

**INSTITUTO DE QUÍMICA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - GEOQUÍMICA**

**ÂNGELO CEZAR BORGES DE CARVALHO**

**Trocas de sal entre a laguna de Araruama e o mar, utilizando um modelo hidrodinâmico (SiSBaHiA)**



**NITERÓI**

**2018**

ÂNGELO CEZAR BORGES DE CARVALHO

**TROCAS DE SAL ENTRE A LAGUNA DE ARARUAMA E O MAR, UTILIZANDO  
UM MODELO HIDRODINÂMICO (SiSBaHiA)**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Geoquímica Ambiental.

Orientador:

Profº Dr. Julio Cesar de Faria Alvim Wasserman

Coorientador:

Profº Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman

NITERÓI

2018

UFF. SDC. Biblioteca de Pós-Graduação em Geoquímica

C331 Carvalho, Ângelo Cezar Borges de.

Trocas de sal entre a laguna de Araruama e o mar, utilizando um modelo hidrodinâmico (SiSBaHiA) / Ângelo Cezar Borges de Carvalho. – Niterói : [s.n.], 2018.

129 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Geociências - Geoquímica Ambiental) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Julio Cesar de Faria Alvim Wasserman.  
Coorientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Paulo Cesar Collonna Rosman.

1. Lagoa costeira. 2. Hipersalinidade. 3. Sistema lagunar. 4. Ecossistema costeiro. 5. Modelagem numérica. 6. Lagoa de Araruama (RJ). 7. Produção intelectual. I. Título.

CDD 551.4609

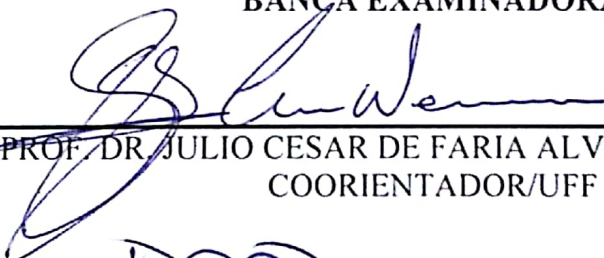
ÂNGELO CEZAR BORGES DE CARVALHO

**TROCAS DE SAL ENTRE A LAGUNA DE ARARUAMA E O MAR, UTILIZANDO UM  
MODELO (SisBaHia)**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós - Graduação  
em Geociências da Universidade Federal Fluminense,  
como requisito parcial para a obtenção do **Grau  
de Mestre**. Área de Concentração: **Geoquímica  
Ambiental**.

Aprovada em fevereiro de 2018.

**BANCA EXAMINADORA**



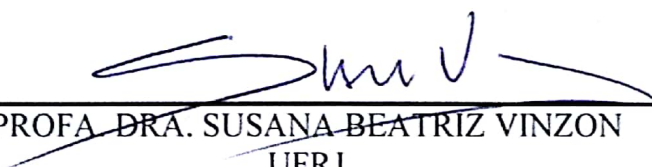
---

PROF. DR. JULIO CESAR DE FARIA ALVIM WASSERMAN  
COORDENADOR/UFF



---

PROF. DR. PAULO CESAR COLONNA ROSMAN  
COORDENADOR/UFRJ



---

PROFA. DRA. SUSANA BEATRIZ VINZON  
UFRJ



---

PROFA. DRA. ELISAMARA SABADINI SANTOS  
UFF

NITERÓI  
2018

## AGRADECIMENTOS

A minha mãe Marilene de Carvalho e meu irmão Jr Carvalho por me proporcionarem um porto seguro não só para os momentos de maré agitada, mas sim todas as ocasiões que precisei de vocês. Agradeço também, a minha irmã Thaynara por sempre me fazer sorrir aparecendo em meu quarto e me fazendo companhia enquanto estudava.

Ao meu pai José Bonfim por me conceder suporte emocional e os melhores conselhos quando tive dúvidas.

A minha prima Moema Carvalho por seu suporte incondicional e por me conceder o benefício de voar e conquistar meus sonhos.

A todos meus familiares por me incentivarem, acreditarem em mim e por contribuírem financeiramente no momento da mudança para o Rio de Janeiro.

Ao meu amigo Danilo Mecnas, não só por sua amizade, mas também por sempre me ajudar com as traduções e me ensinar a organizar meus textos de forma impecável.

Ao meu amado companheiro Matheus Machado por sua amizade, apoio, suporte e paciência. Agradeço também, a minha sogra Deise Machado por me conceder um segundo lar.

Aos meus amigos Andressa Ribeiro, Rodrigo Correia, Rodrigo Cavalcante, Bruno Melo, John Max, Lucas Nunes e Victor Hugo pelo suporte e disponibilidade em me ouvirem sempre que me encontrei preocupado com o andamento da pesquisa e mesmo distante, me ajudaram a atravessar esse difícil caminho.

Aos meus novos amigos Fernanda Pessanha, João Terra, Murilo Carvalho, Cleusa Trevisan, Bruno Cunha, Ludmila Cavalcante, Ana Carolina e Laura Duarte por me ajudarem nos estudos e por me provarem que o meio acadêmico pode existir sem competições desnecessárias.

