Land, e (iii) Mohid Soil**. A primeira ferramenta é responsável pela modelação dos processos hidrodinâmicos, simulação de fenômenos de dispersão, propagação de ondas, transporte de sedimentos, qualidade da água/processos biogeoquímicos na coluna de água e trocas com o fundo. A segunda é um modelo de bacia e a terceira simula o fluxo de água através de meios porosos (SANTOS FERNANDES, 2005).

Segundo Santos Fernandes (2005) o Mohid Water pode ser dividido em quatro grandes classes. As duas primeiras geram as propriedades do escoamento não turbulentas (velocidade, elevação, viscosidade turbulenta, fluxos de água) e turbulentas (viscosidades, difusividades, energia cinética turbulenta, comprimentos de mistura e etc.), as outras duas as propriedades da água (salinidade, temperatura, densidade, amônia, sedimentos coesivos). As três primeiras classes calculam a evolução das propriedades relativamente a um referencial “Eulereano” e a discretização das equações é feita em volumes finitos.

Especificamente, neste trabalho está se aplicando somente o Mohid Water, com objetivo de simular cenários de lançamentos de efluentes em pontos amostrados no campo onde as variáveis físicas e físico-químicas (OD, DBO, temperatura, pH e Nitrogênio e etc) possibilitem inferir sobre a qualidade ambiental da lagoa. Então, é importante frisar que este trabalho adota o uso do Mohid em seu módulo que avalia as propriedades da água, ou seja, o Mohid Water.

A formulação matemática (numérica) usada na simulação do transporte de substancias contempla a variação do tempo e, quanto ao espaço, ela pode ser unidimensional, bidimensional ou tridimensional, dependendo das características físicas ou morfológicas do sistema.

Dyer (1997), Miranda *et al.* (2002) e Rosman (1989) mostraram que sistemas hidrodinâmicos submetidos a pequenos aportes podem ser simulados com a aplicação de equações denominadas “Equações de Águas Rasas” (EAR), que resolvem as variáveis do escoamento assumindo que elas não variam demasiadamente na direção vertical da coluna d'água. As equações de águas rasas (EAR) são:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + F \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = K_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + F \quad (\text{Eq. 13})$$

Assim,  $h$  é a superfície livre,  $u$  e  $v$  são respectivamente as componentes longitudinal e transversal da velocidade,  $K_x$  e  $K_y$  são os coeficientes de dispersão turbulenta e  $F$  o termo fonte ou sumidouro, que pode incluir parametrizações da força de atrito ou o arrasto promovido pelo vento na superfície da lagoa. Daí, considerando fontes e sumidouros, devido ao atrito de fundo, pode-se parametrizar a tensão  $T$  pela equação (LIMA *et al.*, 2009):

$$T = \frac{\rho g u (u^2 + v^2)}{C_h^2} \quad (\text{Eq. 14})$$

Na Equação 14,  $C_h^2$  é o coeficiente de Chézy que considera a altura da rugosidade em sua formulação.

O transporte do soluto e de seus constituintes, ou de substâncias não-conservativas, em suspensão podem ser descritos pela versão bidimensional (2-D) horizontal da equação de advecção-difusão. Tal equação é expressa por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + R \quad (\text{Eq. 15})$$

Na Equação 15, representa-se a concentração do soluto ou constituintes em suspensão, onde  $D_x$  e  $D_y$  são os coeficientes de dispersão turbulenta e  $R$  reúne todas as reações internas e aportes externos que possa alterar a concentração dos constituintes simulados (LIMA *et al.*, 2009).

Diversas são as soluções numéricas propostas para resolver esse conjunto de 4 (Quatro) equações e 4 (Quatro) incógnitas ( $h$ ,  $u$ ,  $v$  e  $c$ ), sendo que a plataforma computacional Mohid as resolvem pelo método dos volumes finitos – MVF (Versteeg; e Malalasekera, 1995), com malhas estruturadas e utilizando o esquema *upwind* para termos advectivos, diferenças centradas para os termos difusivos e Clark-Nicholson para o tempo (LIMA *et al.*, 2009).

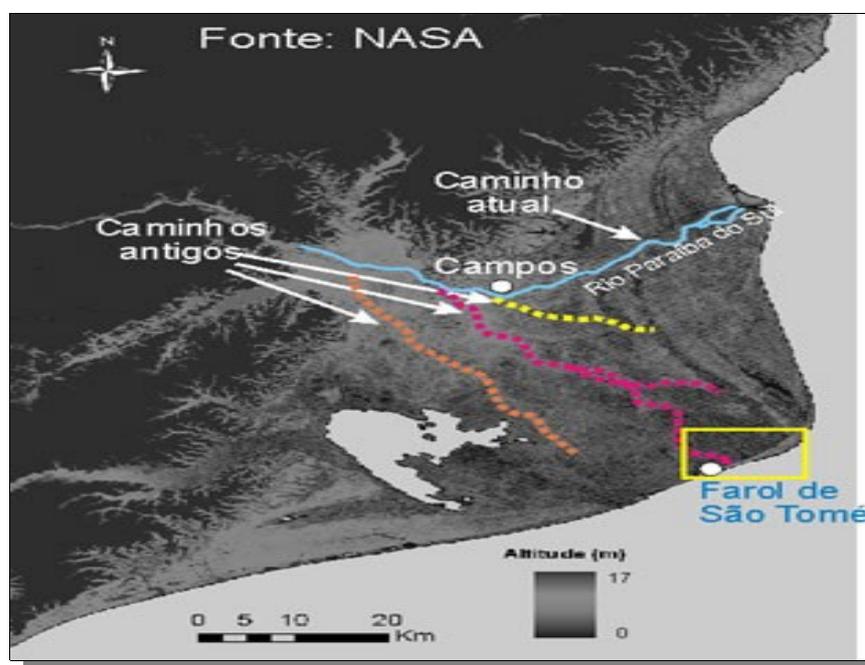
Neste trabalho, o domínio modelado tem extensão de 0,34 km<sup>2</sup> (lagoa do Vigário), sendo utilizada uma malha de 182 x 70 metros com uma discretização espacial de 10 (dez) metros para as células quadráticas.

Os dados cartográficos para implementação da batimetria na interface gráfica GIS (*Geographical Information System*) da plataforma Mohid foram obtidos através da carta batimétrica da lagoa do Vigário (Figura 16), produzida em Fevereiro de 2001, Escala 1:2.500, disponibilizada pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Campos dos Goytacazes.

## 5. ÁREA DE ESTUDO

### 5.1. Histórico da Região Aluvial do Norte Fluminense

Há 120.000 anos o rio Paraíba do Sul vem construindo a planície costeira entre São Tomé e Macaé. A faixa de areia que constitui a praia atual tem somente 10.000 anos de idade. No passado geológico, o rio Paraíba do Sul percorreu diversos caminhos e ocupou diferentes posições. Pelo menos três posições dos antigos canais do rio ainda podem ser identificadas na região entre Campos e Farol de São Tomé, conforme visualizado nas imagens de satélite da Figura 5.



**Figura 5** – Imagem de Satélite dos Possíveis Caminhos do RPS.  
**Fonte:** (NASA, 1998, *apud* DRM-RJ, 2009).

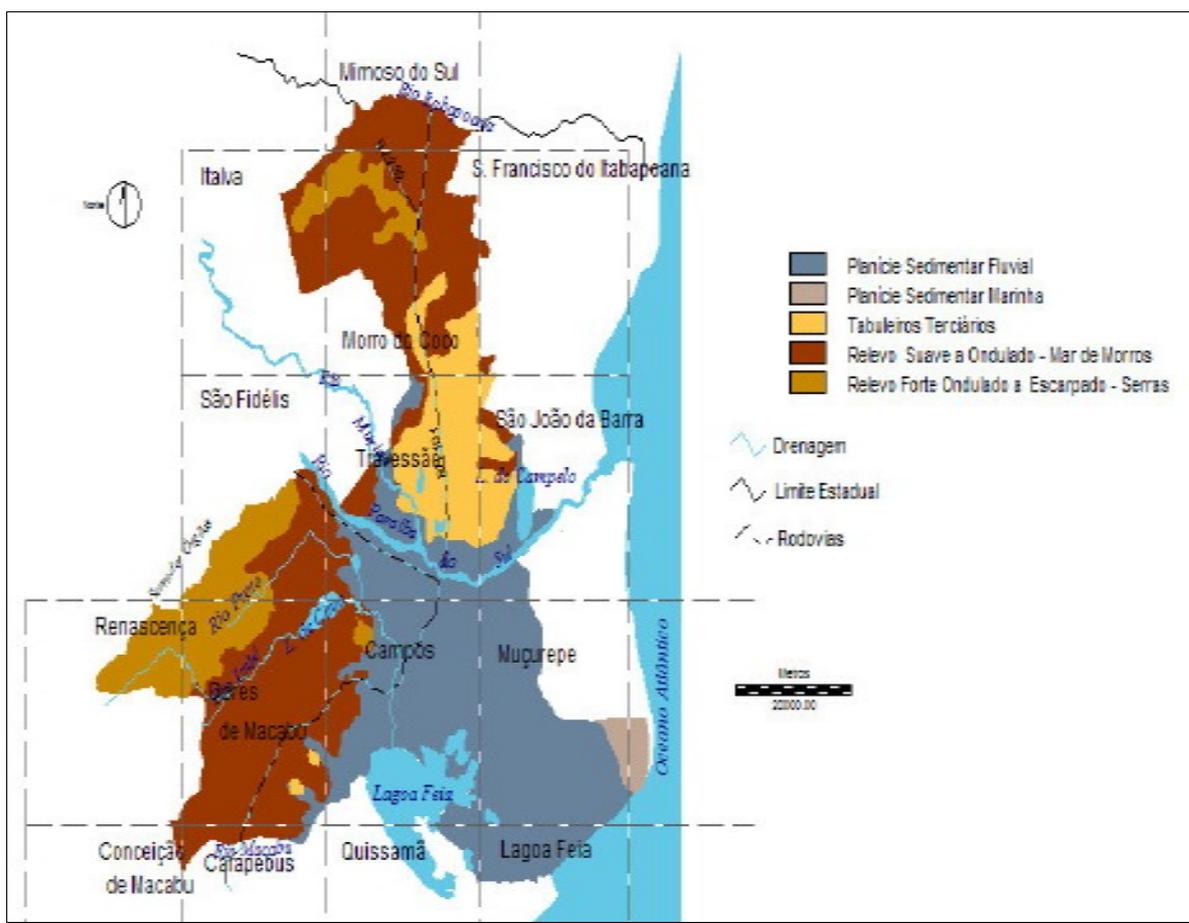
Segundo Soffiati-Neto (1994), poder-se-ia distinguir com clareza três aspectos geomorfológicos na ecorregião norte-fluminense:

*“O mais antigo trata-se do período pré-Cambriano e é formado pela Serra do Mar e por ramificações da Serra da Mantiqueira. O segundo, de origem terrestre, vem a ser os tabuleiros da série Barreiras, formados no Terciário. Por fim, a imensa planície flúvio-deltaica conta com uma parte construída pela ação de rios, notadamente o rio Paraíba do Sul que depositou solenemente sedimentos num golfo pouco profundo, cujo leito ficara emerso ao*

*menos durante a última glaciação, e pelo processo de transgressão-regressão marinho, consolidou dois arcos de largas restingas. O primeiro observador neo-europeu a perceber nitidamente a topografia da região foi o capitão de infantaria Manoel Martins do Couto Reis, em 1785, num mapa e num relatório que se tornaram célebres. Mediante isso, reconheceu ele que haviam três níveis de terreno. O primeiro, baixo e plano, quase ao nível do mar, que é formado por solos arenosos (restingas) e por solos argilosos (planície aluvial), este muito fértil, com campinas separadas por rios, lagoas, brejos e bosques. O segundo possui vastas florestas, àquela altura – em grande parte –, já destruídas por derrubadas e queimadas. O terceiro vai se elevando em direção à serra e abunda em madeira. (COUTO REIS, 1785, apud SOFFIATI-NETO, 1996)*

A unidade geomorfológica da Baixada Campista, abrange uma expressiva área de Norte Fluminense, caracterizada por uma importante baixada flúvio-lagunar, isolada do oceano pelas planícies costeiras de Jurubatiba e da desembocadura do Rio Paraíba do Sul, durante o último máximo transgressivo no Holoceno. A Baixada Campista e as planícies costeiras adjacentes compõem a planície deltaica do Rio Paraíba do Sul, que resulta de uma sequência de eventos transgressivos e regressivos que remontam ao Pleistoceno Superior. Essas variações do nível do mar marcaram períodos cíclicos de erosão e sedimentação dos depósitos continentais e marinhos, que modelaram a atual morfologia da região. O litoral e caracterizado pelo sucessivo empilhamento de cristas de cordões arenosos e, na retaguarda desses cordões, por uma extensa planície flúvio-lagunar, resultante do ressecamento da lagoa Feia coberta, em parte por uma extensa baixada aluvial. Na baixada aluvial, notam-se evidências de canais distribuídos que testemunham antigas posições do delta do Rio Paraíba do Sul (DIAS e GORINI, 1980).

Ramalho (2005) corroborou, em sua tese de doutorado: “Diagnóstico do Meio Físico do Município de Campos dos Goytacazes”, com a percepção de Couto Reis (1785) sobre os cenários físico-geográficos da região. Ela demonstrou num mapa as diversas feições geomorfológicas da região, como se observa na Figura 6.



**Figura 6** – Mapa Geomorfológico do Município de Campos dos Goytacazes/RJ, ilustrando as formações do Relevo e Solo.

**Fonte:** Obtido de Ramalho (2005).

Em outro aspecto, Soffiati-Neto (1998) afirma que Lamego (1974) logrou uma ampla e majestosa interpretação para a interpretação da formação geológica da ecorregião norte-noroeste fluminense. E num estilo épico, diz ele:

*“Lamego empenha-se na análise da zona cristalina emersa e da série Barreiras. Mas os seus esforços se concentram em explicar a formação das planícies aluvial e de restinga, erigindo o rio Paraíba do Sul como o herói desta epopéia. Talvez, desembocando primitivamente no rio Muriaé, num determinado momento, o Paraíba desloca-se para o sul e encontra uma falha na Serra do Mar, entre a Serra do Sapateiro e o morro Peito de Moça, por onde passa a correr até lançar suas águas num golfo de águas rasas. Lentamente, vai formando uma fimbria de terra que constituirá seu primeiro leito e que terminaria num delta tipo “pé de ganso” ou*

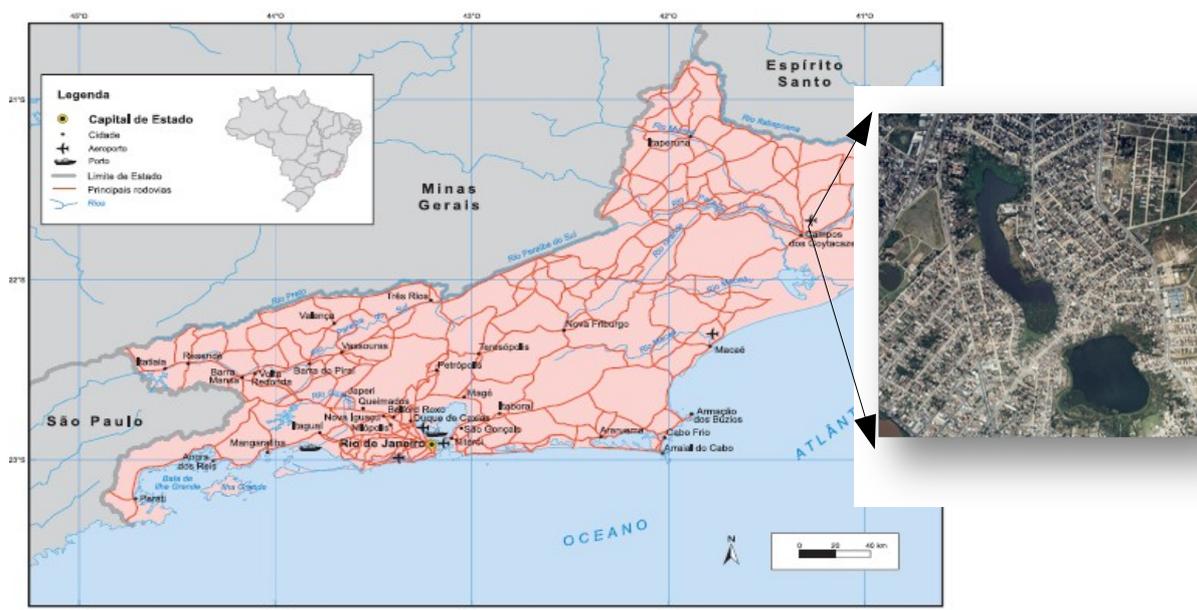
*“Mississipi”. No Holoceno, o curso se bifurca e um dos braços passa a correr para o norte, criando um delta tipo “Ródano” ou “Níger”. De pouco em pouco, este segundo braço vai se consolidando e passa a defluir entre as futuras praias de Atafona e Gargaú, num delta do tipo “Paraíba”, consoante classificação de Lamego. No século XVIII, Couto Reis registrou o paleocanal do rio Paraíba do Sul em seu mapa. Ele era chamado de Grande Canal ou Canal do Cula. Sua nascente localizava-se em frente à foz do rio Muriaé e seu curso rumava para as bandas do Cabo de São Tomé, sendo ainda navegável no período chuvoso.” (LAMEGO, 1974, apud SOFFIATI-NETO, 1998)*

## **5.2. Localização e Características da lagoa do Vigário**

Segundo Santos (2007), a lagoa do Vigário localiza-se na área urbana do município de Campos dos Goytacazes, respectivamente nas coordenadas geográficas 21° 45' 15" S (longitude) e 41° 19' 28" W (latitude), e diz também ser o município o mais populoso da região norte fluminense. Ela diz que a região é caracterizada por dois períodos climáticos distintos entre outubro e abril, caracterizando o verão, com temperaturas médias superiores a 25°C, e o segundo, entre maio e setembro, evidenciado por temperaturas mais amenas com temperaturas médias maiores que 19°C. Diz também que o clima na região é caracterizado por um padrão de variação térmica e pluviométrica bem marcada ao longo do ano, com os maiores índices ocorrendo entre os meses de setembro e janeiro (FEEMA, 1993, apud SANTOS, 2007).

A lagoa do Vigário, segundo Santos (2007), localiza-se entre os bairros de Guarus e Parque Prazeres, ambos situados na cidade de Campos dos Goytacazes. Apresenta uma área total de aproximadamente 0,34 km<sup>2</sup>, profundidade média no verão e inverno de aproximadamente 0,9 a 1,2 m, intenso desenvolvimento marginal de uma população que se instalou no entorno da lagoa a partir da década de 60. A lagoa é densamente colonizada por bancos de macrófitas aquáticas emergentes (*Typha domingensis*) e flutuantes (*Eicchornia crassipes*) que é uma espécie móvel que forma um extenso aglomerado que migra na lagoa de acordo com a predominância dos ventos (LANNES, 2002, apud SANTOS, 2007).

Na Figura 7 pode-se observar a articulação de imagens com o local de estudo escolhido para realização deste trabalho.



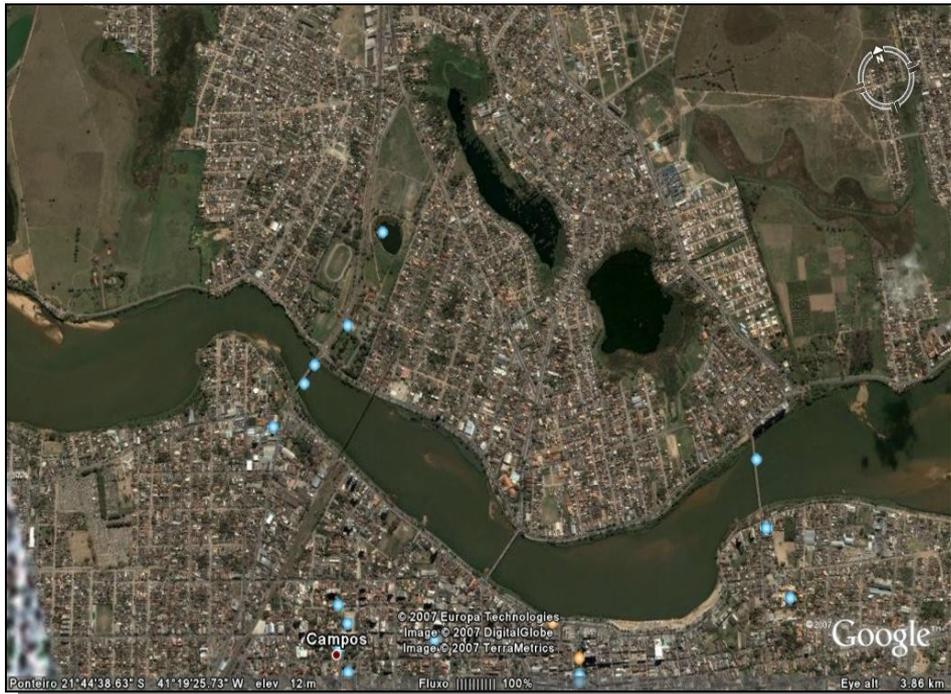
**Figura 7** – Mapa Físico do Estado do Rio de Janeiro, modificado (à esquerda), com indicação da lagoa do Vigário (porções norte e sul), no município de Campos dos Goytacazes/RJ (à direita).  
**Fonte:** Adaptado de IBGE (2010) e Google Earth (2010).

