

CESAR BACILLA MUNHOZ DA ROCHA

**IMPLEMENTAÇÃO E USO DO MODELO MIKE 21 NA ANÁLISE DE
CENÁRIOS HIDRODINÂMICOS NA A LAGOA DA CONCEIÇÃO - SC**

FLORIANÓPOLIS - SC

2007

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
Centro Tecnológico - CTC
Departamento de Engenharia Sanitária Ambiental
Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - PPGEA

IMPLEMENTAÇÃO E USO DO MODELO MIKE 21 NA ANÁLISE DE CENÁRIOS HIDRODINÂMICOS NA A LAGOA DA CONCEIÇÃO - SC

Cesar Bacilla Munhoz da Rocha

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade de Santa Catarina – UFSC, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, área de concentração Hidrodinâmica e Ecologia de Sistemas Marinhos Costeiros.

Orientador: Prof. Dr. Davide Franco

FLORIANÓPOLIS - SC

2007

IMPLEMENTAÇÃO E USO DO MODELO MIKE 21 NÁ ANÁLISE DE CENÁRIOS HIDRODINÂMICOS NA A LAGOA DA CONCEIÇÃO - SC

CESAR BACILLA MUNHOZ DA ROCHA

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental como parte dos requisitos para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Aprovado por:

Osmar O. Möller, Dr., Dept. de Física - FURG

Masato Kobiyama, Dr., ENS - UFSC

Eloi Melo Filho, Dr., ENS - UFSC

Berry Elfrink, Dr., DHI

Sebastião Roberto Soares, Dr.
(Coordenador)

Davide Franco, Dr.
(Orientador)

FLORIANÓPOLIS, SC - BRASIL

DEZEMBRO 2007

RESUMO

A Lagoa da Conceição, localizada na Ilha de Santa Catarina, no Sul do Brasil, é uma típica laguna costeira, conectada com o oceano por um canal de maré. Devido a sua beleza natural e localização estratégica, a laguna esta atualmente sofrendo problemas ambientais e de conflito de uso.

Esse cenário levou o Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) da UFSC a realizar um projeto de pesquisa para estudar a hidrodinâmica da laguna. Esse estudo apresenta os resultados das medições de campo e modelação hidrodinâmica. Os dados batimétricos foram adquiridos e níveis medidos de Fevereiro de 2005 a Março de 2006 (31 dias), em dois pontos diferentes da laguna. Dados meteorológicos também foram coletados de Agosto de 2005 a Junho de 2006. A hidrodinâmica da lagoa e do canal de maré foi investigada com o auxílio do modelo do DHI, Mike 21, através de um convênio de cooperação científica entre o LaHiMar/UFSC e o DHI. Mike 21 é um modelo 2D-H escrito pelo método de volumes finitos que permite a utilização de uma malha não estruturada, que se ajusta melhor a diferentes escalas da Lagoa da Conceição.

A calibração do modelo hidrodinâmico foi realizada forçando o modelo com nível na desembocadura externa do canal e comparando os resultados com níveis d'água medidos dentro da laguna. Os resultados confirmaram a redução dos componentes de alta frequência encontrados por Andrade (2001). A análise de diferentes cenários permitiu a compreensão de características importantes da hidrodinâmica da Lagoa da Conceição. Os principais resultados são que: a pequena passagem conectando o compartimento Sul com o restante da laguna não limita a circulação nessa região da laguna; e o efeito da dragagem do canal principal na troca d'água da laguna.

Palavras-Chave

Lagoa da Conceição, modelação hidrodinâmica, tempo de residência.

ABSTRACT

Conceição Lagoon, located in the Island of Santa Catarina, in Southern Brazil, is a typical coastal lagoon connected to the ocean through a tidal inlet. Due to its natural beauty and strategic location, the lagoon is currently undergoing environmental problems and users' conflicts.

This scenario prompted the Maritime Hydraulics Laboratory (LaHiMar) of UFSC to carry on a research project to study the hydrodynamics of the lagoon. This study reports the results concerning field measurements and modeling. Bathymetric data was collected and water levels recorded from February 2005 to March 2006 (31 days) in two different points within the lagoon. Meteorological data was also collected from August 2005 to June 2006.

The hydrodynamics of the lagoon and the tidal channel was investigated with the aid of DHI's Mike 21 model in the context of a scientific cooperation agreement between LaHiMar/UFSC and DHI. Mike 21 is a 2D-H model in finite volume method that allows its use in an unstructured grid that fits better to different scales.

Hydrodynamic model calibration was performed by forcing the model with level at the channel mouth and comparing the results with the measured water levels recorded inside the lagoon. Modeling showed a reduction of higher frequency tidal components, since longer periods loose less energy in the process of propagation through the channel. Analysis of different scenarios allowed the understanding of important hydrodynamics patterns of Conceição Lagoon. The most relevant are that the very small passage connecting the southern compartment with the rest of the lagoon does not limit the circulation in that part of the lagoon and the effect of dredging the main channel on the exchange of water of the lagoon.

Key-Words

Conceição Lagoon, hydrodynamic modelling, exchange time.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Localização da área de estudo.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2: Distribuição espacial dos sedimentos de fundo, adaptado de Gré e Horn Filho (1999).</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3: Mapa de ocupação do solo da Lagoa da Conceição em 2004. Extraído de Godoy (2007).</i>	<i>12</i>
<i>Figura 4: Distribuição dos dados batimétricos e principais ajustes. Os dados do interior da laguna (em vermelho) e linha de costa (azul) são os dados provenientes do IPUF/CASAN 2001. Os dados do canal (em preto) são provenientes do levantamento da Artherpa Ltda.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5: Localização dos pontos de aquisição de dados.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6: Dados de níveis na Lagoa da Conceição. Em preto (linha fina) o nível na Boca Externa e em azul (linha grossa) no Canto da Lagoa.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7: Rosa dos ventos para a Lagoa da Conceição para o período de 01-08-05 a 01-06-06. Na figura do lado direito estão evidenciada as áreas de sombra geradas pelos morros de entorno da Lagoa da Conceição.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8: Precipitação pluviométrica na Lagoa da Conceição no período de (01-08-05 a 01-06-06).</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9: Malha triangular utilizada na modelação da Lagoa da Conceição.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 10: Variação do Coeficiente de Nash-Sutcliffe durante a calibração do Coeficiente de Manning.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 11: Variação do Coeficiente de Nash-Sutcliffe durante a calibração do Coeficiente de Viscosidade Turbulenta.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12: Comparação entre as oscilações dos níveis de água, medidos e simulados, para a Estação Maregráfica do Canto da Lagoa. Situação do modelo calibrado. A linha em segundo plano é o nível medido (cinza) e a linha no primeiro plano (vermelha) é o resultado do modelo.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 13: Comparação dos resultados calibrados para períodos menores que 36hs (acima) e para períodos maiores que 36hs (abaixo).</i>	<i>37</i>
<i>Figura 14: Contornos de fundo da Lagoa da Conceição.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 15: Localização dos pontos de extração dos dados ao longo do Canal da Barra.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16: Delimitação das áreas utilizadas nos cálculos dos volumes de troca.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 17: Níveis na desembocadura externa (linha pontilhada) e interna (linha contínua) nas frequências acima de 36 horas (A) e abaixo de 36 horas (B).</i>	<i>51</i>
<i>Figura 18: Amplitude dos componentes harmônicos ao longo do Canal da Barra.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 19: Série temporal de níveis em três localizações diferentes da Lagoa da Conceição, corpo principal, Canto da Lagoa e extremidade Norte.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 20: Volume de troca em função da profundidade do canal. O ponto preenchido indica a situação atual.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 21: Evolução da concentração do componente na Lagoa da Conceição.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 22: Distribuição espacial da concentração do componente na Lagoa da Conceição após o período simulado de 31 dias.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 23: Modelo de regressão para o cálculo do tempo de residência na Lagoa da Conceição.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 24: Concentração final com o rio João Gualberto livre de contaminação (A), e contaminado (B).</i>	<i>63</i>
<i>Figura 25: Evolução da concentração do componente no Canto da Lagoa para os 31 dias simulados.</i>	<i>64</i>

<i>Figura 26: Campo de concentração final para o Canto da Lagoa.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 27: Modelo de regressão para o cálculo do tempo de residência no Canto da Lagoa.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 28: Evolução da concentração do componente na extremidade Norte.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 29: Campo de concentração final para a extremidade Norte.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 30: Modelo de regressão para o cálculo do tempo de residência na extremidade Norte.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 31: Sobre elevação de nível devido a ação do vento sobre a superfície da Lagoa da Conceição.</i>	<i>71</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Valores equivalentes de Manning, e rugosidade absoluta.</i>	9
<i>Tabela 2: Principais Constituintes Harmônicos. Fonte: FEMAR 2000.</i>	16
<i>Tabela 3: Localização dos equipamentos.</i>	18
<i>Tabela 4: Principais resultados dos modelos e os respectivos coeficientes de Nash-Sutcliffe.</i>	34
<i>Tabela 5: Principais características da malha computacional. Os valores em itálico indicam a malha utilizada.</i>	38
<i>Tabela 6: Cenários utilizados para o cálculo do volume de troca e do tempo de residência.</i>	46
<i>Tabela 7: Dimensões do canal de acesso ao Canto da Lagoa.</i>	46
<i>Tabela 8: Dados utilizados para avaliação da importância da chuva para a Lagoa da Conceição.</i>	48
<i>Tabela 9: Condições de vento extremas na Lagoa da Conceição.</i>	48
<i>Tabela 10: Distribuição da energia nas extremidades do Canal da Barra.</i>	51
<i>Tabela 11: Amplitude dos principais componentes harmônicos ao longo do Canal da Barra.</i>	52
<i>Tabela 12: Energia dos principais componentes harmônicos ao longo do Canal da Barra.</i>	53
<i>Tabela 13: Energia relativa ao longo do Canal da Barra.</i>	54
<i>Tabela 14: Principais dimensões e volume de troca da Lagoa da Conceição e sub-ambientes.</i>	55
<i>Tabela 15: Volume de troca para cenários hipotéticos da Lagoa da Conceição.</i>	57
<i>Tabela 16: Volume de troca no Canto da Lagoa em diferentes cenários.</i>	58
<i>Tabela 17: Volume de troca na extremidade Norte para os cenários de dragagem do Canal da Barra.</i>	59
<i>Tabela 18: Tempos de residência para a situação atual da Lagoa da Conceição.</i>	61
<i>Tabela 19: Tempos de residência relativos a situação atual da Lagoa da Conceição.</i>	62
<i>Tabela 20: Tempos de residência para a situação atual do Canto da Lagoa.</i>	65
<i>Tabela 21: Tempos de residência relativos a situação atual do Canto da Lagoa.</i>	66
<i>Tabela 22: Tempos de residência para a situação atual na Extremidade Norte.</i>	68
<i>Tabela 23: Tempos de residência relativos a situação atual da extremidade Norte da laguna.</i>	68
<i>Tabela 24: Volumes de pluviosidade para a Lagoa da Conceição.</i>	69
<i>Tabela 25: Volumes de pluviosidade para a Lagoa da Conceição em função do volume de troca da laguna.</i>	69
<i>Tabela 26: Condições de vento utilizadas na análise.</i>	70
<i>Tabela 27: Amplitudes de variação do nível d'água e os volumes deslocados pelo vento na laguna.</i>	71

LISTA DE SÍMBOLOS

M	Número de Manning
k_s	Rugosidade absoluta
t	Tempo
x, y e z	Coordenadas Cartesianas
η	Elevação da superfície livre
d	Profundidade local (batimétrica)
h	Profundidade total
u, v e w	Componentes da velocidade nas direções x, y e z
f	Parâmetro de Coriolis
Ω	Taxa de revolução angular
ϕ	Latitude geográfica
g	Aceleração da gravidade
ρ	Massa específica
ν_t	Coefficiente de viscosidade turbulenta
P_a	Pressão atmosférica
ρ_0	Massa específica de referencia
S	Magnitude da descarga devido a fontes pontuais
u_s e v_s	Velocidades pela qual a água entra no domínio
F_u	Gradiente de tensão no eixo x
F_v	Gradiente de tensão no eixo y
A	Escala de viscosidade turbulenta horizontal
τ_{sx} e τ_{sy}	Componentes x e y das tensões na superfície
τ_{bx} e τ_{by}	Componentes x e y das tensões no fundo
\hat{P}	Taxa de precipitação
\hat{E}	Taxa de evaporação
\bar{u} e \bar{v}	Velocidades medidas na coluna d'água nas direções x e y
T	Temperatura
s	Salinidade

C	Concentração da quantidade escalar
k_p	Taxa de decaimento linear da quantidade escalar
C_s	Concentração da quantidade escalar na fonte
D_v	Coefficiente vertical de difusão
F_c	Termo horizontal de difusão
D_h	Coefficiente de difusão horizontal
l	Comprimento característico de um elemento de malha
S_{ij}	Taxa de deformação
c_f	Coefficiente de arraste de fundo
\vec{u}_b, u_b e v_b	Velocidade do fluxo sobre o fundo e suas componentes em x e y
U_{rs}	Velocidade de atrito associada às tensões de fundo
Cz	Número de Chezy
ρ_a	Densidade do ar
c_d	Coefficiente de arraste do ar
\vec{u}_w	Velocidade do vento a 10m sobre a superfície do corpo d'água
u_w	Componente x da velocidade do vento a 10m
v_w	Componente y da velocidade do vento a 10m
c_a, c_b, w_a e w_b	Constantes empíricas
w_{10}	Intensidade do vento a 10m sobre a superfície do corpo d'água
U	Vetor das variáveis conservadas
F	Função do vetor de fluxo
F^I	Fluxo invíscidos (convectivo)
F^V	Fluxo viscoso respectivamente
S	Vetor dos termos de fonte
A_i	Área do elemento de malha
Ω_a	Variável de integração definida em A_i
Γ_i	Perímetro do elemento
ds	Variável de integração ao longo do perímetro
n	Vetor unitário normal à superfície A_i

c_{Δ}	Velocidade com a qual a informação se propaga no modelo
Δt	Espaço de tempo
Δl	Comprimento característico
c	Celeridade em águas rasas
C_r	Número de Courant
ε^2	Erro Quadrático Médio:
η_o	Nível dos dados adquiridos em campo
η_m	Nível modelado
η^t	Nível no tempo t
σ^2	Variância
$\bar{\eta}_o$	Média da série de dados
E	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
$\bar{\eta}_t$	Média da série temporal
V_t	Volume de Troca
A'	Área de um elemento de malha
a'_{\max}	Amplitude máxima de variação
η'_{\max}	Máxima elevação em um elemento de malha
η'_{\min}	Mínima elevação em um elemento de malha
C_F	Concentração da substancia no final do período modelado
η'_t	Nível em um elemento de malha para cada espaço de tempo t
h'	Profundidade em um elemento de malha
C'_t	Concentração da substância em um elemento em um espaço de tempo t
$P\Delta$	Número de Péclet
V_c	Volume de Circulação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativas e Relevância	3
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivo Geral	6
1.2.2. Objetivos Específicos	6
2. ÁREA DE ESTUDO	7
2.1. Localização	7
2.2. Caracterização Geomorfológica e Sedimentar	8
2.3. Caracterização Hidrográfica	10
2.4. Caracterização Climática.....	11
2.5. Uso e Ocupação da Bacia Hidrográfica.....	11
3. DADOS AMBIENTAIS	14
3.1. Dados Disponíveis.....	14
3.1.1. Dados Batimétricos	14
3.1.2. Dados sedimentológicos	15
3.1.3. Constituintes Harmônicos	16
3.2. Dados Adquiridos	17
3.2.1. Níveis.....	18
3.2.2. Dados Meteorológicos.....	!Fim imprevisto da fórmula
4.1. Descrição do Modelo de Circulação Hidrodinâmica.....	21
4.2. Equações Governantes do módulo hidrodinâmico	22
4.2.1. Equação de transporte de escalares	24
4.2.2. O esquema de fechamento turbulento	25
4.2.3. Tensões superficiais e de fundo.....	26
4.3. Solução Numérica	28
5. CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	32
6. APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	38
6.1. Malha Computacional.....	38
6.2. Cenários Hidrodinâmicos para avaliar a influência do Canal da Barra na hidrodinâmica da laguna.	40
6.2.1. Atenuação do Nível Medido.....	41
6.2.2. Atenuação dos Componentes Harmônicos	41
6.3. Cálculo do Volume de Troca e Tempo de Residência	42
6.3.1. Volume de troca.....	42
6.3.2. Tempo de Residência.	43
6.3.3. Cenários	45
6.4. Indicativos da importância da chuva e do vento.	47
7. RESULTADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	50

7.1. Influência do Canal da Barra na Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição	50
7.1.1. Atenuação do nível pelo Canal da Barra	50
7.1.2. Atenuação dos componentes harmônicos.....	52
7.2. Volume de Troca.....	54
7.2.1. Situação Atual	54
7.2.2. Cenários Hipotéticos para a Lagoa da Conceição	57
7.2.3. Cenários Hipotéticos para o Canto da Lagoa	57
7.2.4. Cenários Hipotéticos para a extremidade Norte	59
7.3. Tempos de Residência	59
7.3.1. Lagoa da Conceição.....	60
7.3.2. Canto da Lagoa.....	63
7.3.3. Extremidade Norte.....	66
7.4. Indicativos da relevância da pluviosidade para o sistema	69
7.5. Indicativos da relevância do vento	70
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A HIDRODINÂMICA DA LAGUNA	72
REFERÊNCIAS	75
ANEXO 1: MALHA BATIMÉTRICA	78
ANEXO 2: CAMPOS DE NÍVES NA LAGOA DA CONCEIÇÃO	79
ANEXO 3: CAMPOS DE NÍVES NA CANAL DA BARRA	80

1. INTRODUÇÃO

Lagunas costeiras são sistemas comuns nas regiões de fronteira dos continentes em todo o mundo e, particularmente, na região Sul do Brasil. Normalmente, tem conexões restritas com o oceano o que ocasiona pouca troca d'água e, conseqüentemente, tendem a apresentar longos tempos de residência, além de serem efêmeras em uma escala geológica (Kjerfve, B, 1990).

Segundo Barnes (1980, *apud* Kjerfve, 1990), lagunas costeiras compreendem cerca de 13% de todos os ambientes do planeta. São ambientes estuarinos protegidos freqüentemente orientados paralelamente à costa, separados do oceano por barreiras e conectados ao oceano por canais (Phleger, 1969 *apud* Kjerfve e Magil, 1989).

Em geral apresentam um sistema de balanço delicado devido à sedimentação, crescimento populacional da região de entorno, e despejo de dejetos humanos. Conseqüentemente, o planejamento e implementação de estratégias são, hoje em dia, questões de alta prioridade em muitos países, incluindo Brasil (Kjerfve, B., *op. cit.*).

Um aspecto fundamental no equilíbrio de lagunas costeiras está relacionado ao processo de circulação de água interna e da troca d'água com o oceano. A hidrodinâmica desses sistemas está fortemente relacionada com os diferentes forçantes meteo-oceanográficas (ventos, chuvas, marés, ondas e correntes) e as características geomorfológicas da região.

A troca d'água entre a laguna e o oceano é causada principalmente pela diferença de nível entre o oceano e a laguna. As variações de nível no oceano, no entanto, podem ocorrer em função de diferentes fatores, como a atração gravitacional entre os planetas, que gera a conhecida maré astronômica, ou o vento agindo sobre a superfície do oceano, que gera variações de níveis consideráveis. As variações de níveis na laguna, por outro lado, podem ser, além das forçadas pela diferença de nível com o oceano, em função do vento local, que pode gerar um gradiente horizontal de elevação do nível interno da laguna, da chuva que tende a aumentar o nível interno da laguna.

A hidrodinâmica das lagunas costeiras está também vinculada com as características morfológicas do canal que liga a laguna com o oceano. No caso da Lagoa da Conceição há um canal longo, raso e meandrante que limita significativamente a troca de energia do sistema. Fazendo-se uma analogia ao sistema clássico de vasos comunicantes, onde dois tanques d'água estão conectados por uma tubulação, a variação de nível em um dos dois

tanques depende da velocidade em que o nível varia no outro tanque e das características de resistência da tubulação que os conecta.

O interesse em estudar processos hidrodinâmicos na Lagoa da Conceição em escala local (no canal intra-lagunar e em porções específicas do corpo d'água) e a possibilidade de realizar campanhas de medição de importantes variáveis do sistema, levaram a implementação de um modelo hidrodinâmico.

Modelos hidrodinâmicos são ferramentas largamente utilizadas no estudo hidrodinâmico de corpos d'água. A ampla utilização desses modelos se deve à possibilidade de avaliar a consistência dos resultados apresentados pelo modelo através da comparação com os dados observados, à possibilidade de descrição detalhada do escoamento no domínio e à avaliação da sensibilidade do ambiente através da utilização de cenários hipotéticos. Por outro lado, a qualidade dos resultados obtidos depende diretamente da qualidade dos dados ambientais utilizados. Os dados de campo são fundamentais para definir as fronteiras físicas do sistema (linha de costa, batimetria, etc), gerar as condições de contorno aberta do modelo, verificar a consistência dos resultados, definir as tensões de superficial do vento e de cisalhamento com o fundo, inserir dados de chuva, rios, ventos, etc.

Rosman (2001), afirma que modelos numéricos são ferramentas indispensáveis aos estudos e projetos, a gestão e ao gerenciamento de corpos de água naturais, pois permitem integrar informações espacialmente dispersas, interpolar informações para regiões nas quais não há medições, ajudar a interpretação de medições feitas em estações pontuais, propiciar entendimento da dinâmica de processos, prever situações simulando cenários futuros, etc.

Rosman *op cit.*, relata ainda que dados ambientais são em geral escassos, e paradoxalmente imprescindíveis para estudos, projetos, diagnósticos, gestão e gerenciamento de corpos d'água naturais. A escassez decorre do alto custo envolvido no levantamento de dados. Os dados que usualmente se obtêm de variáveis ambientais são séries temporais de valores medidos em uns poucos pontos distribuídos na área de interesse. Portanto, os dados medidos de fato representam apenas uma diminuta fração do todo. Uma vez que os modelos matemáticos são forçados pelos dados ambientais, a qualidade dos modelos em descrever o escoamento de um determinado sistema depende da qualidade dos dados ambientais utilizados, principalmente os dados utilizados nas condições de contorno aberta e na delimitação geométrica do corpo d'água.

É importante ressaltar que o presente estudo tem finalidade acadêmica, com inúmeras limitações, e de maneira alguma, deve ser considerado como um estudo de impacto ambiental da região.

1.1. Justificativas e Relevância

As lagoas costeiras são ambientes frágeis, regidos pela interação de complexos processos físico-químicos e biológicos. A Lagoa da Conceição apresenta importância central para a economia do município de Florianópolis e de Santa Catarina. No entanto poucos estudos da hidrodinâmica foram realizados para a região.

Os estudos iniciais foram dedicados à caracterização geo-morfológica da laguna. Muehe e Gomes Jr (1999), realizaram em 1983 o primeiro levantamento batimétrico da região, utilizando teodolito e ecobatímetro em 32 perfis longitudinais.

Gré e Horn Filho, (1999), caracterizaram, em um trabalho realizado em 1992, os sedimentos superficiais de fundo da laguna através de 34 amostras e correlacionou a fácies identificada com a morfologia de fundo da laguna. Porto Filho em (1993), realizou um trabalho de mestrado onde também avaliou a distribuição do sedimento de fundo da laguna.

Em 1999, Sierra de Ledo e Soriano-Sierra publicaram o livro *O Ecossistema da Lagoa da Conceição*, que consiste em 27 trabalhos de diferentes autores sobre a laguna (dentre eles os trabalhos de Muehe e Gomes Jr e Gré e Horn Filho, *op cit.*). Nesse livro foram apresentados 8 trabalhos sobre a hidrodinâmica e componentes estruturais do habitat, 17 trabalhos sobre a biota e sobre o manejo e os efeitos ecológicos.

Em 2001 foi realizada uma batimetria mais detalhada, com ecobatímetro e GPS em 527 perfis pela empresa Aeroconsult Ltda.

Existem dois trabalhos mais aprofundados sobre a hidrodinâmica do sistema Lagoa da Conceição e Canal da Barra. Pereira (2004), realizou um estudo que compreende a coleta de dados ambientais e análise estatística de dados pontuais do Canal da Barra e Lagoa da Conceição. Os dados ambientais (nível d'água, salinidade, temperatura e condutividade) são pontuais espacialmente e por curto período de tempo. Dessa maneira, os principais processos hidrodinâmicos não foram estudados e, conseqüentemente, a compreensão da hidrodinâmica do sistema é limitada.

Andrade (2001), realizou o único estudo, até então, de modelação numérica da hidrodinâmica da Lagoa da Conceição. O trabalho, apesar de apresentar um rigor na implementação do modelo e avaliação dos resultados, apresenta limitações na compreensão da hidrodinâmica do sistema devido aos dados utilizados no estudo. As forçantes foram níveis astronômicos (previstos para a Ilha do Arvoredo), ventos adquiridos no aeroporto de Florianópolis e a batimetria realizada por Muehe e Caruso Jr (1999). O rio João Gualberto,

principal afluente da laguna que se localiza na extremidade Norte, foi inserido como uma fonte no modelo.

No entanto, o vento no aeroporto de Florianópolis difere do vento na laguna devido à orografia da região que apresenta diversos morros na margem Oeste. A batimetria realizada por Muehe e Caurso Jr, além de antiga (realizada em 1983) é bastante imprecisa. No entanto, o trabalho de Andrade (*op. cit.*) é o mais importante sobre a hidrodinâmica da laguna onde foi evidenciada a importância do vento para a circulação interna da laguna e a grande dissipação de energia da maré astronômica pelo Canal da Barra.