Aos integrantes do grupo de pesquisa REMADS: Renata, Teresa, Kaylanne e Gabriela por toda ajuda que me forneceram e ao Eduardo por ter me ajudado a dar os primeiros passos com o SisBaHiA.

Ao Prof. Dr. Julio Wasserman por sua orientação, disponibilidade em me atender e auxílio durante todo o mestrado.

Ao Prof. Dr. Rosman por sua atenção e paciência em me inteirar completamente do funcionamento do SisBaHiA.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Geoquímica por todos os ensinamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento que me proporcionou a tranquilidade necessária para o prosseguimento adequado da pesquisa;

## RESUMO

A Lagoa de Araruama é um sistema hipersalino perene decorrente de sua restrita troca de massas com o área costeira adjacente e balanço hídrico negativo (*input* fluvial e pluvial menor que *output* por evaporação), seu tempo de residência é relativamente longo cerca de 84 dias, o que pode levar a uma suscetibilidade a um processo de deterioração da qualidade da água, mesmo decorrente de uma baixa carga poluidora. Por sua característica sufocada seu equilíbrio é precário, onde alterações do clima, mudanças hidrológicas, dragagens e influências antropogênicas podem causar mudanças em suas características físicas, químicas e biológicas. Nos últimos 45 anos a região da bacia hidrográfica obteve um crescimento populacional na ordem de 421%, esse salto populacional não foi acompanhado das devidas obras de esgotamento sanitário. Desta forma, as águas servidas da população foram destinadas para lagoa sem qualquer tratamento, provocando o decréscimo dos níveis de salinidade da lagoa, episódios de eutrofização e mortandade de peixes. Levando em conta que a hipersalinidade pode corroborar para manutenção da qualidade da água de um sistema lacustre, o objetivo desse trabalho consistiu em analisar o comportamento hipersalino da lagoa de Araruama frente a interferências naturais e antrópicas utilizando modelagem hidrodinâmica e de transporte de sal. Os resultados mostraram que a distribuição horizontal da salinidade está fortemente influenciada pelo clima, onde em período de chuvas intensas houveram áreas da lagoa com salinidade  $>10$ . Em cenário sobre condições semiáridas típicas, a salinidade manteve-se constante ou apresentou aumento. Três cenários de dragagem do Canal de Itajuru foram testados (2,5; 3 e 4 m), cujos resultados apresentaram desde perda a ganho de salinidade. Aprofundando o canal em 4,0m, altera-se o padrão salino do sistema, sugerindo haver uma mudança no sentido do balanço de sal da lagoa. Abertura de um segundo canal de barra implica em completo desequilíbrio da distribuição de sal do ecossistema laguna, tanto em cenário de verão como inverno, tamanha intervenção provocaria uma diluição permanente da salinidade da Lagoa de Araruama.

**Palavras-Chave:** Hipersalinidade. Sistema lagunar. Ecossistema Costeiro. Modelagem Numérica. Gerenciamento Costeiro.

## ABSTRACT

The Araruama Lagoon is a persistent hypersaline system due to its restriction of mass exchange with adjacent coastal area and negative water balance (river inlet and rainfall smaller than evaporation production), the flushing half-life of 84 days, which can lead to a deterioration process of water quality, even though this is due to a low pollution load. Due to its characteristic choked, the balance is precarious, with climate and hydrological changes, dredging and anthropogenic influences can cause changes in its physical, chemical and biological characteristics. In the last forty-five years the watershed region has achieved a population growth of 421%, this population increase was not accompanied by the necessary sanitary sewage works. Thus, the water served for the population was designed for the lagoon without any treatment, resulting in lower levels of salinity in the area (*achei melhor algum outro termo pq ficou repetitivo*), episodes of eutrophication and fish mortality. Taking into account that hypersalinity can corroborate for the maintenance of water quality of a lacustrine system, the goal of this work consisted in analyzing the hypersaline behavior of the Araruama lagoon face to natural and anthropic interferences using hydrodynamic modeling and salt transport. The results showed that the horizontal distribution of the salinity is strongly influenced by the climate, with during the period of intense rains, there were areas of the lagoon with salinity  $> 10$ . In a scenario on typical semi-arid conditions, salinity remained constant or increased. Three dredging scenarios of the Itajuru Canal were tested (2.5, 3 and 4 m), whose results presented from loss to gain of salinity. Deepening the channel by 4.0m, the salt pattern of the system, suggesting that there is a change not sent to the salt balance of the pond. Opening of a second entrance channel implies a complete unbalance of the salt distribution at the lagoon ecosystem, in the summer as well as the winter scenario, such intervention would cause a permanent dilution at the salinity of the Araruama Lagoon.