Dela deflui, de Noroeste para Sudeste, o canal do Vigário, que atravessa parte da área urbana de Guarus – ligando-a à lagoa do Taquaruçu – e, sucessivamente, ao rio Paraíba do Sul. Contudo, esta ligação é controlada por um sistema de comportas manobráveis que está, atualmente, sob o controle do Governo Municipal. E sabe-se que, raramente, devido às cheias do rio Paraíba do Sul, essas comportas não são abertas. A justificativa parte do argumento de que se as águas do rio Paraíba do Sul forem aduzidas pelo canal do Vigário, para revigorar a lagoa do Vigário – isto somente em períodos de cheias –, também implicaria na inundação de toda área urbana de entorno da lagoa, trazendo inúmeros prejuízos materiais.

### 5.3. Características Específicas e Gerais

Segundo Santos (2007) a lagoa do Vigário constitui um corpo d'água receptor de efluentes domésticos advindos das moradias que se instalaram na região de entorno. Uma porcentagem das margens da lagoa sofreu o processo de aterramento, com a redução significativa de boa parte das áreas alagáveis deste ecossistema.

Na Figura 8 observa-se uma imagem atualizada do Google Earth, onde podemos ver a malha urbana do distrito de Guarus (lado direito), envolvendo a lagoa do Vigário.



**Figura 8** – Imagem da lagoa do Vigário que ilustra sua proximidade com o rio Paraíba do Sul e lagoa do Taquaruçu, ambas com a malha urbana envolvendo-as.

**Fonte:** Adaptada e editada do Google Earth, 2010.

Ainda segundo as autoras, a lagoa do Vigário apresenta pH em torno de 7,5 e condutividade elétrica em torno de  $0,7 \text{ mS.cm}^{-1}$ . Afirmam que embora a qualidade das águas da lagoa do Vigário não seja boa, é possível verificar a atividade pesqueira e recreativa intensificada na lagoa, que é praticada especialmente por moradores dos bairros adjacentes (LANNES, 2002, *apud* SANTOS, 2007).

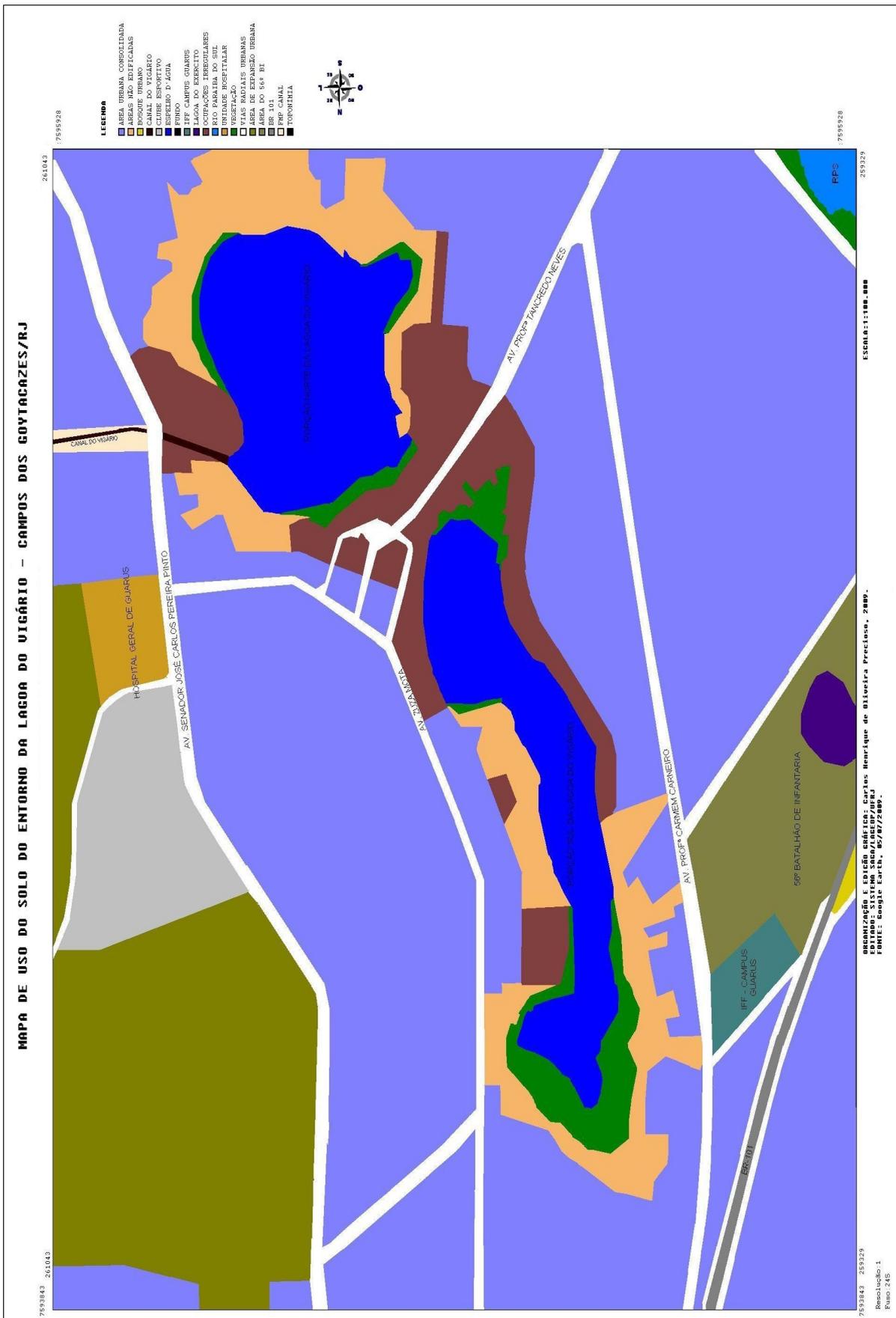
### 5.3.1. Características do Entorno

Pedloviski (2004) fala que durante o processo de urbanização e transformação espacial pelo qual tem passado a região norte fluminense, o complexo de lagoas do município de Campos dos Goytacazes sofreu várias alterações via obras de engenharia, que foram efetuadas hipoteticamente para suprir as necessidades da população e estimular o crescimento econômico. Entretanto, tal processo de urbanização vem causando um profundo declínio do número espécies aquáticas, assim como a danificação da probabilidade de sustentação de ecossistemas aquáticos (ADLER, 2002).

Neste sentido, o autor diz que as obras de dragagem efetuadas pelo DNOS retiravam excessivamente materiais orgânicos das lagoas e, em alguns casos, as lagoas tiveram seu encosto ocupado por populações (LANNES, 2002). E que políticas de reforma urbana aliada

a ocupação de populações tem provocado severas transformações no complexo de lagoas da região norte fluminense. A Lagoa do Vigário, localizada no distrito de Guarus [...], não conheceu destino diferente, pois foi dividida por um aterro há cerca de 30 anos para a construção de uma rodovia.

Na Figura 9, ilustra-se os tipos de usos do entorno da lagoa do Vigário, no distrito de Guarus, elaborado na plataforma SAGA/LAGEOP/UFRJ, em 2009.



**Figura 9** – Mapa de uso de solos do entorno da lagoa do Vigário. Produzido e editado na plataforma computacional SAGA, do LAGEOP/UFRJ, em 2009 pelo autor.

Atualmente, os dois lados do ecossistema são ocupados por comunidades de baixa renda, que despejam seus efluentes sanitários diretamente nas águas da lagoa do Vigário (SOUZA, 2009). A lagoa do Vigário sofre a intensa interferência da ação antrópica, principalmente devido a construção de moradias no seu entorno, que não apenas diminuiu o seu tamanho físico, como também comprometeu a qualidade de suas águas, tanto para utilização doméstica como recreacional, através dos despejos de esgoto sem tratamento. Por outro lado, ainda que de forma localizada, algumas manifestações de populações ribeirinhas sugeriram no município de Campos dos Goytacazes nas últimas décadas. As transformações ocorridas no cenário ambiental do município acarretaram algumas consequências negativas às tais comunidades, que tinham as lagoas como sua principal atividade econômica (LANNES, 2002).

Historicamente, o processo de ocupação das áreas lacustres e brejosas da área urbana de Campos dos Goytacazes, Pedlovski (2005) e Sofiati-Neto (1996), se deu em decorrência das obras de saneamento do antigo DNOS, na década de 80.

Segundo comentários de Almeida & Pedlovski (2006) a área urbana do município só começou a dar sinais de mudanças quando a Vila de São Salvador foi elevada à categoria de cidade, em 1835, passando a se expandir rapidamente quando o mercado do açúcar estimulou a expansão dos canaviais por todo o seu território.

Pedlovski (2005) também afirma que a produção de um espaço urbano desintegrado, ligado à reprodução de caráter periférico do modo de produção capitalista, foi uma característica marcante da cidade de Campos dos Goytacazes. Que as sucessivas intervenções públicas de ordenamento espacial da cidade, que buscaram modernizar sua estrutura urbana, significaram ao longo do tempo, na expulsão de populações de baixa renda das áreas mais centrais. Assim, essas populações passaram a ocupar áreas periféricas e de baixa qualidade habitacional e ambiental.

Segundo Souza (2009) as áreas marginais da lagoa do Vigário – ou Área de Preservação Permanentes (APPs), foram espontaneamente ocupadas por famílias de baixa renda, contudo, não só famílias “pobres” ocupam as APPs. Acrescentou que existem empresas que também ocupam as APPs de forma irregular.

Souza (2009) relata que a maioria das famílias que ocupam as margens da lagoa do Vigário vivem confinadas em pequenos espaços, não possuem sistema de coleta de esgotos e acesso a equipamentos urbanos condizentes, convivem com sérios problemas sanitários, vetores que transmitem doenças (ratos, baratas, mosquitos, caramujos e etc), lixo e inundações sazonais da lagoa. Entretanto, o autor assevera que existem alguns imóveis de

classe média que ocupam as margens, mas sem apresentar termo de posse ou escritura pública legalmente registrada. No caso, infere-se que o problema fundiário nessas comunidades é um sério desafio a ser enfrentado pelo poder público. Relata também o autor que os próprios moradores do entorno revelaram que 80% dos peixes pescados na lagoa formam a base nutricional das famílias, mesmo conscientes de que os peixes possam estar contaminados.

Embora Souza (2009) não relate especificamente quanto a escolaridade e rendimentos dos moradores do entorno, tipificando alguns elementos que levam a inferir sobre as condições sócio-econômicas das famílias, é possível perceber que se trata de comunidades com baixo grau de instrução e rendimentos, empurrando para condições de vida impróprias à manutenção da dignidade, da qualidade de vida e ao exercício pleno da cidadania.

### 5.3.2. Características Bióticas e Abióticas da lagoa do Vigário

Segundo Lannes (2002), a lagoa do Vigário tem comportamento biótico, físico e químico bem peculiar a de uma lagoa eutrofizada, pois todos os parâmetros investigados apresentam grande variabilidade espacial e temporal.

Em seu trabalho de pesquisa Lannes (2002) concluiu que a lagoa apresenta grande variabilidade nos parâmetros de pH, oxigênio dissolvido – OD, condutividade elétrica, temperatura, nitrogênio, e etc (...), nas estações de seca e de chuva. Segundo ela, nas estações secas os valores desses parâmetros são mais elevados, devido à alta concentração de efluentes despejados na lagoa.

No caso do pH, os valores apresentam-se elevados no período chuvoso, concluindo que as águas da lagoa do Vigário são ácidas comparadas ao sistema hidroquímico da lagoa Taquaruçu, a quem ela é ligada. A média do pH encontrada é de 7,64, o que revela realmente um caráter mais ácido.

Para o oxigênio dissolvido (OD) a autora argumenta que os valores variaram de 1,70 mg/L a 7,48 mg/L. Ela afirma que é no período seco que a lagoa atua com maior produtividade primária, revelada pelos valores elevados de condutividade elétrica. Ela afirma que a porção sul (arredondada) da lagoa do Vigário apresenta altas concentrações de

de fósforo (P-Total)<sup>20</sup> e nitrogênio totais (N-Total)<sup>21</sup>, sendo um indicador de acúmulo de matéria orgânica nessa porção, fato ainda mais acentuado no período seco, quando há menor circulação de água na lagoa.

Outro fato importante mencionado por Lannes (2002) é que, devido à baixa profundidade da lagoa e a alta ocorrência de ventos – o que provocaria a recirculação da massa d'água – não se verificou grande diferenças da água superficial com a de fundo.

Mais além, Lannes (2002) aplica a classificação para corpos d'água editada pela Resolução CONAMA N° 20/86<sup>22</sup> e revela que devido a grande concentração de efluentes/esgotos, e por ser o limite de detecção do método de análise de 2400 coliformes/100mL, não foi possível mensurar a quantidade de coliformes fecais na lagoa. Contudo, diz ela que *“esse dado, associado a sinais de poluição por esgotos, perceptíveis pelo olfato ou pela visão, bem como a percepção do recebimento regular de esgotos por intermédio de valas”*; daí enquadrou-se as águas da lagoa o Vigário como *“imprópria”* ao uso e contato humano.

---

20 A lagoa do Vigário apresenta concentração de fósforo total (P-Total) no período chuvoso variando de 8 a 10  $\mu\text{M}$ , e no período seco de 7 a 12  $\mu\text{M}$ . Segundo a autora, esses valores são os maiores da região se comparados a outras lagoas como a de Imboassica, em Macaé/RJ, a lagoa de Cima, em Campos/RJ, e a lagoa de Grussaí, em São João da Barra/RJ.

21 A lagoa do Vigário apresenta concentração de nitrogênio total (N-Total) no período chuvoso variando de 270 a 443  $\mu\text{M}$ , e no período seco de 314 a 537  $\mu\text{M}$ . Segundo a autora, esses valores também são os maiores da região se comparados a outras lagoas como a de Imboassica, em Macaé/RJ, a lagoa de Cima, em Campos/RJ, e a lagoa de Grussaí, em São João da Barra/RJ.

22 A Resolução CONAMA N° 020/87 foi revogada pela Resolução CONAMA N° 357/2005, hoje em vigor.

## 6. METODOLOGIA

### 6.1. Estratégia Inicial de Desenvolvimento

Para a efetivação e aplicação do modelo computacional Mohid na caracterização ambiental da lagoa do Vigário, foi imprescindível gerar e coletar dados de campo que permitissem preencher as exigências do banco de dados do modelo e gerar os resultados desejados. Para isso, foi importante a realização de 2 (duas) campanhas de amostragem, ou trabalho de campo, na lagoa do Vigário, com esse fim.

De início, foram escolhidos parâmetros físicos e físico-químicos que mais se correlacionassem com a qualidade ambiental presente da lagoa do Vigário. E que esses parâmetros pudessem, após inferidos, demonstrar – após os devidos tratamentos e comparações com as normas ambientais legais – o seu real quadro ambiental. Então, foram selecionados os seguintes parâmetros: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total (NTP), temperatura, turbidez, condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico (pH) e cloro total.

Foram realizadas 2 (duas) campanhas ao campo para gerar e coletar amostras. A primeira campanha, realizada no dia 19 de Maio de 2010 teve o propósito de coletar amostras d'água em 6 (seis) pontos na lagoa, 3 (três) na porção sul e 3 (três) na porção norte. Estas amostras foram encaminhadas ao laboratório do CTS-A/FIRJAN com objetivo de determinar os valores de oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e nitrogênio (NTP). Também foram marcadas as coordenadas planas (UTM) dos pontos amostrais para georreferenciamento do modelo.

Na segunda campanha, realizada em 20 de Junho de 2010, o objetivo foi mensurar instantaneamente – com os equipamentos específicos – o oxigênio dissolvido (OD), a temperatura, a condutividade, o pH e o cloro total.

Foi obtido uma planta batimétrica da lagoa do Vigário, confeccionada na Escala 1:2.500, em Fevereiro de 2001, cedida pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura de Campos dos Goytacazes/RJ, objetivando integrá-la à plataforma computacional, em seu modo de aquisição de mapas GIS (*Geographical Information System*).

O desenvolvimento prático desta dissertação se deu em dois momentos: 1) o trabalho de campo, que foi realizado para mensurar os parâmetros físicos e físico-químicos da lagoa, a vazão do exutório e a determinação do balanço hídrico; 2) a pesquisa para obter dados

externos não disponíveis, e a manipulação e implementação do modelo computacional. Os equipamentos e materiais utilizados para esses trabalhos foram:

- i) uma (01) embarcação de alumínio motorizada do Corpo de Bombeiros;
- ii) vinte (20) frascos plásticos para coleta de amostras;
- iii) uma (01) máquina fotográfica Kodak;
- iv) um (01) pHmetro digital;
- v) um (01) turbidímetro digital;
- vi) um (01) condutivímetro digital;
- vii) um (01) GPS digital Garwin Etrex;
- viii) um pHmetro laboratorial;
- ix) uma carta batimétrica da lagoa do Vigário;
- x) um computador notebook de 2 GB RAM e 160 GB de HD;

No caso, o barco foi cedido pelo 5º GBM do Corpo de Bombeiros Militar para realização das campanhas de campo. O número de pessoas envolvidas nas 2 (duas) campanhas foram, num total, de 8 (oito) pessoas, sendo 2 (dois) civis e 6 (seis) militares do Corpo de Bombeiros Militar. Inclusive 2 (dois) veículos do IFF *campus* Campos-Centro que deram suporte aos trabalhos.

Faz-se necessário ressaltar o suporte dado pelo também técnico do laboratório de ciências ambientais/LCA da UENF<sup>23</sup>, e também aluno do PPEA-IFF<sup>24</sup>, que auxiliou nas coletas das amostras com objetivo de não contaminá-las.

## 6.2. Trabalho de Campo

Para aplicação de um modelo computacional que almeja caracterizar ambientalmente um corpo lacustre, tem-se como preponderante a obtenção das medidas de suas variáveis ambientais com as quais se pretende modelar, prever e inferir sobre os resultados. Nesse aspecto, o trabalho de campo se mostra inevitável e imprescindível à conclusão do que se deseja, independentemente dos dados e informações já existentes e disponíveis.

No tocante a essa dissertação, especificamente, o modelo computacional a qual se escolheu aplicar, inclusive as variáveis a serem modeladas, requereram uma medição sistematizada que implicou em 2 (duas) campanhas à lagoa do Vigário.

---

23 Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF;

24 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense.

### 6.2.1. Determinação da Vazão do Exutório para o Balanço Hídrico

Um dos passos importantes para a realização do balanço hídrico da lagoa do Vigário, além do trabalho de coletar as amostras e georreferenciar os pontos amostrais, foi a identificação e mensuração da vazão de saída da lagoa pelo canal extravasor. Este canal está a leste da lagoa, em sua porção sul, sendo minimamente coberto ao submergir pela avenida José Carlos Pereira Pinto, no bairro Calabouço. Após a avenida, o canal do Vigário reaparece e segue seu curso até a lagoa do Taquaruçu.