Em 2005 foram realizados dois trabalhos de conclusão de curso pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (ENS – UFSC). Lino (2005), e Koefender (2005) utilizaram o modelo de diferenças finitas Mike21 para analisar algumas características básicas do escoamento através de dados coletados na desembocadura interna do Canal da Barra. Lino (*op. cit.*), realizou uma avaliação prévia da influência de algumas forçantes (maré astronômica e maré meteorológica) e parâmetros do modelo (rugosidade de fundo variável e constante) no escoamento da laguna. A maior contribuição desse trabalho para o presente estudo é a evidência da pouca sensibilidade do escoamento no interior da laguna frente a utilização de um coeficiente de rugosidade de fundo variável ou constante. O estudo de Koefender (*op. cit.*), avaliou principalmente a mudança no escoamento devido mudança na batimetria em dois períodos 1983 e 2001. Os dois trabalhos servem como avaliações preliminares, por não terem utilizado modelos calibrados e não incluem o Canal da Barra, fundamental para a hidrodinâmica da laguna.

Alguns trabalhos sobre a mudança da paisagem na região foram realizados pelo Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, dentre eles ressalta-se o trabalho de Feitosa 2002 que analisa as principais mudanças na paisagem da região. Recentemente foram realizados dois trabalhos de conclusão de curso no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, (Godoy 2007 e Odreski 2007), analisando imagens aéreas os autores identificaram as principais mudanças na ocupação da região de entorno da laguna.

Alguns trabalhos foram realizados sobre a qualidade da água, e evidenciaram o processo de eutrofização da laguna Sierra *et al.* (1999), Ledo e Sorriano –Sierra (1999) e Froidefond *et. al.* (1999). O crescente problema da perda da qualidade da água da laguna vai de encontro com a utilização da Lagoa como um dos principais pontos turísticos de Santa Catarina. Além disso, lagunas costeiras apresentam importância única na manutenção de recursos pesqueiros, uma vez que atuam como uma fonte de deposição de nutrientes e

materiais orgânicos além de ser um ambiente abrigado. Dessa maneira, servem como um berçário para espécies que tem importância econômica na região (Sierra de Ledo, 1999).

É intrigante que mesmo frente à importância econômica e ambiental desse sistema para o município e a crescente pressão antropogênica, nenhum estudo aprofundado da hidrodinâmica e qualidade d'água na laguna tenha sido feito por órgãos ambientais na região. Frente a essa situação o Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) iniciou em 2005 um projeto para compreender a hidrodinâmica da Lagoa da Conceição. O projeto teve início com medições de campo e os primeiros resultados foram apresentados nos trabalhos de conclusão de curso de Lino (*op.cit.*) e Koefender (*op.cit.*).

Em 2006 foi firmado através do LaHiMar um acordo de cooperação científica entre a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC e o Danish Hydraulic Institute – DHI. DHI é uma das principais empresas do mundo no desenvolvimento e utilização de softwares para a análise de praticamente todo o ciclo hidrológico. O projeto foi realizado utilizando os modelos de engenharia costeira desse instituto, partes do estudo foram realizadas no DHI na Dinamarca. O aumento do intercâmbio entre UFSC/DHI serve para aumentar o conhecimento científico de ambas as partes e para melhorar a compreensão dos ambientes brasileiros e, conseqüentemente, permitir um manejo sustentável. É importante ressaltar que, através desse acordo, parte do estudo pode ser realizado na sede do DHI na Dinamarca.

No caso da Lagoa da Conceição, por exemplo, os diferentes modelos do DHI podem ser utilizados para avaliar importantes características da laguna, muitas ainda não avaliadas nesse estudo. Como, por exemplo, o escoamento na bacia hidrográfica e lençol freático da laguna (com o modelo Mike SHE), o efeito da interação das ondas na desembocadura externa (com o novo modelo de onda Mike 21 SW ou com o modelo Mike 21 PMS), o transporte de sedimentos não coesivos (com o módulo de transporte de sedimentos não coesivos Mike 21 ST) e sedimentos coesivos (com o módulo Mike 21 MT). O módulo de advecção/dispersão (Mike 21 AD), que simplesmente simula o espalhamento de substâncias sujeitas a processos advectivos e dispersivos pode ser utilizado para avaliar a variação de salinidade, temperatura, coliformes fecais, ou para evidenciar a capacidade de troca d'água do sistema (o que foi realizado na parte final desse estudo). O módulo de qualidade de água (Mike 21 ECOLab), que descreve os processos químicos, biológicos e ecológicos e a interação entre as variáveis e também entre os processos físicos de sedimentação dos componentes. Descrições detalhadas dos modelos do DHI podem ser encontrada em www.dhigroup.com

É importante ressaltar que o intercâmbio entre UFSC/DHI é somente de interação técnica e científica e a utilização dos modelos depende de aprovação interna do DHI. A

utilização dos modelos do DHI nos estudos realizados pelo LaHiMar servem para capacitar alunos e aumentar significativamente o conhecimento do funcionamento da Lagoa da Conceição.

O trabalho está organizado da seguinte maneira; No Capítulo 2 são apresentadas as principais características da área de estudo. No Capítulo 3 são apresentados os dados ambientais utilizados no estudo. O capítulo está dividido nos dados previamente disponíveis (item 3.1.) e nos dados adquiridos em campo (item 3.2.). O modelo Mike 21 é apresentado no Capítulo 4 enquanto que no Capítulo 5 é apresentada a calibração do modelo com os dados de nível adquiridos em campo. No Capítulo 6 se encontram os cenários utilizados para o estudo da hidrodinâmica da Lagoa da Conceição enquanto que os resultados são apresentados no Capítulo 7. No Capítulo 8 são apresentadas as considerações finais sobre a hidrodinâmica da laguna.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar padrões do escoamento da Lagoa da Conceição através de modelação numérica realizada com dados ambientais adquiridos em campo.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Disponibilizar um modelo calibrado que possa ser utilizado em trabalhos futuros sobre a hidrodinâmica e qualidade d'água da Lagoa.
2. Avaliar a importância do Canal da Barra para o escoamento interno da laguna e na troca d'água e energia do sistema.
3. Avaliar capacidade de troca d'água da laguna e em diferentes compartimentos.
4. Avaliar a importância do Rio João Gualberto para a qualidade d'água do sistema.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização

Localizada na Ilha de Santa Catarina a Lagoa da Conceição encontra-se entre os paralelos $27^{\circ}30'S$ e $27^{\circ}37'S$ e entre os meridianos $48^{\circ}27'$ e $48^{\circ}25'$, logo abaixo do Trópico de Capricórnio. A Figura 1 apresenta a localização da Lagoa da Conceição.

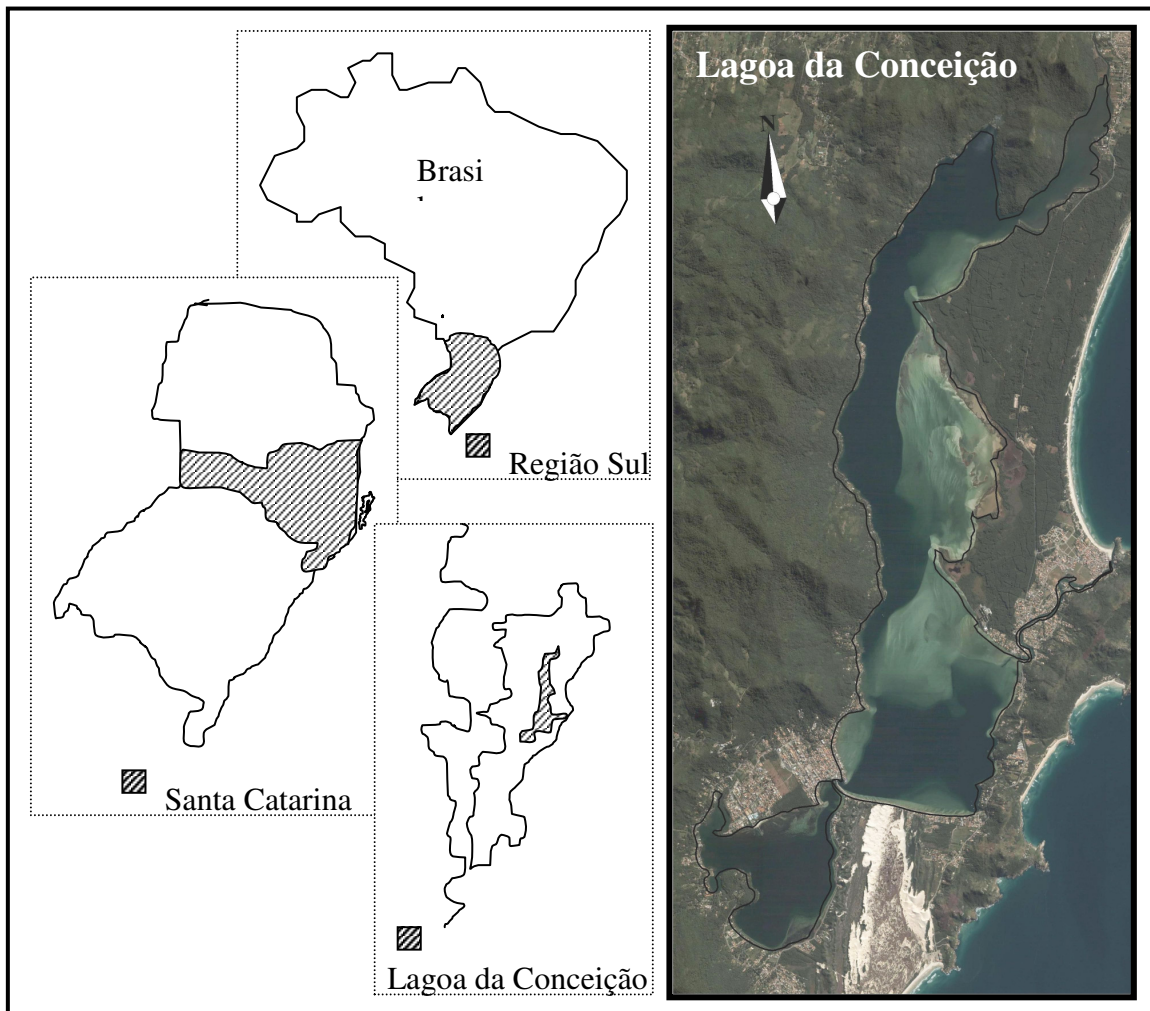


Figura 1: Localização da área de estudo.

2.2. Caracterização Geomorfológica e Sedimentar

Inserida em uma Bacia Hidrográfica com $90,7\text{km}^2$ (Hauff, 1996), a laguna se desenvolve ao longo da margem Leste da Ilha de Santa Catarina no sentido Norte-Sul com um comprimento de aproximadamente com 13,5km. Apresenta largura bastante variada de algumas centenas de metros a apenas 8 metros sob a ponte da Avenida das Rendeiras. O canal de acesso à laguna é raso e bastante meandrante, com um comprimento de aproximadamente 2,5km. A laguna tem uma área de aproximadamente $20,5\text{km}^2$ e uma profundidade média de 2,8m. O sistema Lagoa da Conceição e Canal da Barra apresenta um volume de água de aproximadamente $59 \times 10^6\text{m}^3$ em relação ao nível zero (referência SAD-69).

Segundo Muehe e Gomes Jr. (1999), o sistema Lagoa da Conceição e Canal da Barra como se encontra hoje foi formado após o último período holocênico. O fundo lagunar é diretamente influenciado pela morfologia local, que apresenta costas íngremes no lado Oeste e cordões arenosos na margem Leste. Dessa maneira, seções no sentido Leste-Oeste da laguna são assimétricas sendo mais profundas no lado Oeste e mais rasas e planas no lado Leste. A laguna apresenta uma profundidade máxima de 8,5m e grandes áreas rasas, com menos de 0,5m. Até 1981, o Canal da Barra passava por assoreamentos regulares, impedindo sazonalmente a troca de água do sistema com o mar (Assumpção *at. al.*, 1980 *apud* Odebrecht Caruso, 1999). Desde a construção do molhe na desembocadura e a dragagem de parte de seu leito o canal permanece estável.

A distribuição de sedimentos de fundo da laguna apresenta, segundo Muehe e Gomes Jr (*op. cit.*), os padrões clássicos de sedimentação lagunar, com a predominância de sedimentos arenosos nas partes marginais e siltosas nas partes mais centrais e profundas. As fácies arenosas, situadas na margem Oeste da laguna, são provenientes das encostas do Complexo Cristalino e apresentam imaturidade textural e mineralógica, enquanto que as areias provenientes da barreira arenosa da margem Leste são maduras e provenientes da plataforma continental adjacente. Gré e Horn Filho (1999) afirmam que os valores de assimetria são variados no sistema, assimetria negativa é encontrada em locais de alta energia, como o canal lagunar enquanto que assimetria positiva é observada nos locais de menor energia como os extremos Norte e Sul da laguna. Gré e Horn Filho (*op. cit.*) identificaram cinco fácies texturais: silte arenoso, areia, areia siltosa, silte argiloso e silte.

O silte arenoso cobre cerca de 45% do fundo e contém cerca de 50 a 70% de silte areia sobre cerca de 40% da superfície e se encontra em profundidades menores que 1,5m e no

canal da barra. A fácies areia-siltosa representa um sedimento intermediário entre areia e silte arenoso, com teores entre 50% e 75% de areia. Situa-se em profundidades entre 1,5 e 4m, ocupando 10% da área do fundo e localiza-se principalmente na porção central da laguna. O silte argiloso apresenta 3% do fundo e possui entre 53 e 64% de silte e 21% de argila, restringindo-se a profundidades maiores que 6m. A fácies silte cobre apenas 2% da área e é encontrado em um setor marginal e isolado no Sul da Lagoa. A Figura 2 apresenta a distribuição dos sedimentos encontrada por Gré e Horn Filho e a Tabela 1, os respectivos valores de rugosidade absoluta e Manning para cada fácies sedimentar.

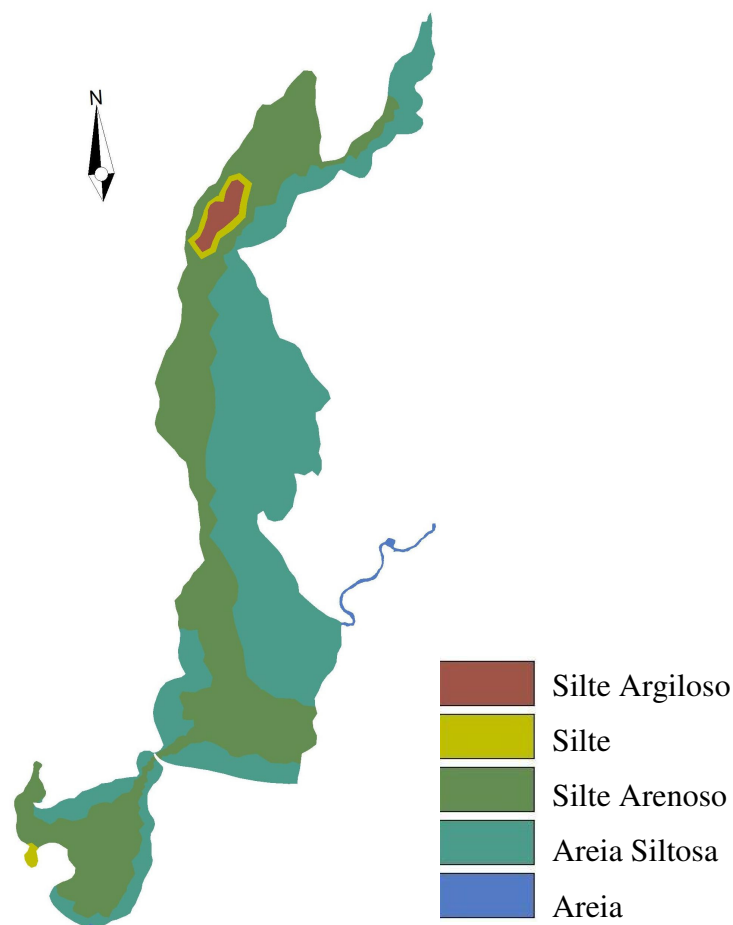


Figura 2: Distribuição espacial dos sedimentos de fundo, adaptado de Gré e Horn Filho (1999).

Tabela 1: Valores equivalentes de Manning, e rugosidade absoluta.

Facies Sedimentar	M	k_s
Areia	0,010	53,9
Areia siltosa	0,015	50,3
Silte arenoso	0,020	48,0
Silte	0,025	46,2
Silte argiloso	0,030	44,8

M - Manning; k_s - Rugosidade absoluta.

2.3. Caracterização Hidrográfica

Segundo Dutra (1990), O rio João Gualberto é a principal fonte de água fluvial do sistema com uma vazão média de $1\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. No entanto, a principal fonte de água doce pode ser proveniente da descarga pluvial.

Pode-se dividir a entrada de água pluvial no sistema de duas maneiras. A primeira atinge diretamente o espelho d'água da Lagoa enquanto que uma segunda fonte deve-se a água que chega ao corpo d'água via bacia de drenagem. A quantificação do volume e do tempo necessário para a água entrar na Lagoa da Conceição nessa segunda maneira pode ser uma questão complexa e ao mesmo tempo importante para a completa compreensão do balanço de massa do sistema. Deve haver ainda alguma troca d'água entre o corpo d'água e o lençol freático.

A evaporação também apresenta importância para a circulação do sistema e para a qualidade da água, mas como esse processo ocorre em escalas temporais maiores do que as da precipitação e da oscilação de maré, sua contribuição foi desconsiderada nesse estudo. Uma vez que deve haver tempo suficiente para o decréscimo no nível ocasionado pela evaporação ser compensada pela diferença de nível no oceano.

Sierra de Ledo & Klingebiel, (1999), em um trabalho realizado em 1988 verificaram que a laguna apresenta uma estrutura vertical homogênea em relação à salinidade e temperatura. Apesar de não apresentarem uma série temporal longa o suficiente que permita afirmar que a lagoa é realmente homogênea verticalmente são os únicos indícios que não há uma estrutura vertical definida no sistema. Essa característica da laguna é importante para corroborar a utilização de um modelo numérico integrado na vertical (2DH).

Rosman (1996), Sierra de Ledo & Klingebiel, (*op.cit*) e Andrade (2001) evidenciaram a importância do Canal da Barra em atenuar a propagação da onda de maré. Andrade (*op.cit.*) encontrou uma atenuação da maré astronômica de 90 a 95%. Por se tratar de um canal longo, raso e meandrante o Canal da Barra deve funcionar como um eficiente filtro de frequência. Ou seja, períodos curtos são mais facilmente atenuados do que os períodos mais longos, como, por exemplo, marés meteorológicas, que possuem períodos de alguns dias. Esse é um que domina as lagoas costeiras no Sul do Brasil.

Andrade (*op. cit.*), evidenciou através de um modelo de transporte advectivo a dificuldade do subsistema sul em trocar água com o corpo principal da laguna. O autor também evidenciou a grande influência do vento na circulação interna da Lagoa. Uma vez que

a laguna apresenta amplas áreas com bancos submersos o vento tem capacidade de movimentar toda a coluna d'água nessas regiões.

2.4. Caracterização Climática

Florianópolis apresenta as características climáticas inerentes ao litoral sul-brasileiro. As estações do ano são bem caracterizadas, verão e inverno bem definidos, sendo o outono e primavera de características semelhantes. A média das máximas do mês mais quente varia de 26°C a 31°C e a média das mínimas do mês mais frio, de 7,5°C a 12°C. A temperatura média anual está em torno de 24°C. A temperatura mais baixa registrada na cidade (no período entre 1970 a 1979) foi de 0°C e a máxima foi de 39°C, (Nimer, 1979). Geadas não são frequentes, mas ocorrem esporadicamente no inverno. Devido à proximidade do mar, a umidade relativa do ar é de 80% em média. A precipitação é bastante significativa e bem distribuída durante o ano. A precipitação normal anual para o período de 1911-1984 foi de 1521 mm. Não existe uma estação seca, sendo o verão geralmente a estação que apresenta o maior índice pluviométrico (Barbosa, 2003). Elevadas precipitações ocorrem de janeiro a março, com média de 160 mm mensais, sendo que de abril a dezembro há pouca variação, com uma média em torno de 100 mm mensais. Os valores mais baixos ocorrem de junho a agosto.

A insolação apresenta o valor médio anual de 2025,6 horas/ano representando 46% do total possível, o que permite dizer que mais da metade do ano o sol permanece encoberto. As taxas médias anuais de evaporação são de 1019 mm.

Segundo os critérios de Köeppen, a classificação climática da região de Florianópolis é do tipo Cfa, situada em zona intermediária subtropical, pertencente ao grupo mesotérmico úmido, com chuvas distribuídas uniformemente durante o ano (Barbosa, *op cit.*).

2.5. Uso e Ocupação da Bacia Hidrográfica

A urbanização da Lagoa da Conceição se iniciou pela colonização açoriana, sendo marcada pela fundação da freguesia de Nossa Senhora da Conceição da Lagoa em 1750 e consolidada pela construção da Igreja em 1751 (Souza, 2003). A construção da ponte sobre o canal das rendeiras em 1845 facilitou a ocupação de sua costa. O processo de adensamento se

iniciou efetivamente nas décadas de 40 e 50. Na década de 60 as principais vias estruturais do bairro da LC já estavam presentes o que possibilitou o adensamento populacional da região. A partir da década de 80 uma nova forma de ocupação começa a surgir na laguna: são os loteamentos. No início de 2000 é evidente o aumento das atividades de comércio e serviços, principalmente na região conhecida como “centrinho” e o estabelecimento de tipologias mais compactas, como prédios de 3 e 4 pavimentos e construções em fita (sem afastamentos laterais significativos) (Souza, *op.cit.*). O trabalho realizado por Odriski (2007) evidencia um crescente adensamento populacional ao longo da laguna. O autor calculou um aumento da área urbana de 14,4% entre 1998 e 2004. O aumento da área urbana ocorreu principalmente sobre as regiões de dunas e vegetação. A Figura 3 apresenta o mapa de ocupação do solo apresentado por Godoy (2007), para o ano de 2004.

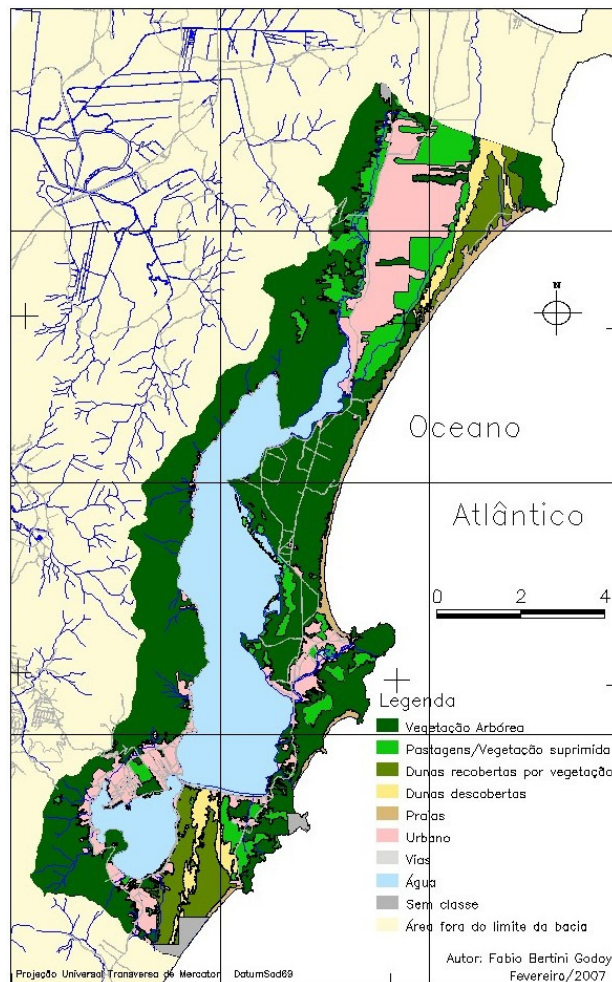


Figura 3: Mapa de ocupação do solo da Lagoa da Conceição em 2004. Extraído de Godoy (2007).

Atualmente os impactos ambientais são evidentes. Durante os meses mais quentes do ano a região Sul da laguna apresenta episódios de crise anóxica e o mau cheiro é evidente na área, o que causa prejuízos para as pousadas e outros estabelecimentos comerciais da região (Costa *at al*, 2000).

Segundo Souza (*op.cit.*), a paisagem em construção na Ilha de Santa Catarina está orientada por um plano diretor inadequado às expectativas da população, e que está baseado no zoneamento, não considerando a dimensão paisagística e ambiental como fator determinante na qualidade do espaço urbano.

Segundo Passos (2001), a vocação do bairro Lagoa da Conceição para a atividade turística é inegável, mas o crescimento desta atividade econômica demanda infra-estrutura, que acaba por gerar uma intensificação no processo de produção do espaço urbano.

Os habitantes do bairro têm se mobilizado contra estes problemas, estão organizados em diversas ONGs e já conseguiram alguns progressos. As principais ONGs que atuam no bairro são a AMOLA (Associação dos Moradores da Lagoa, criada em 1985), a Fundação Lagoa e a ONDA (Organização de Diversos Amigos). De acordo com Kuhnen (2002), estas três entidades estão organizadas de formas distintas e tem diferentes formas de abordagem. Porém todas estão em busca da manutenção da qualidade de vida no bairro, de uma urbanização mais adequada às peculiaridades locais e principalmente na preservação do meio ambiente natural e da cultura açoriana.

Nos últimos anos os movimentos populares e a criação e atuação do Comitê de Gerenciamento da Lagoa da Conceição conseguiram, de certa forma, ordenar a urbanização na região. No entanto, muitas são as discussões a cerca do novo plano diretor e os tomadores de decisão necessitam de ferramentas efetivas que os auxiliem no gerenciamento sustentável da região.

3. DADOS AMBIENTAIS

Os dados ambientais utilizados no presente estudo estão apresentados em dois tópicos principais. No primeiro, denominado Dados Disponíveis, são descritos os dados complementares, que não foram adquiridos em campo durante esse estudo, mas são essenciais para a simulação do modelo hidrodinâmico. As informações pregressas dizem respeito ao levantamento batimétrico do corpo d'água à distribuição do sedimento de fundo e a previsão da maré astronômica na entrada do Canal da Barra. No segundo item, Dados Adquiridos, é apresentada uma descrição detalhada dos dados adquiridos em campo, que compreendem medições de níveis d'água e de vento.