**Keywords:** Hypersalinity. Lagoon system. Coastal ecosystem. Numerical Modeling. Coastal management.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Gráfico mostrando o enriquecimento em um nutriente limitante e a resposta em termos de produção primária do fitoplâncton.....	22
<b>Figura 2</b> - Esquema de evolução da disponibilidade de nutrientes durante o processo de abertura de barra em lagunas costeiras. ....	24
<b>Figura 3</b> - Mapa de localização da Área de Trabalho.....	27
<b>Figura 4</b> - Balanço hídrico (pluviosidade - evaporação) na laguna de Araruama. Estação Meteorológica da Companhia Nacional de Álcalis/Arraial do Cabo. ....	30
<b>Figura 5</b> - Variação Anual de Evaporação entre Iguaba Grande e Cabo Frio.....	32
<b>Figura 6</b> - Variação Anual de Precipitação entre Iguaba Grande e Cabo Frio. ....	32
<b>Figura 7</b> - Crescimento populacional dos municípios do entorno da Lagoa de Araruama. ....	35
<b>Figura 8</b> - Roteiro da Modelagem Ambiental.....	40
<b>Figura 9</b> - Sistema de Coordenadas do Sistema de Modelagem promediado na vertical (3D e 2DH). ....	42
<b>Figura 10</b> – Distribuição de salinidade utilizada como condição inicial do modelo de transporte. ....	45
<b>Figura 11</b> - Domínio de Modelagem da Lagoa de Araruama.....	49
<b>Figura 12</b> - Mapa da batimetria geral da Lagoa de Araruama, com os dados de 2005 e 2016 da UFF. ....	50
<b>Figura 13</b> - Malha de discretização da Lagoa de Araruama para os cenários 1 e 2. O quadro em destaque descreve as informações da malha.....	51
<b>Figura 14</b> - Malha de discretização da Lagoa de Araruama para o cenário 3. O quadro em destaque descreve as informações da malha.....	51
<b>Figura 15</b> - Rosa dos ventos de janeiro de 2009 da estação meteorológica de Arraial do Cabo. Imagem gerada utilizando o programa WRPLOT.....	53
<b>Figura 16</b> - Intensidade dos ventos de janeiro de 2009, da estação meteorológica de Arraial do Cabo.....	53
<b>Figura 17</b> - Rosa dos ventos de julho de 2009 da estação meteorológica de Arraial do Cabo. Imagem gerada utilizando o programa WRPLOT.....	54
<b>Figura 18</b> - Intensidade dos ventos de julho de 2009, da estação meteorológica de Arraial do Cabo.....	54

<b>Figura 19</b> - Rosa dos ventos de janeiro de 2015 da estação meteorológica de Arraial do Cabo. Imagem gerada utilizando o programa WRPLOT.....	55
<b>Figura 20</b> - Intensidade dos ventos de janeiro de 2015, da estação meteorológica de Arraial do Cabo.....	56
<b>Figura 21</b> - Rosa dos ventos de julho de 2015 da estação meteorológica de Arraial do Cabo. Imagem gerada utilizando o programa WRPLOT.....	56
<b>Figura 22</b> - Intensidade dos ventos de julho de 2015, da estação meteorológica de Arraial do Cabo.....	57
<b>Figura 23</b> - Curva de Maré Sintética (720h).....	61
<b>Figura 24</b> - Pontos de descarte de efluentes. ....	62
<b>Figura 25</b> - Mapa com a localização das estações virtuais. ....	64
<b>Figura 26</b> - Elevação da superfície livre entre estações 3, 4, 6 e 7.....	66
<b>Figura 27</b> - Elevação da superfície livre entre dois pontos de malha nas extremidades Leste e Oeste da Lagoa de Araruama durante o verão.....	67
<b>Figura 28</b> - Mapa de elevação da superfície livre sob atuação de ventos de nordeste. ....	68
<b>Figura 29</b> - Mapa de circulação hidrodinâmica sobre atuação de ventos de nordeste. Seta A: Vórtices sentido anti-horário; Seta B: vórtice sentido horário. ....	68
<b>Figura 30</b> - Elevação da superfície livre entre dois pontos de malha nas extremidades Leste e Oeste da Lagoa de Araruama durante o inverno. ....	69
<b>Figura 31</b> - Mapa de elevação da superfície livre sob atuação de ventos de sudoeste. ....	70
<b>Figura 32</b> - Mapa de circulação hidrodinâmica sobre atuação de ventos de nordeste. Seta A: vórtice sentido horário; Seta B: vórtice sentido anti-horário.....	70
<b>Figura 33</b> - Comparação entre os padrões hidrodinâmicos sob atuação de ventos de NE e de SW. ....	71
<b>Figura 34</b> - Mapa de circulação hidrodinâmica em situação de calmaria, momento de enchente.....	71
<b>Figura 35</b> - Detalhe da Corrente de Enchente no Canal Itajurú. ....	72
<b>Figura 36</b> - Mapa de circulação hidrodinâmica em situação de calmaria, momento de vazante. ....	72
<b>Figura 37</b> - Detalhe da Corrente de Vazante no Canal Itajurú. ....	73
<b>Figura 38</b> - Balanço Hídrico entre a pluviosidade e evaporação anual, estação meteorológica de Arraial do Cabo (INMET), de janeiro de 2009 a dezembro de 2015. ....	74