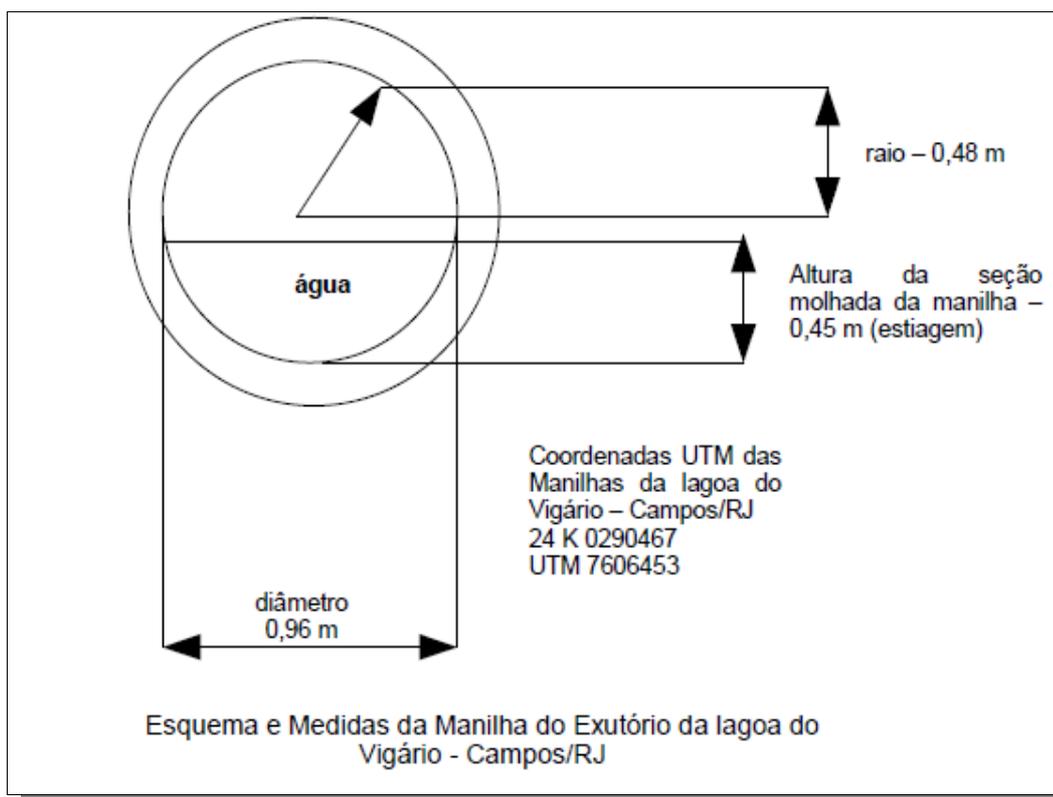
No dia 19 de Maio de 2010, em que se realizou o trabalho de campo, percebeu-se *in situ* que, após a embocadura do canal – imediatamente ao deixar a lagoa, antes de submergir a avenida José Carlos Pereira Pinto e reaparecer após ela – as águas descem de um vertedor e caem numa caixa de concreto com 2 (duas) manilhas de diâmetro igual a  $\phi = 0,96$  metros.

Foram procedidas as medições internas das 2 (duas) manilhas para fins de cálculo de vazão, com uma trena – sob supervisão do Prof. Dr. Vicente de Paulo Santos<sup>25</sup>, professor de gestão de recursos hídricos do PPEA/IFF – cujas medidas geraram o desenho esquemático das dimensões das manilhas do exutório.

Na Figura 10, vê-se o esquema da manilha.

---

<sup>25</sup> Vicente de Paulo Santos Oliveira é doutor em Engenharia Agrícola pelo Departamento de Engenharia Agrícola/Universidade Federal de Viçosa/MG, atua como professor da disciplina “Gestão de Recursos Hídricos” do Mestrado Profissional do Instituto Federal Fluminense/IFF;



**Figura 10** – Desenho esquemático da manilha na saída da lagoa do Vigário.  
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Paralelamente, procedeu-se também a mensuração da altura molhada da manilha do exutório, detectando-se 0,45 metros. No contexto, entende-se que essa altura molhada é mínima e se deve ao fato do período de estiagem, ou seja, de vazão mínima, devido a estação de chuvas escassas.

Aplicando-se as formulações matemáticas básicas pudemos determinar a área<sup>26</sup> da seção da manilha, que resultou em  $A_{\text{manilha}} = 0,725 \text{ m}^2$ . No caso, se a manilha-padrão tiver 2 (dois) metros de comprimento, o volume<sup>27</sup> máximo resultante da manilha será de  $V_{\text{manilha}} = 1,45 \text{ m}^3$ .

Depreende-se que o volume das 2 (duas) manilhas que compõem o exutório da lagoa do Vigário tem juntas um “volume de cheia”<sup>28</sup> igual a, aproximadamente,  $2,90 \text{ m}^3$ . Infere-se, então, que a vazão máxima da lagoa – por imposição das dimensões de ambas as manilhas, é de  $2,90 \text{ m}^3$ .

26 A área de uma seção circular é calculada pela equação  $A = \pi R^2$ ;

27 O volume de um cilindro é calculado pela equação  $V = \pi R^2 \cdot h$ ;

28 Chamamos de “volume de cheia” o volume máximo de águas que vertem da lagoa nos períodos de grande precipitação pluviométrica;

Independentemente de se ter determinado a vazão máxima do exutório da lagoa – isso para períodos de maior vazão –, percebeu-se que a altura molhada da manilha-padrão foi de 0,45 m. No caso, em períodos de mínima precipitação seria preciso determinar o volume mínimo d'água referente à essa altura molhada. Para fins de cálculo, considerou-se então a velocidade de fluxo de 0,035 m/s e seção molhada das manilhas de 0,64 m<sup>2</sup>. Assim, calculou-se o produto da velocidade da água pela área molhada das manilhas, ou seja, 0,035 m/s x 0,64 m<sup>2</sup>, no vertedor retangular do exutório, onde verificou-se uma vazão mínima de 0,0224 m<sup>3</sup>/s. Conseqüentemente, se calcular essa vazão para 30 dias, tem-se a capacidade máxima de vazão de 58,06 x 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/mês.

#### 6.2.2. Definição e Caracterização da Micro-bacia da lagoa do Vigário

A lagoa do Vigário, segundo Santos (2007), possui uma área de 0,34 km<sup>2</sup>. No caso, multiplicou-se pela profundidade média de 1,2 m e chegou-se a um volume de reservatório de aproximadamente 408.000 m<sup>3</sup> de água.

Especificamente, esse volume seria um “volume controlado”, isto é, para os períodos de normalidade em que as águas da lagoa estejam em sua leito natural e sem as implicações decorrentes das variações sazonais abruptas – cheias e secas – que, invariavelmente, alteram esse volume, para mais ou para menos.

Para este trabalho, foram utilizados 1 (uma) trena, câmera fotográfica e 1 (um) aparelho de GPS, modelo Garwin Etrex.

Um dado muito importante foi levantado junto a concessionária de saneamento do município – *Consórcio Águas dos Paraíba*, em entrevista com o gerente de operações, engenheiro Juscélio Azevedo de Sousa<sup>29</sup>. Este informou que atualmente 700 (setecentos) imóveis localizados na margem da lagoa do Vigário não apresentam condições de terem seus esgotos recolhidos devido estarem abaixo da cota de rua. Defende, inclusive, a remoção deste imóveis da faixa marginal de proteção (FMP)<sup>30</sup> da lagoa.

Além disso, foi informado que o volume diário de lançamento de efluentes sanitários desses 700 imóveis à lagoa do Vigário gira em torno de 357 m<sup>3</sup>/dia (4,13 litros/segundo) mais o lançamento de um matadouro e uma fábrica de doces, que juntos correspondem, mensalmente – para fins de balanço hídrico – a uma descarga orgânica de 28.512 m<sup>3</sup>/mês, ou aproximadamente 28,512 milhões de litros de esgotos lançados “*in natura*” diretamente na

29 Juscélio Azevedo de Souza é engenheiro e gerente de operações da empresa *Águas do Paraíba*, concessionária de saneamento no Município de Campos dos Goytacazes/RJ.

30 A faixa marginal de proteção – FMP, é uma faixa de 30 metros estabelecida por legislação estadual (RJ) visando a manutenção da mata ciliar de rios e lagos, evitando a erosão de taludes e a ocupação irregular;

lagoa. Entretanto, não foi possível precisar a quantidade de efluentes orgânicos que chegam à lagoa provenientes de galerias pluviais e do escoamento superficial.

Falou também que a Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) de Guarus, instalada no parque Vicente Dias, coleta e trata os esgotos dos bairros do entorno. Nesse caso, operando em 70% de sua capacidade, a ETE Jardim Carioca (Guarus) trata 2.420 m<sup>3</sup>/dia, sendo que sua capacidade de projeto é de 3.456 m<sup>3</sup>/dia.

Para fins de cálculo do balanço hídrico, precisou-se delimitar a área da micro-bacia da lagoa do Vigário, o que possibilitaria mensurar o escoamento, a evapotranspiração, a evaporação e infiltração. No caso, aprovou delimitar a micro-bacia da lagoa do Vigário utilizando-se do altímetro *on line* do Google Earth, que revela a altitude do terreno em relação ao mar e a Carta Altimétrica IBGE SAD 69, Folha Campos. Assim, foi possível construir e editar a Figura 11, que representa a micro-bacia.

Neste região havia muitas lagoas, que foram canalizadas e se transformaram em brejos, devido a expansão da malha urbana. Como o fluxo de escoamento da micro-bacia obedece a forma e geometria do terreno – talvez devido o talvegue estar posicionado dentro da lagoa, que deflui pelo canal do Vigário até a lagoa do Taquaruçu, foi imperativo, então, estabelecer os contornos da micro-bacia na forma da Figura 11. Contudo, vale lembrar que a área de entorno à micro-bacia possui sua drenagem ligada ao rio Paraíba do Sul. Só a área imediatamente próxima à lagoa do Vigário é drenada para ela.

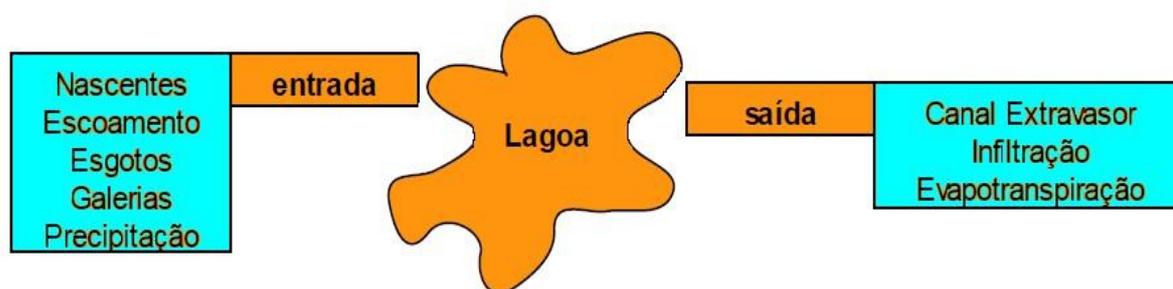
A linha branca que forma um polígono irregular, traçada no entorno da lagoa do Vigário, delimita sua micro-bacia. Neste caso, quando temos um terreno de relevo ondulado, como é o de formação barreira – ou tabuleiros – é difícil precisar a altimetria, senão por aproximações engendradas com o uso da ferramenta Google Earth<sup>31</sup>. Essa ferramenta apresenta um erro aproximado de 10% na determinação da altimetria, haja vista que sua base cartográfica é a folha IBGE<sup>32</sup> SAD 69, considerada desatualizada. Isto se deve ao fato de que, na década de 70, quando o IBGE realizou o trabalho de elaboração das cartas planialtimétricas, a cidade de Campos dos Goytacazes – principalmente o distrito de Guarus –, não era totalmente urbanizada e ocupada.

Além dessa delimitação, viu-se como importante considerar o coeficiente de capacidade ( $K_c$ ) da microbacia da lagoa do Vigário, segundo Oliveira & Brito (1998), que é um número adimensional que indica a tendência da microbacia à enchentes. Neste caso, esse coeficiente é dado pela expressão  $K_c = P/A^{1/2}$ .

31 O Google Earth é uma plataforma computacional geográfica, disponível na internet, em [www.google.com](http://www.google.com);

32 O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE é o órgão do governo brasileiro responsável pela pesquisa científica e divulgação de produtos de base geográfica e estatística;





**Figura 12** – Representação esquemática da lagoa do Vigário para um balanço hídrico.  
**Fonte:** Elaborada pelo próprio autor.

### 6.2.3. Medições dos Parâmetros Físicos e Físico-Químicos

Neste trabalho, vislumbrou-se aplicar um modelo computacional (MOHID) à caracterização ambiental da lagoa do Vigário e, para isso, necessário se fez pesquisar e produzir dados disponíveis e indisponíveis. Mas que caracterização ambiental seria-nos plausível para demonstrar o já conhecido estado crítico das águas da lagoa? Não bastasse a ocupação desordenada e imprópria das área de preservação permanente/APP<sup>33</sup> daquele ecossistema lacustre – já tratado noutra dissertação –, coube agora investigar a qualidade de suas águas e caracteriza-la através de um aplicativo computacional cujos produtos geram informações gráficas de simples entendimento.

Buscou-se caracterizar tão somente alguns aspectos da água associados a ocupação e práticas insustentáveis do entorno. Por isso, entendeu-se que seria bastante plausível investigar a qualidade da água da lagoa do Vigário, do ponto de vista ecológico e sanitário, balizando-nos nos parâmetros legais fixados na Resolução CONAMA N° 357/2005 e NT INEA N° 202/1986.

A melhor forma de se identificar e caracterizar o impacto das ocupações no entorno da lagoa do Vigário, seria a de investigar os parâmetros físicos e físico-químicos associados ao lançamento de efluentes orgânicos pontual e difusos, ou seja, aqueles que são imediatamente lançados por residências, comércios e indústrias à margem da lagoa e os que lançam indiretamente, via galerias pluviais e escoamento superficial de ruas. E para investigar e caracterizar essa qualidade ambiental através de um recurso computacional preditivo teríamos que optar pelos parâmetros físicos e físico-químicos já consagrados nos meios científicos e acadêmicos, ou seja, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), a demanda química de oxigênio (DQO), o nitrogênio total (NTP), a condutividade elétrica, a

<sup>33</sup> As áreas de Preservação Permanente/APP, constantes no art. 2º, do Código Florestal Brasileiro, foram criadas com objetivo de preservar a vegetação ciliar e, conseqüentemente, proteger os corpos hídricos a elas associadas dos impactos antrópicos hodiernos;

temperatura, o potencial hidrogeniônico (pH), o cloro total, a turbidez e o oxigênio dissolvido (OD).

Como afirmam Branco (1978), Branco e Rocha (1979) e Von Sperling (2005), o esgoto orgânico é a principal causa da aceleração da eutrofização dos lagos e de problemas sanitários. Ou seja, isso se traduz em consumo do oxigênio dissolvido, aumento da produção excessiva de biomassa, mau odor, morte de espécies endêmicas e mais suscetíveis e sem falar na própria estética da lagoa.

Para obter os dados físicos e físico-químicos da lagoa, foram empreendidas 2 (duas) campanhas à lagoa com o apoio do 5º grupamento de bombeiros militar/GBM que deram o suporte logístico de embarcação e guarda-vida. Além disso, foi preciso obter, na segunda campanha, os equipamentos que pudessem mensurar as variáveis OD, temperatura, pH, turbidez, condutividade e cloro total, cedidos pelo LabFoz da unidade de pesquisa agroambiental (UPEA) do IFF. Inclusive, também foi preciso o uso de GPS para georreferenciamento das estações<sup>34</sup> distribuídas nas 2 (duas) porções da lagoa.

Ilustra-se na Figura 13, a foto da equipe que atuou nas campanhas de amostragem na lagoa do Vigário.

---

<sup>34</sup> Estações são os pontos georreferenciados de onde foram coletadas as amostras d'água;



**Figura 13** – Foto da equipe de suporte ao trabalho de campo realizado na lagoa do Vigário.  
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na primeira campanha procedeu-se as coletas e marcações das coordenadas planas UTM (*Universal Transversor Mercator*) para enviar à análise do Centro de Tecnologia Ambiental da FIRJAN (CTA-FIRJAN), no Rio de Janeiro/RJ, donde foram coletadas 6 (seis) amostras. Esses pontos amostrais, para fins de identificação, foram denominados LV-1, LV-2, LV-3, LV-4, LV-5 e LV-6. Foram divididos 3 (três) pontos amostrais para cada porção da lagoa, visando obter uma distribuição equitativa e que refletisse resultados coerentes num meio não-conservativo.

A Tabela 7, apresenta a localização das estações de coleta na lagoa do Vigário em coordenadas planas (UTM).

Estações	Latitude	Longitude
LV1*	0260247 E	7593728 S
LV2*	0260407 E	7593693 S
LV3*	0260571 E	7593775 S
LV4*	0259944 E	7594583 S
LV5*	0260006 E	7594218 S
LV6*	0260149 E	7594022 S
LV7	0260564 E	7593714 S
LV8	0260493 E	7593678 S
LV9	0260335 E	7593605 S
LV10	0260234 E	7593507 S
LV11	0260415 E	7593562 S
LV12	0260620 E	7593547S
LV13	0260524 E	7593425 S
LV14	0259894 E	7594473 S
LV15	0259958 E	7594421 S
LV16	0259981 E	7594374 S
LV17	0259969 E	7594205 S
LV18	0260062 E	7594167 S
LV19	0260186 E	7594130 S
LV20	0260174 E	7593958 S

\* Pontos Amostrais cujos parâmetros foram simulados.

**Tabela 7:** Localização dos pontos amostrados na Lagoa do Vigário (Coordenadas Planas UTM).

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na segunda campanha, o objetivo foi de mensurar e registrar os parâmetros lacustres pH, oxigênio dissolvido – OD, temperatura, condutividade, turbidez e cloro total, além de registrar as coordenadas planas (UTM) dos pontos amostrais.

Especificamente, também foram coletadas amostras nessa segunda campanha para se conferir no laboratório da Unidade de Pesquisa Agroambiental – UPEA (IFF) as medidas feitas em campo. Entretanto, nessa segunda campanha optou-se por distribuir 20 (vinte) pontos amostrais (estações) ao longo da 2 (duas) porções da lagoa: 10 (dez) pontos na porção norte e 10 (dez) pontos na porção sul.

Essa estratégia de ampliar as estações para 20 (vinte) pontos foi adotada com intuito de gerar uma maior confiabilidade espaço-temporal ao modelo com a distribuição ao longo do espelho d'água. Assim, tem-se um grau de resolução e espacialização que nos permitissem observar as diferenças de valores dos parâmetros ao longo da lagoa, isto é, nas bordas, no meio e na proximidade dos lançamentos pontuais de carga orgânica.

Na Figura 14, apresenta-se uma sequência de fotos dos equipamentos utilizados na campanha para medição e amostragem dos parâmetros físicos e físico-químicos da lagoa do Vigário, em expedição realizada no dia 20/06/2010.



**Figura 14** – Composição de imagens dos equipamentos utilizados na medição instantânea de alguns parâmetros na lagoa do Vigário. 01) Oxímetro, 02) Condutivímetro, 03) pHmetro Digital, 04) pHmetro Laboratorial, 05) Turbidímetro, e 06) GPS.

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os parâmetros amostrados nas campanhas 1 e 2 de amostragens, importantes para a caracterização e análise desse trabalho estão dispostos na Tabela 8.

Estações	Região da Lagoa	OD (mg.L <sup>-1</sup> )	DBO (mg.L <sup>-1</sup> )	NTP (mg.L <sup>-1</sup> )	Temperatura (°C)	pH	Condutividade (µS.cm <sup>1</sup> )
LV1	NORTE	6,0	7,0	< ld	23,6	8,95	0,654
LV2		4,6	6,0	< ld	24,6	9,12	0,658
LV3		5,3	7,0	< ld	24,4	9,15	0,667
LV4	SUL	4,3	4,0	7,0	24,6	7,28	0,858
LV5		4,9	7,0	6,0	24,4	7,50	0,860
LV6		3,7	8,0	6,6	24,5	7,59	0,844
LV7	NORTE	5,6	NM	NM	23,7	8,92	0,669
LV8		4,9	NM	NM	24,8	9,24	0,662
LV9		4,3	NM	NM	24,0	9,20	0,665
LV10		4,4	NM	NM	25,0	9,16	0,668
LV11		5,0	NM	NM	24,0	9,09	0,666
LV12		5,6	NM	NM	23,4	9,17	0,667
LV13		5,0	NM	NM	23,8	9,23	0,663
LV14	SUL	3,8	NM	NM	25,6	7,36	0,862
LV15		4,5	NM	NM	24,4	7,48	0,870
LV16		4,0	NM	NM	23,8	7,22	0,866
LV17		4,2	NM	NM	23,5	7,30	0,865
LV18		4,2	NM	NM	24,2	7,60	0,858
LV19		5,2	NM	NM	24,3	7,66	0,857
LV20	4,1	NM	NM	24,0	7,62	0,848	

ld – limite de detecção do método (2 mg.L<sup>-1</sup>); NM – não mensurado

**Tabela 8:** Resultados obtidos para os parâmetros OD (mg.L<sup>-1</sup>), DBO (mg.L<sup>-1</sup>), NTP (mg.L<sup>-1</sup>), Temperatura (°C), pH e Condutividade (µS.cm<sup>1</sup>) na Lagoa do Vigário.