3.1. Dados Disponíveis

3.1.1. Dados Batimétricos

A precisão dos dados de profundidade em cada elemento de grade é crucial para a correta simulação dos campos de fluxo no modelo numérico, uma vez que as equações são aplicadas em cada elemento de grade utilizando a profundidade local. Dessa maneira deve-se tentar obter os dados de contorno de fundo mais precisos e atuais possíveis.

Nesse trabalho foram integrados dados batimétricos de diferentes fontes. Na região interna da Lagoa da Conceição foram utilizados os dados do IPUF/CASAN publicados em 2001 na escala 1:20000. O levantamento dos dados foi realizado utilizando-se um ecobatímetro e GPS em 527 perfis ao longo do corpo principal da laguna. Para o Canal da Barra foram utilizados dados provenientes do levantamento realizado pela empresa Artherpa Engenharia e Arquitetura Ltda. em 1997 e atualizações com base no levantamento realizado em 2005 pela Sócioambiental Consultores Associados Ltda.

Para corrigir algumas incongruências observadas na linha de costa, foram realizadas verificações em campo com aparelho GPS em campanhas realizadas pelo Lahimar. Foram feitas correções na linha de costa na região da Avenida das Rendeiras, no canal de conexão do corpo principal da lagoa com o canto Sul, e em alguns pontos da extremidade Norte da

laguna. A Figura 4 apresenta a distribuição dos dados batimétricos e indica as principais correções realizadas.

Todos os dados foram referenciados ao nível zero SAD 69 - IBGE.

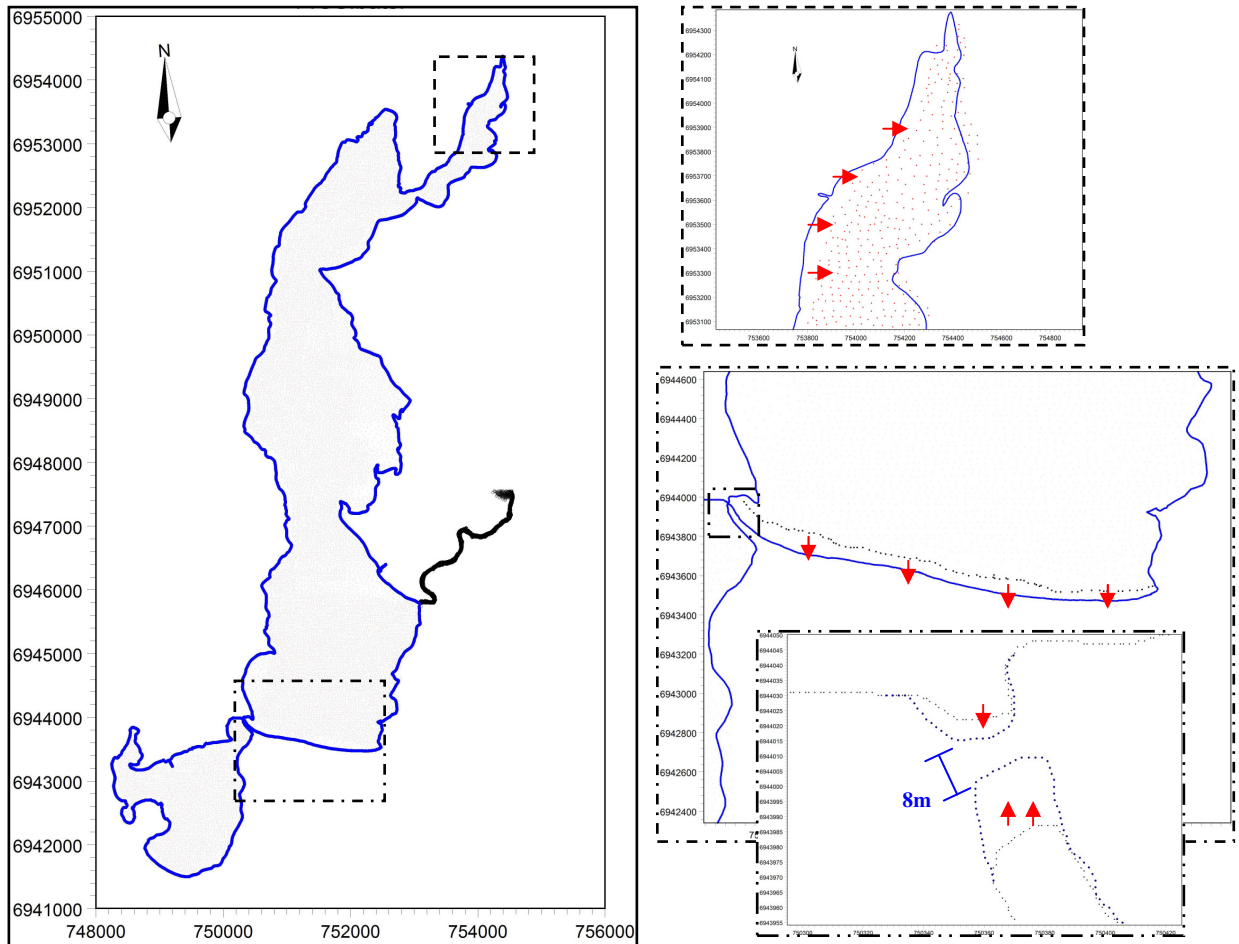


Figura 4: Distribuição dos dados batimétricos e principais ajustes. Os dados do interior da laguna (em vermelho) e linha de costa (azul) são os dados provenientes do IPUF/CASAN 2001. Os dados do canal (em preto) são provenientes do levantamento da Artherpa Ltda.

3.1.2. Dados sedimentológicos

A distribuição de sedimento de fundo é utilizada para a estimativa dos valores de coeficiente de rugosidade de fundo no modelo numérico. A definição do valor de rugosidade de fundo é um passo chave na montagem do modelo uma vez que a calibração do modelo é realizada alterando principalmente o valor desse parâmetro.

Os dados utilizados são de Gré & Horn Filho, (1999), como descritos anteriormente, Figura 2.

3.1.3. Constituintes Harmônicos

Em alguns cenários específicos foram utilizados somente os níveis forçados pela atração gravitacional entre os astros. Nesse caso os constituintes harmônicos foram utilizados da estação maregráfica do Arvoredo. Os dados foram utilizados da tabela da FEMAR (2000), medidas no período de 01/04/82 a 01/05/82 nas coordenadas geográficas $27^{\circ} 17,0$ S e $48^{\circ} 21,5$ W. Escolheu-se esses constituintes para permitir a comparação com os resultados de Andrade (2001).

A Tabela 2 apresenta as características dos constituintes utilizados baseado na tabela de maré da FEMAR (2000).

Tabela 2: Principais Constituintes Harmônicos. Fonte: FEMAR 2000.

Componente	Amplitude (cm)	Fase (graus)
M2	19,6	071
S2	14,2	063
O1	10,6	075
K1	9,7	130
N2	5,9	150
Q1	4,9	066
K2	3,9	062
P1	3,2	126
M3	2,5	148
M4	2,5	108
M3	2,5	148
M1	2,2	132
MS4	1,6	188
MK3	1,4	051
NU2	1,1	139
MNS2	1,0	037
2N2	0,8	229
T2	0,8	063

3.2. Dados Adquiridos

Entre Fevereiro e Março de 2006 foram coletados dados de níveis, através de dois STDs (modelo SD-200 fabricado pela empresa Sensordata A. S.) . Dados de vento, pluviosidade e pressão atmosférica através da Estação Meteorológica Automática (modelo Vantage Pro Plus Wireless fabricada por Davis Instruments) foram coletados no período de Agosto de 2005 a Junho de 2006, cobrindo dessa maneira o período de coleta de dados de níveis. Todos os dados foram coletados em taxas amostrais de 30 minutos. A Figura 5 apresenta a localização dos pontos de coleta e a Tabela 3, as coordenadas em UTM 22S.



Figura 5: Localização dos pontos de aquisição de dados.

Tabela 3: Localização dos equipamentos.

Equipamento	UTM22S (x, y)
STD1	(750430, 6943674)
STD2	(754513, 6947208)
Est. Met.	(752650, 6946147)

3.2.1. Níveis

A medição de níveis no corpo lagunar teve duas finalidades principais a estimativa de condições de contorno na fronteira aberta no modelo numérico (Canal da Barra), e a calibração do modelo (Canto da Lagoa, ver Figura 5). Foram utilizados dois STDs para a coleta de dados no período de 18 de Fevereiro de 2006 a 22 de Março de 2006 compreendendo 31 dias de dados. O comprimento da série temporal é um fator importante no estudo que limita a interpretação dos resultados do modelo. Isso porque as condições meteo-oceanográficas variam consideravelmente sazonalmente e uma medida de 31 dias dificilmente será uma amostra significativa das possíveis combinações ambientais na Lagoa da Conceição. No entanto, diversas questões podem ser respondidas e inicialmente analisadas com os dados de níveis disponíveis. Medições de níveis mais longas podem servir simplesmente para refinar as análises.

Os equipamentos foram instalados em píers de atracação de embarcações na laguna em profundidades 1,2m (Canal da Barra) e 1,4m (Canto da Lagoa). Os STDs através de uma rotina interna utilizam a condutividade e a temperatura para estimar a salinidade, e junto com a medida de pressão, calcular o nível da água sobre o sensor do equipamento.

As séries temporais de níveis medidos se encontram na Figura 6, abaixo.

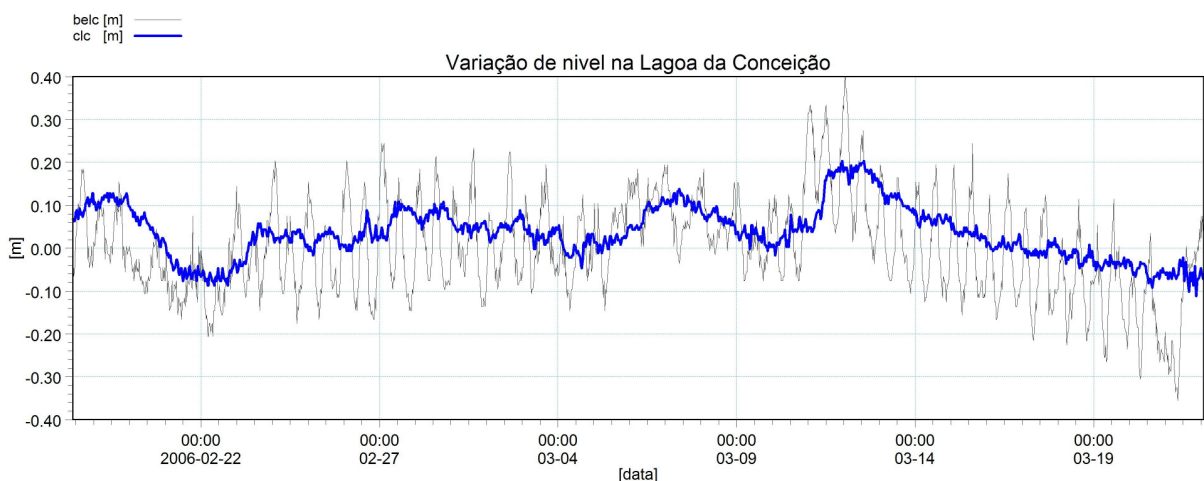


Figura 6: Dados de níveis na Lagoa da Conceição. Em preto (linha fina) o nível na Boca Externa e em azul (linha grossa) no Canto da Lagoa.

3.2.2. Dados Meteorológicos

Os dados de direção e magnitude do vento foram utilizados para forçar o modelo numérico. A aquisição dos dados foi realizada através de uma estação meteorológica automática Davis colocada junto às instalações do Laboratório de Oceanografia da UFSC localizado na Barra da Lagoa durante o período de 01-08-05 a 01-06-06, com taxa amostral de 30 minutos. A localização do equipamento pode ser observada na Figura 5.

É importante ressaltar que a estação meteorológica se localizou sob influência dos morros de entorno da laguna. A Figura 7 apresenta uma rosa de vento para o período de aquisição dos dados (01-08-05 a 01-06-06), e uma figura esquemática com a localização da estação meteorológica com a zona de sombra causada pelos morros.

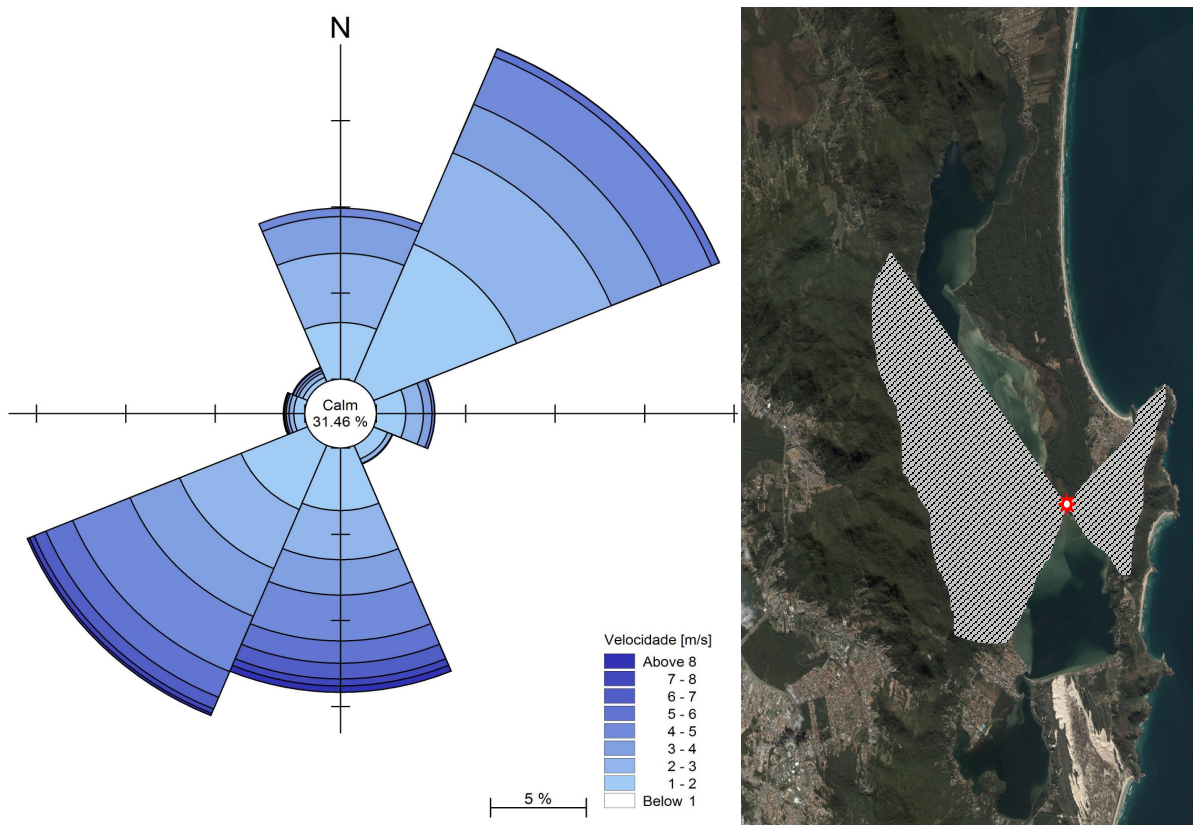


Figura 7: Rosa dos ventos para a Lagoa da Conceição para o período de 01-08-05 a 01-06-06. Na figura do lado direito estão evidenciadas as áreas de sombra geradas pelos morros de entorno da Lagoa da Conceição.

A zona de sombra se reflete diretamente na distribuição direcional dos dados apresentada na rosa de ventos, restringindo a presença dos ventos de Leste-Oeste. Existem morros protegendo toda a laguna dos ventos do quadrante Oeste. Os ventos do quadrante Leste, no entanto, têm obstáculos somente na região central da laguna e, portanto, espera-se

que na região Norte e Sul da laguna devam estar presentes. De qualquer maneira a distribuição dos dados de vento foi considerada representativa dos ventos na Lagoa da Conceição.

Pode-se notar também que em 31,46% do tempo o vento se encontrou abaixo de 1m.s^{-1} , sendo 18,44% correspondente ao período sem vento. Andrade (2001), analisou 41 meses de dados de ventos medidos três vezes ao dia pelo CLIMERH (Centro Integrado de Meteorologia e Recursos Hídricos de Santa Catarina) em uma estação meteorológica em São José, na grande Florianópolis.

É interessante notar que mesmo sendo em uma localização morfológica diferente os dados apresentaram praticamente o mesmo padrão dos dados coletados na laguna, principalmente pela ausência de ventos do eixo Leste-Oeste.

Andrade (*op.cit.*), definiu ainda o *vento reinante* como sendo o vento mais freqüente e o *vento dominante* como o maior produto entre freqüência de ocorrência e intensidade do vento. Os dados foram separados em seções de 22,5 graus (totalizando 16 setores). O vento reinante calculado para a Lagoa da Conceição foi, assim como em Andrade (*op. cit.*), proveniente da direção Norte, mas com intensidade de 1m.s^{-1} e freqüência de 8,2%, enquanto o autor tinha encontrado uma intensidade de 3m.s^{-1} e freqüência de 5,0%. O vento dominante foi do quadrante Sul com intensidade de 5m.s^{-1} e freqüência de 2,7%, Andrade (*op.cit.*) obteve um vento dominante do mesmo quadrante, mas com intensidade de 7m.s^{-1} . A diferença dos dados em relação aos apresentados por Andrade (*op.cit.*), pode ser devido ao período amostral (Andrade obteve dados de 41 meses com intervalo amostral de 8 horas). Os dados adquiridos foram, conforme item 3.2.1., coletados durante 10 meses com intervalo amostral de 30 minutos. Além disso, o autor não apresentou o número de seções utilizadas para discretizar direcionalmente os dados de vento.

A Figura 8 apresenta os dados de chuva a cada 30 minutos para o período de aquisição de dados pela estação meteorológica (01-08-05 a 01-06-06).

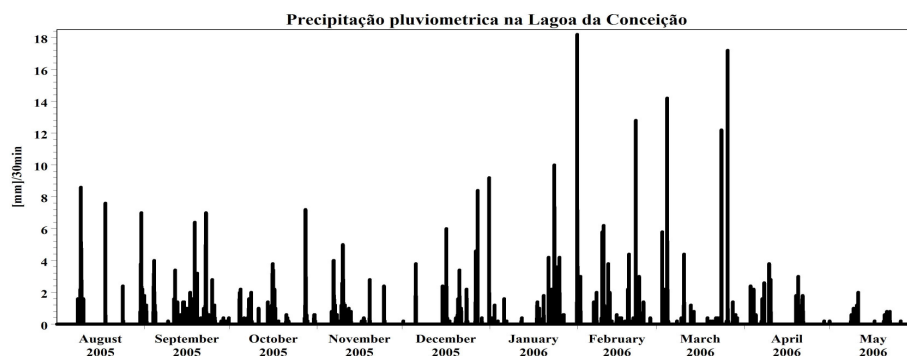


Figura 8: Precipitação pluviométrica na Lagoa da Conceição no período de (01-08-05 a 01-06-06).

4. MODELO NUMÉRICO MIKE21

4.1. Descrição do Modelo de Circulação Hidrodinâmica

O escoamento em um corpo de água pode ser convenientemente descrito por um modelo numérico, que nada mais é do que um conjunto de equações representando a conservação das propriedades do fluido que podem ser discretizadas e resolvidas no espaço e no tempo por métodos numéricos sobre uma grade computacional.

Segundo Rosman (1997), modelos bidimensionais podem ser divididos em dois tipos; modelos bidimensionais na horizontal (2DH), e modelos bidimensionais na vertical (2DV). O modelo utilizado no presente estudo é 2DH onde as variáveis são integradas na vertical, ou seja, possuem somente as dimensões (x, y, t) . Portanto, devem ser utilizadas em ambientes verticalmente homogêneos ou onde as estratificações ao longo da coluna d'água possam ser desconsideradas. Esse é o caso da Lagoa da Conceição porque, como referido no item 2.3., a laguna não apresenta estratificação na coluna d'água (ver trabalhos de Sierra de Ledo e Klingebiel, 1999, e Andrade, 2001).

O DHI Water & Environment Institute (formalmente conhecido como Danish Hydraulic Institute), desenvolveu dois modelos hidrodinâmicos, um em diferenças finitas (Mike 21 HD) e outro em volumes finitos (Mike 21 HD FM). Lino (2005) e Koefender (2005) utilizaram o modelo Mike 21 HD na Lagoa da Conceição (sem a inclusão do Canal da Barra) em seus trabalhos de conclusão de curso. Esse modelo apresenta uma grade retangular, e conseqüentemente, para incluir morfologias muito detalhadas, como a do Canal da Barra, seria necessário um espaçamento de grade muito pequeno o que aumentaria demasiadamente o tempo de cálculo e o tamanho dos arquivos de saída do modelo.

Comparações entre os dois modelos quanto ao tempo de modelação somente para a área da laguna (sem a inclusão do Canal da Barra) indicaram a maior eficiência computacional do modelo em volumes finitos. Dessa maneira, foi utilizado o modelo MIKE 21 Flow Model FM (versão 2008), que se baseia num sistema de grade não estruturada e foi desenvolvido para aplicações oceanográficas, costeiras e estuarinas.

Segundo (DHI Scientific Documentation, 2007), o sistema resolve as equações de Navier-Stokes para escoamentos incompressíveis mediadas pelo método de Reynolds e

considerando as suposições de pressão hidrostática e a aproximação de Boussinesq. Conseqüentemente, o modelo resolve, em cada elemento de grade computacional, equações de continuidade, quantidade de movimento, temperatura, salinidade e massa específica, que são completadas por um esquema de fechamento turbulento.

A discretização espacial das equações é realizada utilizando um método de Volumes Finitos centrado nos elementos de cada célula, utilizando-se o método de solução de Riemman (em um esquema de Roe) é utilizado. O domínio espacial é discretizado pela subdivisão do espaço em elementos não sobrepostos em uma grade não estruturada. O modelo apresenta três módulos principais: Módulo Hidrodinâmico, Módulo de Transporte e Módulo ECO Lab.

4.2. Equações Governantes do módulo hidrodinâmico

Por simplicidade as equações serão apresentadas no sistema de coordenadas cartesiano, no entanto, quando se utiliza uma grade não estruturada o modelo pode utilizar um sistema de coordenadas esféricas ou sigma. A descrição das equações nesses sistemas pode ser encontrada em DHI Scientific Documentation, (2007).

Em escoamentos naturais as velocidades são baixas e as variações de volume devidas às variações de pressão são desprezíveis. Por serem considerados incompressíveis, as equações de conservação da massa desse escoamento podem ser escritas como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 1$$

As equações de Conservação da Quantidade de Movimento por unidade de massa para fluídos incompressíveis utilizando a aproximação de Boussinesq nas direções x e y são respectivamente segundo DHI, (*op cit*):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \quad 2$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \quad 3$$

onde t é o tempo; x, y e z são as coordenadas Cartesianas; η é a elevação da superfície livre; d é a profundidade local (batimétrica); $h = \eta + d$ é a profundidade total; u, v e w são as componentes da velocidade nas direções x, y e z ; $f = 2\Omega \sin \phi$ é o parâmetro de Coriolis (Ω é a taxa de revolução angular e ϕ a latitude geográfica); g a aceleração da gravidade; ρ é a massa específica; v_t é o coeficiente de viscosidade turbulenta (ou Eddy viscosity) vertical; P_a é a pressão atmosférica; ρ_0 é a massa específica de referencia. S é a magnitude da descarga devido a fontes pontuais e (u_s, v_s) é a velocidade pela qual a água entra no domínio.

Os termos de tensão horizontal são descritos utilizando uma relação de gradiente de tensão, que é simplificada para:

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad 4$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad 5$$

onde A é a escala de viscosidade turbulenta horizontal.

As condições de contorno para u, v e w são:

Na superfície livre ($z = \eta$):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad 6$$

No fundo ($z = -d$):

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad 7$$

onde (τ_{sx}, τ_{sy}) e (τ_{bx}, τ_{by}) são as componentes x e y das tensões na superfície e fundo respectivamente.

A profundidade total, h , pode ser obtida pela condição de contorno cinemática na superfície, uma vez que o campo de velocidades é obtido pelas equações de continuidade e conservação de quantidade de movimento. No entanto, uma equação mais robusta é obtida pela integração vertical da equação local de continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS + \hat{P} - \hat{E} \quad 8$$

onde \hat{P} e \hat{E} são as taxas de precipitação e evaporação por unidade de massa respectivamente e \bar{u} e \bar{v} são as velocidades medidas na coluna d'água:

$$\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad \bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad 9$$

O fluido é considerado incompressível. Logo, a massa específica, ρ , não depende da pressão, mas somente da temperatura, T , e da salinidade, s , pela equação de estado

$$\rho = \rho(T, s) \quad 10$$

A equação utilizada é a equação geral de estado da UNESCO (em UNESCO, 1981).

4.2.1. Equação de transporte de escalares

A equação de conservação para uma quantidade escalar em três dimensões é dada por

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = F_c + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) - k_p C + C_s S \quad 11$$

Onde C é a concentração da quantidade escalar, k_p é a taxa de decaimento linear da quantidade escalar, C_s é a concentração da quantidade escalar na fonte e D_v é o coeficiente vertical de difusão. F_c é o termo horizontal de difusão que é definido por

$$F_c = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] C \quad 12$$

onde D_h é o coeficiente de difusão horizontal ($m^2.s^{-1}$).

4.2.2.O esquema de fechamento turbulento

Segundo Abbot e Basco (1989), movimentos turbulentos contribuem significativamente para o transporte de quantidade de movimento, temperatura e massa em praticamente todos os corpos d'água e tem uma influência determinante na distribuição do campo de velocidade, temperatura e concentração de substancias em um fluido.