<b>Figura 39</b> - Balanço Hídrico entre a pluviosidade e a evaporação mensal, estação meteorológica de Arraial do Cabo (INMET), de janeiro a dezembro de 2009. ....	75
<b>Figura 40</b> - Balanço Hídrico entre a evaporação e pluviosidade mensal, estação meteorológica de Arraial do Cabo (INMET), de janeiro a dezembro de 2015. ....	76
<b>Figura 41</b> - Mapa de distribuição de salinidade período de verão com balanço hídrico positivo, 2009. Momento de estofa vazante em maré de sizígia – Instante: 2426400(s), equivalente ao vigésimo sétimo dia de simulação. ....	77
<b>Figura 42</b> - Mapa de distribuição de salinidade período de inverno com balanço hídrico positivo, 2009. Momento de estofa vazante em maré de quadratura – Instante: 2498400(s), equivalente ao vigésimo oitavo dia de simulação. ....	78
<b>Figura 43</b> - Mapa de distribuição de salinidade período de verão com balanço hídrico negativo, 2015. Momento de estofa vazante em maré de quadratura – Instante: 2584800(s), equivalente ao vigésimo nono dia de simulação. ....	80
<b>Figura 44</b> - Mapa de distribuição de salinidade período de inverno com balanço hídrico negativo, 2015. Momento de estofa vazante em maré de quadratura – Instante: 2584800(s), equivalente ao vigésimo nono dia de simulação. ....	81
<b>Figura 45</b> - Variação da concentração de sal nas estações virtuais da região oeste 13, 14 e 15, durante um mês de simulação, em verão de 2009. ....	82
<b>Figura 46</b> - Variação da concentração de sal nas estações 7, 8 e 16, virtuais da região central durante um mês de simulação, em verão de 2009. ....	83
<b>Figura 47</b> - Variação da concentração de sal nas estações virtuais 3, 4 e 5 da região leste, durante um mês de simulação, em verão de 2009. ....	84
<b>Figura 48</b> - Variação da concentração de sal nas estações virtuais da 13, 14 e 15 na região oeste, durante um mês de simulação, em verão de 2015. ....	84
<b>Figura 49</b> - Variação da concentração de sal nas estações virtuais da região central, durante um mês de simulação, em verão de 2015. ....	85
<b>Figura 50</b> - Variação da concentração de sal nas estações virtuais 3, 4 e 5 da região Leste, durante um mês de simulação, em verão de 2015. ....	86
<b>Figura 51</b> - Distribuição de salinidade obtida através do modelo, em cenário de verão e valores medidos por Mello, (2007), no verão de dez05/jan06 (em vermelho). ....	88
<b>Figura 52</b> - Distribuição de salinidade obtida através do modelo, em cenário de verão e valores medidos por Silva (2014), no inverno de agos/14 (em vermelho). ....	88

<b>Figura 53</b> - Mapa do Canal Itajuru com os pontos de todos os nós com a batimetria alterada para 2,5m. ....	90
<b>Figura 54</b> - Mapa do Canal Itajuru com os pontos de todos os nós com a batimetria alterada para 3,0m. ....	90
<b>Figura 55</b> - Mapa do Canal Itajuru com os pontos de todos os nós com a batimetria alterada para 4,0m. ....	91
<b>Figura 56</b> - Mapa de distribuição horizontal de salinidade em período de verão com Canal Itajuru inalterado.....	92
<b>Figura 57</b> - Mapa de distribuição horizontal de salinidade em período de verão com Canal Itajuru dragado (-2.5m).....	93
<b>Figura 58</b> - Mapa de distribuição horizontal de salinidade em período de verão com Canal Itajuru dragado (-3.0m).....	93
<b>Figura 59</b> - Mapa de distribuição horizontal de salinidade em período de verão com Canal Itajuru dragado (-4.0m).....	94
<b>Figura 60</b> - Seção de cálculo determinada para obtenção das vazões de entrada e saída do sistema. ....	96
<b>Figura 61</b> - Mapa de distribuição de salinidade período de verão, 2015. Momento de estufa vazante – Instante: 2498400(s), equivalente ao vigésimo oitavo dia de simulação. ....	101
<b>Figura 62</b> - Mapa de distribuição de salinidade período de verão, 2015. Momento de estufa vazante – Instante: 5133600(s), equivalente ao quinquagésimo quinto dia de simulação. ....	102
<b>Figura 63</b> - Mapa de distribuição de salinidade período de verão, 2015. Momento de estufa vazante – Instante: 7596000(s), equivalente ao octogésimo quinto dia de simulação. ....	103
<b>Figura 64</b> - Mapa de distribuição de salinidade período de inverno, 2015. Momento de estufa vazante – Instante: 2545200(s), equivalente ao vigésimo nono dia de simulação. ....	104
<b>Figura 65</b> - Mapa de distribuição de salinidade período de inverno, 2015. Momento de estufa vazante – Instante: 5094000(s), equivalente ao quinquagésimo sexto dia de simulação. ....	105
<b>Figura 66</b> - Mapa de distribuição de salinidade período de inverno, 2015. Momento de estufa vazante – Instante: 7642800(s), equivalente ao octuagésimo quinto dia de simulação. ....	106
<b>Figura 67</b> - Variação da concentração de sal nas estações virtuais 7, 8 e 16 da região central, durante um mês de simulação, em verão de 2015. ....	107
<b>Figura 68</b> - Variação da concentração de sal das estações virtuais 13, 14 e 15 na região oeste, durante um mês de simulação, em verão de 2015. ....	108