Na implementação da interface gráfica GIS (*Geographical Information System*) do Mohid (*Water Modelling System*) também foi preciso fazer o *background* (aquisição) da imagem da área de entorno e do corpo hídrico a ser discretizado. Para isso, foi obtido junto à Prefeitura Municipal de Campos dos Goytacazes uma carta batimétrica da lagoa do Vigário (Figura 15).



Sobre esta carta batimétrica foi construída toda a arquitetura dos arquivos de grade, pontos de batimetria, coordenadas planas UTM dos parâmetros amostrados e polígonos do domínio de discretização na interface gráfica GIS (*Geographical Information System*) da plataforma Mohid. Estes arquivos são importantes pois formam o domínio discreto usado no modelo hidrodinâmico na interface GUI (*Graphical User Interface*) do Mohid (*Water Modelling System*).

### 6.3. Balanço Hídrico da lagoa do Vigário

A importância do balanço hídrico para este trabalho, se deu pela necessidade de estabelecer os aportes de água para a lagoa e sua descarga pelo canal, à jusante da porção sul. Esse dado é importante porque o modelo se baseia em equações de balanço de massa e no método do volume finitos (MVF), onde, a solução numérica dada ao problema físico deve atender à conservação de massa no ambiente discretizável.

Primeiramente, foi necessário estabelecer a dimensão da bacia contribuinte da lagoa – que não existia. Para isso, utilizou-se uma carta topográfica IBGE SAD 69 no sentido de comparar as cotas altimétricas reais de referência com as cotas altimétricas do Google Earth. Assim, utilizou-se a altimetria do Google Earth *on line* para identificar os divisores de água da micro-bacia. Assim, delimitou-se a bacia conforme consta na Figura 11, em 2,12 km<sup>2</sup>.

O método adotado para calcular o balanço hídrico foi o da radiação, de Jansen & Haise –<sup>6</sup> expresso pela equação:

$$EVT = (0,025 \cdot T_{média} + 0,88) \cdot G / 59 \quad (\text{Eq. 16})$$

Esta equação determina a evapotranspiração (EVP) pelo produto da média mensal de incidência da radiação solar pela temperatura na área da bacia. Para isso, foi necessário buscar os dados meteorológicos disponíveis, fornecidos pela UPEA-IFF<sup>35</sup> e pelo campus da UFRRJ<sup>36</sup>. Já o método usado para calcular a evaporação da lagoa foi o de M. Coutagne, dado pela equação:

$$EVP = P - c \cdot P^2 \quad (\text{Eq. 17})$$

35 Os dados da estação meteorológica da Unidade de Pesquisa Agroambiental do Instituto Federal Fluminense – UPEA/IFF estão disponíveis no site <<http://www.upea.iff.edu.br/upea/labgeo.html>>.

36 Os dados Meteorológicos da estação agrometeorológico do *campus* Campos dos Goytacazes da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro/UFRRJ estão disponíveis em <[www.ufrrj.br](http://www.ufrrj.br)>.

Convencionou-se calcular o balanço hídrico do mês de Maio e Junho/2010, devido a estação de estio, ou seja, de baixa precipitação, que favorece a mínima variação de volume d'água na lagoa. Assim foram calculados a evapotranspiração, a evaporação, a precipitação, a infiltração, o escoamento superficial e a vazão do canal Vigário.

O volume médio calculado da lagoa do Vigário é de 408.000 m<sup>3</sup> de água, variando somente quando há grandes precipitações ou fortes secas. Mesmo assim, como a lagoa tem uma característica urbana peculiar, ou seja, está toda inserida na área urbana de Guarus, ela ainda serve como bacia de drenagem e acumulação de águas pluviais e efluentes irregulares, além de receber contribuição freática do rio Paraíba do Sul – com argumenta Soffiati (1998).

Nas Tabelas 09 e 10, pode-se observar que a variação de volume da lagoa do Vigário, não olvidando que suas contribuições freáticas – principalmente do rio Paraíba do Sul e nascentes –, os escoamentos superficiais e os lançamentos diretos e indiretos de efluente de toda espécie, são os principais responsáveis pela manutenção de um espelho d'água constante, com poucas variações de volume no período seco. Contudo, no período chuvoso, percebe-se maior variação desse volume, haja vista o grande fluxo d'água que percorre a bacia.

Tabela de Cálculo do "Balanço Hídrico" da Lagoa do Vigário Maio/2010	
Precipitação Mensal	0,0346 m/mês
Evapotranspiração Mensal (Método da Radiação)	0,00177 m/mês
Volume Precipitado (Bacia)	7,335 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês
Volume Precipitado (Lagoa) – VPL*	1,176 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês
Evapotranspiração (Bacia) – EVT**	0,375 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês
Evaporação (Lagoa) – EVP***	17,44 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês
Escoamento Superficial (90% da Precipitação Bacia) ES	6,60 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês
Infiltração (10% da Precipitação Bacia) – I	0,7335 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês
Lançamentos de Efluentes – LE	28,512 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês
Vazão do Exutório (Canal) – VE	24,88 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês
$\Delta V = VPL + ES + LE - I - EVT - EVP - VE$	- 8,2 x 10 <sup>3</sup> /mês****
Volume Final/Mês ( $V_{lagoa} + \Delta V$ ) = 408 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ***** - 8,2 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	399,8 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> *****

\* VPL é o volume precipitado diretamente no espelho d'água da lagoa do Vigário.  
 \*\* EVT calculada segundo método da radiação de Jensen & Haise (1973).  
 \*\*\* EVP calculada segundo método de M. Coutagne.  
 \*\*\*\* Balanço de volume d'água calculado na lagoa do Vigário no mês de Maio/2010.  
 \*\*\*\*\* Volume médio da lagoa do Vigário, considerando sua área de 0,34 km<sup>2</sup> x profundidade média de 1,2 m.  
 \*\*\*\*\* Volume d'água final na lagoa do Vigário no mês de Maio/2010.

**Tabela 09** – Cálculo do Balanço Hídrico da lagoa do Vigário no mês de Maio de 2010.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 09, elaborada a partir da interpolação de dados meteorológicos e a definição da área da micro-bacia da lagoa, representa a variação do volume d'água na lagoa do Vigário no mês de Maio/2010 – período (seco) em que foi realizada a primeira amostragem – e onde se pode observar os valores de decréscimo (em vermelho) e o volume final da lagoa.

No cálculo dos valores, adotou-se para o escoamento superficial a taxa de 90% da precipitação total na bacia; e para a infiltração, a taxa de 10% da precipitação. Esses valores foram adotados mediante a condição da bacia, ou seja, de estra inserida em área totalmente urbana e de solos impermeáveis.

Nota-se, na Tabela 09, que houve uma variação para menos no volume da lagoa; isso em razão, principalmente, da evaporação, da evapotranspiração e do escoamento superficial, ou seja, tudo o que precipita – quando precipita, escoo imediatamente pelo canal extravasor da lagoa, em direção à lagoa do Taquaruçu.

Na Tabela 10, que representa o balanço hídrico no mês de Junho/2010, vê-se que, em relação a Maio/2010, houve um decréscimo d'água. Contudo, em relação ao volume médio da lagoa, observa-se que o saldo foi negativo.

Tabela de Cálculo do “Balanço Hídrico” da Lagoa do Vigário Junho/2010	
Precipitação Mensal	0,0248 m/mês
Evapotranspiração Mensal (Método da Radiação)	0,001435 m/mês
Volume Precipitado (Bacia)	$5,257 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$
Volume Precipitado (Lagoa) – VPL*	$0,843 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$
Evapotranspiração (Bacia) – EVT**	$0,304 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$
Evaporação (Lagoa) - EVP***	$10,88 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$
Escoamento Superficial (90% da Precipitação Bacia) ES	$4,7313 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$
Infiltração (10% da Precipitação Bacia) – I	$0,5257 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$
Lançamentos de Efluentes – LE	$28,512 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$
Vazão do Exutório (Canal) – VE	$25,92 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$
$\Delta V = \text{VPL} + \text{ES} + \text{LE} - \text{I} - \text{EVT} - \text{EVP} - \text{VE}$	$- 2,49 \times 10^3/\text{mês}^{****}$
Volume Final/Mês ( $V_{\text{lagoa}/\text{Maio}} + \Delta V$ ) = $399,08 \times 10^3 \text{ m}^3^{*****} - 2,49 \times 10^3 \text{ m}^3$	$397,31 \times 10^3 \text{ m}^3^{*****}$

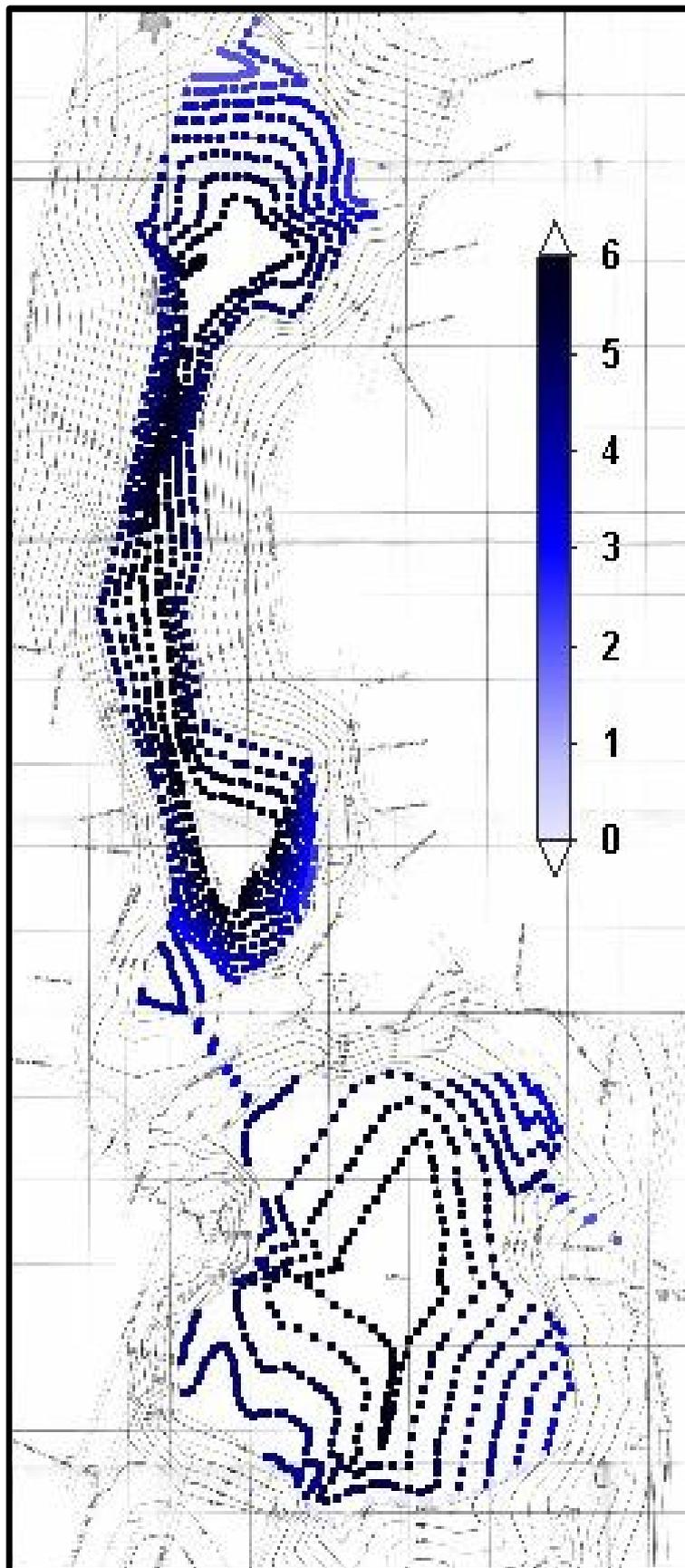
\* VPL é o volume precipitado diretamente no espelho d'água da lagoa do Vigário.  
 \*\* EVT calculada segundo método da radiação de Jensen & Haise (1973).  
 \*\*\* EVP calculada segundo método de M. Coutagne.  
 \*\*\*\* Balanço de volume d'água calculado na lagoa do Vigário no mês de Junho/2010.  
 \*\*\*\*\* Volume médio da lagoa do Vigário, considerando sua área de 0,34 km<sup>2</sup> x profundidade média de 1,2 m.  
 \*\*\*\*\* Volume d'água final na lagoa do Vigário no mês de Junho/2010.

**Tabela 10** – Cálculo do Balanço Hídrico da lagoa do Vigário no mês de Junho de 2010.  
 Fonte: Elaborado pelo autor.

## **6.4. Implementação do Modelo Computacional**

### 6.4.1. Método para implementação da Interface Gráfica GIS (*Geographical Information System*)

Para implementação da plataforma Mohid (*Water Modelling System*), na interface gráfica GIS (*Geographical Information System*), foi necessário buscar uma carta georreferenciada da área de interesse – a lagoa do Vigário, onde se pudesse construir a batimetria a partir na distribuição de pontos XYZ. Com a carta batimétrica da lagoa do Vigário, produzida em Fevereiro de 2001, Escala 1:2.500, cedida pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Campos dos Goytacazes/RJ, foi possível construir a batimetria digital do domínio discretizável, onde fosse possível gerar terrenos digitais (Figura 16).



**Figura 16** – Distribuição Espacial dos Pontos de Batimetria (Em metros) na Interface GIS do Mohid, para Construção do Terreno Digital.

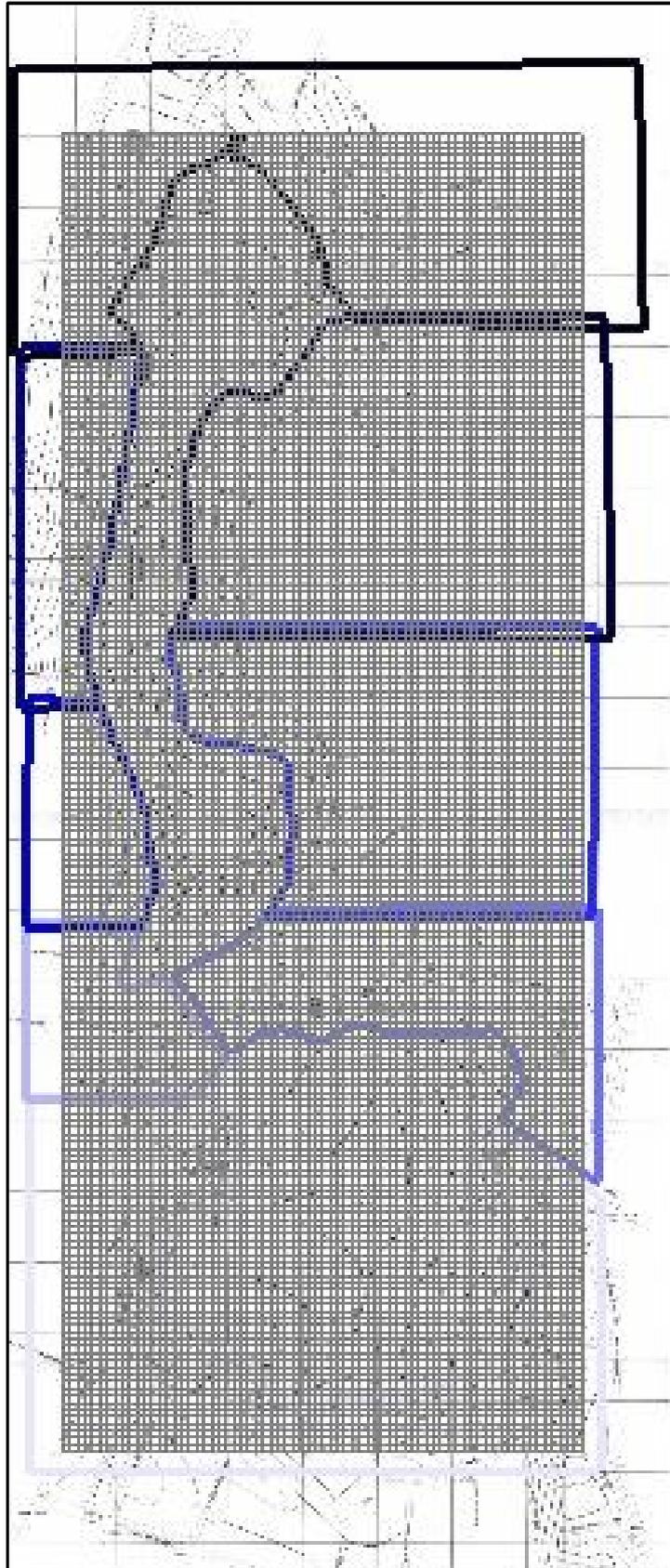
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Após, foram construídos polígonos definidores da interface água/terra e uma grade sobre a área discretizável do domínio, com 187 X 70 nós e passo 10 (tamanho das células de grade), conforme as exigências do Mohid.

A construção do domínio discretizável da interface GIS (*Geographical Information System*) atende o seguinte passo-a-passo: i) background da imagem; ii) construção dos polígonos terra-água; iii) alocação dos pontos isométricos da batimetria; iv) geração do terreno digital em arquivo DAT.

Também existe a possibilidade de alocar os pontos dos parâmetros físicos e físico-químicos mensurados em campo, entretanto, devido à exigência do Mohid não foi possível gerar terrenos digitais com boa resolução, uma vez que se exige uma quantidade maior de pontos para realizar sua triangulação.

A Figura 17 ilustra os polígonos definidores de terra-água e a grade gerada na interface gráfica GIS (*Geographical Information System*) do Mohid, sobre o *background* (aquisição) de imagem da carta batimétrica da lagoa do Vigário.



**Figura 17** – Domínio Discretizado com Grade Gerada, de 187 x 70, com passo 10 (tamanho de células), e polígonos na interface GIS do Mohid, Construída sobre Carta Batimétrica em Escala 1:2.500, SAD 69.

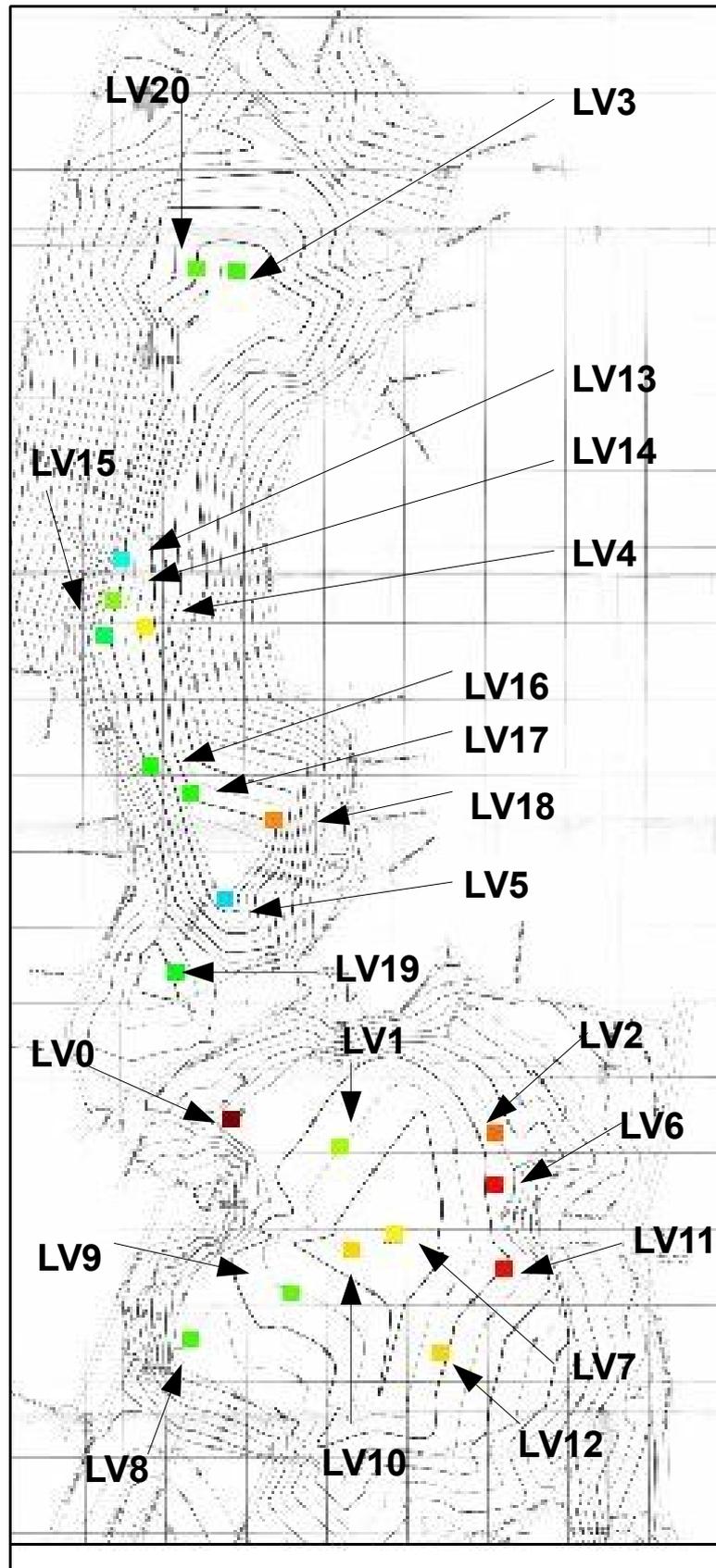
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Com essa alocação de pontos, a interface gráfica GIS (*Geographical Information System*) constrói um terreno digital da lagoa, gerando um arquivo DAT a ser utilizado na interface GUI (*Graphical User Interface*).