No modelo Mike21 existe mais de um método para modelar processos turbulentos. A escolha de um valor constante para o coeficiente de viscosidade turbulenta é o modo, mas comum. Smagorinsky (1963 *in* DHI, 2007) propôs expressar as escalas de transporte por um parâmetro de viscosidade turbulenta relacionado com uma escala de comprimento. A escala de viscosidade turbulenta é definida como:

$$A = C_s^2 l^2 \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \quad 13$$

onde C_s pode ser considerada como constante, l é um comprimento característico e a taxa de deformação é dada por:

$$S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (i, j = 1, 2) \quad 14$$

4.2.3. Tensões superficiais e de fundo

A tensão de fundo, $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ é determinada por uma lei quadrática de atrito,

$$\vec{\tau}_b = \rho_0 c_f \vec{u}_b \left| \vec{u}_b \right| \quad 15$$

Onde c_f é o coeficiente de arraste de fundo e $\vec{u}_b = (u_b, v_b)$ é a velocidade do fluxo sobre o fundo. A velocidade de atrito associada às tensões de fundo é dada por:

$$U_{rs} = \sqrt{c_f \left| \vec{u}_b \right|^2} \quad 16$$

Para o escoamento em duas dimensões \vec{u}_b é a velocidade integrada na vertical e o coeficiente de arraste pode ser relacionado ao número de Chezy, C_z ($m^{1/2}.s^{-1}$), ou ao número de Manning, M ($m^{1/3}.s^{-1}$):

$$c_f = \frac{g}{C_z^2} \quad 17$$

$$c_f = \frac{g}{\left(Mh^{1/6} \right)^2} \quad 18$$

O número de Manning pode ser estimado pela rugosidade absoluta de fundo, k_s , utilizando a seguinte equação:

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}} \quad 19$$

A tensão superficial, $\vec{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$, é determinada pela ação do vento sobre a superfície do corpo de água. A tensão é definida por uma relação empírica semelhante à equação (15):

$$\tau_s = \rho_a c_d |\bar{u}_w| \bar{u}_w \quad 20$$

onde ρ_a é a densidade do ar, c_d é o coeficiente de arraste do ar, e $\vec{u}_w = (u_w, v_w)$ é a velocidade do vento a 10m sobre a superfície do corpo d'água. A velocidade de atrito associada às tensões superficiais é dada por:

$$U_s = \sqrt{\frac{\rho_a c_d |\bar{u}_w|^2}{\rho_0}} \quad 21$$

O coeficiente de arraste, c_d , pode ser considerado como constante ou variar linearmente com a velocidade do vento. A fórmula empírica proposta por Wu (1982), é utilizada no modelo para a parametrização do coeficiente de arraste:

$$c_d = \begin{cases} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} < w_b \\ c_b & w_{10} \geq w_b \end{cases} \quad 22$$

onde, c_a, c_b, w_a e w_b são constantes empíricas e w_{10} é a intensidade do vento a 10m sobre a superfície do corpo d'água. Os valores padrão para as constantes empíricas no modelo são: $c_a = 1,255 \times 10^{-3}$, $c_b = 2,425 \times 10^{-3}$, $w_a = 7m.s^{-1}$ e $w_b = 25m.s^{-1}$, esses valores são, segundo DHI (*op. cit.*), razoáveis para aplicações em oceanos abertos.

4.3. Solução Numérica

As equações são resolvidas no domínio utilizando um método de Volumes Finitos. O domínio espacial é discretizado pela subdivisão do contínuo em elementos de malha não sobrepostos separados por nós.

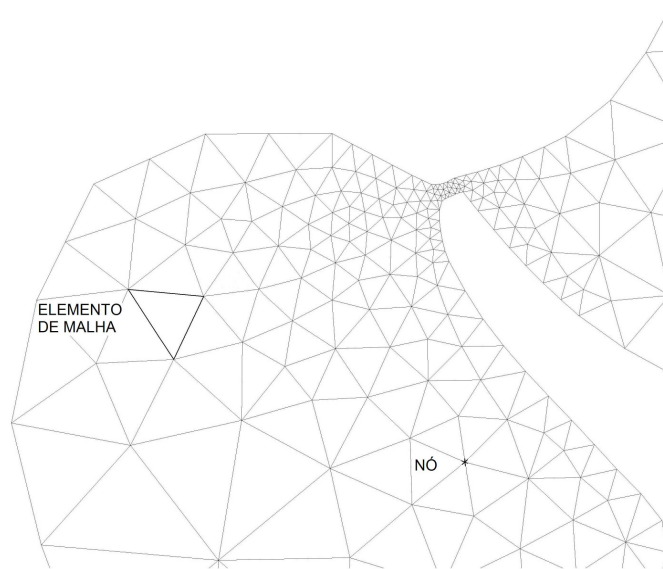


Figura 9: Malha triangular utilizada na modelação da Lagoa da Conceição.

A principal característica desse método é a integração das equações governantes sobre um volume de controle para resultar em equações discretizadas nos pontos nodais.

Para a versão em duas dimensões os elementos podem ser arbitrariamente moldados, mas a forma mais comum é a triangular. As variáveis dependentes do sistema são representadas como uniformes em cada elemento da grade e associadas ao centro de cada célula.

A forma integral do sistema de equações de água rasa em duas dimensões pode ser escrita em um sistema Cartesiano como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F(U) = S(U) \quad 23$$

onde U é o vetor das variáveis conservadas, $F = F^I - F^V$ é o função do vetor de fluxo e S é o vetor dos termos de fonte. Que por sua vez podem ser escritas como:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ h\bar{u} \\ h\bar{v} \end{bmatrix} \quad 24$$

$$F_x^I = \begin{bmatrix} h\bar{u} \\ h\bar{u}^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - d^2) \\ h\bar{u}\bar{v} \end{bmatrix}, F_x^V = \begin{bmatrix} 0 \\ hA \left(2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \\ hA \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \quad 25$$

$$F_y^I = \begin{bmatrix} h\bar{v} \\ h\bar{v}\bar{u} \\ h\bar{v}^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - d^2) \end{bmatrix}, F_y^V = \begin{bmatrix} 0 \\ hA \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ hA \left(2 \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \quad 26$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial x} + f\bar{v}h - \frac{gh^2}{2\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_o} + hu_s \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial y} + f\bar{u}h - \frac{gh^2}{2\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{\rho_o} + hv_s \end{bmatrix} \quad 27$$

Os subscritos I e V denotam os fluxos invíscidos (convectivo) e viscoso respectivamente. Integrando a equação (23) sobre um elemento de grade e utilizando o teorema de Gauss para reescrever o fluxo integral, tem-se:

$$\int_{A_i} \frac{\partial U}{\partial t} d\Omega_a - \int_{A_i} S(U) d\Omega_a = - \int_{\Gamma_i} (F \cdot n) ds \quad 28$$

onde A_i é a área do elemento de malha, Ω_a é a variável de integração definida em A_i , Γ_i é o perímetro do elemento, ds é a variável de integração ao longo do perímetro e n é o vetor unitário normal à superfície A_i .

Os fluxos convectivos horizontais são calculados utilizando a aproximação de Roe através da solução de Riemann (*in* DHI Scientific Documentation 2007). Um sistema de primeira ordem é utilizado para a integração espacial.

Para a integração no tempo um esquema explícito de Euler é utilizado. A utilização de um método explícito implica em uma limitação no intervalo de integração temporal para uma dada discretização espacial. Essa limitação se dá porque a velocidade com a qual a informação se propaga no modelo, c_Δ , deve ser pelo menos duas vezes mais rápida que a velocidade de propagação de uma onda em água rasa, c .

Sendo:

$$c_\Delta = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad 29$$

onde Δt é o espaço de tempo, Δl é o comprimento característico. Enquanto que:

$$c = \sqrt{gh} \quad 30$$

Portanto, pode se definir um espaço de tempo ou um tamanho mínimo de elemento de grade de maneira a permitir que:

$$c_\Delta \geq 2c \quad 31$$

Que pode ser rearranjado de maneira a resultar na conhecida condição de estabilidade CFL, ou número de Courant.

$$\frac{1}{2} \leq c \frac{1}{c_\Delta} \quad \text{ou} \quad C_r \leq \sqrt{gh} \frac{\Delta t}{\Delta l} \quad 32$$

onde $C_r \leq 0,5$ é o valor limite da condição CFL.

As condições de fronteira do modelo podem ser definidas de três maneiras, fronteiras fechadas, abertas e alagamento/secagem (*flooding and drying*).

Nas condições de fronteira fechadas (fronteiras de terra) os fluxos normais à fronteira são forçados a serem nulos para todas as variáveis. Para a equação de conservação da quantidade de movimento linear leva a condições deslizantes ao longo das fronteiras fechadas.

As fronteiras abertas podem ser especificadas tanto como uma série temporal de descarga ou elevação da superfície.

Se a opção de alagamento e secagem é escolhida no modelo, as fronteiras fechadas são consideradas móveis. Essa teoria está baseada nos trabalhos de Zhao et al. (1994), e Sleigh et al. (1998) *in* DHI Scientific Documentation (2007). Quando as profundidades passam de um determinado limite mínimo o problema é reformulado, e somente quando as profundidades ultrapassam um limite ainda menor os elementos são excluídos dos cálculos. Quando a reformulação é utilizada os fluxos de quantidade de movimento são considerados nulos e consideram-se somente os fluxos de massa. As profundidades em cada elemento de célula são monitoradas e os elementos são classificados como, *seco*, *alagado* ou *molhado*.

$$h_{seco} < h_{alagado} < h_{molhado}$$

Os valores padrão são $h_{seco} = 0,005m$, $h_{alagado} = 0,05m$, $h_{molhado} = 0,1m$.

Deve-se notar ainda que para valores muito pequenos de $h_{molhado}$, velocidades de fluxo excessivamente altas podem ocorrer e causar problemas de instabilidade numérica.

5. CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração é o processo de ajuste de parâmetros do modelo em modo a garantir a melhor concordância possível entre os resultados apresentados pelo modelo e medições ambientais. No caso de modelos hidrodinâmicos Gerritsen *et al.*, (1995) *apud* Tobón, (2002), afirma que a calibração do modelo pode ser realizada utilizando-se primeiramente a rugosidade de fundo e em uma segunda instância, a batimetria e as condições de contorno. Lino (2005), evidenciou que os resultados do modelo da Lagoa da Conceição, com rugosidade constante ou rugosidade variável conforme a composição sedimentar (ver Figura 2), não apresentam diferenças significativas. Ou seja, o modelo da laguna foi pouco sensível a pequenas variações de rugosidade ao longo do domínio. Esse fato, somado a medição de dados de níveis em somente dois pontos da laguna (desembocadura externa do Canal da Barra e Canto da Lagoa, ver Figura 5) nos levou a realizar a calibração do modelo através da variação de um coeficiente de Manning constante para todo o domínio. A calibração foi realizada também através de mudanças nos valores de viscosidade turbulenta do modelo.

Para a calibração do modelo da Lagoa da Conceição foram feitas diversas simulações incluindo diferentes cenários de rugosidade de fundo, pequenas correções nos valores de profundidade da malha batimétrica e também, mudanças nos valores de viscosidade. A correção de pequenos pontos na malha batimétrica foi necessária para corrigir pequenos erros de interpolação da malha (i.e. pontos demasiadamente rasos) que podem influenciar significativamente no resultado do modelo.

Duas séries temporais de níveis d'água no período de 18/02/06 a 22/03/06, totalizando 31 dias foram utilizadas para a calibração do modelo. Para forçar o modelo foram utilizados os dados do STD na desembocadura externa do canal, e para comparação com níveis do modelo, as medições do STD no Canto da Lagoa. A localização dos pontos pode ser observada na Figura 5, as séries temporais de nível utilizadas para forçar (desembocadura externa) e para calibrar o modelo (Canto da Lagoa), na Figura 6. O modelo foi forçado ainda com os dados de vento adquiridos pela estação meteorológica (Figura 7).

A calibração do modelo foi realizada através da variação de dois parâmetros de ajuste do modelo, *rugosidade de fundo* e *viscosidade turbulenta*. Para cada campo de nível calculado pelo modelo foi extraída uma série de nível no mesmo ponto de aquisição de dados no Canto

da Lagoa (Figura 5). A comparação dos resultados com o nível medido foi realizada de duas maneiras diferentes, pela simples comparação visual das duas séries de nível e pela avaliação do melhor coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Nash e Sutcliffe, 1970).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é utilizado para avaliar a capacidade de modelos hidrodinâmicos descrever descargas em escoamentos naturais. Moriasi *et al* (2007), afirma que o coeficiente de Nash Sutcliffe também pode ser utilizado para analisar outros resultados além de dados de descarga, como, por exemplo, parâmetros de qualidade de água e níveis d'água. O coeficiente pode ser definido como uma razão entre o *erro quadrático médio*:

$$\varepsilon^2 = \sum_{t=1}^T (\eta_o^t - \eta_m^t)^2 \quad (33)$$

onde η_o é o nível dos dados adquiridos em campo, η_m é o nível modelado, η^t é o nível no tempo t .

e a *Variância*:

$$\sigma^2 = \sum_{t=1}^T (\eta_o^t - \bar{\eta}_o)^2 \quad (34)$$

onde $\bar{\eta}_o$, é a média da série de dados.

Dessa maneira o coeficiente de Nash-Sutcliffe pode ser definido como:

$$E = 1 - \frac{\varepsilon^2}{\sigma^2} \quad (35)$$

O coeficiente pode variar de $-\infty$ a 1, mas quanto mais próximo de 1 mais acurado é o modelo. Um resultado de eficiência igual a zero ($E = 0$) indica que o modelo tem a mesma acurácia da média da série de dados, e menor que zero o modelo é pior que a média.

O primeiro parâmetro a ser ajustado foi, a rugosidade de fundo, através da variação número de Manning (M). Nesse passo foi mantido o valor padrão do coeficiente de viscosidade turbulenta ($0,002 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). O valor de Manning inicial foi de ($M = 32 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$) e

como a análise visual indicou um sub-estimativa dos níveis, a resistência foi diminuída até o valor de $M = 60 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, que apresentou o melhor coeficiente de Nash-Sutcliffe. O valor encontrado se encontra na Tabela 4. O próximo passo foi o ajuste do valor de viscosidade turbulenta que do valor inicial ($0,002 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), foi ajustado até o valor de $2 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, que apresentou o melhor coeficiente de Nash-Sutcliffe encontrado, Tabela 4.

A Tabela 4 apresenta os valores de Nash-Sutcliffe para os principais resultados da calibração. O valor em negrito (0,47), é o coeficiente do modelo calibrado.

Tabela 4: Principais resultados dos modelos e os respectivos coeficientes de Nash-Sutcliffe.

	Nash-Sutcliffe
Valores Iniciais*	0,15
Número de Manning = 60	0,32
Viscosidade Turbulenta = $2 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	0,47

Valores Iniciais: Manning = 32, Viscosidade Turbulenta = $2 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

As Figuras 10 e 11, abaixo, apresentam a variação do coeficiente de Nash-Sutcliffe durante o processo de calibração.

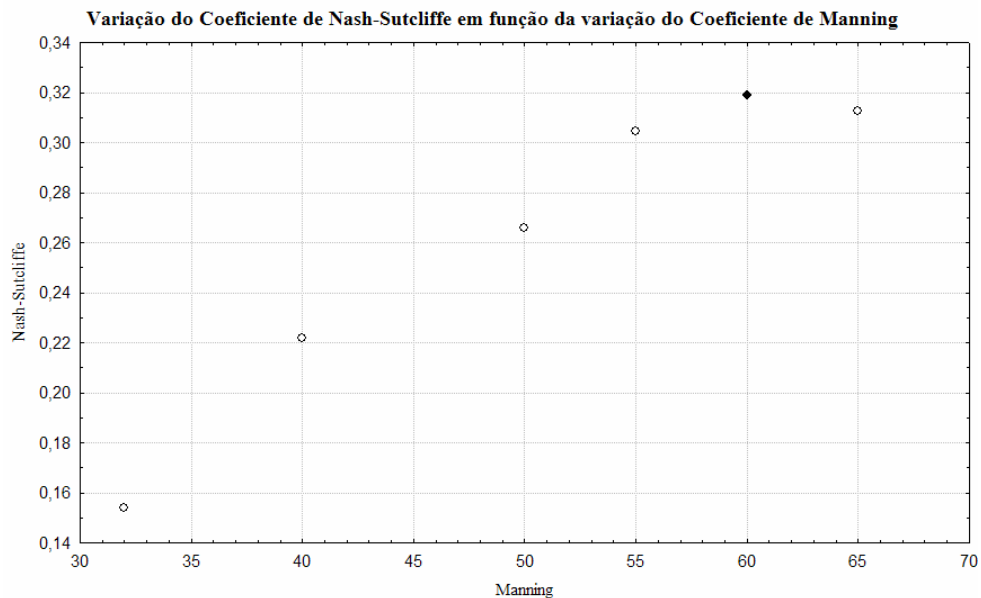


Figura 10: Variação do Coeficiente de Nash-Sutcliffe durante a calibração do Coeficiente de Manning.

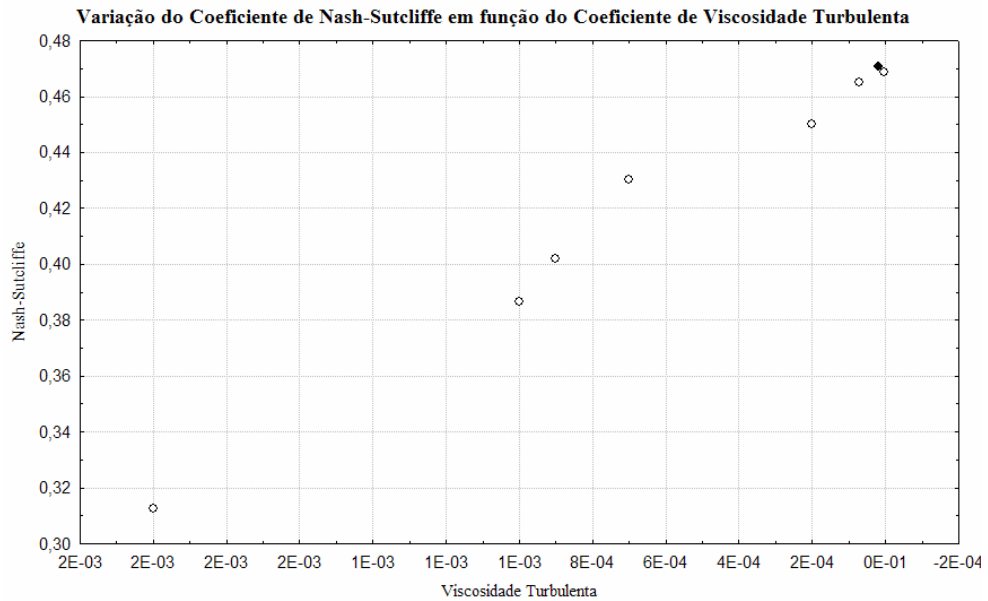


Figura 11: Variação do Coeficiente de Nash-Sutcliffe durante a calibração do Coeficiente de Viscosidade Turbulenta.

Com essa análise puderam-se escolher os valores dos parâmetros de ajuste do modelo que mais aproximem o resultado do modelo aos dados de nível obtidos em campo. Dessa maneira, acredita-se escolher o modelo que melhor represente os fenômenos de interesse para a hidrodinâmica da Lagoa da Conceição. Os principais inputs do modelo calibrado se encontram abaixo:

Forçantes

- Níveis d'água instantâneos
- Campo de ventos instantâneos

Parâmetros de execução

- Intervalo de tempo mínimo: 0,1s
- Intervalo de tempo máximo: 1800s
- Número de Courant crítico: 0,8
- Número total de passos de tempo: 1520

Parâmetros físicos

- Atrito de fundo: coeficiente de Manning, $M = 60m^{1/3}.s^{-1}$
- Viscosidade turbulenta: coeficiente de difusão turbulenta = $2 \times 10^{-5} m.s^{-1}$
- Atrito do Vento = 0,002425

A Figura 12 apresenta as séries de nível medido no Canto da Lagoa e o resultado calibrado do modelo.

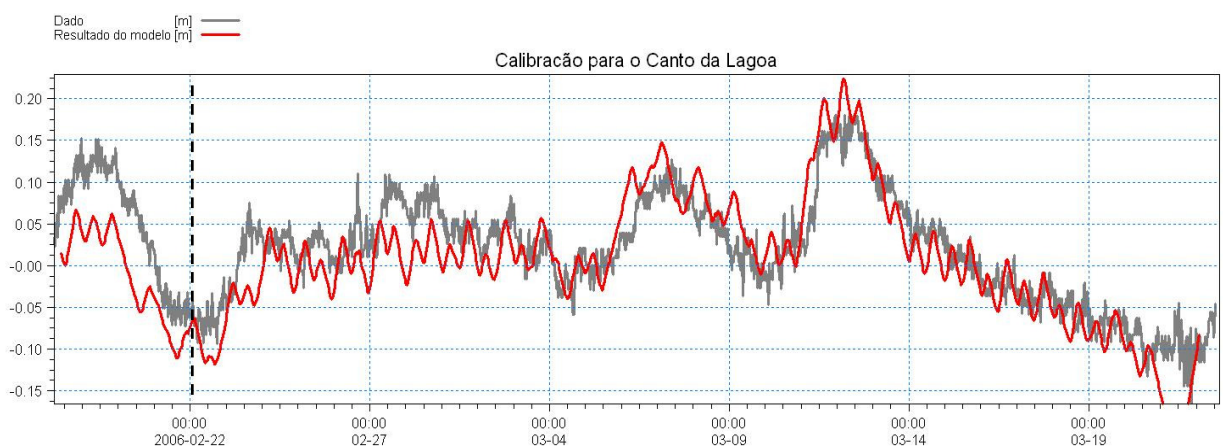


Figura 12: Comparação entre as oscilações dos níveis de água, medidos e simulados, para a Estação Maregráfica do Canto da Lagoa. Situação do modelo calibrado. A linha em segundo plano é o nível medido (cinza) e a linha no primeiro plano (vermelha) é o resultado do modelo.

A linha tracejada na figura acima indica o período de aquecimento do modelo, cerca de quatro dias e que não foi considerado nas análises.

Como os níveis medidos não foram referenciados a um datum conhecido há uma incerteza quanto à posição média dos dados para a comparação com o resultado do modelo. Dessa maneira foi feito um nivelamento a posteriori. Ao nível medido foi adicionado 2,8cm, que é a diferença entre as médias das séries temporais (calibrada e medida).

Os resultados foram considerados satisfatórios, principalmente no que se refere à amplitude de variação de longo período.

Outra comparação útil é a avaliação dos resultados em diferentes frequências. Através de uma rotina de filtro passa baixo/alto do módulo Mike Zero (Mike Zero são uma série de rotinas para pré e pós-processamento de dados). A rotina é uma Transformada Rápida de Fourier (FFT - Bendat e Piersol, 1986, *apud* DHI – Mike 21 Toolbox manual, 2007), para

separar um sinal em frequências desejadas. Foram analisadas as frequências maiores e menores que 36hs para evidenciar a coerência dos resultados obtidos. Como os principais constituintes harmônicos se encontram abaixo do período de 36hs espera –se com essa filtragem separar a componente astronômica da componente meteorológica,ou sub-mareal.

A Figura 13 apresenta a comparação dos níveis para frequências maiores e menores que 36 horas. Os picos na baixa frequência, apesar de não apresentarem o mesmo nível, apresentaram a mesma amplitude, que é o fator mais relevante para gerar o escoamento na laguna.

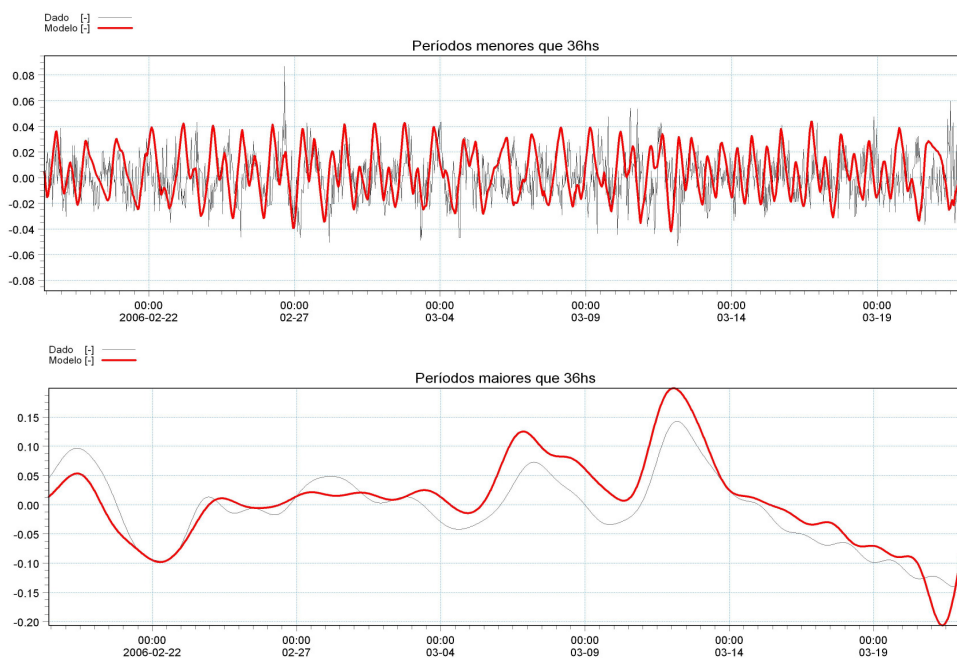


Figura 13: Comparação dos resultados calibrados para períodos menores que 36hs (acima) e para períodos maiores que 36hs (abaixo).

6. APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

6.1. Malha Computacional

Uma coerente discretização espacial do domínio a ser modelado é fundamental para possibilitar o cálculo correto dos campos de fluxos do ambiente. A geração da malha computacional deve levar em consideração dois pontos fundamentais. De um lado, deve-se ter uma malha que seja suficientemente refinada para descrever as mudanças nos contornos de fundo e resolver as equações governantes do escoamento. Por outro lado, por limitações computacionais, deve-se tentar obter uma malha que tenha o mínimo número de pontos de grade com maior área possível. Isso porque uma malha demasiadamente refinada aumenta significativamente o tempo de simulação devido à condição de estabilidade de Courant (ou CFL, equação (29)). Nesse sentido, a malha não estruturada utilizada pelo modelo possibilita a discretização espacial do domínio de forma mais eficiente, diminuindo o esforço computacional envolvido na modelação em comparação com uma grade retangular.

Na etapa de calibração foi realizado um teste para a definição da melhor malha computacional para a Lagoa da Conceição. O teste consistiu em simular sete dias da série temporal (de 22/2/2006 a 29/2/2006, ver Figura 6) em malhas batimétricas com quantidade de elementos de malha cada vez menores. O resultado de cada modelação foi comparado com a série de níveis no Canto da Lagoa (Figura 5), através do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, também utilizado na calibração do modelo. As principais características da malha computacional, utilizada na Lagoa da Conceição, se encontram na Tabela 5, e uma ilustração da malha no ANEXO 1.

Tabela 5: Principais características da malha computacional. Os valores em itálico indicam a malha utilizada.

Número de elementos	25620	10338	6499	<i>3763</i>	1336
Mediana da área [m ²]	62	86	154	<i>155</i>	665
Área mínima [m ²]	0,23	0,46	0,54	<i>0,69</i>	0,72
Área máxima [m ²]	2727	12542	14966	<i>49547</i>	201211
Tempo de execução [hs]	165	60	32	<i>8</i>	3
Nash-Sutcliffe	0,49	0,47	0,45	<i>0,47</i>	-1,13

É interessante ressaltar que foram utilizados 2114 elementos de grade no Canal da Barra, ou seja, 56% do número de elementos utilizado na malha. Os menores elementos se encontraram no canal de acesso ao Canto da Lagoa devido à pequena dimensão desse canal (8m de largura).

É importante ressaltar que a única fronteira aberta, localizada na desembocadura externa do Canal da Barra foi inserida a cerca de 200m dentro do canal. Isso foi feito para coincidir à fronteira do modelo com a localização onde foi adquirido o dado de nível. Para os cenários forçados com os níveis astronômicos a batimetria foi estendida até o limite do oceano. O esquema indicando o prolongamento da batimetria se encontra no ANEXO 1.

A interpolação dos dados batimétricos descritos no item 3.1.1. na malha não estruturada produziu os contornos de fundo apresentados na Figura 14.

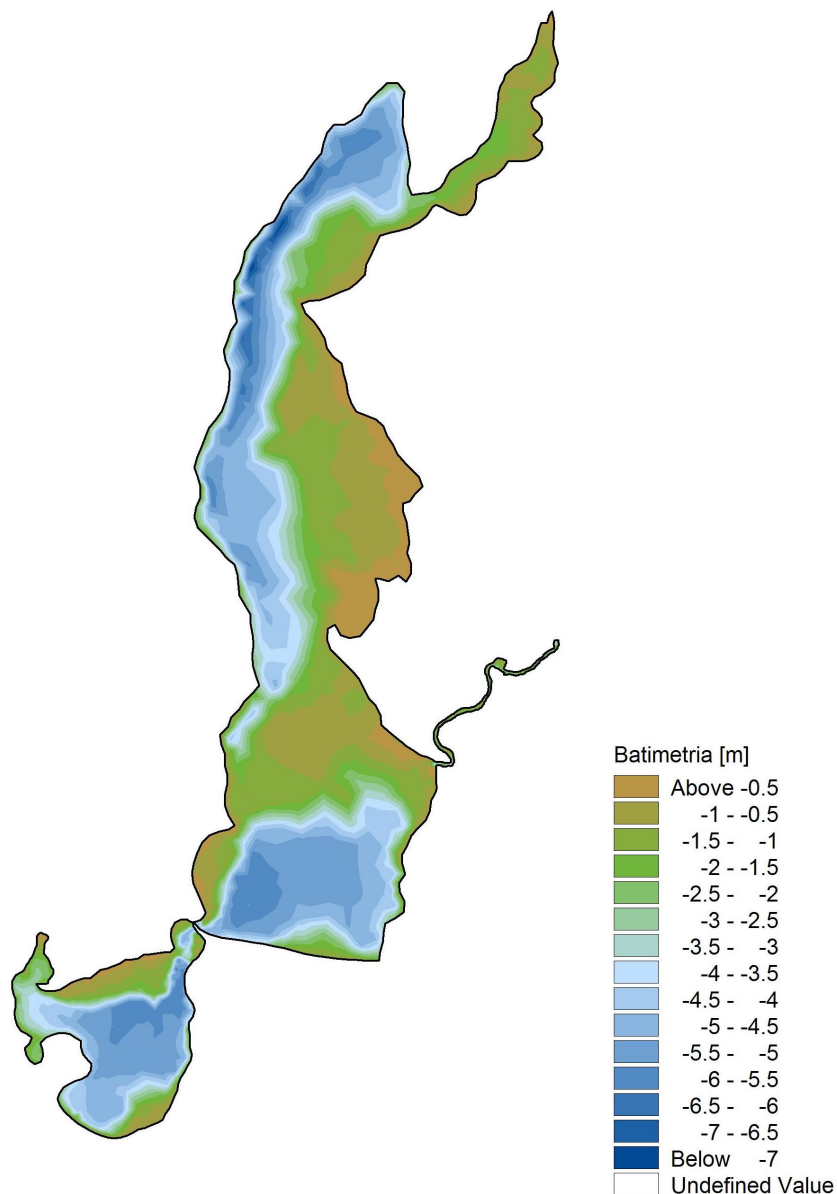


Figura 14: Contornos de fundo da Lagoa da Conceição.

6.2. Cenários Hidrodinâmicos para avaliar a influência do Canal da Barra na hidrodinâmica da laguna.

Para cada questão a ser investigada foram realizados cenários específicos que diferem, basicamente, nas forçantes meteo-oceanográficas e na região modelada. Todos os cenários foram realizados para um período de aproximadamente 31 dias, correspondente ao período máximo dos dados de condição de contorno aberta (Figura 6).

O processo de atenuação da oscilação de nível do oceano pelo Canal da Barra pode ser facilmente compreendido pela analogia a um mecanismo bastante conhecido em hidráulica de canais, o sistema de *vasos comunicantes*, que nada mais é do que dois tanques de água interligados por um duto.

Nesse sistema, a eficiência de transferência de energia entre dois corpos d'água depende da frequência de variação do nível em um dos corpos (oceano) e das características do duto condutor (Canal da Barra), p. ex. rugosidade, comprimento, forma e área do duto. Se os dois corpos de água estiverem conectados por um duto fino e bastante rugoso (ou com uma pequena área) as variações de níveis rápidas em um lado do duto não serão completamente transferidas para o outro lado do tanque, uma vez que a rugosidade do duto tende a consumir energia e não permite que a variação do nível ocorra plenamente, havendo um decréscimo de amplitude e atraso de fase na variação do outro lado do tanque. Se a variação for rápida para a escala do sistema o outro lado do tanque praticamente não responderá a variação de nível. Por outro lado, se a variação for lenta há tempo suficiente para que a variação de nível em um tanque seja seguida pelo outro tanque. Em situações reais, como na Lagoa da Conceição a propagação da maré pelo Canal da Barra leva a transformação de parte da energia potencial em energia cinética que é consumida pelo atrito, levando a perda de energia.

Dessa maneira, espera-se que na Lagoa da Conceição oscilações em frequências mais altas sejam mais amortecidas pelo Canal da Barra, enquanto que variações de nível na boca externa em frequências mais baixas tenham maior facilidade de adentrar o sistema.

A atenuação do nível pelo Canal da Barra foi analisada em duas etapas: 1) atenuação do nível medido e 2) atenuação dos componentes harmônicos. Avaliando a atenuação de nível pelo Canal da Barra em diferentes frequências pode-se evidenciar a importância do canal na diminuição da variação do nível interno da Laguna.

6.2.1. Atenuação do Nível Medido

O cenário do nível medido utilizou a grade batimétrica apresentada no ANEXO 1 e o nível na desembocadura externa do Canal da Barra, apresentado na Figura 6, para forçar o modelo. Foram comparados os resultados em sua amplitude máxima de variação e da energia potencial para o nível medido e para frequências maiores e menores que 36 horas.

A energia dos sinais foi calculada através da variância:

$$E = \frac{\sum_{t=1}^T (\eta_t - \bar{\eta}_t)^2}{n} \quad (36)$$

o índice t indica o tempo e $\bar{\eta}_t$ a média da série.

6.2.2. Atenuação dos Componentes Harmônicos

Nesse cenário foi utilizada a grade batimétrica estendida até o limite com o oceano, conforme apresentado no 6.1. (ver ANEXO1). Os constituintes harmônicos, apresentados na Tabela 2, foram utilizados para gerar os níveis utilizados na fronteira aberta. Cada série de nível foi extraída em dez pontos ao longo do canal e avaliada o decréscimo da amplitude e de energia relativa à amplitude do nível. A Figura 15 apresenta a localização dos pontos ao longo do canal.

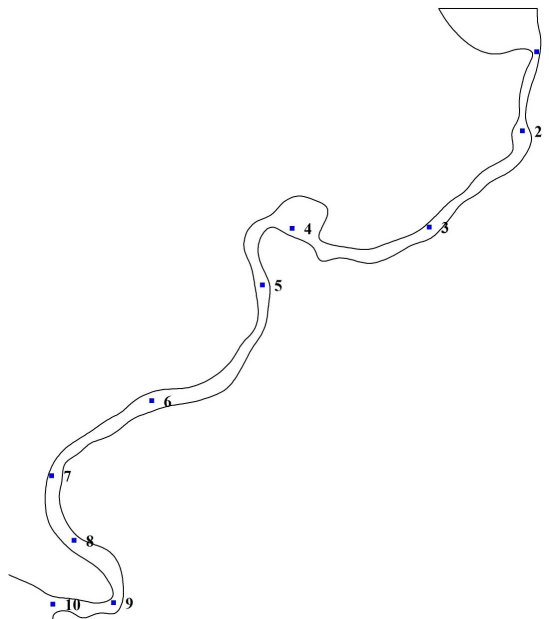


Figura 15: Localização dos pontos de extração dos dados ao longo do Canal da Barra.

6.3. Cálculo do Volume de Troca e Tempo de Residência

A análise da hidrodinâmica da Lagoa da Conceição foi realizada através dos cálculos do Volume de Troca, que é uma estimativa do volume de água trocado num sistema por um determinado período e do Tempo de Residência, que nada mais é do que o tempo necessário para um sistema renovar suas águas.

6.3.1. Volume de troca

O prisma de maré é comumente definido como o volume de água que trocado por uma lagoa em um ciclo de maré (normalmente M2). No entanto, na Lagoa da Conceição a maré meteorológica apresenta maior relevância para a circulação do sistema (ver itens 7.1., 7.2. e 7.3. do próximo capítulo), e a série temporal não é longa o suficiente para definir um período característico de variação do período dessa maré (alguns dias). Dessa maneira, optou-se por definir o termo *volume de troca*, devido à ausência de um ciclo temporal característico. Mangor (2004), afirma que o volume de troca pode ser calculado multiplicando a superfície da laguna pela variação máxima de nível.

O volume de troca (V_t) foi calculado pela integração do produto da área de cada elemento (A'), com a amplitude máxima de variação para o período, (a_{\max}), da seguinte maneira:

$$V_t = \sum (a'_{\max} \times A') \quad (37)$$

onde, A' é a área de um elemento de malha e a amplitude máxima de variação a'_{\max} , foi calculada como:

$$a'_{\max} = \eta'_{\max} - \eta'_{\min} \quad (38)$$

onde η'_{\max} e η'_{\min} , são as elevações máximas e mínimas em cada elemento de malha.

O maior nível da série temporal (η'_{\max}) ocorreu no dia 11 de Março 2006 às 16:00 enquanto que o menor nível (η'_{\min}) em 20 de Março de 2006 às 22:00, totalizando aproximadamente 9 dias de intervalo (ver Figura 6). Os campos de elevação da superfície para esses dois casos podem ser encontrados no ANEXO 2, e no ANEXO 3 os campos para o Canal da Barra para a mesma situação.

É importante ressaltar que, como o período total da série de dados é de somente trinta e um dias, espera-se que o volume de troca analisado em um período distinto possa apresentar resultados bastante diferentes.

6.3.2. Tempo de Residência.

A estimativa do tempo de residência foi realizada utilizando o módulo de transporte advectivo do modelo hidrodinâmico (ver item 4.2.1.), que permite calcular o transporte de uma determinada substância no domínio. No presente estudo foi incluído uma substância com concentração inicial igual a 100 e avaliado o decréscimo desse valor ao longo dos 31 dias de simulação.

O decréscimo da concentração da substância no domínio ocorre por duas maneiras, pelo transporte advectivo e pela dispersão. O transporte advectivo é o transporte de massa, que efetivamente renova a água do sistema. A dispersão é responsável pela solubilização com os compartimentos vizinhos.

Na fronteira aberta do modelo o fluxo de entrada ocorre com concentração nula (0), que pode ser interpretada com *água limpa*.

Uma vez que o modelo de transporte calcula a concentração da substância integrada na coluna d'água em cada elemento de malha o cálculo da concentração total no domínio em cada espaço de tempo também deve ser corrigida pelo volume de cada elemento. A concentração total em cada espaço de tempo foi calculada da seguinte maneira:

$$C_F = \frac{\sum (\eta'_t + h') \times A' \times C'_t}{\sum (h' \times A')} \quad (39)$$

onde η'_t é o nível em um elemento de malha para cada espaço de tempo t , h' é a profundidade em um elemento de malha e C'_t a concentração da substância em um elemento em um espaço de tempo.

A avaliação de resultados preliminares indicou que a concentração ao final do período modelado (31 dias) ainda é bastante alta (78% para a Lagoa da Conceição), e o tempo necessário para atingir concentrações baixas (p. ex. 10%) é consideravelmente mais longo que o tempo simulado. Dessa maneira, modelos estatísticos para a estimativa dos tempos de residência não seriam estatisticamente confiáveis. A alternativa foi calcular e comparar os tempos de residência encontrados nos diferentes cenários relativos ao tempo de residência do modelo calibrado.

Os resultados foram avaliados quanto ao decréscimo integrado espacialmente para cada dia modelado. O decréscimo da concentração foi inserido em um gráfico logarítmico e ajustado uma linha de tendência exponencial. O tempo de residência foi estimado como sendo o tempo necessário para a concentração integrada diminuir até 10%, 5% e 1%. A concentração observada no último passo de tempo também foi analisada para evidenciar a distribuição espacial do nível de contaminação (ou concentração) no domínio.

6.3.2.1. Definição do coeficiente de dispersão do módulo de transporte

Como não se dispõe de dados de coeficiente de dispersão para a Lagoa da Conceição foi utilizado um valor padrão para todos os cenários avaliados ($0,01\text{m}^2/\text{s}$). Esse valor é utilizado pelo DHI em diversos estudos hidrodinâmicos quando não se dispõe de dados de dispersão.

Como a equação (11) depende claramente do intervalo de tempo e do espaçamento de grade, que foram mantidos constantes em todos os cenários.

Mesmo utilizando um coeficiente de dispersão amplamente utilizado pode haver uma diferença para um caso real. O *número de Péclet*, segundo Abbot e Basco (1989), é um número adimensional que relaciona a taxa de advecção com a taxa de difusão de um fluido e pode ser calculado da seguinte maneira:

$$P\Delta = \frac{(u)\Delta x}{\Delta t} \quad (40)$$

onde u é a velocidade em um elemento de grade e Δx é a área do elemento. Para $P\Delta \leq 2$, a dispersão domina a diluição do contaminante para valores de $P\Delta > 10$ o transporte convectivo é dominante. O cálculo do número de Péclet foi realizado em diversas circunstâncias (áreas do elemento e velocidades de fluxo). Como os elementos da grade apresentam menores áreas onde as velocidades são maiores (no Canal da Barra e no canal de acesso ao Canto da Lagoa), o número de Péclet sempre foi maior que 10. Isso indica que, mesmo tendo incertezas sobre a validade do valor do coeficiente de dispersão utilizado, o valor tem importância secundária, uma vez que o transporte convectivo é dominante no modelo.

6.3.3. Cenários

Os cenários utilizados para o cálculo do volume de troca e do tempo de residência foram realizados em dois domínios além da Lagoa da Conceição, Canto da Lagoa e extremidade Norte. A escolha de analisar esses sub-sistemas separadamente se deve ao fato de estarem posicionados nas extremidades da laguna, o que dificulta a troca d'água pelo Canal da Barra (localizado em uma região central da laguna), por apresentarem estrangulamentos e nos últimos anos terem sido verificados indícios de crises anóxicas nessas regiões (ver item 2.5). A Figura 16 apresenta a delimitação das regiões modeladas.

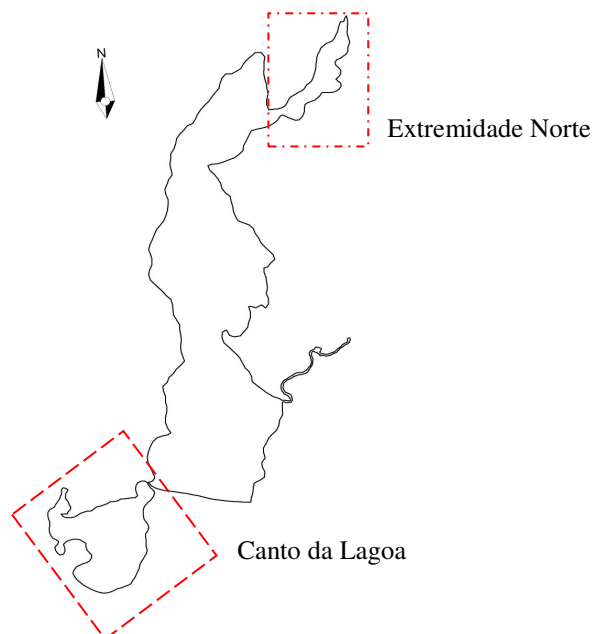


Figura 16: Delimitação das áreas utilizadas nos cálculos dos volumes de troca.

A Tabela 6 apresenta os cenários utilizados para a avaliação dos volumes de troca e também dos tempos de residência.

Tabela 6: Cenários utilizados para o cálculo do volume de troca e do tempo de residência.

Cenário	Domínio	Condição de Fronteira	Forçante	Mudança na Batimetria *	Fonte**
L1	Lagoa da Conceição	Nível medido	Vento	Não	
L2		Nível medido	Não	Não	
L3		Nível astronômico	Não	Não	
L4		Nível medido	Vento	Canal + 1m.	
L5		Nível medido	Vento	Canal + 2m.	
L6		Nível medido	Vento	Não	Rio = 0
L7		Nível medido	Vento	Não	Rio = 100
C1	Canto da Lagoa	Nível medido	Vento	Não	
C2		Nível medido	Vento	Sim, ver Tabela 7	
C3		Nível medido	Vento	Canal + 1m.	
C4		Nível medido	Vento	Canal + 2m.	
N1	Extremidade Norte	Nível medido	Vento	Não	
N2		Nível medido	Vento	Canal + 1m.	
N3		Nível medido	Vento	Canal + 2m.	
N4		Nível medido	Vento	Não	Rio = 0
N5		Nível medido	Vento	Não	Rio = 100

* Canal + 1m e Canal + 2m significam o aprofundamento do Canal da Barra em 1 e 2 metros, respectivamente.

** Rio João Gualberto com concentração da substância igual a zero (Rio = 0) e 100 (Rio = 100).

Os cenários L1, C1 e N1, utilizaram as mesmas condições do modelo calibrado.

A Tabela 7 apresenta as mudanças realizadas na seção do canal sob a Avenida das Rendeiras, que dá acesso ao Canto da Lagoa.

Tabela 7: Dimensões do canal de acesso ao Canto da Lagoa.

Cenário	Largura [m]	Profundidade [m]
C2p1	8	0,25
C2p2	8	0,50
C2p3	8	1,00
C2p4	8	1,50
C2	8	2,00
C2p5	8	3,00
C2I1	50	2,00
C2I2	100	2,00

As letras *p* e *l* indicam, respectivamente, mudanças na profundidade e na largura do canal de acesso ao canto lagoa. O cenário em negrito não apresenta outro índice por ser a situação atual da laguna.

6.3.3.1. Influência do Rio João Gualberto

A influência do Rio João Gualberto no nível de contaminação da Lagoa da Conceição e extremidade Norte foi avaliada em quatro cenários como apresentado na Tabela 6. O rio foi introduzido nos cenários de duas maneiras. Com concentração da substância modelada nula, quando contribui para o decréscimo da concentração no domínio e com concentração igual a 100, quando contribuindo para o aumento da concentração no domínio. Como em ambos os casos o balanço de massa é igual à comparação entre os cenários que avaliam a influência do Rio João Gualberto deve ser feita como nível de concentração (ou contaminação) ao invés de tempo de residência. A vazão do rio foi à medida por Dutra (1990), $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

6.4. Indicativos da importância da chuva e do vento.

Foram ainda analisados os indicativos da importância do vento e da chuva para o sistema. A chuva tem a capacidade diluir a água da laguna, aumentar o nível e forçar a vazão d'água para fora do sistema. Como já mencionado a chuva adentra o sistema da Lagoa da Conceição de duas maneiras, incidindo diretamente no espelho d'água e pela percolação d'água via bacia de drenagem e lençol freático. No entanto, o cálculo do volume d'água e tempo de atraso para a água adentrar a laguna via bacia de drenagem e lençol freático é uma tarefa complexa, que requer uma modelação completa do ciclo hidrológico. A solução foi realizar cálculos simplificados que indicam a magnitude de importância da chuva para o sistema.

Os cálculos foram realizados estimando o volume de chuva que adentra o sistema de duas maneiras, uma diretamente no lençol freático, e a segunda através do volume total da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição. No segundo caso deve ocorrer uma superestimativa considerável do volume que adentra a laguna, uma vez que grande parte do volume que precipita na bacia hidrográfica não adentra o corpo de água da laguna. No entanto, espera-se que o volume que efetivamente adentra chegue na laguna esteja entre os dois casos.

Os dados de precipitação foram utilizados de três maneiras, calculando a precipitação média para todo o período amostral, a precipitação média para o período em que houve chuva e a máxima precipitação no período. Esses três dados foram multiplicados pela área do espelho d'água da laguna (20,5km²) e pela área da bacia hidrográfica (90,7km²). Os resultados foram comparados com os volumes de troca da laguna. A Tabela 8 apresenta os principais dados utilizados nos cálculos dos volumes chuva na laguna.

Tabela 8: Dados utilizados para avaliação da importância da chuva para a Lagoa da Conceição.

Área da laguna	20890000m ²
Área da bacia hidrográfica	90700000m ²
Média da pluviosidade para o período	0,081mm
Média da pluviosidade para o período com chuva	1,028mm
Maior pluviosidade [30min]	18,200mm

O vento atua sobre a laguna de duas maneiras, criando uma sobre elevação do nível através da tensão de cisalhamento e homogeneizando as águas da laguna. Para avaliar a influência do vento na sobre elevação do nível foram realizadas três modelações com as maiores velocidades de vento encontradas e suas respectivas direções (ver Figura 7). O vento foi inserido no modelo como velocidade e direção constante. Foram modelados cinco dias, mas após um dia o modelo já se apresentou estável, ou seja, a sobre elevação do nível não mudou. Os fluxos na fronteira aberta foram mantidos fixos em zero, sendo, portanto, o vento a única forçante do escoamento.

As condições de vento utilizadas nessa análise apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Condições de vento extremas na Lagoa da Conceição.

	Direção	Velocidade
Vento 1	45°	8m.s ⁻¹
Vento 2	205°	10m.s ⁻¹
Vento 3	180°	12m.s ⁻¹

Como a fronteira aberta do modelo apresenta fluxo nulo os resultados devem ser interpretados como um volume de circulação interna da laguna. O volume de circulação (V_c), foi calculado da seguinte maneira:

$$V_c = \sum |\eta| \times A \quad (41)$$

O volume de circulação é o volume deslocado pelo vento dentro da laguna. Os resultados foram comparados com o volume de troca da laguna.

7. RESULTADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO

7.1. Influência do Canal da Barra na Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição

Para avaliar a influência do Canal da Barra na hidrodinâmica da Lagoa da Conceição foram realizadas diversas modelações que avaliam a atenuação de nível pelo Canal da Barra em função da frequência da variação do nível no oceano, como descrito no Item 6.2.

7.1.1. Atenuação do nível pelo Canal da Barra

A amplitude máxima de variação da série de níveis (maior diferença de nível da série) adquiridos na desembocadura externa do Canal da Barra para o período de estudo (31 dias) foi de 0,64m enquanto que no Canto da Lagoa de 0,29m. A diferença de amplitude máxima entre as duas séries indica uma atenuação da amplitude máxima de 46%.

Como a série temporal disponível é relativamente curta (somente 31 dias), não é possível avaliar com exatidão as variações nas diferentes frequências de interesse do nível medido, principalmente nas frequências correspondentes aos períodos de entrada de frente frias (alguns dias).

Alternativamente, uma filtragem passa baixo/alto pode separar a série temporal em diferentes bandas de frequência. Nessa análise, a série temporal foi separada entre períodos menores que 36hs, considerada dominada pela maré astronômica, e em períodos maiores que 36hs, que foi considerada dominada principalmente pela maré meteorológica. A Figura 17 apresenta a separação dos resultados do modelo calibrado.