<b>Figura 69</b> - Variação da concentração de sal das estações virtuais 4, 5 e 6 na região Leste, durante um mês de simulação, em verão de 2015. ....	108
<b>Figura 70</b> - Variação da concentração de sal das estações virtuais 7, 8 e 9 da região central, durante três meses de simulação, em inverno de 2015. ....	109
<b>Figura 71</b> - Variação da concentração de sal nas estações virtuais 13, 14 e 15 da região Leste, durante três meses de simulação, em inverno de 2015. ....	109
<b>Figura 72</b> - Variação da concentração de sal nas estações virtuais da 4, 5 e 6 região Leste, durante três meses de simulação, em inverno de 2015. ....	110
<b>Figura 73</b> - Acima detalhe da porção oeste, verão 2015. Abaixo, detalhe porção oeste, inverno 2015. Momento de ultima estofa vazante. ....	111
<b>Figura 74</b> - Acima esquerda, detalhe da porção central, verão 2015. Abaixo detalhe da porção central, inverno 2015. Momento de ultima estofa vazante. ....	112
<b>Figura 75</b> - Acima, detalhe da porção leste, verão 2015. Abaixo, detalhe da porção leste, inverno 2015. Momento de ultima estofa vazante. ....	112

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Vazão Média dos Principais Rios e Represa de Juturnaíba.....	29
<b>Tabela 2</b> - Variação temporal da salinidade na lagoa de Araruama desde o início dos anos 1990 .....	36
<b>Tabela 3</b> - Dados de evaporação utilizados na modelagem.....	59
<b>Tabela 4</b> - Vazão Média 2009.....	60
<b>Tabela 5</b> - Vazão Média 2015.....	60
<b>Tabela 6</b> - Constantes harmônicas utilizadas na modelagem. ....	61
<b>Tabela 7</b> - Vazões de esgoto afluentes e respectivos pontos de descarte. ETE – Araruama – ETE São Pedro – ETE Cabo Frio. ....	63
<b>Tabela 8</b> - Localização e Coordenadas das Estações Virtuais.....	65
<b>Tabela 9</b> - Dados de salinidade medidos por (MELLO, 2007) em dezembro de 2005 e janeiro de 2006, pelo REMADS (2014) e os resultados relativos ao estudo de (GOMES, 2009) e o desta pesquisa. ....	87
<b>Tabela 10</b> - Vazão Máxima, Mínima e o volume total de água de entrada e saída durante 718,12 horas. ....	97
<b>Tabela 11</b> - Salinidade para as diferentes condições batimétricas do Canal Itajuru.....	99
<b>Tabela 12</b> - Salinidade em diferentes estofas de maré vazante para o verão e inverno 2015. ....	110

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 OBJETIVO GERAL</b> .....	16
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
3.1 LAGUNAS COSTEIRAS HIPERSALINAS .....	17
3.2 BALANÇO HÍDRICO E DE SAL EM LAGUNAS COSTEIRAS .....	19
3.3 PROCESSOS TRÓFICOS EM AMBIENTES LAGUNARES .....	20
3.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE GESTÃO DE AMBIENTES COSTEIROS .....	25
<b>4 ÁREA DE TRABALHO</b> .....	27
4.1 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS .....	28
4.2 BALANÇO HÍDRICO DA LAGOA DE ARARUAMA.....	29
4.3 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS .....	30
<b>4.3.1 Evaporação e Precipitação</b> .....	31
<b>4.3.2 Vento</b> .....	32
4.4 CARACTERIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DA MARÉ .....	33
4.5 ESTUDOS DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA EM ARARUAMA .....	33
4.6 DESENVOLVIMENTO URBANO E SANEAMENTO AMBIENTAL .....	35
4.7 EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DE ARARUAMA (LEVANTAMENTO HISTÓRICO) .....	37
<b>5 METODOLOGIA</b> .....	39
5.2 MODELO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA 2DH PARA CORPOS D'ÁGUA RASOS .....	41
<b>5.2.1 Equações Governantes</b> .....	42
5.3 MODELO DE TRANSPORTE EULERIANO ADVECTIVO-DIFUSIVO.....	44
<b>5.3.1 Formulação Matemática do Modelo de Transporte</b> .....	44
5.4 CONDIÇÕES INICIAIS .....	45
5.5 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO .....	46
<b>5.5.1 Simulação em Condições de Balanço Hídrico Positivo e Negativo</b> .....	46
<b>5.5.2 Dragagem do Canal em 2,5, 3,0 e 4,0 metros</b> .....	47
<b>5.5.3 Abertura de um Canal de Barra</b> .....	47
5.6 DADOS DE ENTRADA .....	48
<b>5.6.2 Discretização Espacial</b> .....	50