Além da grade, dos polígonos e da batimetria construídos na interface gráfica GIS (*Geographical Information System*) do Mohid, também foram plotados alguns pontos de amostragem dos parâmetros de campo, com intuito de gerar um mapa de distribuição espacial.

De forma a ilustrar a plotagem dos pontos amostrados e georreferenciados na lagoa do Vigário, construiu-se a Figura 18, com base na Tabela 8. Nela, vemos a distribuição dos pontos amostrados e a diversas tonalidades de cores, ou seja, a interface gráfica GIS (*Geographical Information System*) do Mohid atribui uma tonalidade de cor para cada valor quantificável.

Na Figura 18, vê-se os pontos amostrais do oxigênio, um dos parâmetros mais importantes nesse trabalho, haja vista sua imprescindível presença no corpo d'água e sua função de limitador de biodiversidade.



**Figura 18** – Distribuição Espacial das Estações de Amostragem de Parâmetros Mensurados (oxigênio, Tabela 8), gerado na Interface GIS da Plataforma Mohid, sobre a Carta Batimétrica da lagoa, Escala 1:2.500, SAD 69.

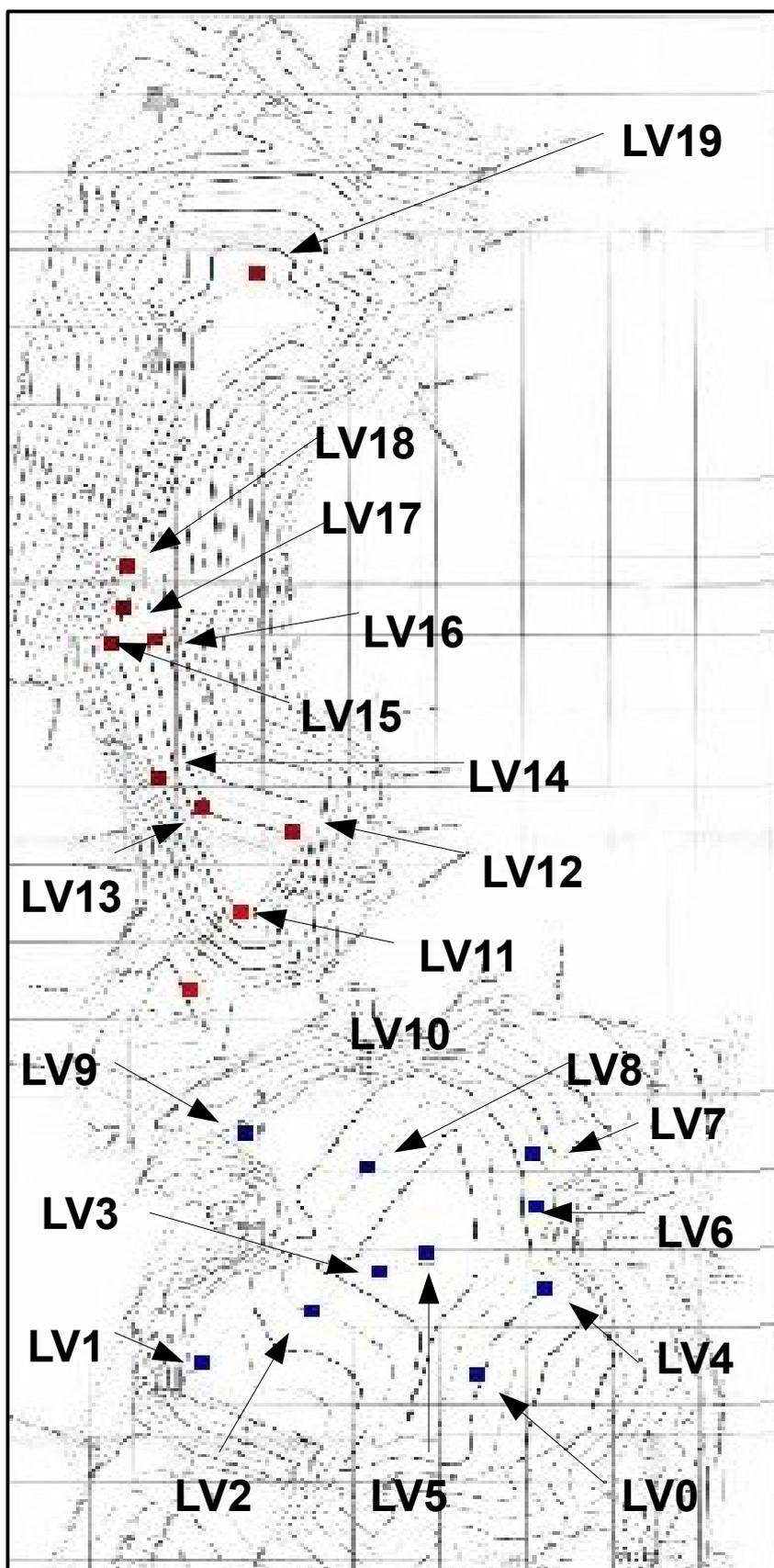
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Outro importante parâmetro mensurado foi a condutividade da lagoa. Esse é um importante parâmetro pois ele indica a presença de íons  $H^+$  e  $H^-$  na água, que são fortes condutores de eletricidade. Ou seja, nos processos de degradação de matéria orgânica, os decompositores agem nos compostos orgânicos a fim de reduzi-los a nutrientes e substâncias húmicas presentes na água da lagoa (SANTOS, 2007).

Como falado anteriormente, além da temperatura, o pH pode ter grande influência sobre a condutividade elétrica, por isso a intenção de mensurá-los. Num ecossistema aquático qualquer, a presença de “substâncias orgânicas” podem influenciar nos valores da *condutividade elétrica*, assim como também podem revelar informações sobre o “metabolismo” e fenômenos da bacia de drenagem. Daí, poder-se-ia dizer que a *condutividade elétrica* é uma variável importante pois ela possibilita conhecer a magnitude da concentração iônica, a produtividade primária (redução de valores) e a decomposição (elevação de valores), assim como detectar as fontes poluidoras e as diferenças geoquímicas.

A *condutividade elétrica* da água pode variar de acordo com a temperatura e a concentração total de substâncias ionizadas dissolvidas. Em águas cujos valores de pH se encontram em faixas extremas ( $pH > 9$  ou  $pH < 5$ ), os valores de condutividade são devidos às altas concentrações de poucos íons em solução; os mais frequentes, como dito anteriormente, são o  $H^+$  e  $OH^-$ .

Na Figura 19, vemos os pontos de amostragem da condutividade, plotadas na interface gráfica GIS (*Geographical Information System*) do Mohid.



**Figura 19** – Distribuição Espacial das Estações de Amostragem de Parâmetros Mensurados (condutividade, Tabela 8), gerado na Interface GIS da Plataforma Mohid, sobre a Carta Batimétrica da lagoa, Escala 1:2.500, SAD 69.

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Outros parâmetros lacustres como o pH, a temperatura, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e o nitrogênio total (NTP), a condutividade elétrica e o cloro total também foram mensurados, entretanto, devido a reduzida presença de pontos amostrados não foi possível construir, pela interface gráfica GIS (Geographical Information System), a distribuição espacial na lagoa.

#### 6.4.2. Construção da Simulação na Interface GUI (*Graphical User Interface*)

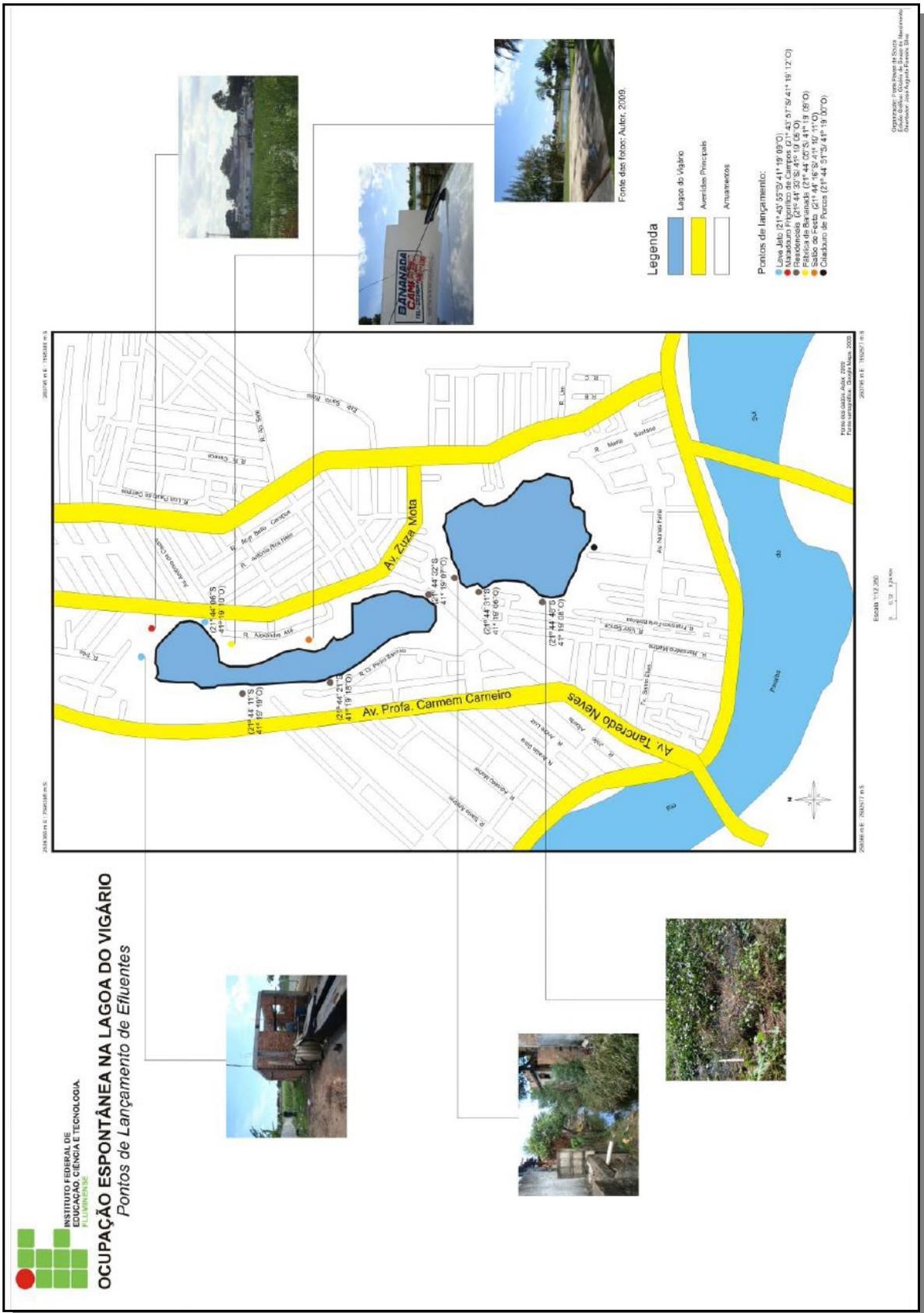
Na interface de simulação GUI (*Graphical User Interface*) do Mohid implementamos somente a simulação de 4 (quatro) parâmetros, devido a limitação de dados que não foram amostrados em campo, inclusive, pela relevância dos mesmos para sua análise qualitativa. Os parâmetros simulados, de maior relevância foram: i) o oxigênio dissolvido, ii) a demanda bioquímica de oxigênio, iii) o nitrogênio total (NTP), e, iv) a temperatura. Esses parâmetros são relevantes do ponto de vista da avaliação ambiental da lagoa no que tange à presença e os efeitos da matéria orgânica (esgotos) lançadas nas águas.

Na interface GUI (*Graphical User Interface*), após implementada toda a arquitetura gráfica exigida pela interface GIS (*Geographical Information System*), foi preciso identificar os principais pontos de lançamentos de efluentes e os cenários de simulação construídos.

Inicialmente, observou-se que os pontos de lançamentos são bastante difusos, concentrados tão somente em pontos onde existem maior número de residências na borda da lagoa, pequenas indústrias de transformação (doces e abatedouro bovinos com tratamento primário), escoamento de galerias pluviais, estábulos, pocilgas e demais lançamentos.

Apropriadamente, recorreu-se à constatação do que havia observado em seu trabalho de dissertação SOUZA (2010). Assim, corroborou-se com seus apontamentos haja vista que o mesmo perfil de lançamentos foi observado neste mesmo ano.

Nas simulações da interface GUI (*Graphical User Interface*), como as fontes de lançamento são muito difusas, optou-se por alocar esses lançamentos conforme o mapa da Figura 20, de Souza (2010).



**Figura 20** – Mapa com locações dos principais pontos de descarga e fontes poluidoras da lagoa do Vigário.  
**Fonte:** Elaborado e editado por SOUZA, 2010.

A partir da identificação dos principais pontos de lançamentos, ora corroborados por Souza (2010), foi elaborado 1 (um) cenário (hipótese) de emissão de efluentes, locando as descargas (lançamentos) próximas aos pontos amostrados (LV1, LV2, LV3, LV4, LV5 e LV6), com objetivo de comparar os dados amostrados e simulados, visando inclusive analisar a coerência de ambos e realizando as simulações com vazões e periodicidade diferentes. Para tal, foi necessário fixar condições iniciais (valores de fronteira), dispostas da seguinte forma:

- 20 °C, para o parâmetro Temperatura;
- Concentração inicial de 4 mg.L<sup>-1</sup>, para o parâmetro OD;
- Concentração inicial de 6 mg.L<sup>-1</sup>, para o parâmetro DBO;
- Concentração inicial de 2 mg. L<sup>-1</sup>, para o parâmetro NTP;
- Velocidade média de 1.1 m.s<sup>-1</sup> para ventos na direção SE-NO;
- Radiação solar do dia (19/05/2010), de 170 watts/m<sup>2</sup>;
- Cobertura de nuvens, em percentual, de 10%;
- Tempo de simulação: 14 meses (tempo de residência do efluente).

Na Tabela 11 apresenta-se os dados e características das descargas de efluentes nos pontos da lagoa do Vigário.

<b>Ponto de Descarga</b>	<b>Características da Descarga</b>	<b>Dados de Entrada do Efluente</b>
1	Descarga de Efluentes Típica de Matadouro de Bovinos	DBO= 30 mg/L, OD= 2 mg/L, NTP= 10 mg/L Q= 0,004 m <sup>3</sup> /s
2	Descarga de Efluentes Típica de Fábrica de Doces e Afins	DBO= 30 mg/L, OD= 2 mg/L, NTP= 10 mg/L Q= 0,003 m <sup>3</sup> /s
3	Descarga de Efluentes Típica de Residências e Comércio	DBO= 30 mg/L, OD= 2 mg/L, NTP= 10 mg/L Q= 0,002 m <sup>3</sup> /s
4	Descarga de Efluentes Típica de Residências, Comércio e Pocilgas	DBO= 30 mg/L, OD= 2 mg/L, NTP= 10 mg/L Q= 0,001 m <sup>3</sup> /s
5	Descarga de Efluentes Típica de Residências, Estábulo e Pocilgas	DBO= 30 mg/L, OD= 2 mg/L, NTP= 10 mg/L Q= 0,001 m <sup>3</sup> /s

**Tabela 11** – Tabela de Caracterização das Descargas e Volumes Simulados.

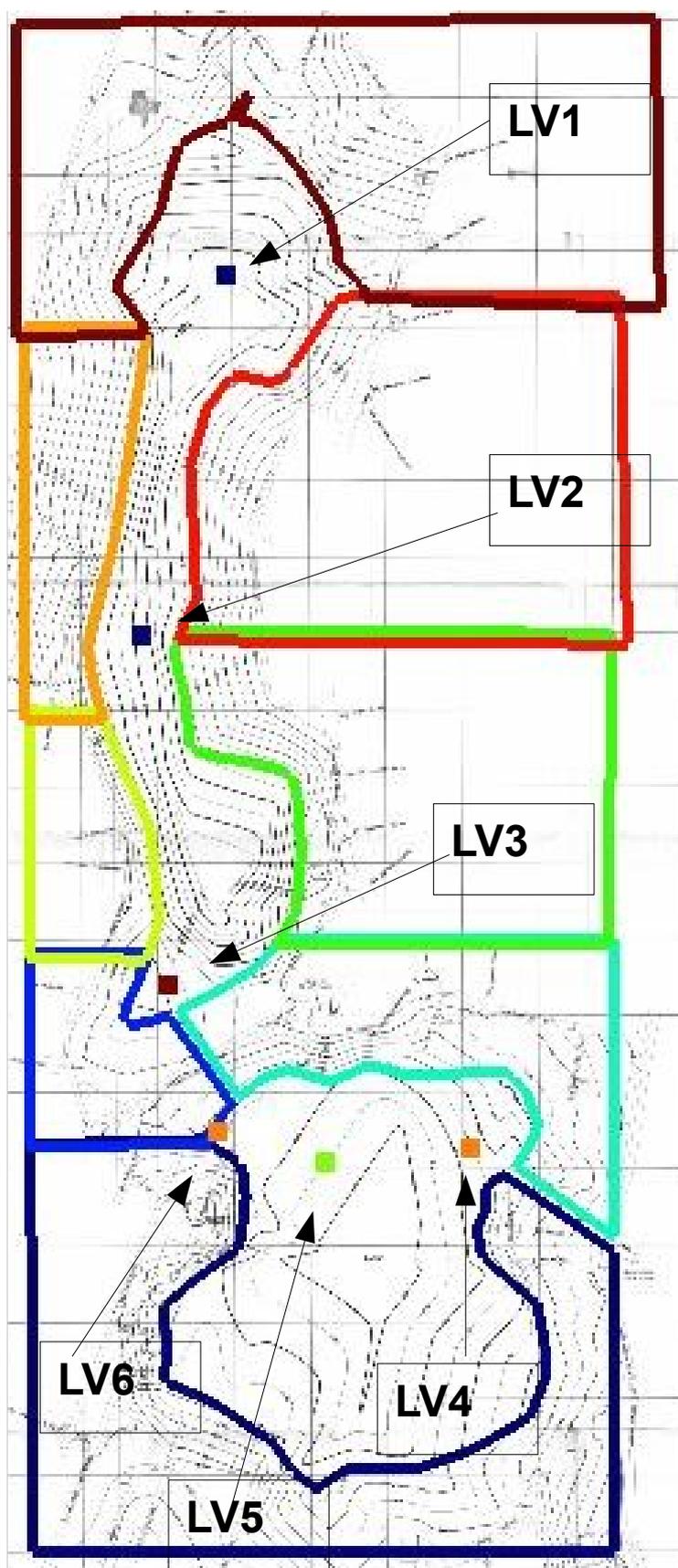
Importante frisar que o tempo de simulação escolhido é o tempo de residência do efluente na lagoa, dimensionado a partir do balanço hídrico calculado. Neste caso, o tempo de residência do efluente na lagoa é de 14 (quatorze) meses.

O Cenário ora aventado representa o lançamento de 5 (cinco) descargas com volume total de efluentes da ordem de 28.521 m<sup>3</sup>, que seria o volume total de todos os despejos na lagoa, com as condições iniciais conforme dispõe a Tabela 12 e com tempo de residência de 14 (quatorze) meses.