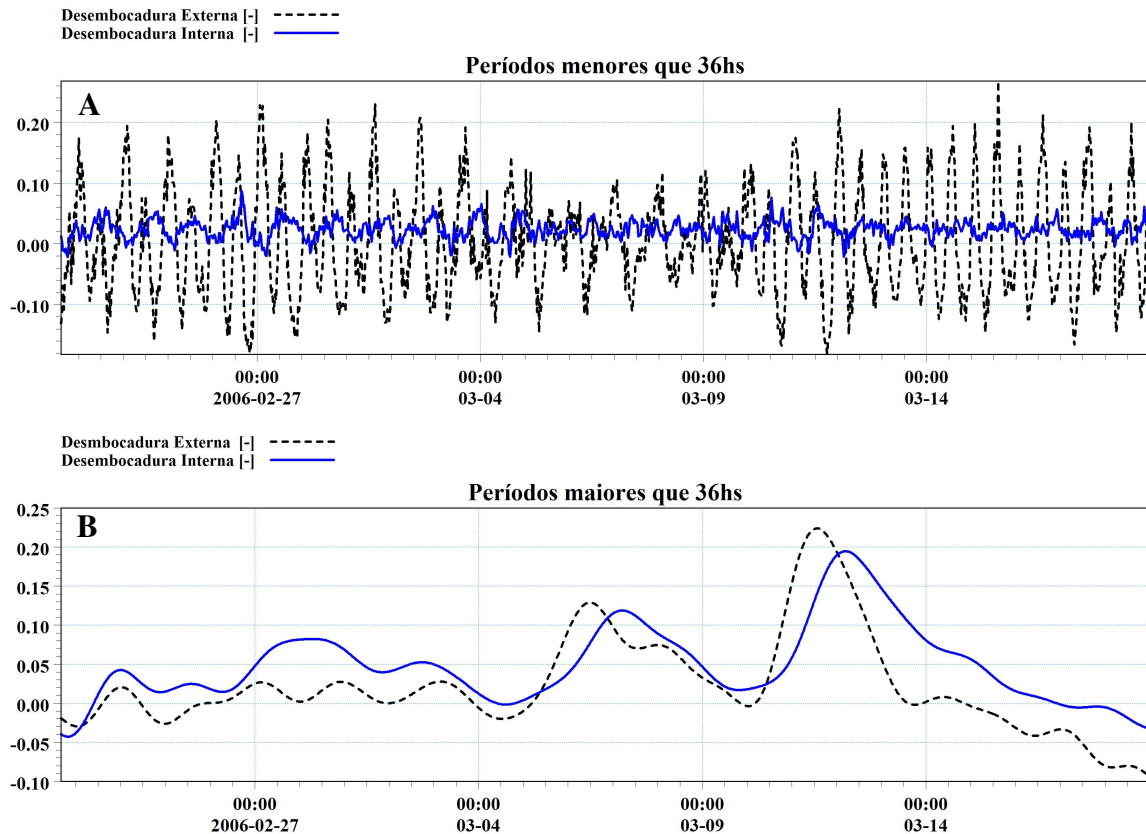


Figura 17: Níveis na desembocadura externa (linha pontilhada) e interna (linha contínua) nas freqüências acima de 36 horas (A) e abaixo de 36 horas (B).

Na desembocadura externa (Figura 17, linha pontilhada), a energia está distribuída 54% na freqüência supra-mareal (Períodos ≤ 36 hs) e 46% na freqüência sub-mareal (Períodos > 36 hs). O Canal da Barra transforma essas freqüências de maneira que na desembocadura interna do canal a energia esteja distribuída somente 13% na freqüência supra-mareal e 87% na freqüência sub-mareal. Essa transformação corresponde a uma atenuação de 92% para os períodos ≤ 36 hs e de 31% para os períodos maiores que 36hs. A atenuação total da energia ao longo do Canal da Barra foi de 64%.

A maior atenuação nas freqüências supra-mareais ocorre pelo mesmo processo dos vasos comunicantes, descritos anteriormente, e indica a importância da maré meteorológica no padrão hidrodinâmico da Lagoa da Conceição. A Tabela 10 sumariza a distribuição de energia nas extremidades do canal.

Tabela 10: Distribuição da energia nas extremidades do Canal da Barra.

	Períodos ≤ 36 hs		Períodos > 36 hs		Total
	Valor	% total	Valor	% total	Valor
Desembocadura Externa	0.0074	54.4%	0.0062	45.6%	0.0137
Desembocadura Interna	0.0006	12.8%	0.0043	87.2%	0.0049
Atenuação		91.6%		31.4%	64.2%

7.1.2. Atenuação dos componentes harmônicos

A transformação dos componentes harmônicos foi analisada através de pontos ao longo do Canal da Barra. Por simplicidade, foram utilizados somente os quatro principais constituintes harmônicos, dois semi-diurnos (M2 e S2) e dois diurnos (K1 e O1), que correspondem a cerca de 90% da energia da maré astronômica.

A atenuação relativa da amplitude dos constituintes semi-diurnos (M2 e S2) é de 90% e de 70% para os componentes diurnos (K1 e O1). A distribuição das amplitudes dos componentes ao longo do canal pode ser observada na Tabela 11.

Tabela 11: Amplitude dos principais componentes harmônicos ao longo do Canal da Barra.

Distância (m) / [Ponto do canal]	Componentes harmônicos			
	O1	K1	M2	S2
0 [fronteira]	0,120	0,136	0,250	0,170
130 [1]	0,118	0,135	0,246	0,168
470 [2]	0,108	0,119	0,216	0,144
885 [3]	0,090	0,010	0,180	0,122
1355 [4]	0,077	0,081	0,142	0,094
1640 [5]	0,064	0,068	0,115	0,078
2185 [6]	0,051	0,052	0,082	0,056
2550 [7]	0,045	0,043	0,062	0,043
2785 [8]	0,039	0,040	0,052	0,037
3075 [9]	0,038	0,035	0,040	0,026
3305 [10]	0,034	0,033	0,031	0,019

A Figura 18 apresenta a amplitude relativa à amplitude dos constituintes harmônicos ao longo do Canal da Barra.

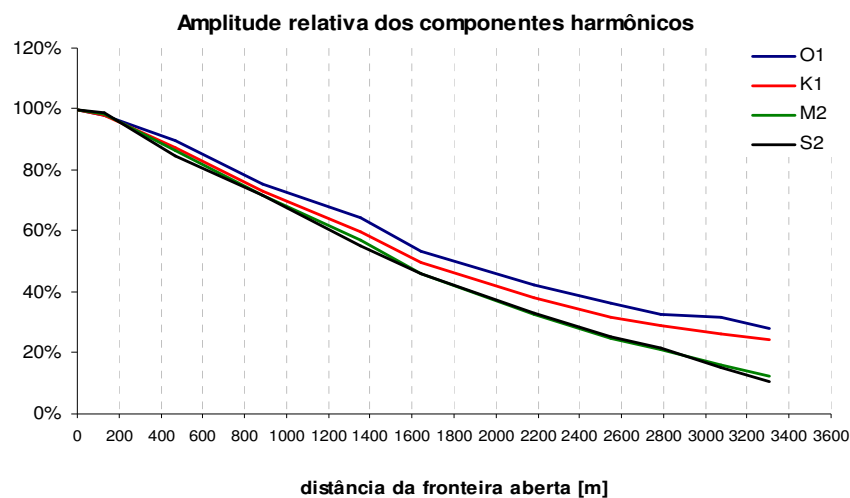


Figura 18: Amplitude dos componentes harmônicos ao longo do Canal da Barra.

Pode-se perceber que a taxa de atenuação dos constituintes ao longo do canal é praticamente constante. No entanto há nos primeiros 150m (antes de realmente adentrar o canal) menor atenuação da amplitude, nos primeiros 1500m há um aumento da taxa de atenuação enquanto que no final da série ocorre um decréscimo na taxa de atenuação, principalmente para os constituintes diurnos (O1 e K1).

Para considerar a quantidade de energia que esta disponível no interior da laguna é interessante avaliar a atenuação da energia potencial dos componentes da mesma maneira que no item anterior. A Tabela 12 apresenta a energia nos pontos do canal e a Figura 19, a energia relativa ao longo do canal.

Tabela 12: Energia dos principais componentes harmônicos ao longo do Canal da Barra.

Distância (m) / [Ponto do canal]	Componentes harmônicos			
	O1	K1	M2	S2
0 [fronteira]	3,60E-03	4,62E-03	1,56E-02	7,23E-03
130 [1]	3,45E-03	4,45E-03	1,52E-02	7,06E-03
470 [2]	2,90E-03	3,52E-03	1,17E-02	5,20E-03
885 [3]	2,04E-03	2,49E-03	8,06E-03	3,70E-03
1355 [4]	1,49E-03	1,66E-03	5,06E-03	2,20E-03
1640 [5]	1,02E-03	1,14E-03	3,31E-03	1,52E-03
2185 [6]	6,45E-04	6,79E-04	1,69E-03	7,87E-04
2550 [7]	4,71E-04	4,71E-04	9,64E-04	4,56E-04
2785 [8]	3,86E-04	3,90E-04	6,86E-04	3,37E-04
3075 [9]	3,63E-04	3,13E-04	4,02E-04	1,65E-04
3305 [10]	2,86E-04	2,71E-04	2,39E-04	8,28E-05

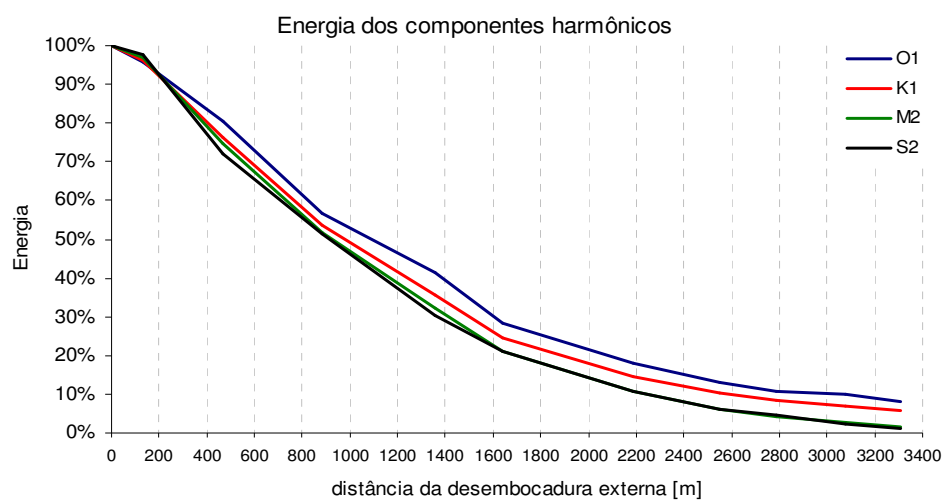


Figura 19: Amplitude dos componentes harmônicos ao longo do Canal da Barra.

O gráfico acima apresenta claramente um decréscimo exponencial da energia relativa dos constituintes ocorrendo um decréscimo na taxa de atenuação da energia ao longo do Canal da Barra para o interior da laguna. A Tabela 13 apresenta a energia relativa para as componentes diurnas (O1 + K1), para as componentes semi-diurnas (M2+S2) e a soma dos quatro constituintes.

Tabela 13: Energia relativa ao longo do Canal da Barra.

Distância	Diurnas	Semi-diurnas	Total
[m]	[O1+K1]	[M2+S2]	[O1+K1+M2+S2]
0	100%	100%	100%
130	97%	97%	97%
470	81%	74%	75%
885	60%	51%	52%
1355	45%	32%	33%
1640	34%	21%	22%
2185	25%	11%	12%
2550	21%	6%	8%
2785	19%	4%	6%
3075	18%	2%	4%
3305	17%	1%	3%

Novamente ocorre maior atenuação nos componentes harmônicos com maior frequência, resultando somente 17% e 1% para os componentes diurnos e semi-diurnos respectivamente.

7.2. Volume de Troca

O volume de água trocado foi estimado através dos níveis máximos e mínimos em cada elemento da grade como descrito no item (6.3.1.).

7.2.1. Situação Atual

A situação atual é a mesma utilizada na calibração do modelo e corresponde aos cenários L1, C1 e N1 apresentados na Tabela 6.

Além do volume de troca para o corpo principal da laguna também foram calculados os volumes de troca relativos em dois compartimentos da Lagoa da Conceição, na extremidade Norte e no Canto da Lagoa conforme apresentado na Figura 16.

A Tabela 14 apresenta um resumo das principais dimensões da Lagoa da Conceição e os volumes de troca para o período (9 dias).

Tabela 14: Principais dimensões e volume de troca da Lagoa da Conceição e sub-ambientes.

	Lagoa	Norte	Canto da Lagoa
Área	20 890 000m ²	1 006 000m ²	3 050 000m ²
Profundidade média	2,80m	1,10m	3,57m
Volume total*	58 545 000m ³	1 150 000m ³	10 901 000m ³
Varição máxima de nível	0,35m	0,34m	0,34m
Volume de Troca [9 dias]	7 407 000m³	345 000m³	1 030 000m³

* referenciado ao nível médio para o período de simulação.

O Canto da Lagoa corresponde a 19% do volume total de água da Lagoa da Conceição enquanto que a extremidade Norte com 2%. O volume de troca da laguna para o período de nove dias é 13% do volume total da laguna, no Canto da Lagoa o volume de troca é de 9% e na extremidade Norte de 30%. É interessante notar que apesar do Canto da Lagoa apresentar 19% do volume d'água da Lagoa da Conceição o volume de troca nesse sub-ambiente é somente 14% do volume de troca total da laguna. Essa característica é um reflexo da maior profundidade média dessa região e indica maior dificuldade de troca d'água em relação ao demais regiões da Lagoa da Conceição. Na extremidade Norte a situação é oposta, devido à baixa profundidade, a região representa somente 2% do volume total, mas 5% do volume de troca da laguna.

Outra característica importante verificada durante o cálculo dos volumes de troca é que não há uma diferença significativa na amplitude dos níveis nos três ambientes estudados (Tabela 14 e Figura 19). Isso deve ocorrer pela combinação de duas características da laguna. Primeiramente o Canal da Barra serve, como mencionado anteriormente, um eficiente filtro de alta frequência, onde somente as baixas frequências têm capacidade de adentrar a laguna. Por exemplo, 87% da energia dentro da laguna está na frequência sub-mareal. Dessa maneira, as oscilações de nível dentro da laguna devem ser lentas o suficiente para permitir que o nível varie praticamente de forma homogênea em todo o corpo lagunar. Esse fato pode ser evidenciado graficamente pela concordância das séries de níveis apresentados na Figura 19 abaixo. A segunda característica é o curto comprimento do canal de acesso. Apesar de apresentar pequena profundidade e largura (2m e 8m, respectivamente), o canal de acesso também possui um comprimento muito curto. Conseqüentemente, o canal estrangula muito o

fluxo, mas somente por uma curta distância, que parece ser suficiente para não influenciar na capacidade de troca do Canto da Lagoa.

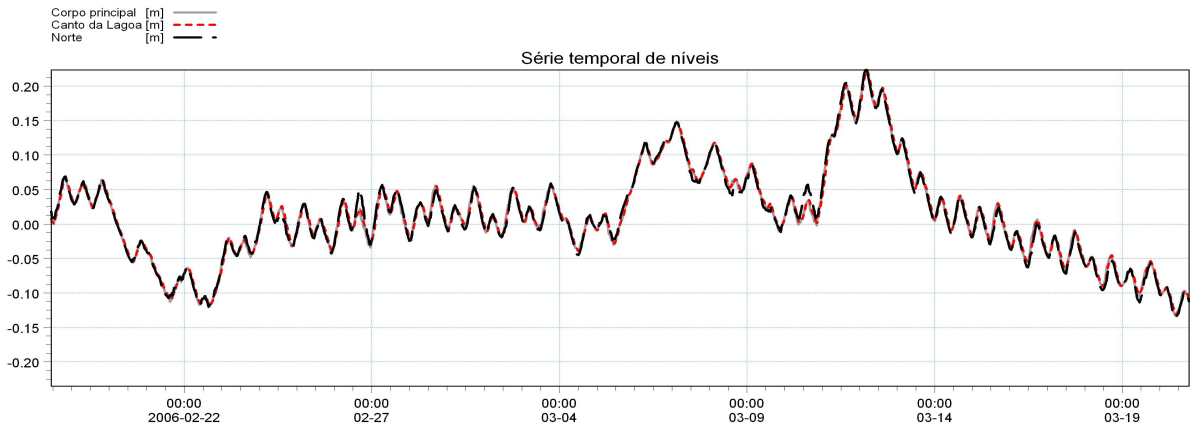


Figura 19: Série temporal de níveis em três localizações diferentes da Lagoa da Conceição, corpo principal, Canto da Lagoa e extremidade Norte.

É importante ressaltar que Lino (2005), encontrou 2cm de diferença entre as amplitudes da desembocadura interna e o Canto da Lagoa. No presente estudo a variação máxima encontrada foi de cerca de 1cm. Esse pequeno gradiente de nível tem pouca importância para a hidrodinâmica da Lagoa da Conceição, porque a energia é transferida praticamente sem perda para os compartimentos internos da laguna. Dois exemplos do campo de elevação da superfície no Canal da Barra podem ser observados no ANEXO 3.

Uma vez que o Canal da Barra filtra grande parte da maré astronômica surge o interesse em investigar se mudanças na calha do canal aumentaria a eficiência do canal da barra em transferir energia para dentro da laguna.

Outra questão é quanto à capacidade de troca d'água entre o Canto da Lagoa (que sofre freqüentes crises anóxicas) e o corpo principal da laguna frente a uma variação da seção do canal que conecta esses dois corpos d'água (canal sob a ponte da Avenida das Rendeiras). Uma vez que a diferença de fase e amplitude é muito pequena (Figura 19), uma mudança na seção do canal pode não resultar em aumento da troca d'água entre o Canto da Lagoa e o corpo principal da laguna. Para avaliar a troca d'água da Lagoa da Conceição e os subsistemas (Canto da Lagoa e extremidade Norte) foram realizados diversos cálculos dos tempos de residência para vários cenários, conforme apresentados no item 6.3.2., e que são apresentados a seguir.

7.2.2. Cenários Hipotéticos para a Lagoa da Conceição

Os volumes de troca para cenários hipotéticos se encontram na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15: Volume de troca para cenários hipotéticos da Lagoa da Conceição.

Cenário	Volume de Troca	VT relativo*
Nível Medido (L2)	7 403 000m ³	100%
Nível Astronômico (L3)	2 742 000m ³	37%
Dragagem do Canal da Barra em 1m (L4)	8 530 000 m ³	115%
Dragagem do Canal da Barra em 2m (L5)	9 256 000 m ³	125%

* volume de troca relativo à situação atual da Lagoa da Conceição (cenário L1).

O volume de troca para o cenário sem vento (L2) praticamente não apresentou diferença para a situação atual (L1), enquanto que para o cenário com nível astronômico o volume é somente 37% do volume encontrado para a laguna. Evidenciando novamente a importância da maré meteorológica para a troca de água da Lagoa da Conceição.

Uma dragagem do Canal da Barra em 1m aumentaria o volume de troca em 15%, enquanto que a dragagem em 2m ocasionaria um aumento de 25% em relação ao volume de troca atual.

Uma questão que surge nesse momento é se com a dragagem do Canal da Barra, a laguna continuaria a variar o nível em fase como verificado no item 7.2.1 (ver Figura 19). Dessa maneira, o próximo passo foi analisar os cenários hipotéticos nos sub-sistemas definidos na Figura 15.

7.2.3. Cenários Hipotéticos para o Canto da Lagoa

O volume de troca no Canto da Lagoa foi avaliado em função da variação da seção do canal de acesso (ver Tabela 7), e da dragagem do Canal da Barra. A Tabela 16 apresenta a variação máxima de nível, volumes de troca e os volumes de troca relativos ao cenário C1.

Tabela 16: Volume de troca no Canto da Lagoa em diferentes cenários.

Cenário	Volume de Troca	VT relativo
Mudanças no canal de acesso (C2p1)	795000	77%
Mudanças no canal de acesso (C2p2)	950000	92%
Mudanças no canal de acesso (C2p3)	977000.3	95%
Mudanças no canal de acesso (C2p4)	1013000	98%
Mudanças no canal de acesso (C2p5)	1042023	101%
Mudanças no canal de acesso (C2I1)	1044899	101%
Mudanças no canal de acesso (C2I2)	1044047	101%
Dragagem do Canal da Barra em 1m (C3)	1204000	117%
Dragagem do Canal da Barra em 2m (C4)	1298000	126%

Os resultados da tabela acima comprovam o que foi indicado no item 7.2.1., que mudanças que aumentem a seção do canal de acesso ao Canto da Lagoa não acarretam em aumento do volume de troca do sistema. No entanto, aprofundamentos no Canal da Barra aumentam significativamente (17% e 26%) o volume de troca no Canto da Lagoa. Mesmo com o aumento da profundidade no Canal da Barra, que favorece a entrada de frequências mais baixas na laguna, o pequeno canal de acesso ao Canto da Lagoa parece ainda não limitar a variação nesse sub-sistema. Por outro lado, diminuições na profundidade do canal de acesso somente acarretam em diminuição significativa do volume de troca para profundidades menores que 0,5m. A Figura 20 evidencia melhor o comportamento do volume de troca relativo para os cenários de assoreamento do canal de acesso.

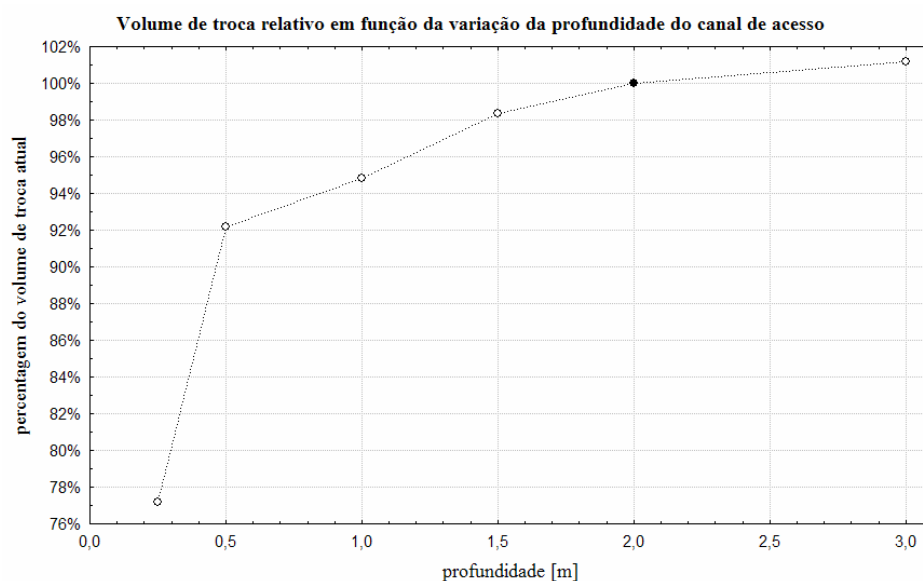


Figura 20: Volume de troca em função da profundidade do canal. O ponto preenchido indica a situação atual.

A figura acima evidencia a capacidade do canal de acesso em suportar assoreamento de sua seção. O ponto preenchido corresponde à configuração atual do canal de acesso ao Canto da Lagoa.

7.2.4. Cenários Hipotéticos para a extremidade Norte

Os volumes de troca para a extremidade Norte da Lagoa da Conceição foram calculados para os cenários de dragagem do Canal a Barra em 1m e 2m (N2 e N3, Tabela 6). Os cenários para avaliação da influência do Rio João Gualberto (N4 e N5) apresentam o mesmo balanço de massa que a situação atual, dessa maneira o volume de troca se mantém constante e a avaliação dos resultados foi feita em função do nível de contaminação da laguna.

Tabela 17: Volume de troca na extremidade Norte para os cenários de dragagem do Canal da Barra.

Cenário	Volume de Troca	VT relativo
Dragagem do Canal da Barra em 1m (N2)	414 000m ³	120%
Dragagem do Canal da Barra em 2m (N3)	452 000m ³	131%

Os cenários de dragagem do Canal da Barra em 1m e 2m ocasionaram um aumento do volume de troca de 20% e 31% respectivamente. Devido à baixa profundidade desse sub-ambiente o volume de troca relativo ao volume de troca da condição inicial aumenta mais do que nos outros domínios analisados. No entanto, a relação entre os volumes de troca da extremidade Norte e do corpo principal da laguna se mantém constante para todos os cenários, 5%.

7.3. Tempos de Residência

A avaliação do tempo de residência na Lagoa da Conceição e nos sub-ambientes descritos na Figura 15 foi realizada para os cenários apresentados na Tabela 6. Conforme descrito no item 6.3.1., devido ao grande erro estatístico associado à previsão dos tempos de residência na Lagoa da Conceição, a análise foi feita através da comparação dos diferentes cenários.

7.3.1. Lagoa da Conceição

7.3.1.1. Situação Atual

No corpo principal da Lagoa da Conceição o componente apresentou um decréscimo médio de até 78,4% da concentração inicial. A Figura 21 abaixo apresenta as concentrações médias encontradas a cada 24hs para o período simulado.

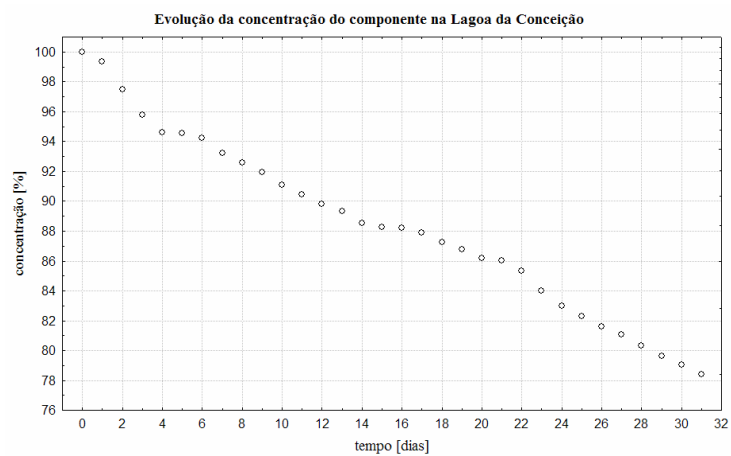


Figura 21: Evolução da concentração do componente na Lagoa da Conceição.