<b>5.6.4 Balanço Hídrico: Evaporação, Precipitação e Vazão Afluente</b> .....	57
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	64
6.2 INFLUÊNCIA DO BALANÇO HÍDRICO SOBRE A SALINIDADE DA LAGOA DE ARARUAMA.....	73
<b>6.2.1 Precipitação e Evaporação: 2009 a 2015</b> .....	73
<b>6.2.2 Distribuição da Salinidade: 2009</b> .....	76
<b>6.2.3 Distribuição da Salinidade: 2015</b> .....	79
<b>6.2.4 Avaliação da Influência do Balanço Hídrico</b> .....	81
<b>6.2.5 Comparação com Dados de Campo e Software</b> .....	86
<b>6.3 DRAGAGEM DO CANAL ITAJURU</b> .....	88
<b>6.3.1 Método da Dragagem</b> .....	89
<b>6.3.2 Distribuição Horizontal da Salinidade: 2015</b> .....	91
<b>6.3.3 Balanço de Massas de Água</b> .....	95
<b>6.3.4 Comparação entre os Cenários</b> .....	99
6.4 ABERTURA DE UM CANAL DE BARRA NA PORÇÃO OESTE DA LAGOA DE ARARUAMA.....	100
<b>6.4.1 Distribuição Horizontal da Salinidade – Verão 2015</b> .....	100
<b>6.4.2 Distribuição da Salinidade - Inverno 2015</b> .....	104
6.4.3 Série Temporal de Salinidade.....	106
<b>6.4.5 Análise do Padrão Sazonal</b> .....	110
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	115
<b>8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	119

## 1 INTRODUÇÃO

Aproximadamente dois terços das grandes cidades distribuídas em todo mundo estão localizadas em zonas costeiras próximas a lagoas e estuários (SOUZA; KJERFVE, 1997). Esta intensa aglomeração populacional vem causando pressões, com propósitos diversos, sobre os recursos hídricos desses ambientes, como vias fluviais, energia, irrigação, consumo e descarga de esgoto (GUERRA, 2008). Conseqüentemente, a pressão exercida sobre os recursos hídricos costeiros vem reduzindo sua resiliência a longo prazo e, assim, limitando sua sustentabilidade (DUXBURY; DICKINSON, 2007).

As lagoas costeiras são ambientes altamente produtivos e berço de várias espécies. Contudo, são ecossistemas vulneráveis às tensões artificiais, pois respondem mais rápido a estressores que outros ambientes (JONES, 2001). Além disso, também são influenciadas por mudanças naturais (*e.g.* clima) que podem corroborar para alterações das comunidades aquáticas e dos padrões de qualidade da água.

Diversas lagoas pelo mundo estão sujeitas a algum tipo de impacto antrópico (BRUUN, 1994). Erosões, escoamento superficial de fertilizantes empregados na agricultura, descarga de efluentes de áreas urbanas e obras de engenharia são as perturbações antrópicas mais comuns (BRUUN, 1994). A fertilização cultural tem conduzido muitas lagoas costeiras para condições eutróficas e hipereutróficas (KNOPPERS; CARMOUZE; MOREIRA-TURCQ, 1999). As principais conseqüências disso são mudanças na composição das espécies, mortalidade de peixes, mudanças do estado trófico e problemas sanitários (BOROWITZKA, 1994; CARMOUZE et al., 1993; LAVERY; LUKATELICH; MCCOMB, 1991; SFRISO et al., 1988). Entretanto, os órgãos reguladores, ao invés de controlar as fontes de nutrientes, sugerem alternativas nas obras de engenharia, tais como mudanças nos canais de maré, dragagem e estabilização do nível da água para aumentar a capacidade de armazenamento e o potencial de diluição dos efluentes (BRUUN, 1994).

As lagoas costeiras localizadas no litoral fluminense, *e.g.* Lagoa de Araruama, Lagoa Vermelha, Lagoa de Itaipú, entre outras, possuem dimensões variadas e são vulneráveis aos impactos naturais e antrópicos devido à limitada troca das massas d'água, longos tempos de residência e baixa profundidade (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993).

A Lagoa de Araruama, a partir da década de 60, iniciou um crescimento urbano desordenado (SILVA et al., 2015). Esse grande desenvolvimento, no entanto, resultou em grande aporte de efluentes domésticos e industriais transformando-a, assim, em um corpo

receptor de rejeitos (BASSANI, 2000). Apesar do adensamento urbano crescente após a década de 60, a Lagoa de Araruama conseguiu manter, por um longo tempo, seu estado oligotrófico em função da sua alta salinidade e grande volume de água (GUERRA, 2008). Porém, estudos demonstraram que alterações na sua hidrologia, poderiam provocar mudanças em seu estado trófico (KJERFVE et al., 1996; MOREIRA-TURCQ, 2000; SOUZA et al., 2003). Assim, como sugeriram os estudos acima citados, o estado trófico da Lagoa de Araruama evoluiu de oligotrófico para mesotrófico (MELLO, 2007), e de mesotrófico para eutrófico (GUERRA, 2008). O que pode ter corroborado para uma série de eventos de desequilíbrio ambiental na laguna registrado na literatura.

Em julho de 2005, as águas do sistema, que eram transparentes, adquiriram uma coloração acastanhada em função de um repentino florescimento de microalgas (MELLO, 2007). Em 2009 e 2011, massivas mortandades de peixes ocorreram após intensas chuvas, trazendo danos para a comunidade pesqueira (WASSERMAN, 2016). Além de afetar atividades de pesca, mudanças na balneabilidade também podem acarretar em problemas para as atividades turísticas, que são atraídas pelos característicos ventos fortes, águas calmas, grande insolação e baixa precipitação na região da laguna (SOUZA, 1997).