A descarga de efluente, da ordem de 28.521 m<sup>3</sup>/mês, distribuída por ponto de lançamento da seguinte forma: Ponto 1 (Matadouro) – 0,004 m<sup>3</sup>/s; Ponto 2 (Fábricas de Doces) – 0,003 m<sup>3</sup>/s; Ponto 3 (Residências e Comércio) – 0,002 m<sup>3</sup>/s; Ponto 4 (Residências, Comércio e Póvilgas) – 0,002 m<sup>3</sup>/s; e, Ponto 5 (Residências, Estábulo e Póvilgas) - 0,002 m<sup>3</sup>/s . A descarga de efluentes do cenário tem as seguintes características físico-químicas: demanda bioquímica de oxigênio (DBO) de 30 mg/L, oxigênio dissolvido (OD) de 2mg/L, Nitrogênio Total Particulado (NTP) de 10 mg/L e temperatura de 30 °C e representam o despejo de esgotos de abatedouros, póvilgas e águas residuárias nos 5 pontos.

O cenário (hipótese) de simulação previstos envolvem o lançamento de efluentes, considerando o funcionamento da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) do Jardim Carioca. Os lançamentos propostos foram locados em 5 (cinco) células (i,j), 3 (três) na porção norte e 2 (duas) na porção sul, onde se concentram as principais descargas e os pontos amostrados (LV1, LV2, LV3, LV4, LV5 e LV6) de forma a coincidir com os mesmos (Figura 21) e possibilitar a verificação do modelo.

O diagnóstico acerca da qualidade das águas da lagoa do Vigário foi traçado a partir dos dados levantados em campo para os seguintes parâmetros: OD, DBO, Nitrogênio total (NTP), Temperatura, pH e condutividade (Tabela 9). No entanto, os parâmetros simulados foram oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), Nitrogênio Total (NTP) e Temperatura, com base nos pontos amostrados (Figura 21).



**Figura 21:** Pontos Amostrados da lagoa do Vigário para DBO, OD, NTP e Temperatura, elaborado na Interface GIS do Mohid, sobre Carta Batimétrica, Escala 1:2.500, SAD 69.  
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na construção da interface GUI (*Graphical User Interface*) foi importante definir nos módulos (pré-processador) internos o tempo de simulação (Model), os efeitos da atmosfera – como os ventos (Atmosphere), a geometria (Geometry), as interfaces água-ar e água-sedimento (InterfaceWaterAir e WaterSediment), a hidrodinâmica (Hydrodynamic), a turbulência (Turbulence), as propriedades da água (WaterProperties), e as descargas (Discharges). Neste módulo de descargas é onde se informa o volume de lançamentos, em metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), em locais – células da grade discretizada – representadas no terreno digital da batimetria. É a arquitetura, assim por dizer, do módulo pré-processador da interface GUI (*Graphical User Interface*), que, com os *inputs* e o intervalo de tempo definido, resultará a simulação do parâmetro investigado.

Após a montagem do módulo pré-processador do simulador GUI (*Graphical User Interface*), com seus *inputs* necessários à simulação dos parâmetros informados, é acionado o simulador ('Launch Mohid'), que produzirá – no módulo pós-processador, os resultados da simulação.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1. Resultados das Amostragens de Campo

#### 7.1.1. Diagnóstico para a Qualidade das Águas na Lagoa do Vigário

As campanhas de amostragens realizadas foram estabelecidas de forma a abranger as fontes difusas de descargas orgânicas. Os pontos de amostragem foram escolhidos seguindo o fluxo natural da bacia, que deflui na direção Noroeste-Sudeste. Foram definidos como parâmetros para a simulação do sistema: oxigênio, temperatura, condutividade e pH, sendo alguns destes medidos no próprio local de amostragem, com auxílio de instrumentação apropriada, e outros (NTP e DBO) submetidos à análise laboratorial específica, realizadas no Centro de Tecnologia Ambiental (CTS-A) SENAI do sistema Firjan/RJ.

De acordo com Santos (2007) e Lannes (2004), inclusive de informações da Concessionária ‘Águas do Paraíba’ (em entrevista pessoal, 2010), ambas as porções da lagoa do Vigário (norte e sul) apresentam um aporte significativo de carga orgânica proveniente de efluentes domésticos, comerciais e de pequenas indústrias, águas pluviais com óleos e graxas, e uma grande quantidade de material lixiviado do solo que poluem a lagoa e torna sua qualidade ambiental bastante insatisfatória para usos múltiplos, principalmente os de contato humano (recreação).

As campanhas de amostragens permitiram observar que a porção norte da lagoa do Vigário possui águas mais turbidas em relação àquelas da porção sul. Na porção norte pode-se ainda observar, *in loco*, a presença de grande quantidade de vegetação flutuante e fixa (algas macrofíticas submersas e emersas – taboa [*Tiphia dominguensis*] e gigoga/aguapé [*Eichhornia crassipes*]); prova de que o processo de eutrofização é acelerado pela carga crescente de matéria orgânica para a região. Este fato é corroborado por Lannes (2002) e Santos (2007) quando asseveram que o metabolismo da lagoa é planctônico e oxidativo, e onde o processo de respiração sobressai. Nesse caso, há mineralização da matéria orgânica *in natura* e, portanto, um grande incremento de nutrientes nas águas, que favorece o crescimento de algas e o acúmulo de sedimentos de fundo.

Na Figura 22 observa-se fotografias obtidas na campanha de amostragem e que ilustram a presença desse tipo de vegetação na região de estudo.



**Figura 22:** Fotos representativas da vegetação flutuante presente na lagoa do Vigário, onde se vê espécies conhecidas por gigoga/aguapé e taboa.

**Fonte:** Elaborado e editado pelos autores.

#### 7.1.2. Considerações sobre o Balanço Hídrico na lagoa do Vigário

Quanto ao balanço hídrico da lagoa do Vigário, foi preciso determinar a micro-bacia de drenagem, conforme a Figura 11, e, daí, através do método adotado e das medições de campo, estabelecer os meses de interesse, que foram Maio e Junho/2010. Nesses meses foram realizadas as campanhas de amostragens, importantes para a análise de consistência/coerência das simulações engendradas na interface GUI (*Graphical User Interface*) do Mohid.

As Tabelas 09 e 10 mostram que existem uma variação de volume mensal na lagoa devido ao aporte d'água constante dos lançamentos de efluentes, das chuvas sazonais do período e das contribuições subterrâneas, haja vista a proximidade com o rio Paraíba do Sul.

Observa-se que houve saldo negativos no volume d'água da lagoa no mês de Maio/2010 da ordem de  $8,2 \times 10^3 \text{ m}^3$  de água – devido talvez a elevada evaporação do período. No mês de Junho/2010, houve um decréscimo menor, ou seja, da ordem de  $2,49 \times 10^3 \text{ m}^3$  –, implicando na maior residência de água na lagoa. Nisso, percebe-se que o volume d'água que chega à lagoa sofre uma perda substancial devido à evaporação e evapotranspiração, geralmente atribuídas aos fortes ventos e à radiação solar – cujos níveis de intensidade são característicos da região. Esse dado corrobora a medida de vazão do exutório feita no campo, conforme as considerações do item 6.3. desta dissertação.

Pode-se perceber que, para um escoamento de fluxo da ordem de  $24.880 \text{ m}^3$  em Maio/2010, considerando que esse volume deflui pelo exutório – manilhas do canal defluente – sendo considerada a velocidade de fluxo de  $0,015 \text{ m/s}$  (no vertedor retangular

do exutório). Calculou-se a vazão para Maio/2010 em aproximadamente  $24,88 \times 10^3 \text{ m}^3$ , ou  $24.880 \text{ m}^3$  no mês. Em Junho/2010 a vazão do exutório foi de  $25,92 \times 10^3 \text{ m}^3$ .

Infere-se que o resultado do balanço hídrico, ou seja, a vazão que defluiu nesse mês (perda do sistema lacustre) – da ordem de  $24,88 \times 10^3 \text{ m}^3$  em Maio/2010 e  $25,92 \times 10^3 \text{ m}^3$  em Junho/2010 – salvo as aproximações e incertezas do método, confere, em termos gerais, com a vazão do exutório no mês. Teoricamente, no mês subsequente, a velocidade do fluxo de vazão do canal do Vigário, tenha variado conforme o volume d'água precipitado na bacia.

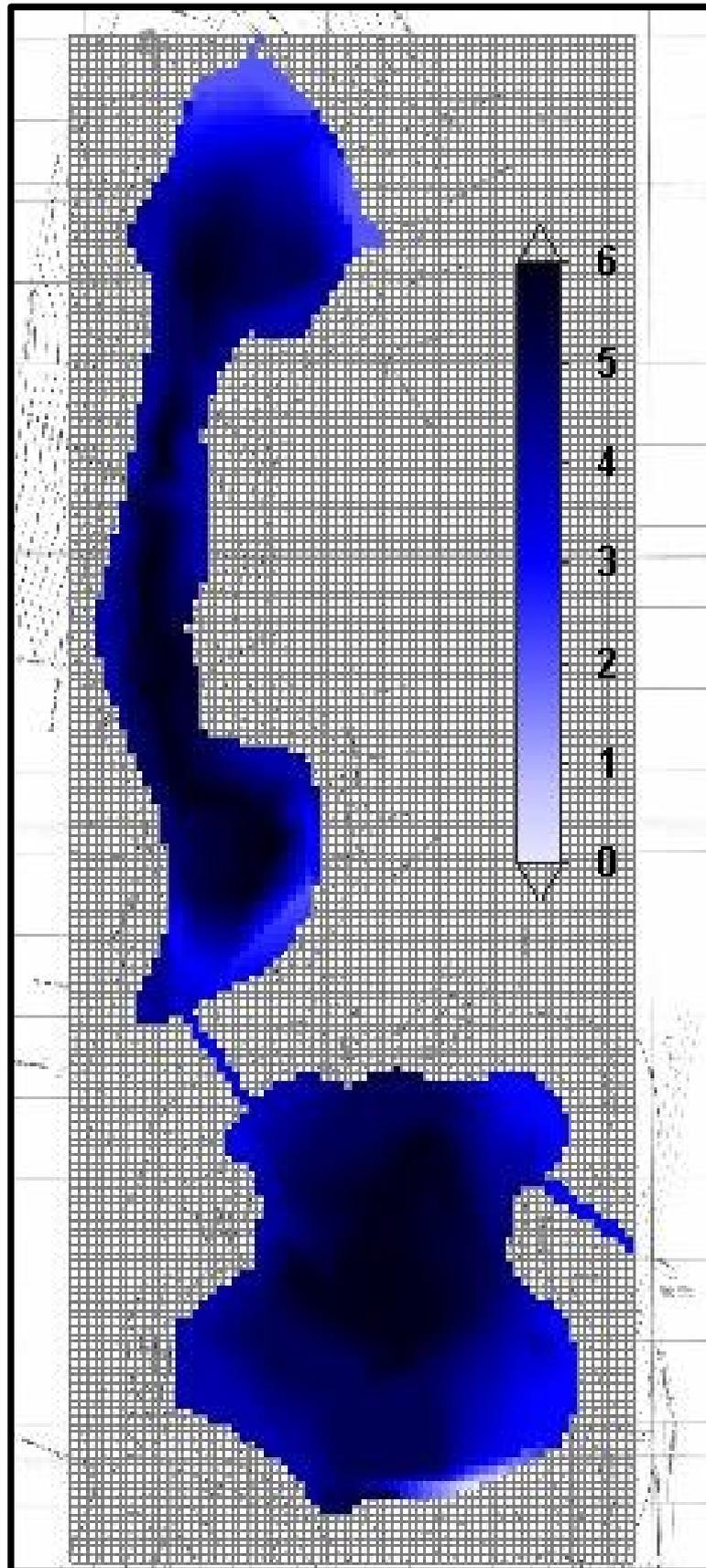
O volume médio da lagoa é  $408.000 \text{ m}^3$  d'água – excetuando as chuvas sazonais do período seco – a capacidade limite da lagoa no período de cheias, ou seja, de máxima precipitação, podendo até mesmo superar este limite. Vê-se que não só na lagoa do Vigário, mas em todo corpo hídrico superficial, existe uma variação singular de volume d'água devido à pequena ou alta entrada d'água. No caso em estudo, observa-se que o volume d'água da lagoa do Vigário sofreu um pequeno decréscimo de aporte nos meses de Maio/2010 e Junho/2010.

## **7.2. Análise dos Parâmetros Amostrados Através da Interface Gráfica GIS (*Geographical Information System*)**

Os seguintes parâmetros ambientais foram analisados para a avaliação da qualidade das águas na lagoa do Vigário neste estudo: Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Total (NTP), Temperatura, pH e Condutividade, sendo que alguns destes foram medidos no próprio local de amostragem, com auxílio de instrumentação apropriada, e outros submetidos à análise laboratorial específica, realizadas no Centro de Tecnologia Ambiental (CTS-A) SENAI do sistema Firjan/RJ. O acompanhamento da simulação de alguns desses parâmetros foi realizado com auxílio das interfaces gráficas da plataforma computacional Mohid.

Na interface gráfica GIS (*Geographical Information System*) foi realizado todo o embasamento da batimetria da região de estudo, necessária para a alimentação do modelo hidrodinâmico. A discretização do domínio utilizou uma malha de  $187 \times 70$  nós, com tamanho de célula 10 cm.

Para gerar o terreno digital batimétrico (Figura 23) foi necessário dispor das profundidades da lagoa do Vigário (4 e 8 metros) em relação a um referencial, ou uma profundidade arbitrária. Adotou-se a profundidade arbitrária de 10 metros e, dessa forma, os valores gerados na planta batimétrica (2 a 6 metros) são relativos a esse referencial.



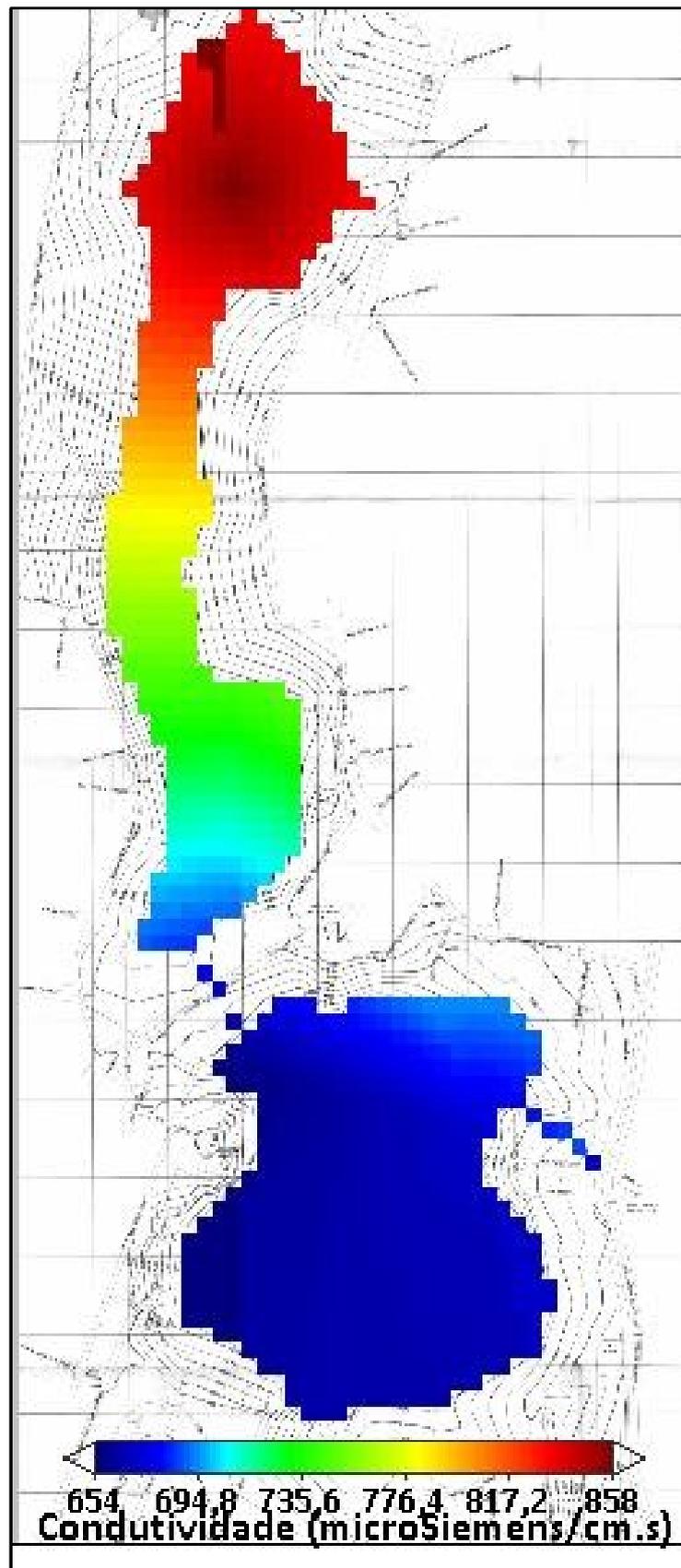
**Figura 23** – Terreno Digital da Batimetria (Em metros) da lagoa do Vigário, gerado na Interface GIS da Plataforma Mohid (Versão 2002), em 31/10/2010.

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A simulação do cenário (hipótese) de descarga na interface GUI (*Graphical User Interface*) tornou-se possível somente após gerado o terreno digital da batimetria na interface GIS (*Geographical Information System*). Isto se deve ao fato de que o domínio de discretização no qual o modelo computacional aplica sua formulação numérica (MVF) é utilizado na interpolação dos pontos amostrados.

Além do mapa digital batimétrico, também foram gerados, na interface GIS, o mapa de dispersão de um dos parâmetros ambientais estudados: a condutividade. Os mapas de dispersão podem ser utilizados como uma ferramenta adicional, juntamente com as simulações geradas na interface GUI (*Graphical User Interface*) para diferentes descargas d'água na região, na abordagem sobre a qualidade das águas da lagoa.

Na Figura 24 ilustra-se a distribuição espacial da condutividade na lagoa do Vigário, sendo este uma ferramenta importante para avaliar a presença de sais e o forte processo de mineralização que ocorre na lagoa, como assevera Lannes (2004). Na porção norte da lagoa observa-se valores elevados de condutividade, provavelmente devido a oxidação de matéria orgânica que é lançada e maior quantidade naquela porção.



**Figura 24** – Distribuição Espacial da Condutividade na lagoa do Vigário, gerado na interface GIS da plataforma Mohid (versão 2002), em 31/10/2010.  
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber, de acordo com os dados amostrados em campo (Tabela 8), que os parâmetros Temperatura e oxigênio dissolvido (OD) não apresentaram variabilidade significativa para ambas as partes da lagoa. Além disso, averigua-se que os teores de oxigênio dissolvido (OD) na porção norte são ligeiramente menores, possivelmente estes estejam associados aos processos oxidativos de descargas de efluentes orgânicos. Os resultados referentes à condutividade, com valores mais acentuados na porção norte, também tendem a confirmar essa hipótese. A presença de concentração de sais hidrossolúveis na água está relacionada a altos valores de condutividade, principalmente em período seco.

Com relação ao pH, existe uma diferenciação clara entre as porções norte e sul, sendo que esta última apresenta valores mais altos. Esta característica pode estar associada ainda aos teores obtidos de oxigênio dissolvido (OD) e condutividade.

No contexto legal, mais especificamente relacionado à norma da Resolução CONAMA Nº 357/2005, averigua-se que a lagoa do Vigário apresenta valores de nitrogênio total (NTP), na porção norte, inferior a norma ( $1,27 \text{ mg/L} < x < 2,0 \text{ mg/L}$ , parágrafo 3º, art. 10), enquanto os valores para DBO se extrapolam (até 3 mg/L).

Os resultados obtidos para demanda bioquímica de oxigênio (DBO), da ordem de 7 mg/L, são considerados elevados para um corpo hídrico. Tais valores refletem um elevado consumo de oxigênio na degradação da matéria orgânica proveniente do lançamento de efluentes na lagoa. No caso do oxigênio dissolvido (OD) a norma fixa o valor em não inferior a 6,0 mg/L, contudo, as amostragens revelaram valores bem inferiores (da ordem de 3,5 a 4,5 mg/L).

Assim, no âmbito da legislação ambiental, poder-se-ia inferir sobre um enquadramento para este corpo lacustre, no que caberia a aplicação da Classe 3, haja vista a menor exigência de balneabilidade e dessedentação animal, excluídos os usos humanos de contato.