O campo de concentração encontrado após os 31 dias de simulação pode ser observado na Figura 22.

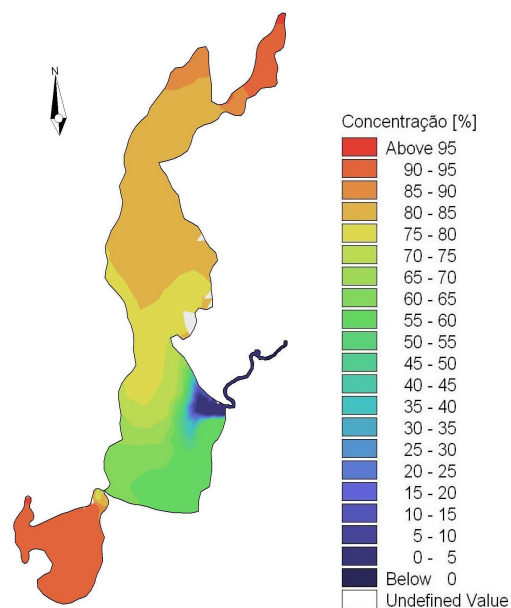


Figura 22: Distribuição espacial da concentração do componente na Lagoa da Conceição após o período simulado de 31 dias.

Evidentemente, o tempo de residência não é homogêneo ao longo da laguna. O Canal da Barra troca às águas da região central da laguna rapidamente enquanto que as extremidades Norte e Sul apresentam uma renovação d'água consideravelmente menor. Essa estagnação das águas nas extremidades tende a ocasionar maior dificuldade na diluição de contaminantes que sejam despejados nesses compartimentos. No caso do Canto da Lagoa, há ainda o efeito da maior profundidade, o que leva a um menor volume de troca relativo (ver item 7.2.1.), aumentando ainda mais o tempo de residência.

A Figura 23, abaixo, apresenta o modelo exponencial utilizado para o cálculo do tempo de residência da laguna em função do decréscimo da concentração do componente analisado. Pode-se observar na figura ainda a equação que descreve o tempo de residência.

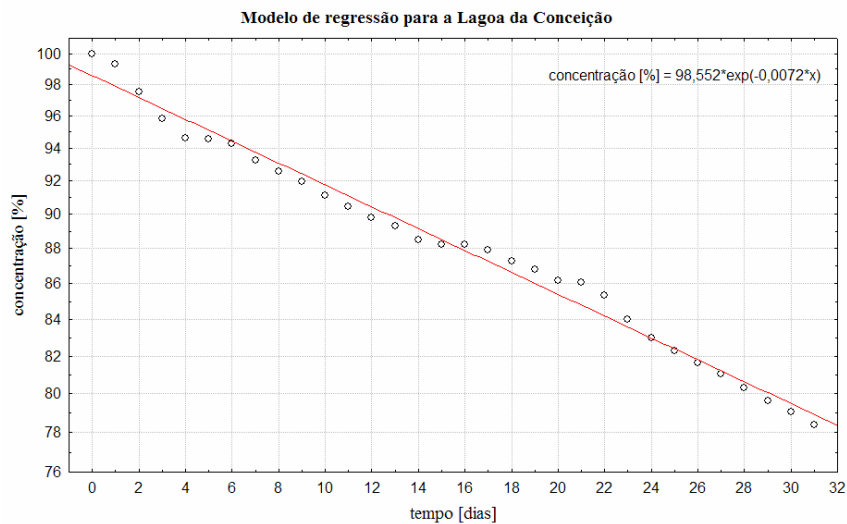


Figura 23: Modelo de regressão para o cálculo do tempo de residência na Lagoa da Conceição.

Como descrito no item 6.3.1., para auxiliar a compreensão da hidrodinâmica da Lagoa da Conceição foram calculados os tempos de residência através da função apresentada na Figura 23. Os tempos necessários para a concentração no domínio atingir os valores clássicos na avaliação de qualidade d'água se encontram na Tabela 18.

Tabela 18: Tempos de residência para a situação atual da Lagoa da Conceição.

Concentração	Tempo [dias]
10%	319
5%	417
1%	663

Apesar da incerteza estatística dessa análise, os tempos de residência são bastante longos, quase um ano para atingir 10% da concentração.

7.3.1.2. Cenários Hipotéticos

Os cenários da Lagoa da Conceição, apresentados na Tabela 6, foram utilizados para avaliar o tempo de residência relativo à condição atual apresentada no item anterior.

A Tabela 19 apresenta os tempos de residência para os diferentes cenários relativos a condição atual da Lagoa da Conceição.

Tabela 19: Tempos de residência relativos a situação atual da Lagoa da Conceição.

Cenário	Tempo de Residência Relativo		
	10%	5%	1%
Nível Medido (L2)	106%	106%	103%
Nível Astronômico (L3)	157%	150%	151%
Dragagem 1m (L4)	71%	71%	68%
Dragagem 2m (L5)	58%	59%	57%
Rio <i>limpo</i> (L6)	66%	60%	64%
Rio <i>contaminado</i> (L7)	115%	115%	111%

O cenário com nível medido sem vento (L2) apresentou um pequeno aumento no tempo de residência (cerca de 6%), enquanto que o cenário com nível astronômico apresentou um acréscimo de aproximadamente 50%. A interpretação desses resultados indica que em momentos onde não haja a influência de maré meteorológica a Lagoa da Conceição tende a aumentar o tempo necessário para trocar suas águas em cerca de 50%.

A dragagem do Canal da Barra em 1m acarreta em uma redução de cerca de 30% no tempo de residência da laguna, enquanto que para a dragagem de 2m a redução é de 40%.

Quando inserido com água com concentração nula (cenário L6), o Rio João Gualberto ocasiona um decréscimo no nível de contaminação de aproximadamente 40%, próximo ao cenário de dragagem do canal em 2m. Por outro lado, o rio *contaminado* (cenário L7) aumenta o nível de contaminação em cerca de 15%. A Figura 24 apresenta os campos de concentração final para os casos do rio *limpo* (esquerda) e do rio *contaminado* (direita).

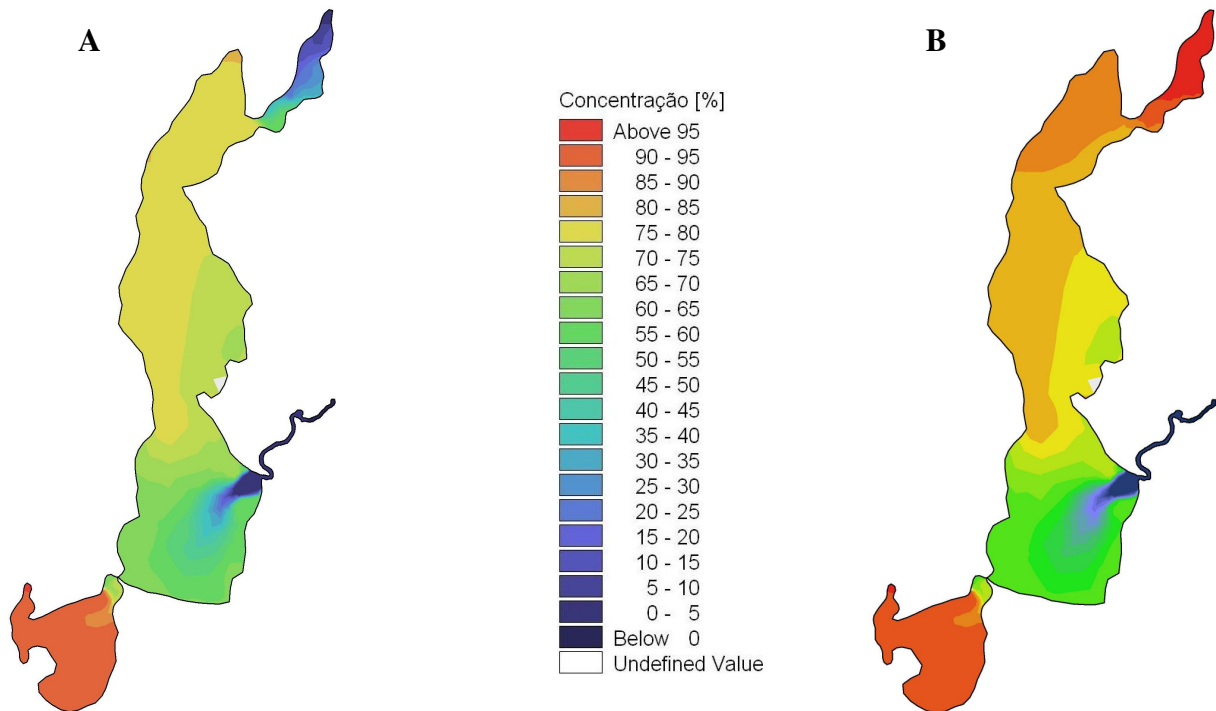


Figura 24: Concentração final com o rio João Gualberto livre de contaminação (A), e contaminado (B).

É interessante notar que apesar de apresentar um importante papel no nível de contaminação da laguna, para o período simulado (31 dias), o Rio João Gualberto não apresentou influência no nível de contaminação no Canto da Lagoa. Dessa maneira, próximo passo foi analisar a variação do tempo de residência nas extremidades da Lagoa da Conceição.

7.3.2. Canto da Lagoa

7.3.2.1. Situação atual

O cenário que simula a situação atual no Canto da Lagoa (cenário C1), apresentou um decréscimo de até 59% para o período simulado (31 dias). A Figura 25 apresenta a variação da concentração média no período simulado.

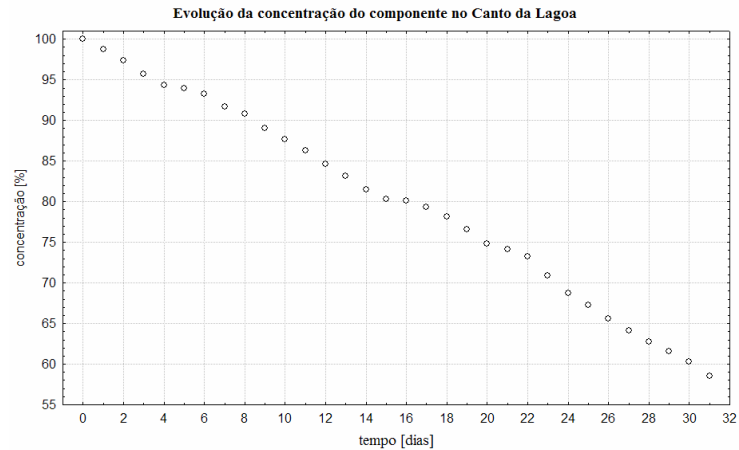


Figura 25: Evolução da concentração do componente no Canto da Lagoa para os 31 dias simulados.

A Figura 26 apresenta o campo de concentração no Canto da Lagoa após os 31 dias simulados.

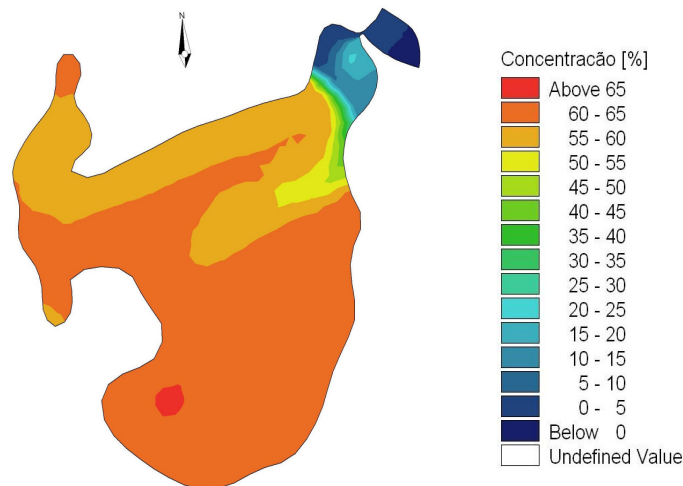


Figura 26: Campo de concentração final para o Canto da Lagoa.

A extremidade Sul do Canto da Lagoa apresenta menor capacidade de troca d'água do que o restante do compartimento. Esse fato vai de encontro às evidências de eutrofização dessa região, Sierra *et al.* (1999), Ledo e Sorriano –Sierra (1999) e Froidefond *et al.* (1999).

A Figura 27 apresenta o modelo utilizado para o cálculo do tempo de residência do Canto da Lagoa.

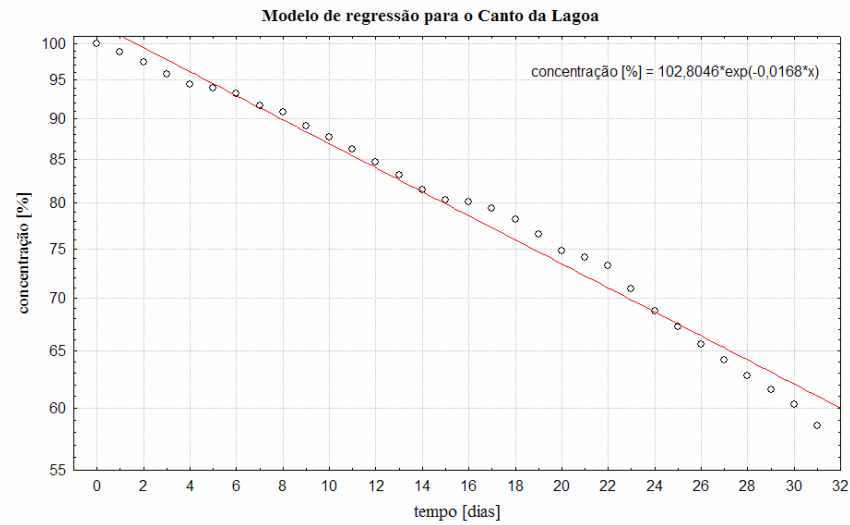


Figura 27: Modelo de regressão para o cálculo do tempo de residência no Canto da Lagoa.

O modelo foi utilizado para prever o tempo de residência encontrado na Tabela 20, abaixo.

Tabela 20: Tempos de residência para a situação atual do Canto da Lagoa.

Concentração	Tempo [dias]
10%	139
5%	180
1%	275

A análise dos tempos de residência do Canto da Lagoa deve levar em consideração que o sistema troca água com a Lagoa da Conceição, estando sujeito, portanto, as condições de qualidade da água da laguna.

7.3.2.2. Cenários Hipotéticos

Os cenários hipotéticos utilizados para comparação com a situação atual estão descritos na Tabela 6. A Tabela 21 apresenta os tempos de residência para os diferentes cenários em função do tempo de residência da situação atual do Canto da Lagoa apresentado no item anterior.

Tabela 21: Tempos de residência relativos a situação atual do Canto da Lagoa.

Cenário	<u>Tempo de Residência Relativo</u>		
	10%	5%	1%
Mudanças no canal de acesso (C2p1)	269%	271%	270%
Mudanças no canal de acesso (C2p2)	154%	155%	155%
Mudanças no canal de acesso (C2p3)	102%	102%	102%
Mudanças no canal de acesso (C2p4)	99%	99%	99%
Mudanças no canal de acesso (C2p5)	102%	101%	102%
Mudanças no canal de acesso (C2I1)	102%	102%	101%
Mudanças no canal de acesso (C2I2)	102%	102%	102%
Dragagem do Canal da Barra em 1m (C3)	58%	58%	58%
Dragagem do Canal da Barra em 2m (C4)	48%	48%	47%

Diminuições na profundidade do canal de acesso ao Canto da Lagoa somente acarretaram decréscimos significativos no tempo de residência para os cenários com profundidades de 0,5m e 0,25m. Portanto, profundidades entre 1m e 0,5 parecem ser críticas para a troca de água no Canto da Lagoa. Um alargamento do canal de acesso não afeta o tempo de residência do Canto da Lagoa. Esse fato, já evidenciado nos itens anteriores, se deve a transferência de amplitude da laguna para o Canto da Lagoa ocorrer plenamente, com muito pouca perda de energia.

As dragagens no Canal da Barra (cenários C3 e C4) influenciam consideravelmente no decréscimo do tempo de residência, cerca de 40% e 50% respectivamente, e parece ser a única maneira de efetivamente diminuir o tempo de residência do Canto da Lagoa.

7.3.3. Extremidade Norte

7.3.3.1. Situação Atual

Para o período simulado (31 dias) a concentração na extremidade Norte foi deduzida em até 2,5% da concentração inicial, indicando que há uma troca de água significativa desse sistema com o restante da laguna. A Figura 28 apresenta a evolução da concentração do componente na extremidade Norte da Lagoa da Conceição.

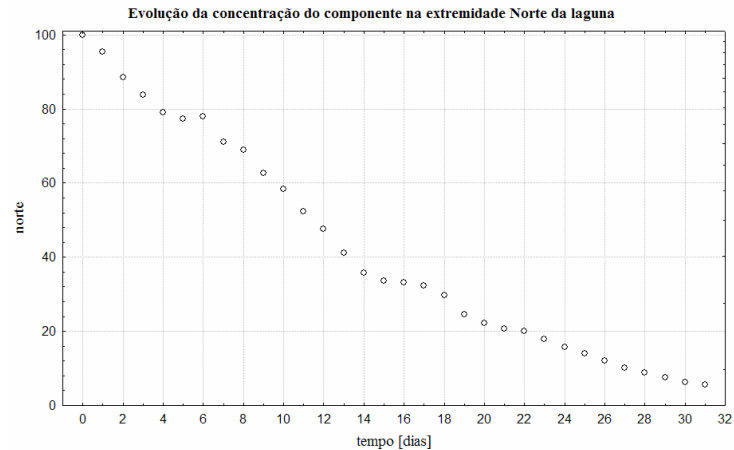


Figura 28: Evolução da concentração do componente na extremidade Norte.

A distribuição espacial final do componente apresentada na Figura 29 indica a capacidade de troca d'água desse sistema com o restante da laguna. Na porção Norte do sistema, onde ocorreu a maior concentração, há o Rio João Gualberto que tem influencia importante no tempo de residência desse sub-sistema.

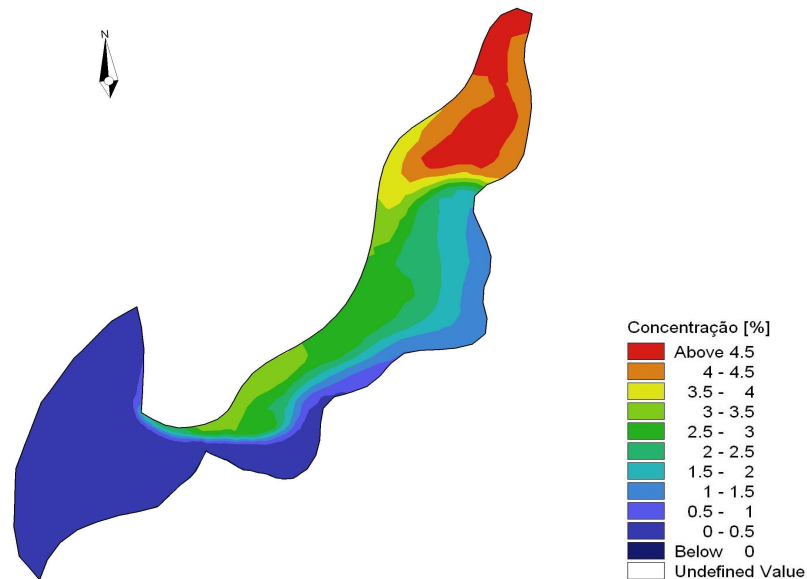


Figura 29: Campo de concentração final para a extremidade Norte.

A Figura 30 apresenta o modelo exponencial utilizado para o cálculo dos tempos de residência. É importante ressaltar que, como a concentração do componente chegou a 2,5% as afirmações quanto ao tempo de residência são mais confiáveis que nos outros ambientes.

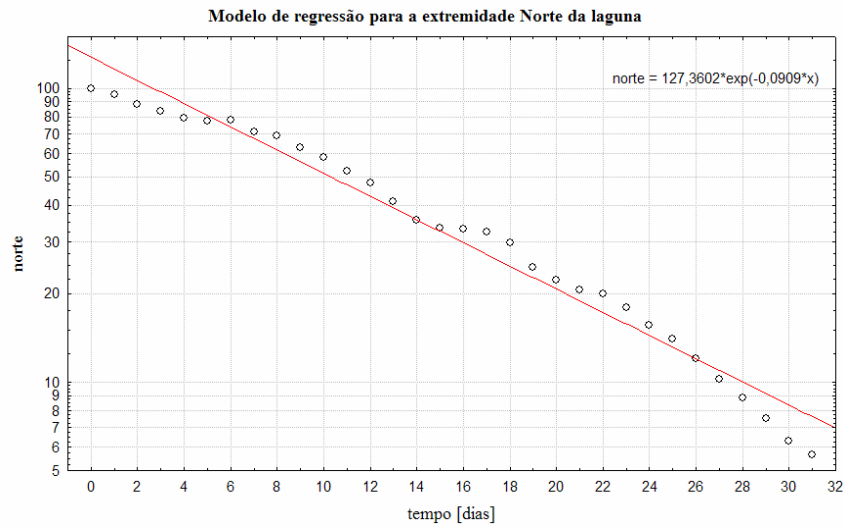


Figura 30: Modelo de regressão para o cálculo do tempo de residência na extremidade Norte.

A Tabela 22 apresenta o tempo de residência para a situação atual do Canto da Lagoa.

Tabela 22: Tempos de residência para a situação atual na Extremidade Norte.

Concentração	Tempo [dias]
10%	28
5%	36
1%	53

7.3.3.2. Cenários Hipotéticos

A Tabela 23 apresenta os tempos de residência relativos à situação atual da extremidade Norte da Lagoa da Conceição.

Tabela 23: Tempos de residência relativos a situação atual da extremidade Norte da laguna.

Cenário	Tempo de Residência Relativo		
	10%	5%	1%
Dragagem do Canal da Barra em 1m (N2)	90%	90%	89%
Dragagem do Canal da Barra em 2m (N3)	75%	76%	76%
Rio limpo (N4)	49%	49%	48%
Rio contaminado (N5)	419%	435%	448%

Os cenários de dragagem do Canal da Barra ocasionaram um decréscimo no tempo de residência da extremidade Norte da laguna em 10% para 1m de dragagem e 25% para o cenário com 2m de dragagem.

Os cenários com o Rio João Gualberto (N4 e N5) indicaram a importância do aporte fluvial para o nível de contaminação dessa região. O rio com água livre de contaminação diminui o tempo necessário para diminuir o nível de contaminação da laguna pela metade. Por outro lado, o rio *contaminado* eleva esse tempo em cerca de quatro vezes. Dessa maneira, pode-se afirmar que a qualidade da água do Rio João Gualberto é determinante na qualidade da água dessa extremidade e também tem grande influência no nível de contaminação do corpo principal da Lagoa da Conceição (ver Tabela 19 e Figura 24).

7.4. Indicativos da relevância da pluviosidade para o sistema

A importância da precipitação pluviométrica foi avaliada conforme descrito no item 6.4. A Tabela 24 apresenta os resultados dos volumes encontrados para os cenários de precipitação no corpo d'água da laguna e na bacia hidrográfica.

Tabela 24: Volumes de pluviosidade para a Lagoa da Conceição.

	Lagoa da Conceição	Bacia Hidrográfica
Média para o período	1692m ³	7347 m ³
Media para o período com chuva	21475 m ³	93240 m ³
Máxima pluviosidade no período	380198 m ³	1650740 m ³

O volume médio a cada meia hora que entra diretamente na laguna é cerca de 1700m³ enquanto que o volume que atinge a bacia hidrográfica é 7347m³, ou seja, o volume real que adentra a laguna no período deve estar entre esses dois valores.

A Tabela 25 apresenta a comparação dos resultados anteriores com o volume de troca da Lagoa da Conceição, 7 407 000m³, (ver, Tabela 14).

Tabela 25: Volumes de pluviosidade para a Lagoa da Conceição em função do volume de troca da laguna.

	Lagoa da Conceição	Bacia Hidrográfica
Média para o período	0,02%	0,10%
Media para o período com chuva	0,29%	1,26%
Máxima pluviosidade no período	5,13%	22,29%

Os resultados da tabela acima indicam que o volume de água introduzido pela pluviosidade na Lagoa da Conceição é somente uma pequena porção do volume de troca que a laguna pode apresentar. A exceção ocorre quando há um evento de chuva intenso onde o volume de água inserida na laguna está entre 5% e 22%.

No entanto, deve-se notar que a chuva adentra o sistema em todo o espelho d'água e pelas bordas da laguna, enquanto que o Canal da Barra supre água pro sistema somente em um ponto. Dessa maneira a chuva deve apresentar importância significativa para a troca de água da laguna, principalmente para as extremidades Norte e Sul.

7.5. Indicativos da relevância do vento

A Lagoa da Conceição apresenta grandes áreas com profundidades rasas, o vento apresenta uma influência grande na circulação dessas regiões e, conseqüentemente, da laguna inteira.

Para avaliar a variação de nível que o vento é capaz de gerar foram utilizados três climas de vento como apresentado no item 6.4. Para essas direções foram identificadas as velocidades máximas presentes no período de aquisição de dados. As condições de vento utilizadas se encontram na Tabela 26.

Tabela 26: Condições de vento utilizadas na análise.