Logo, estudos ecológicos que compreendam a dinâmica desses ambientes são fundamentais, não apenas para o entendimento do metabolismo dos ecossistemas, mas também para planejamentos ambientais costeiros eficientes que contemplem atividades de monitoramento contínuo de indicadores ecológicos, *e.g.* comportamento hidrodinâmico, salinidade, OD, entre outros (CRAPEZ; BISPO; TOSTA, 1993; MOSS, 1998; SHEFFER, 2000). Neste contexto, a aplicação de modelos matemáticos podem servir de ferramentas para compreender sistemas complexos como este ecossistema lacustre e auxiliar na tomada de decisões acerca do gerenciamento de seus recursos hídricos (FRAGOSO JR; FERREIRA; MARQUES, 2009).

A modelagem computacional foi empregada em diferentes trabalhos para a caracterização do comportamento hidrodinâmico na Lagoa de Araruama (CUNHA, 2003; GAVA, 2008), bem como a identificação do padrão sazonal da salinidade (GOMES, 2009). Desta forma, o presente trabalho ressalta a importância da utilização de um modelo computacional, com o intuito de enriquecer o conhecimento acerca da dinâmica deste ambiente, através da determinação do comportamento da salinidade da Lagoa de Araruama – parâmetro importante quando se trata de um ambiente hipersalino – frente a cenários projetados de interferência natural e antrópica.

## 2 OBJETIVO GERAL

Analisar as respostas em termos de variação da salinidade da lagoa de Araruama frente aos aportes de água doce e às interferências antrópicas no dimensionamento das conexões com o mar, utilizando modelagem hidrodinâmica e de transporte de sal.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Desenvolver modelo hidrodinâmico 2DH capaz de simular a circulação hidrodinâmica e o transporte de sal na Lagoa de Araruama em diversos cenários;
- II. Avaliar a influência do balanço hídrico sobre a distribuição horizontal de salinidade na Lagoa de Araruama em período húmido (2009) e período seco (2015);
- III. Observar a resposta da distribuição horizontal da salinidade da Lagoa de Araruama frente a modificações na conexão com o mar, através de sucessivas dragagens no Canal Itatjuru;
- IV. Analisar a resposta da distribuição espacial da salinidade da Lagoa de Araruama frente a abertura de um canal de barra na porção oeste do sistema e sugerir qual seria a nova dinâmica da salinidade da laguna.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 LAGUNAS COSTEIRAS HIPERSALINAS

Na literatura científica há variadas definições para a fisiografia de lagunas costeiras salinas ou hipersalinas, segundo as mais diversas abordagens (ANGUS, 2016). Sua caracterização varia globalmente em sentido terminológico, como em termos conceituais. Alguns autores sugerem terminologias diferentes como: “sistemas costeiros semi-fechados” (*semi-enclosed coastal systems - SECS*) (NEWTON et al., 2014) e regiões de trocas restritas (*regions of restricted exchange – RRE*) (TETT et al., 2003). Outros, definem os sistemas considerando diversos fatores, principalmente o morfológico associado ao climático.

Segundo esse preceito, Phleger (1969) define lagunas costeiras como corpos d’água marinhos interiores, encontradas em todos os continentes, usualmente orientadas em direção paralela à costa, separadas do oceano por uma barreira, mas conectando-se ao mesmo por um ou mais canais. A essa definição, Kjerfve (1994) acrescentou que as ligações com o oceano podem ser ocasionalmente obstruídas, como resultado da sedimentação pela ação das ondas e da deriva litorânea.

Outras definições são propostas também, por exemplo, pelo Manual de Interpretação de Habitats Europeu, que estabelece que lagunas salinas são extensões de água salgada costeira superficial, de salinidade variável e volume de água, total ou parcialmente separadas do mar por bancos de areia ou esporões, ou, menos frequentemente, por rochas. Posteriormente, a pedido do Grupo de Trabalho da Lagoa Salina do Reino Unido (*The UK Saline Lagoon Working Group commissioned*), Bamber (2010) revisou a definição para:

Áreas de tipicamente (mas não exclusivamente) superficiais, costeiras água salgada, total ou parcialmente separada do mar por bancos de areia, *tills* ou, com menos frequência, rochas ou outros substratos duros. Eles mantêm uma proporção de sua água na maré baixa e podem desenvolver-se como corpos de água salobra, totalmente salgadas ou hipersalinas.

A definição mais utilizada na literatura é proposta por Kjerfve (1986), o autor divide as lagunas em três tipos geomorfológicos de acordo com o canal de ligação com o oceano, a saber: laguna sufocada, com um único e longo canal de conexão com o mar; laguna restrita, apresenta dois ou mais canais de ligação; e laguna vazada, com várias conexões com o mar ao longo da costa. Dentre esses tipos, a primeira, apresenta a menor taxa de troca de água.

Segundo Miranda; Castro; Kjerfve (2002), tais sistemas costeiros são em geral rasos, com 1 a 10 metros de profundidade, que podem ser forçados pela descarga de água doce, pela tensão de cisalhamento do vento e, em menor intensidade, pela maré. Ainda segundo os autores, as lagoas localizadas em regiões tropicais e subtropicais os balanços de precipitação- evaporação podem desempenhar papel importante para o sistema.