Lannes (2002) assevera em seu trabalho que a população do entorno da lagoa do Vigário, inclusive alguns pescadores amadores, não devem ter contato com suas águas, devido à sua poluição.

### 7.3. Resultados da Simulação Através da Interface GUI (*Graphical User Interface*)

Conforme apregoado anteriormente, a análise de consistência/coerência do Mohid neste domínio foi feita com os dados amostrados em campo. Para o cenário, convencionou-se dispor as figuras das simulações em blocos, ou conjuntos de 4 (quatro) figuras, de parâmetros por períodos de simulação, facilitando a visualização e comparação das figuras.

Foi contemplada a construção de um cenário sobre a variabilidade espaço-temporal dos seguintes parâmetros: Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Total Particulado (NTP) e Temperatura, baseado nos pontos amostrados da Figura 21. Os parâmetros selecionados para a aplicação das simulações possuem sua importância fundamentada relativos ao metabolismo, respiração e eutrofização.

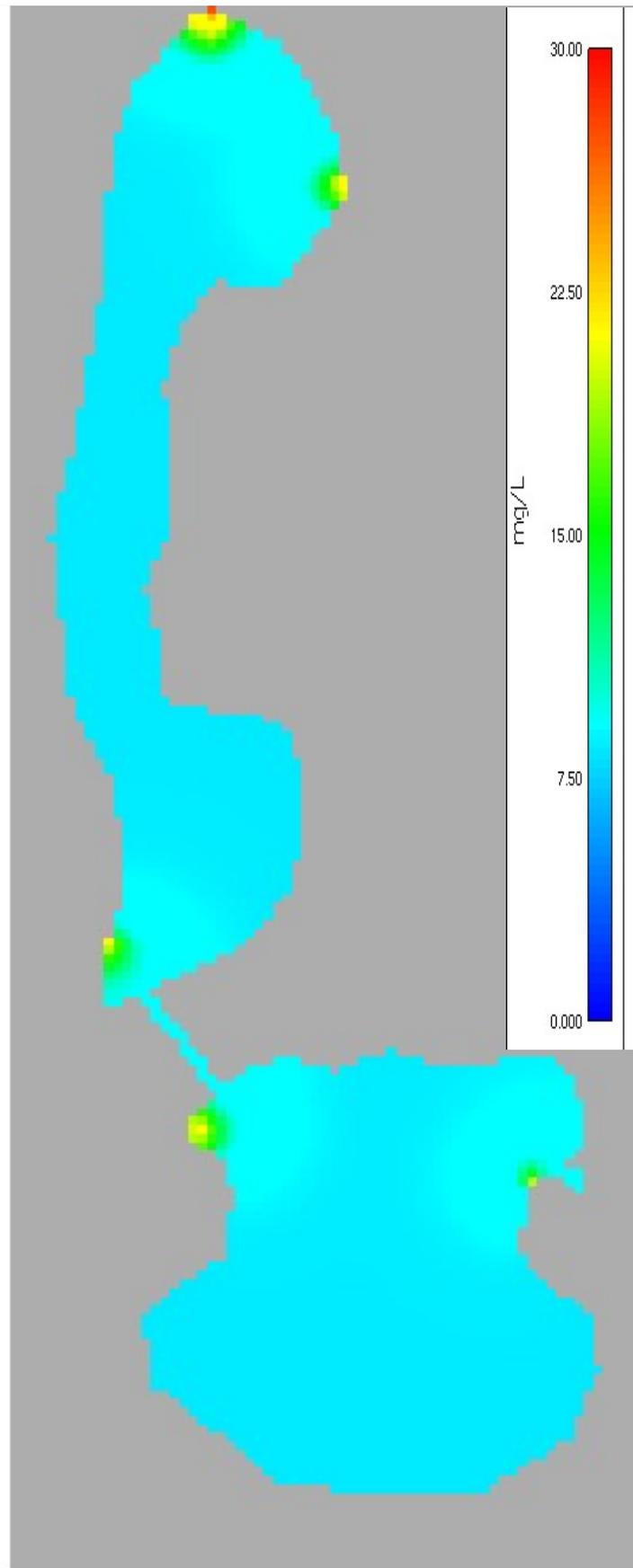
Os resultados no cenário proposto permitem dizer que o simulador retorna com valores para os parâmetros analisados, bem próximos aos *inputs* do pré-processador. Contudo, isso dependerá da série temporal processada e do volume da descarga. Aliás, não se pode concluir definitivamente acerca desses resultados, haja vista a necessidade do incremento de outras ferramentas da plataforma Mohid, da elaboração de um balanço hídrico anual, de uma análise de consistência/coerência baseada em amostragens consecutivas e, conseqüentemente, na sua validação.

Na simulação foram padronizados valores de referência (*'default\_value'*) para a lagoa: a temperatura (20 °C), a DBO (8 mg/L), o OD (4mg/L) e o Nitrogênio (7 mg/L).

Foi imposto ao modelo um caráter mais dispersivo, elevando seus coeficientes de dispersão de modo a visualizar o encontro das plumas de descarga com os pontos amostrados da Figura 21, e a fim de conferir – ou não – a análise de consistência/coerência do mesmo.

#### 7.3.1. Cenário de Modelagem

Neste caso, para o Cenário, observa-se na Figura 25, 26, 27 e 28, o comportamento final dos parâmetros DBO, OD, Nitrogênio e temperatura, simulados no tempo de residência de 14 meses.



**Figura 25:** Simulação da Descarga de Efluentes com Predominância do Comportamento da DBO.  
**Fonte:** Elaborado pelo Autor.

Na Figura 25, vê-se que a DBO nos primeiros instantes de lançamento concentra-se entre 30 mg/L e 20 mg/L; contudo, o efluente atinge os pontos amostrados LV1, LV3, LV4 e LV6, com concentrações entre 7,0 mg/L e 9,0 mg/L (Figura 25). No caso, a concentração amostrada nos pontos estão entre 8,0 mg/L e 9,0 mg/L.

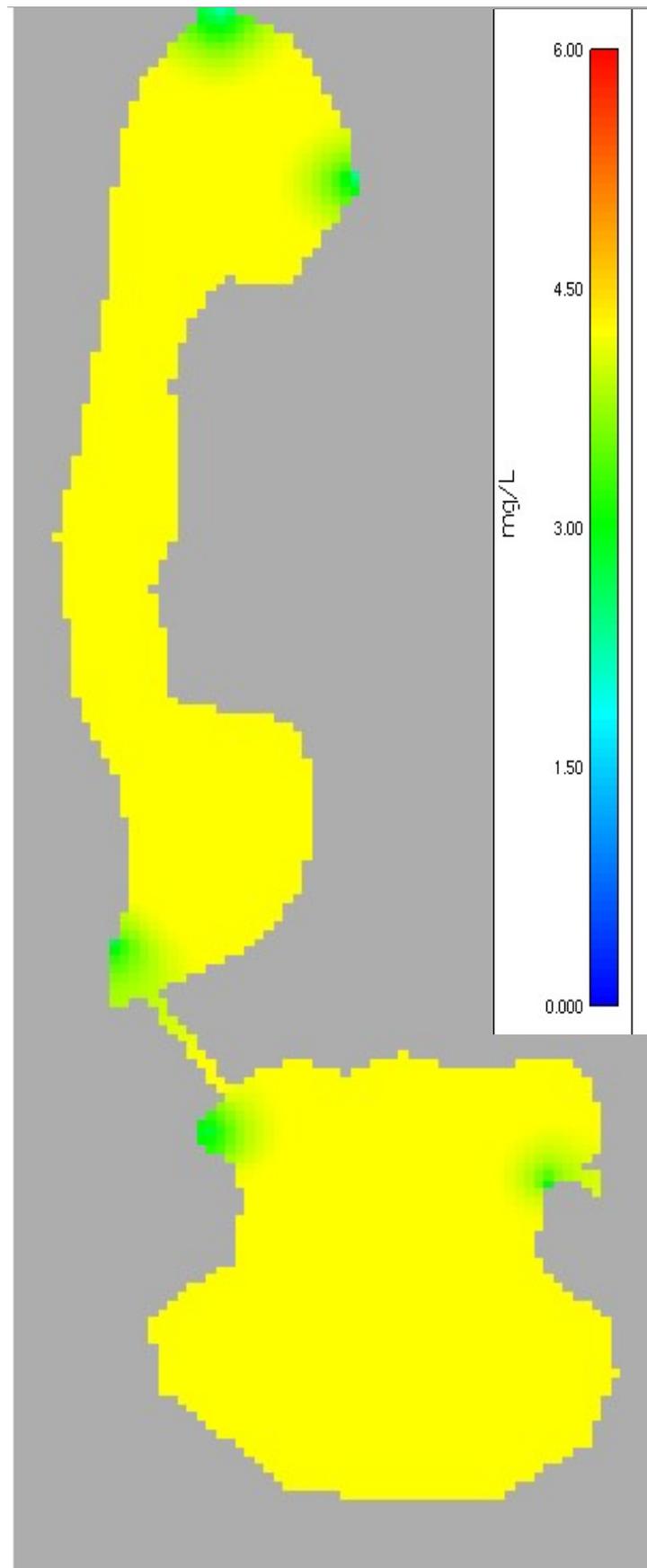
O oxigênio dissolvido (OD), lançado com 2,0 mg/L, após a simulação, ficou entre 3,5 mg/L e 4,5, mg/L (Figura 26), ao passo que na amostragem obteve-se concentrações entre 4,0 mg/L e 6,0 mg/L.

O Nitrogênio total lançado na descarga foi de 10 mg/L, mas na amostragem a concentração para a porção norte ficou abaixo de 2,0 mg/L, e acima de 6,0 mg/L na porção sul. Na simulação a concentração se estabeleceu entre 2,5 mg/L e 3,0 mg/L (Figura 27), no caso, dentro da média, salvo os ajustes futuros do modelo.

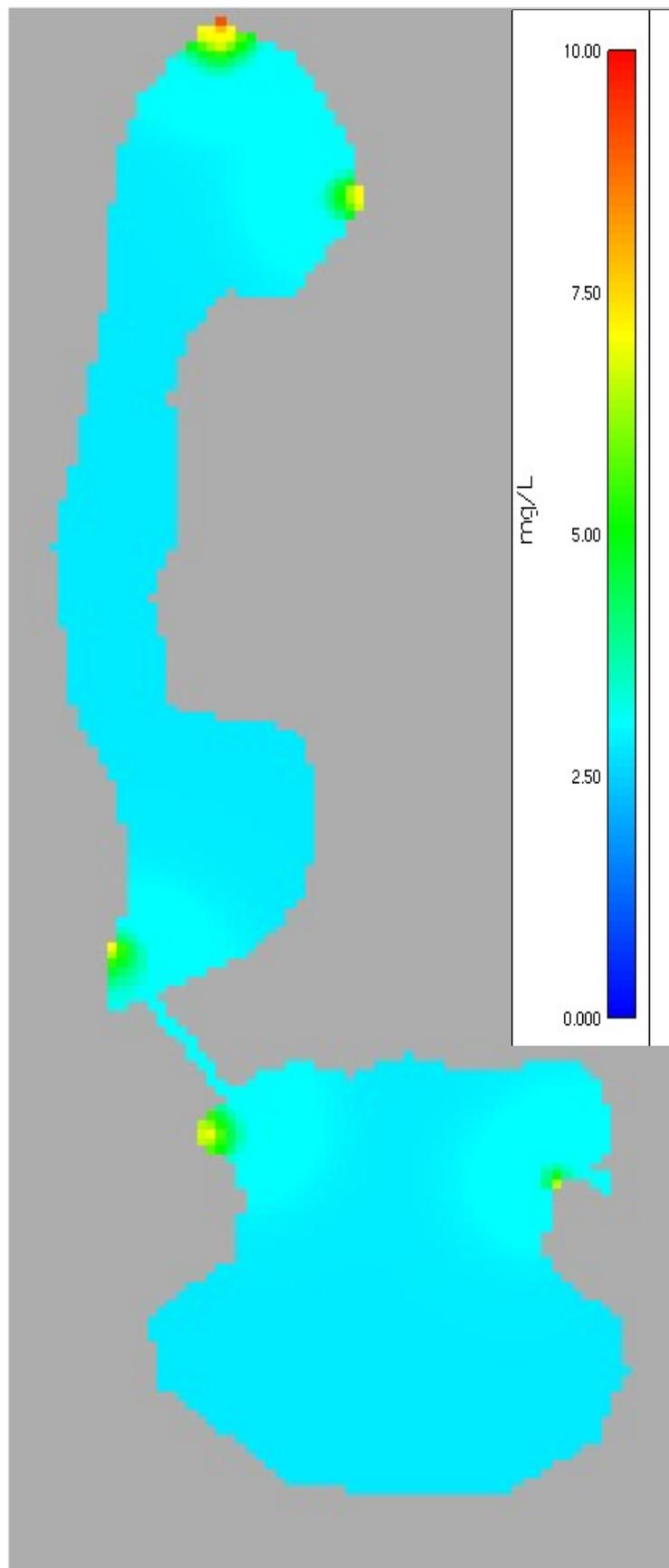
Para a temperatura, a descarga foi de 30 °C, com retorno de simulação entre 21° C e 23 °C (Figura 28), próximo inclusive às condições iniciais da lagoa.

Atente-se para o fato de que as simulações ilustram as altas concentrações dos parâmetros nos instantes iniciais das descargas, dispersando e variando à medida em que o tempo decorre e há a sinergia de outros fatores intervenientes.

Para os parâmetros de DBO e OD, foram expandidas as imagens de suas figuras, objetivando uma melhor visualização do comportamento desses parâmetros, haja vista sua importância no contexto dos processos metabólicos e como agente limitador de biodiversidade.

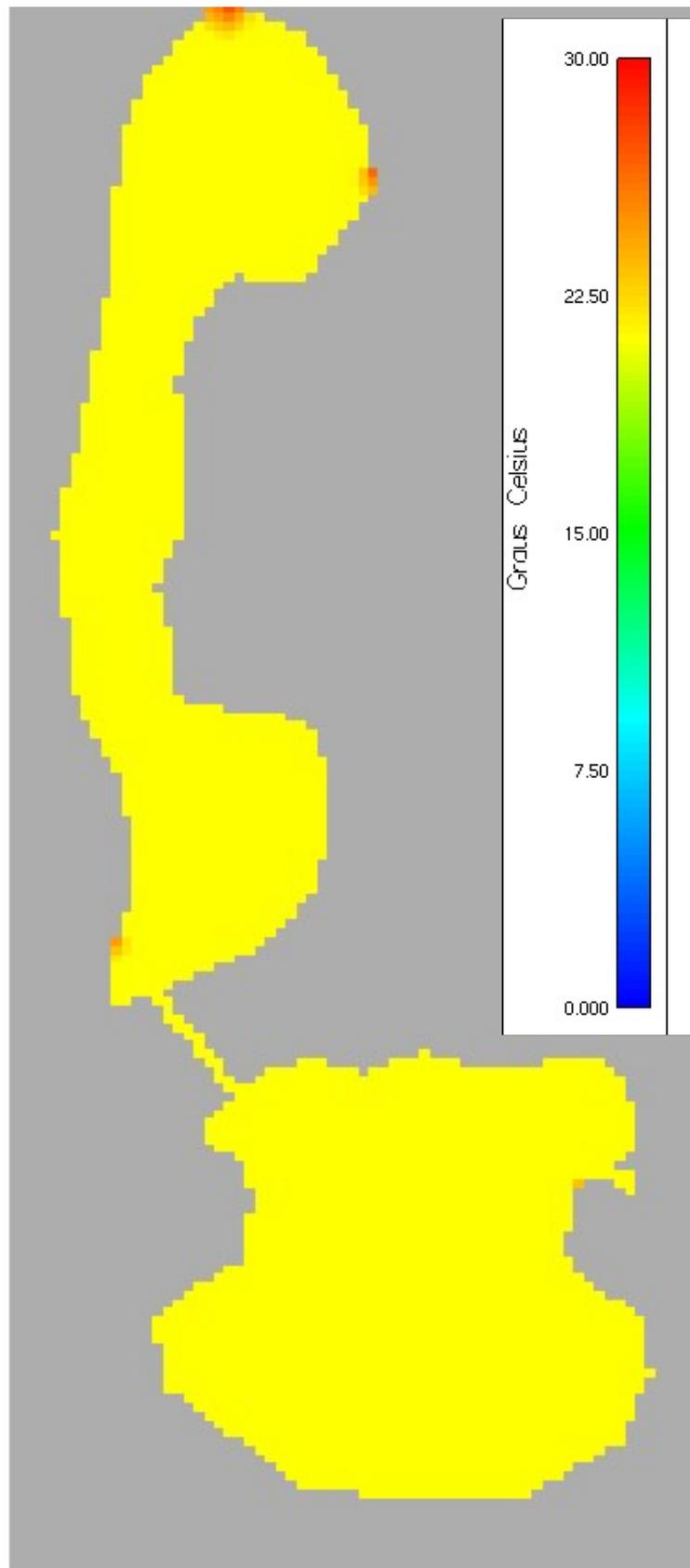


**Figura 26:** Simulação da Descarga de Efluentes com Predominância do Comportamento do OD.  
**Fonte:** Elaborado pelo Autor.



**Figura 27:** Simulação da Descarga de Efluentes com Predominância do Comportamento do Nitrogênio Total.

**Fonte:** Elaborado pelo Autor.



**Figura 28:** Simulação da Descarga de Efluentes com Predominância do Comportamento da Temperatura.

**Fonte:** Elaborado pelo Autor.

Conforme anunciado anteriormente, apresenta-se a Tabela 12, a fim de se contrastar os resultados amostrados com os simulados.

Parâmetros	Resultados Experimentais		Resultados da Simulação Após 7 meses
<b>OD</b> (mg.L <sup>-1</sup> )	P. Norte	5,07 ± 0,55	3,5 < x < 4,5
	P. Sul	4,29 ± 0,47	
<b>DBO</b> (mg.L <sup>-1</sup> )	P. Norte	6,67 ± 0,58	8,0 < x < 9,0
	P. Sul	6,03 ± 2,08	
<b>NTP</b> (mg.L <sup>-1</sup> )	P. Norte	(< ld)	2,5 < x < 3,0
	P. Sul	6,53 ± 3,57	
<b>Temperatura</b> (°C)	P. Norte	24,13 ± 0,54	21,0 < x < 23,0
	P. Sul	24,33 ± 0,56	
<b>pH*</b>	P. Norte	9,12 ± 0,11	NS
	P. Sul	7,46 ± 0,16	
<b>Condutividade*</b> (µS.cm <sup>-1</sup> )	P. Norte	0,66 ± 0,01	NS
	P. Sul	0,86 ± 0,01	

ld – limite de detecção ; NS – não simulado;

\* Parâmetros não simulados; \*\* Valores abaixo do limite de detecção do método.

**Tabela 12** – Tabela de Comparação de Dados Amostrados e Simulados (análise de consistência/coerência).

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Apoiando-se nas Tabelas 8 e 12, poder-se-ia avaliar que, no caso da simulação dos parâmetros os resultados ora simulados mostraram-se bem coerentes à realidade, mesmo não havendo – neste caso, a inclusão dos coeficientes de decaimento. Vê-se que em todos os parâmetros simuláveis, estes estabelecem-se dentro da margem de desvio padrão dos parâmetros amostrados, tanto na porção sul, quanto na norte, salvo o nitrogênio total, que porção norte ficou abaixo de 2,0 mg/L, ou seja, menor que o limite de detecção do método laboratorial.

Ressaltas-se que no caso do Nitrogênio, como o valor de detecção do método em laboratório está abaixo de 2,0 mg/L, condicionou-se considerar esse valor como máximo nos pontos amostrais abaixo desse limite em todos os casos. Para os demais parâmetros, considerou-se as concentrações máximas simuladas para efeito de comparação de seus comportamentos. Portanto, nota-se que a DBO, mesmo dentro da margem de erro, ficou pouco acima de média amostrada (6,7 mg/L), ou seja, 9,0 mg/L.

Diferente da DBO, os demais parâmetros – OD, Temperatura e Nitrogênio – tiveram bom comportamento e ficaram dentro da margem de erro padrão, possibilitando uma boa análise de consistência/coerência.