	Direção	Velocidade
Vento 1	45°	8m.s ⁻¹
Vento 2	205°	10m.s ⁻¹
Vento 3	180°	12m.s ⁻¹

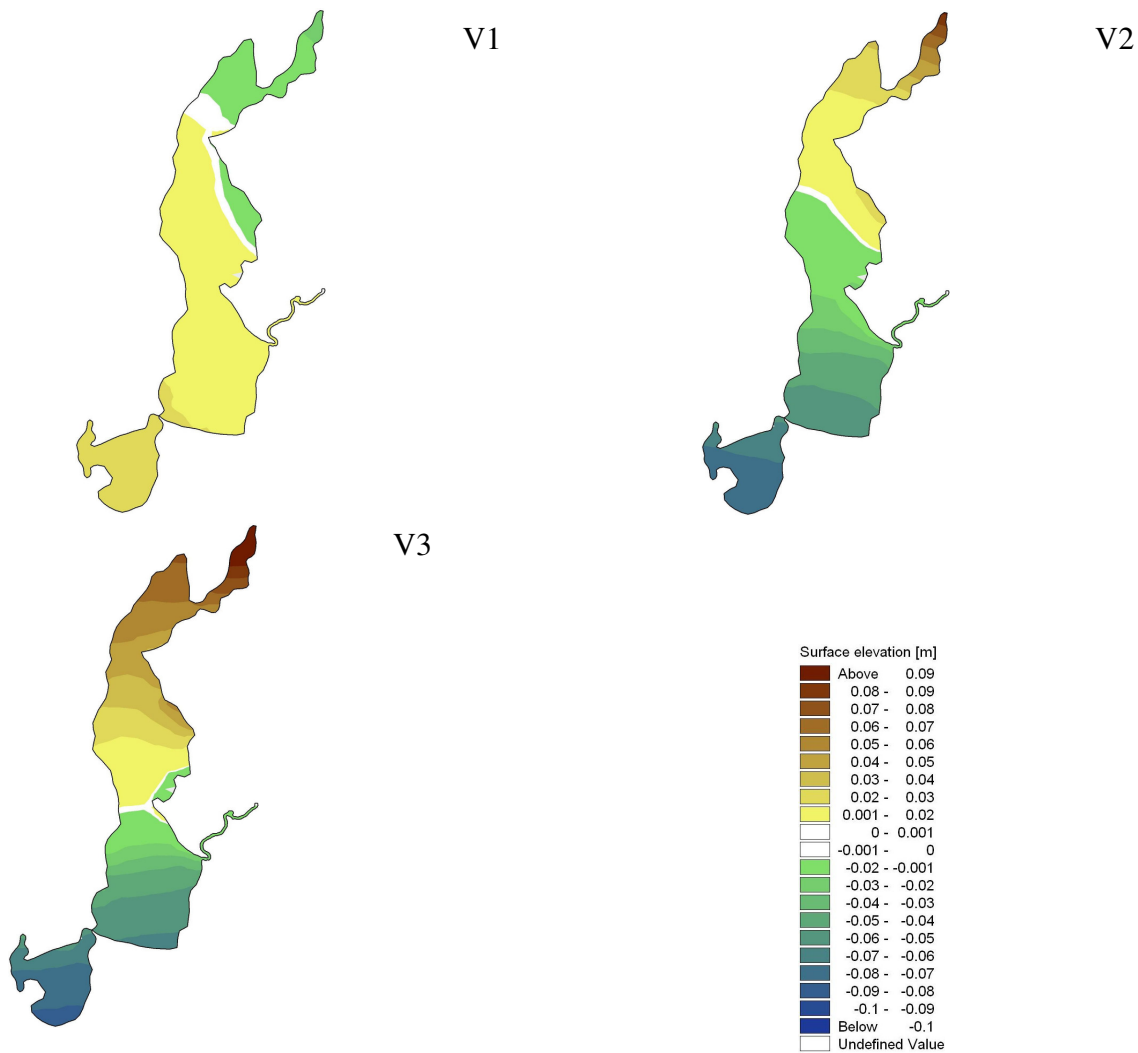
Após cerca de 24hs, com o sistema estável, foram analisados os campos de níveis para verificar a máxima amplitude que esses ventos são capazes de efetuar na laguna. Dos campos de níveis foi calculado o volume máximo integrado para cada condição de vento. A Tabela 27 apresenta os volumes d'água deslocados pela ação do vento nos cenários simulados.

Tabela 27: Amplitudes de variação do nível d'água e os volumes deslocados pelo vento na laguna.

	Amplitude	Volume de Circulação	VT Relativo
Vento 1	0,06m	245000m ³	3%
Vento 2	0,17m	685000 m ³	9%
Vento 3	0,22m	911000 m ³	12%

O vento apresenta uma capacidade significativa de variação de nível na laguna. Andrade encontrou uma elevação máxima do nível da Lagoa da Conceição 12cm para um vento Sul (180graus) com intensidade de 7m.s^{-1} . O volume máximo circulado pelo vento é somente 12% do volume de troca.

A Figura 31 apresenta os campos de níveis encontrados após a estabilização do sistema.

**Figura 31: Sobre elevação de nível devido a ação do vento sobre a superfície da Lagoa da Conceição.**

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A HIDRODINÂMICA DA LAGUNA

A influência do Canal da Barra e a hidrodinâmica da Lagoa da Conceição foram avaliadas através em diferentes cenários. Devido à limitação espaço-temporal dos dados coletados, e a não calibração do coeficiente de dispersão utilizado no modelo de transporte, uma parte das análises foram comparativas à situação atual. Mesmo assim, foi possível compreender alguns processos hidrodinâmicos importantes para a troca e qualidade da água da Lagoa da Conceição.

É essencial nesse momento ressaltar novamente que o presente estudo tem finalidade exclusivamente acadêmica, não devendo ser considerado como uma análise de impacto ambiental. Devido às diversas limitações do estudo ressaltadas anteriormente esse estudo pode ser considerado, no máximo, como um projeto piloto que servirá de base para um Estudo de Impacto Ambiental, tão necessária à região.

Como evidenciado por Andrade (2001) o Canal da Barra funciona como um eficiente filtro de frequências para a Lagoa da Conceição. A atenuação da energia do nível medido foi de 64%. Na desembocadura externa do canal 54% da energia disponível pelo gradiente de nível esta nas frequências maiores que 36hs (46% nas frequências menores que 36hs). No entanto, as frequências maiores que 36hs são sensivelmente mais atenuadas que as menores que 36hs, havendo uma atenuação de 92% e 31% respectivamente. Fazendo com que na desembocadura interna do Canal da Barra a energia concentrada em 87% na baixa frequência (13% na alta frequência). As frequências menores que 36hs normalmente são associadas com entradas de frente frias que, comprovadamente, regem a troca de água da Lagoa da Conceição.

A avaliação da atenuação dos principais componentes harmônicos apresentou o padrão de atenuação dos componentes ao longo do Canal da Barra. Os componentes diurnos (O1 e K1), sofreram atenuação da energia de 83%, enquanto que os componentes semi-diurnos praticamente não adentram a laguna, sofrendo uma atenuação de 99%. A atenuação media dos componentes harmônicos foi de 97%, próximo dos valores encontrados por Andrade (2001), 95%.

As análises dos volumes de troca e tempos de residência indicaram que as oscilações de níveis ocorrem sem diferença de amplitude significativa ao longo de toda a Lagoa da Conceição. O pequeno canal de acesso ao Canto da Lagoa não é capaz de influenciar em

mudanças na amplitude de variação do nível nesse compartimento e, mesmo variações significativas na seção desse canal, não influenciam na capacidade de troca d'água desse sub-sistema. A combinação dos efeitos de filtragem das altas frequências pelo Canal da Barra e curto comprimento do canal pode ocasionar esse padrão.

A morfologia alongada no sentido Norte – Sul, e o posicionamento do Canal da Barra na Lagoa da Conceição (central), dificultam a troca d'água nas extremidades da laguna. Na extremidade Norte, a presença do Rio João Gualberto apresenta papel importante para a qualidade da água da região e de praticamente toda a Lagoa da Conceição. A manutenção da qualidade da água.

O Canto da Lagoa é a região com maior dificuldade de troca d'água, por estar posicionado em uma das extremidades da laguna e apresentar a maior profundidade média. Aumentos da seção do canal de acesso não acarretam em melhoras na capacidade de troca d'água do sub-sistema. Somente a dragagem do Canal da Barra parece melhorar a troca d'água do Canto da Lagoa. O aprofundamento do Canal da Barra em 1m diminui o tempo de residência no Canto da Lagoa em cerca de 40%, enquanto que o aprofundamento em 2m, diminui o tempo de residência em 50%.

A dragagem do Canal da Barra também apresenta efeitos positivos para a qualidade da água da Lagoa da Conceição. O tempo de residência da Lagoa diminui cerca de 30% para uma dragagem de 1m, para 2m o decréscimo no tempo de residência é de aproximadamente 40%. A extremidade Norte também diminui seu tempo de residência em 10% e 25% para os cenários de dragagem em 1m e 2m respectivamente. No entanto, a qualidade da água nessa região está diretamente relacionada com a qualidade da água do Rio João Gualberto. A presença do rio com água limpa diminui o nível de contaminação da região pela metade, enquanto que se o rio contribuir com água contaminada o nível de contaminação pode aumentar mais de quatro vezes.

O Rio João Gualberto também tem influência importante na qualidade no restante da laguna. A inserção do rio contaminado aumenta o nível de contaminação na Lagoa da Conceição em quase 15%, e o rio limpo diminui o nível de contaminação em quase 40%. Para o período simulado não houve influência do Rio João Gualberto no Canto da Lagoa.

É importante ressaltar que a região Norte da Lagoa sofreu nos últimos anos o maior adensamento populacional da área de entorno da Lagoa da Conceição e que grande parte dos dejetos domésticos é lançada diretamente nos pequenos córregos e ribeirões que deságuam na laguna. Produzindo, dessa maneira, um cenário que tende a comprometer cada vez mais a qualidade da água da Lagoa.

Uma possível alternativa para esse quadro seria a construção de uma estação de tratamento de esgotos que libere os dejetos no rio João Gualberto. Assegurando que a água despejada no rio seja de boa qualidade haverá um aumento do fluxo do rio com água limpa o que levaria a uma melhora da qualidade da água da região Norte e corpo principal da laguna. No entanto, a salinidade da laguna tenderá a diminuir e os efeitos para a biota também deverão ser investigados. No entanto, para melhorar a qualidade da água em toda a Lagoa da Conceição a solução é a dragagem do Canal da Barra.

Os volumes de precipitação pluviométrica calculados são pequenos em comparação aos volumes de troca da laguna. No entanto, a importância da chuva para a Lagoa da Conceição está na maneira que adentra o sistema. Principalmente no Canto da Lagoa onde há pouca troca d'água.

Em uma situação extrema, o vento pode movimentar até quase um milhão de metros cúbicos de água na laguna, o que corresponde à cerca de 12% do volume de troca da laguna. A ação do vento é mais importante nas regiões mais rasas da laguna, onde pode movimentar maior parte da coluna d'água.

O aprofundamento dos estudos de modelação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição deve passar, necessariamente, pela aquisição detalhada e contínua de dados de campo, uma vez que a capacidade dos modelos hidrodinâmicos em prever escoamentos naturais esta diretamente relacionada com a qualidade dos dados utilizados nos modelos.

Medições de nível e corrente, simultâneas, em regiões do Canal da Barra e Lagoa da Conceição serveriam para aprofundar a calibração do modelo (p. ex., do ajuste do coeficiente de rugosidade de fundo) e, dessa maneira, aumentar a confiabilidade nos resultados. Medições por períodos de tempo mais longos na desembocadura externa do Canal da Barra adicionariam confiabilidade às análises estatísticas dos resultados, uma vez que devem existir mais repetições de um determinado fenômeno natural (p. ex., entrada de frentes frias).

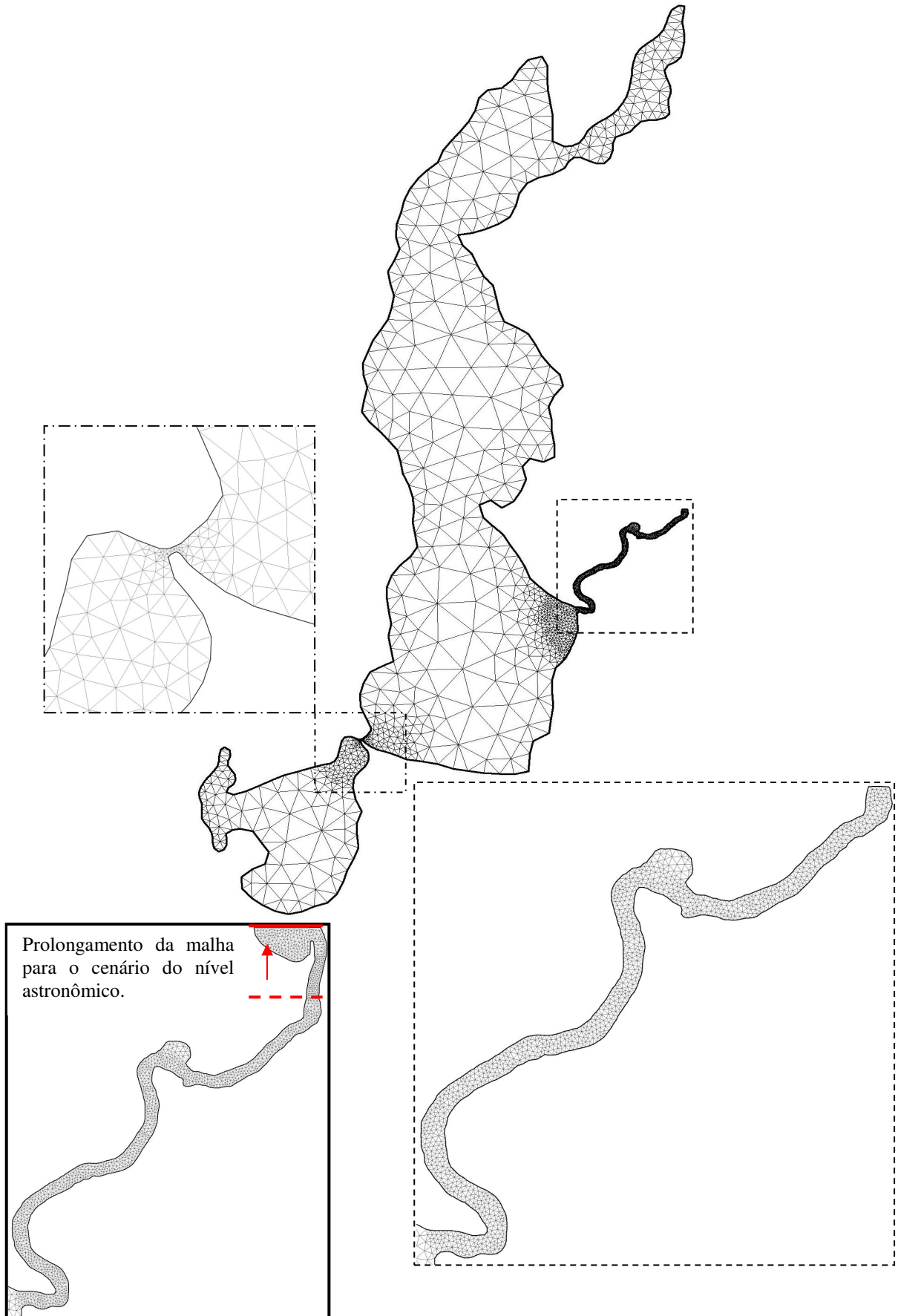
Modelos hidrodinâmicos são eficientes ferramentas para o manejo de ambientes aquáticos. No entanto, devem ser utilizados para responder questões específicas sobre uma determinada característica da hidrodinâmica de um sistema. A aproximação entre comunidade e universidade é essencial nessa etapa. É necessário que a comunidade compreenda os estudos que a universidade esta realizando, enquanto que a universidade deve tentar absorver a necessidade dos diversos setores da comunidade em seus estudos. Dessa maneira, é possível delinear o estudo de modelação hidrodinâmica, de maneira que, os resultados auxiliem no gerenciamento sustentável da Lagoa da Conceição.

REFERÊNCIAS

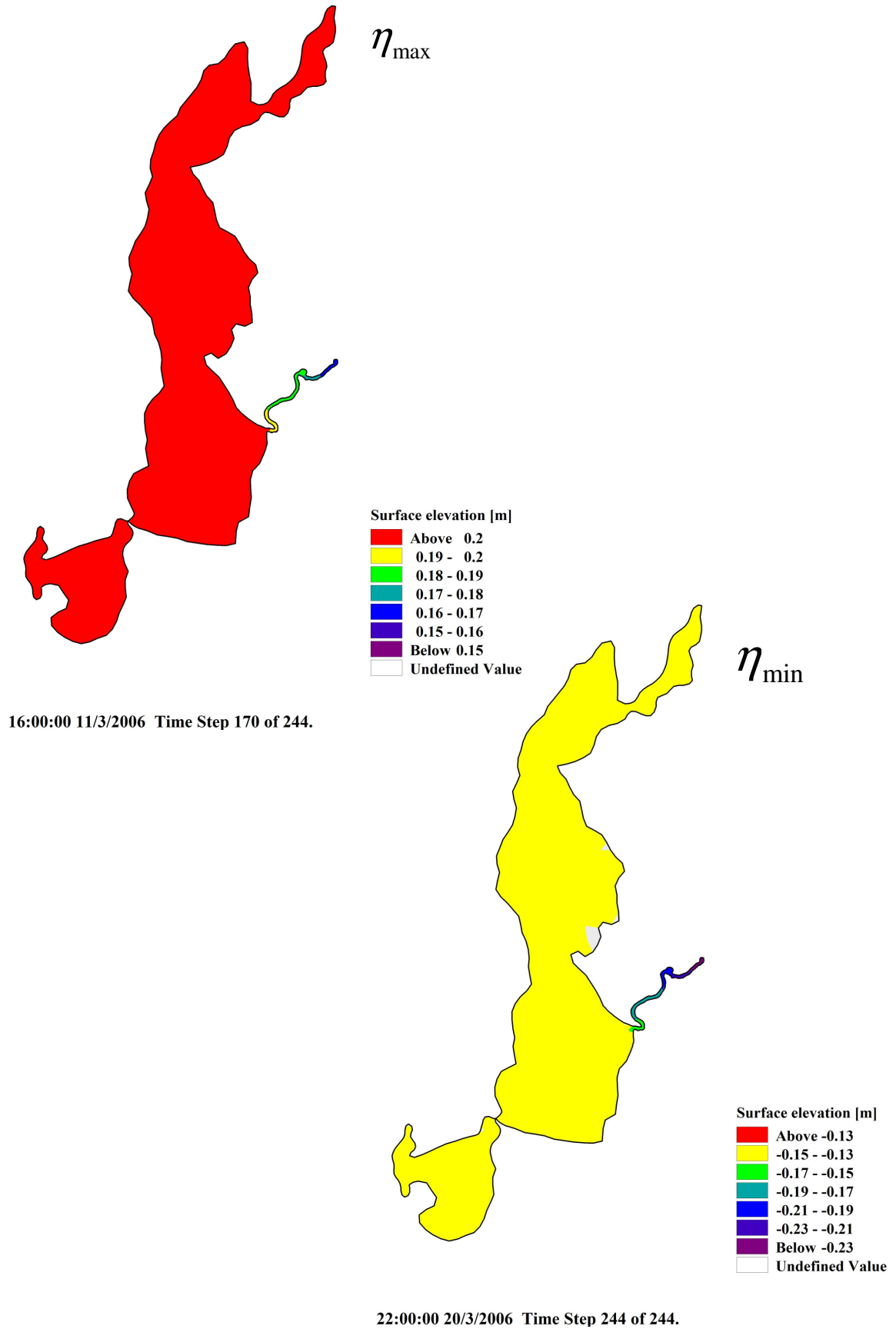
- ABBOT, M. B., BASCO, D. R., 1989, **Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers**. Logan Group, UK Limited.
- NASH, J. E. AND J. V. SUTCLIFFE., 1970, **River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles.**, Journal of Hydrology, 10 (3), 282–290.
- MORIASI, D. N. ET AL. (2007), **Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.**, Transactions of the ASABE, 50:(3), 885–900.
- HAUFF, S. N. **Diagnóstico Ambiental Integrado da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis, SC.** Dissertação (Mestrado em Geografia), UFSC. Florianópolis, SC. 1996.
- ANDRADE, R. C. **Estudo da circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. 121 f. Caruso e Odebrecht, 1999.
- DHI Scientific Documentation, 2007., Disponível no endereço eletrônico www.dhigroup.com
- DUTRA, S., 1990, **Caracterização Geo-Ambiental da Bacia de Drenagem do Rio João Gualberto, Ilha de Santa Catarina.** Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.
- FEITOSA F. F., 2002, **A Natureza e a Cidade: Qualificando Percursos na Lagoa da Conceição.** Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Arquitetura e Urbanismo - UFSC, Florianópolis, Brasil. *Título:*.
- FEMAR 2000, **Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras.** Fundação de Estudos do Mar – Femar. 1ª ed. Rio de Janeiro. 280p.
- FROIDEFOND, J. M.; STEFFEN, C. A. ; RODRIGUES, M. K. ; LUZ, V. J. P. ; MARTINS, M. R. ; SORIANO-SIERRA, E. J. . **Relação entre fatores de refletância espectral e parâmetros hidrológicos da Lagoa da Conceição, SC.** O Ecossistema da Lagoa da Conceição. Série Fepema, Florianópolis, SC, v. 4, p. 101-112, 1999.
- GODOY, F. B., **Caracterização Temática da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis - SC.** Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.
- GRÉ, J. C. R., HORN FILHO, N. O., 1999, "**Caracterização Textural dos Sedimentos de Fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**". In: Sierra de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J. (eds). O Ecossistema da Lagoa da Conceição, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 25-34 Florianópolis, SC, Brasil pp. 53.

- HAUFF, S. N. **Diagnóstico ambiental integrado da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição**. 1996. 145 p Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BARBOSA, T. C. P. **ECOLAGOA: um breve documento sobre a ecologia da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição** / Ana Cristina José, Juliana Rezende Torres – Florianópolis, Agnes, 2003.
- KJERFVE, B. 1990. **Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems**. UNESCO/UNDF Regional Project "Mangrove Ecosystems in Asia and the Pacific" (RAS/79/002 e RAS/86/120), 79p.
- KOEFENDER, F. **Análise Numérica da Influência Batimétrica no Padrão de Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC**. 101p. Dissertação (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.
- KUHNEN, A. **Lagoa da Conceição: Meio Ambiente e Modos de Vida em Transformação**. Florianópolis: Cidade Futura, 2002.
- LINO, J.F.L. **Análise Numérica da Influência de Forçantes Meteorológicas e Oceanográficas sobre a Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC**. Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, SC. 2005.
- MANGOR K., **Shoreline Management Guidelines**. DHI Water & Environment. Denmark. 232p. 2004.
- MIKE 21 MANUAL, DHI Water & Environment Institute. Disponível no endereço eletrônico www.dhigroup.com 2007.
- MUEHE, D., CARUSO GOMES Jr., **Batimetria e Algumas Considerações Sobre a Evolução Geológica da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina**. In: Sierra de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J. (eds). O Ecossistema da Lagoa da Conceição, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 15-24. 1999.
- NIMER, E., **Climatologia do Brasil**. Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente (SUPREN). Rio de Janeiro. IBGE 422p. 1979.
- ODEBRECHT, C., CARUSO GOMES Jr., **Hidrografia e Matéria Particulada em Suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. In: Sierra de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J. (eds). O Ecossistema da Lagoa da Conceição, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 35-61. 1999.
- ODRESKI F. R., **Alterações da Cobertura do Solo da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição. Florianópolis – SC**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.

- PASSOS, O. A., **Balneabilidade da Lagoa da Conceição e seus reflexos na qualidade de vida da população local**. Trabalho para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil. **2001**.
- PEREIRA, M. L. M., **Estudo da dinâmica das águas do canal da Barra – Barra da Lagoa – Florianópolis, SC**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Santa Catarina, 2004.
- PORTO FILHO, E., **Sedimentometria e Algumas Considerações Sobre a Biogeoquímica dos Sedimentos de Fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado em Geografia, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil. 1993.
- SIERRA DE LEDO, B. e KLINGEBIEL, A., **Effets Sur la Structure Hydrologique d'un Système Lagunaire, de son Ouverture Permanente Vers la Mer: Exemple de la Lagoa da Conceição (Île de Santa Catarina) Brésil**. In: Sierra de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J. (eds). O Ecossistema da Lagoa da Conceição, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 385-402. 1999.
- SIERRA DE LEDO, B., e SORIANO-SERRA, E. J., **A Coastal Ecosystem Management and its Effects in a Subtropical Climate: the Conceição Lagoon**. In: Sierra de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J. (eds). O Ecossistema da Lagoa da Conceição, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 371-383. 1999.
- ROSMAN, P. C. C., **EIA da Marina Porto da Barra – Florianópolis – SC: Análise dos Aspectos Hídricos e Oceanográficos**. Relatório AECO/COPPE/UFRJ. 1996.
- _____. **Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos**. In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos (Vol. 3), Capítulo 3, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. 1997.
- _____. **Os Modelos para Recursos Hídricos**. In: Magrini, A., dos Santos, M. A. (eds). Gestão Ambiental em Recursos Hídricos (Vol. 3), Capítulo 2 (Parte III), Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, COPPE/UFRJ. 2001.
- SOUZA, M. L. de. **Mudar a cidade: uma introdução crítica ao planejamento e à gestão urbanos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.
- SOUZA, J. C., **Análise da Paisagem: Instrumento de Intervenção nos Espaços Livres da Lagoa da Conceição – Florianópolis**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 145 p. 2003.
- TOBÓN, C. A. P., **Metodología para la validación de modelos hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: aplicación a la Bahía Meldrof em la Costa Del Mar Del Norte Alemán**. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade Nacional de Minas, Universidad Nacional de Colômbia – Posgrado em Reaprovechamento de Recursos Hidráulicos. 2002.
- WU, J., 1982, **Wind Stress Over Sea Surface from Breeze to Hurricane**, Journal of Geophysical Research, 87 (C12) , pp. 9704-9706.

ANEXO 1: MALHA BATIMÉTRICA

ANEXO 2: Campos de nı́ves na Lagoa da Conceição



ANEXO 3: Campos de níveis na canal da barra