No cenário os resultados obtidos parecem ilustrar que a atividade microbiológica e a degradação da matéria orgânica são elevados, ocorrendo em todo momento e em toda a extensão da lagoa. Os parâmetros simulados ilustram um elevado consumo de OD e maior DBO, uma vez que, para oxidar a matéria orgânica, os microorganismos (plâncton) demandam oxigênio dissolvido nesse processo, inclusive no processo de respiração aeróbia. O Nitrogênio, um dos nutrientes responsáveis pelo processo de eutrofização da lagoa, presente na matéria orgânica em compostos de bases nitrogenadas variou singularmente na simulação, mas teve suas maiores concentrações (6,0 a 7,0 mg/L amostrada e 3,0 a 5,0 mg/L simulada) na porção sul.

Percebe-se que os parâmetros simulados, nos 5 (cinco) pontos de descargas, atingiram os pontos LV1, LV3, LV4 e LV6, possibilitando fazer uma análise de coerência e/ou consistência positiva dos resultados, dentro das condições de simulação já anunciadas na metodologia.

Importante lembrar que as concentrações simuladas dentro da galeria celular que une as porções norte e sul da lagoa – sob a avenida Tancredo Neves (bairro Jardim Carioca), apresentaram-se maiores que nos demais pontos da lagoa, isso provavelmente em decorrência da ausência de luz, de baixa circulação de ventos, do assoreamento por sedimentos e vegetação aquática e etc.

Carmouze (1998) diz que o *oxigênio dissolvido* (OD) é necessário para a respiração da maioria dos organismos que habitam o meio aquático e, geralmente, se reduz ou desaparece quando a água recebe grandes quantidades de substâncias orgânicas biodegradáveis encontradas no esgoto doméstico, em certos resíduos industriais, no vinhoto e outros efluentes. Os efluentes orgânicos que chegam à lagoa são degradados por microorganismos que se utilizam do oxigênio na respiração. Por isso, quanto maior a carga de matéria orgânica, maior o número de microorganismos decompositores e, conseqüentemente, maior o consumo de oxigênio.

Além disso, Carmouze (1998) fala que a solubilidade do oxigênio na água depende de fatores como a pressão e a temperatura. No contexto, a elevação da temperatura implica na diminuição e solubilização do oxigênio, haja vista que sua difusão na coluna d'água se dá por transporte de massas d'água, ou seja, o padrão de distribuição se dá ao inverso do gás carbônico. Num dia de sol, por exemplo, enquanto ocorre um grande consumo de gás

carbônico ocorre a produção de oxigênio na zona “iluminada”, devido ao fenômeno da fotossíntese. Na zona “escura”, acontece o contrário, ou seja, uma alta produção de gás carbônico e consumo de oxigênio devido a atividade microbiana. Dessa atividade ocorre a degradação da matéria orgânica e a produção de sedimento de fundo nos lagos.

Esteves (1998) assevera que são nos lagos rasos que se observam as maiores amplitudes de variação de oxigênio dissolvido na superfície, especialmente nos períodos de cheias – em que há maior aporte de matéria orgânica e revolvimento do sedimento – onde a concentração de oxigênio dissolvido atinge valores muito baixos.

Neste caso, poder-se-ia inferir para a situação da lagoa que as concentrações amostradas de OD ao longo da lagoa não variam substancialmente neste período de estiagem, fixando-se entre 3,0 mg/L e 6,0 mg/L (Tabela 8) a uma temperatura média de 30 °C. Nas simulações apresentadas percebeu-se que mesmo após o decurso das horas ou dias, as concentrações tenderiam a uma elevação, em decorrência dos fenômenos relatados por Carmouze (1998).

Pode-se considerar o *oxigênio dissolvido* (OD) como um dos indicadores de estado trófico de lagos para fins de avaliação ambiental, inclusive, da eutrofização deste corpo lacustre. Assim, considerando Lannes (2002) e Santos (2007) poder-se-ia afirmar que a lagoa do Vigário está em adiantado estado de eutrofização.

Para Von Sperling (2005), a *demanda bioquímica de oxigênio* (DBO) é a quantidade de oxigênio necessária para que os microorganismos possam estabilizar a matéria orgânica via processos bioquímicos, e isso importa no consumo de oxigênio dissolvido na água. Ela é um parâmetro muito importante para se avaliar o grau de poluição de um corpo hídrico. Na lagoa do Vigário a simulação da DBO se comportou de maneira peculiar para cada volume de descarga e tempo de lançamento, possibilitando perceber sua variabilidade. Contudo, vê-se que sua concentração está atrelada, assim como para o OD, à dispersão do efluente lançado no decurso do tempo. Em casos onde o volume foi maior, houve uma maior concentração no início das descargas, ocorrendo numa redução considerável após 20 dias, conforme afirma Von Sperling (2005).

Esteves (1998) diz que a temperatura e o pH podem ter grande influência sobre a condutividade elétrica. E a presença de substâncias orgânicas influenciam nos valores de condutividade, revelando informações sobre o metabolismo lacustre, a magnitude iônica, a produtividade primária – para valores baixos, e a decomposição – para valores elevados. Na Tabela 8 e na Figura 24, percebe-se que a variação da condutividade na lagoa indica elevados valores na porção norte (acima de 0,800  $\mu$ Siemens/cm) e baixos valores na porção

sul. Assim, conforme a literatura, depreende-se que na porção norte da lagoa do Vigário o processo de produção primária predomina, e na porção sul é o processo de decomposição. Inclusive, ressaltas-se para o fato de que foi na porção norte – onde produtividade primária predomina, que se constatou grande quantidade de vegetação aquática submersa e emersa (macrófitas), possivelmente em virtude dessa característica.

O nitrogênio em altas concentrações, segundo a literatura também é um fator limitante de biodiversidade nos corpos hídricos, pois em suas formas secundárias – nitretos, nitritos e nitratos, são altamente tóxicos à fauna ictiológica. No caso da lagoa do Vigário, os valores de nitrogênio encontrados na amostragem foram baixos para a porção norte e elevados para a porção sul, inclusive, além do recomendado pelas normas legais. Depreende-se disso que a emissão de esgotos com a presença de bases nitrogenadas é mais elevada na porção sul do que na norte (Tabela 9).

No tocante à legislação, especificamente a Resolução CONAMA N° 357/2007, poder-se-ia caracterizar a lagoa do Vigário como um corpo hídrico bem poluído e eutrofizado, já que suas concentrações de parâmetros limitadores de biodiversidade – como OD, não atendem aos padrões legalmente exigidos (mínimo de 6,0 mg/L).

Já as Diretrizes 202.R e 205.R do INEA-RJ dão uma boa orientação de como manter os lançamentos, para cada classe de atividade poluidora, dentro dos limites de concentração para cada parâmetro investigado, possibilitando a melhora da qualidade ambiental da lagoa e da qualidade de vida dos moradores do entorno.

## 8. CONCLUSÃO E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

### 8.1. Conclusões

O presente estudo focou uma avaliação preliminar qualitativa do comportamento dos principais parâmetros físicos e físico-químicos de um corpo d'água (pH, temperatura, condutividade, demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido e nitrogênio total), que são indicadores de qualidade ambiental de um corpo hídrico, com o auxílio de uma ferramenta computacional denominada Mohid. De um modo geral a utilização desse tipo de ferramenta, elaborados na interface gráfica GIS (*Geographical Information System*) da plataforma Mohid, permitiu vislumbrar os diferentes parâmetros ambientais bem como inferir sobre um diagnóstico preliminar acerca da qualidade das águas da região de interesse.

Num segundo momento foram realizadas simulações, na interface GUI (*Graphical User Interface*) da Plataforma Mohid, utilizando descargas de efluentes em cinco pontos considerados críticos (Matadouro, fábricas, pocilgas, estábulos e etc), no intuito de diagnosticar o comportamento de alguns parâmetros ambientais. Os parâmetros escolhidos (Temperatura, OD, DBO e NTP) são as variáveis que refletem significativamente a qualidade ambiental de um corpo hídrico diante de seu uso, e por esta razão foram focadas no processo de simulação.

O simulação permitiu estudar e diagnosticar um problema ambiental, que é o lançamento de carga orgânica de diversas fontes, e – ainda, a construção de um modelo computacional para a lagoa do Vigário. Este modelo, passível de aperfeiçoamento e ajustes, pode, futuramente, oferecer respostas mais consistentes sobre essa lagoa urbana e, sobretudo, sobre os impactos gerados pela presença de ocupações e construções humanas nas suas margens, contribuindo positivamente para a gestão da qualidade deste ambiente e à saúde da população do entorno.

A análise de consistência/coerência do modelo, realizada com a comparação dos dados amostrados com os simulados, retornaram com um resultado satisfatório, incluídos a média e o desvio padrão das amostragens. No entanto, as reações cinéticas de decaimento  $\beta$  e a percepção de sensibilidade do modelo não foram previstas neste trabalho, ficando sugeridos para futuros pesquisadores.

Embora as simulações aqui realizadas previssem o comportamento de variáveis físicas e físico-químicas com as amostragens de campo – permitindo uma análise de coerência satisfatória do modelo –, os resultados desse trabalho não podem ser encarados como conclusivos, em sua totalidade, pois dependem de ajustes relacionados a uma série de

dados intervenientes no processo e que ainda não foram previstos. Estes ajustes e dados adicionais a serem aplicados são as contribuições subterrâneas, o aumento do número de estações de amostragens, uma série temporal mais longa, novas amostragens no período seco e chuvoso, os coeficientes de reações cinéticas moleculares (decaimento  $\beta$ ), e etc.

Verifica-se que o uso da plataforma computacional Mohid se mostra muito útil na avaliação, caracterização e no acompanhamento da qualidade dos recursos hídricos. E, aqui, se torna uma ferramenta importante e de simples inferência à avaliação da qualidade ambiental da lagoa do Vigário.

Num contexto amplo, considera-se que a aplicação do Mohid para simular um cenário de despejos de efluentes orgânicos na lagoa do Vigário foi satisfatória e coerente, podendo ser aplicado em outros corpos lacustres ou rios, sendo uma boa ferramenta de suporte à gestão pública e privada das águas e à previsão de comportamento de parâmetros ambientais.

## **8.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Muito embora o propósito deste trabalho contemplasse inicialmente a calibração e validação do modelo utilizado (Mohid) para a lagoa do Vigário, inclusive a ampliação das amostragens de campo, não foi possível realizar todo esse planejamento, devido o tempo escasso e à grande demanda na incorporação e implementação do modelo. No caso, a validação e calibragem dependeriam de uma quantidade maior de dados amostrados, o que significaria aumentar as campanhas de amostragens tanto no período de estiagem quanto no chuvoso. Entretanto, dada a escassez de tempo e limitação de recursos, isso não foi possível.

Exigiu-se uma análise de consistência/coerência dos parâmetros modelados com amostragens de campo e ajustes na plataforma Mohid para que os resultados pudessem traduzir parte da realidade ambiental da lagoa. Para isso, foram realizadas campanhas para identificarmos os parâmetros medidos, inclusive o de promover essa mensuração ao longo de mais dias. Contudo, nem todos os parâmetros foram mensurados, devido ao curto período disponível. Os resultados aqui trabalhados são, portanto, de apenas um dia de amostragem.

No bojo desse trabalho, apesar de termos conseguido aplicar uma plataforma computacional jamais aplicada em um corpo hídrico lacustre, e com condições ambientais tão adversas, podíamos ter avançado mais no quesito da inserção de demais parâmetros que possibilitariam a previsão, por exemplo, das reações cinéticas de primeira ordem, de

traçadores, de fitoplâncton e fitoplâncton, mas que deixo à consideração de futuros pesquisadores e à elaboração de trabalhos futuros, com as seguinte sugestões:

- i. extensão temporal e espacial dos parâmetros amostrados na lagoa;
- ii. monitoramento sazonal dos parâmetros com amostragens em períodos secos e de chuvas;
- iii. monitoramento cotidiano dos efluentes lançados na lagoa com devida amostragem de parâmetros;
- iv. incorporação de outros módulos de simulação da interface GUI (*Graphical User Interface*) para simular reações cinéticas de primeira e segunda ordem;
- v. verificação de contribuições freáticas que influem no volume da lagoa;
- vi. inferir sobre o módulo de avaliação do plâncton e de outras variáveis limnológicas;
- vii. realizar a análise de sensibilidade do modelo;
- viii. avaliação de novos cenários a serem avaliados e modelados;
- ix. elaboração de um balanço hídrico com série temporal longa; e,
- x. calibração e validação do modelo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ADLER**, R.W. 2002. Fresh Water. In: Stumbling Toward Sustainability. John C. Dernbach (org.); Washington DC: Ed. Environmental Law Institute.

**ALMEIDA**, C. R. & **PEDLOVISKI**, M. A. Sociedade e Ambiente no Contexto Urbano: Contradições entre Preservação Ambiental e Pobreza Social, Campos dos Goytacazes, RJ. Campos dos Goytacazes. Artigo, LEEA-UENF: 2006.

**AMARAL**, K. J. Estuário do Rio Macaé: Modelagem Computacional como Ferramenta para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos [Rio de Janeiro], 2003.

**ANDRADE**, Thompson A; **SERRA**, Rodrigo V. O Recente Desempenho das Cidades medias no Crescimento Populacional Urbano Brasileiro. Texto para discussão no 554. Rio de Janeiro. IPEA, 1998.

**BRAGA**, B. [et al]. Introdução à Engenharia Ambiental – 2ª edição, Editora Pearson Prentice Hall. São Paulo, 2005.

**BRANCO**, S.M. Hidrobiologia Aplicada à Engenharia Sanitária. São Paulo: Cetesb, 1978. 620 p.

**BRANCO**, S.M.; **ROCHA**, A.A. Poluição, Proteção e Usos Múltiplos de Represas. São Paulo: Edgard Blücher, 1979. 185 p.

**BRASIL**. Ministério do Meio Ambiente. GEO Brasil/MMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/geobrasil.html>>. Acessado em: 20 set. 2010.

**BRASIL**. Lei no 6.938/91. Política Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm)>. Acesso em: 16 maio 2009.

**BRASIL**. Lei no 9.433/97. Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm)>. Acesso em: 20 maio. 2009.

**BRASIL**. Resolução CONAMA 357/2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2009.

**CARMOUZE**, J. P. O Metabolismo dos Ecossistemas Aquáticos: Fundamentos Teóricos, Métodos de Estudo e Análises Químicas. São Paulo – Editora Edgard Blücher – FAPESP. 253p. 1998.

**DIAS**, G. T. M. & **GORINI**, M. A. A Baixada Campista: Estudo Morfológico dos Ambientes Litorâneos. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 31, 1980, Camboriu. Anais, Camboriu: SBG, 1982. v. 1, p. 588-602.

**DYER**, K. “Estuaries. A Physical Introduction”, John Wiley & Sons Ltd, pp. 195. London, 1997.

**DRM**, Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro. Mapa Geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <[www.drm.rj.gov.br/mapageomorfologico.html](http://www.drm.rj.gov.br/mapageomorfologico.html)> acessado em: 20 jul. 2009.

**ESTEVES**, F. A. Fundamentos de Limnologia – 2ª edição, Editora Interciência. Rio de Janeiro, 1998.

**FACCO**, A. G. Modelagem do Balanço Hídrico em Micro-bacia Hidrográfica com Plantação de Eucalipto. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2008.

**FEITOSA**, Fernando A. C., **FILHO**, J. M [et al]. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM, LabHid-UFPE, 1997.

**INEA**, Instituto Estadual do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro. Diretrizes DZ N° 202/1986, DZ 205/1987 e DZ 215/2007. Disponível em: <[www.inea.rj.gov.br/legislacao.html/diretrizes](http://www.inea.rj.gov.br/legislacao.html/diretrizes)>. Acessada em 20 agost. 2010.

**LANNES**, L.S. Hidroquímica do Sistema Alagado Urbano Vigário-Taquarucu, Campos dos Goytacazes, RJ; Campos dos Goytacazes. Monografia de Graduação, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro/UENF, 2002.

**LIMA**, W.P. Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas. São Paulo: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1986. 242p.

**LIMA**, E. B.; **RODRIGUES**, P. P. W. G.; **SILVA NETO**, A. J.; **MESA**, M. I.; **SANTIAGO**, O. L.; **LUGON JUNIOR**, J. Redes Neurais na Obtenção dos Parâmetros de um Modelo Computacional do Estuário do Macaé (Artigo). Búzios/RJ. Congresso Ibero Latino-Americano de Modelagem Computacional; Armação de Búzios/RJ, 2010.

**MACHADO**, M. Bezerra. Modelagem Tridimensional da Dispersão de Poluentes em Rios. Campinas/SP: [s.n.], 2006.

**MALISKA**, C. R. Transferência de Calor e Mecânica de Fluidos Computacional. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

**MONTE-MOR**, R. L. M. A. Questão Urbana e o Planejamento Urbano-regional no Brasil Contemporâneo (Relatório). Diretrizes para Formulação de Políticas de Desenvolvimento Regional e de Ordenação do Território Brasileiro (Projeto). Ministério da Integração Nacional – MIN. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. Belo Horizonte: CEDEPLAR – UFMG, 2004.

**MOTA**, S. Urbanização e Meio ambiente. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

**ODUM**, E. P. & **BARRET**, G. Ecologia. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.

**OLIVEIRA**, A. M. S.; **BRITO**, S. N. A. [et al], Geologia de Engenharia, ABGE. São Paulo, 1998.

**PORTO**, R. L. L. & **FILHO**, K. Z. Introdução à Hidrologia – Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico (Apostila). São Paulo, 1986.

**PEDLOVISKI**, M. A. Estudando a Relação entre Populações Economicamente Marginalizadas e Ecossistemas Aquáticos em Áreas Urbanas: O Caso da lagoa do Vigário, Campos dos Goytacazes, RJ. Campos dos Goytacazes. Artigo, LEEA-UENF: 2004.

**PROSAB**, Projeto (Livro 2). Nutrientes de Esgoto Sanitário: Utilização e Remoção. Francisco Suetônio Bastos Mota e Marcos Von Sperling (coordenadores). Rio de Janeiro: ABES, 2009.

**PONCE**, V. M. Engineering Hydrology: Principles and Practice. Englewood cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989. 640p.

**RAMALHO**, R. S. Diagnóstico do Meio Físico como Contribuição ao Planejamento do Uso da Terra no Município de Campos dos Goytacazes; Campos dos Goytacazes/RJ. Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro/UENF, 2005.

**ROSMAM**, P. Modelos de Circulação em Corpos D'Água Rasos. In R.C. Vieira da Silva (Ed.). Numerical Methods in Water Resources. Rio de Janeiro: ABES, 1989.

**SANTOS**, J. M. C. O. Avaliação da Produção de Metano em Alagados Construídos, Campos dos Goytacazes/RJ. Dissertação de Mestrado, Laboratório de Ciências Ambientais, UENF. P29, 2007.

**SANTOS FERNANDES**, R. M. A. Modelação Operacional no Estuário do Tejo. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico; Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2005.

**SHIKLOMANOV**, I. A. Comprehensive Assessment of Fresh Resources of World; Assessment of Water Resources and Water Availability in the World. WMO/SEI, 1997.

**SOUSA**, E. P. Avaliação de Mecanismos Dispersivos em Rios através de Problemas Inversos. Dissertação de Mestrado, IPRJ – UERJ. Rio de Janeiro, 2009.

**SOUZA**, Frank P., Estudo da Ocupação Espontânea na lagoa do Vigário, no Município de Campos dos Goytacazes/RJ, Propostas Mitigadoras e Amparo Legal. Dissertação de Mestrado. Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes/RJ, 2010.

**SOFFIATI NETTO**, Aristides Arthur. A Agonia das Lagoas do Norte Fluminense. Ciência e Cultura, v.37, n. 10, p. 1627-1638, 1985.

**SOFFIATTI NETO**, Aristides Arthur. Os Canais de Navegação do Seculo XIX no Norte Fluminense. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. v. 1. n. 2. Campos dos Goytacazes, RJ, 2007.

**SOFFIATI NETTO**, Aristides Arthur. Aspectos Históricos das Lagoas do Norte do Estado do Rio de Janeiro in ESTEVES, Francisco de Assis (ed.), Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998.

**STEYAERT, L.T.** A Perspective on the State of Environmental Simulation Modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. Environmental modeling with GIS. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 3, p. 16-30.

**TELLES, W. R.** Simulação do Transporte Horizontal Bidimensional de Substância Conservativa. Dissertação de Mestrado, IPRJ-UERJ. Rio de Janeiro, 2009. 21 p.

**TUCCI, C. E. M [et al].** Hidrologia – Ciência e Aplicação. 4ª edição – Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2007.

**VEERSTEG, H. & MALALASEKERA, W.** Computational Fluids Dynamics, An Introduction to Finite Volume Method, Logman Group. Londres, 1995.

**VON SPERLING, M.** Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. In: Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgoto. 3ª ed. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v.1, 452 p, 2005.