Lagoas Costeiras, dependendo das condições climáticas locais e geomorfológicas, podem apresentar concentração de sal, comportando-se desde uma lagoa hiposalina até hipersalina (KJERFVE, 1986; CARMOUZE; KNOPPERS; VASCONCELOS, 1991). Segundo Kjerfve (1986 e 1994) este comportamento pode ser encontrado em lagoas costeiras tipo “sufocada”, onde existe um único canal de ligação entre o sistema aquático e o oceano com troca de massas restrita. Desta forma, a lagoa costeira, ao reter água do mar em seu interior somado a um balanço hídrico negativo (*output* por evaporação superando *input* por descargas fluviais e pluviais), ocorrerá aumento da concentração do sal, conferindo ao sistema a condição hipersalina (GRÄWE; WOLFF; RIBBE, 2009; HEGGIE; SKYRING, 1999; KJERFVE et al., 1996; WOLANSKI, 1986).

Tendo em vista que a hipersalinidade de lagoas está fortemente associada aos processos climáticos, existem muitas lagoas no mundo que apresentam transição entre hipersalinidade intermitente como a lagoa de Caimanero-Huizache, na costa Oeste do México, descrita por (MOORE; SLINN, 1984) que apresenta pouco mais de 175 km<sup>2</sup> de área, mas uma amplitude de salinidade que varia de 23 (na estação úmida) a 84 (na estação seca). Como também podem apresentar hipersalinidade perene, como a de Coorong, na Austrália (WEBSTER, 2010); a de Akyatan, na Turquia (LECUYER et al., 2003) e a de Indian River, na Flórida (KANG; KOCH; GOBLER, 2015). A lagoa de Araruama - RJ, área de trabalho desse estudo, também é um sistema hipersalino perene, controlado pelas características semiáridas da região onde se situa (KJERFVE et al., 1996).

Nesses ambientes aquáticos a hipersalinidade atribui determinadas particularidades geoquímicas, físicas e biológicas relevantes. Por exemplo, a salinidade pode funcionar como um conveniente traçador, além de auxiliar na manutenção da qualidade da água (SMITH, 1994). Outra citação relevante é que nestes sistemas o desenvolvimento da vida não é favorecido pela excessiva pressão osmótica, extremos de pH, temperaturas elevadas e baixa disponibilidade de oxigênio e somente organismos que dispõem de mecanismos adaptativos específicos são capazes de sobreviver (SHILO, 1980). Desta maneira, a forte pressão do

ambiente pode levar os processos tróficos a serem controlados preferencialmente por fatores físicos e químicos, em detrimento dos biológicos (STILLER; NISSENBAUM, 1999).

Alguns trabalhos pretéritos têm demonstrado que ambientes hipersalinos tendem a apresentar uma baixa produção primária fitoplanctônica, visto que a disponibilidade de nitrogênio e particularmente de fósforo na coluna d'água é restrita (STILLER; NISSENBAUM, 1999). Assim, as águas das lagunas hipersalinas ficam transparentes e permitem uma maior proliferação de biomassa macroalgal, próxima ao fundo, onde, além disto os nutrientes encontram-se mais disponíveis (CANFIELD JR et al., 1984; SOUZA et al., 2003).

Ademais, quanto às lagunas costeiras hipersalinas do tipo “sufocada”, seu tempo de residência é relativamente longo, o que leva a um processo de deterioração da qualidade da água, mesmo decorrente de uma baixa carga poluidora (KJERFVE et al., 1996). Portanto, estes sistemas têm seu equilíbrio precário, onde alterações do clima, mudanças hidrológicas, dragagens e influências antropogênicas podem causar mudanças em suas características físicas, químicas e biológicas (KJERFVE et al., 1996).

### 3.2 BALANÇO HÍDRICO E DE SAL EM LAGUNAS COSTEIRAS

Segundo resultados dos estudos de Smith (1994), o balanço hídrico e de sal de uma lagoa estão no centro do entendimento de suas características físicas, químicas e biológicas. De acordo com Smith (1994), os fatores morfológicos influenciam diretamente nos processos que controlam o equilíbrio hídrico e de sal, os mais importantes são as dimensões e configuração do canal de comunicação com o mar, o tamanho da lagoa e a orientação em relação aos ventos predominantes e a profundidade da água. As configurações internas controlam as trocas de água. A configuração do canal, em contrapartida, controla os níveis do fluxo de saída da água e o tempo de residência, e, portanto, a qualidade da água. Os ventos têm um maior efeito na direção das correntes em grandes lagunas. A batimetria de fundo, desde a natural ou resultado de intervenções antrópicas no canal, controlam a influência da maré que por sua vez controla o transporte advectivo. Já o fluxo de sal, determina as características estuarinas da lagoa.

Para Smith (1994), quando trata-se de uma laguna sufocada, as correntes de maré são, em geral, apenas importantes na proximidade das enseadas, e a advecção é a principal resposta à forçante do vento local. A circulação conduzida pelo vento inclui uma deriva que

produz uma inclinação superficial e conduz um fluxo de retorno próximo ao fundo. Uma corrente orientada por densidade pode ser significativa mesmo em lagoas bem misturadas. Desta forma, o fluxo da maré residual pode ser importante a longo prazo, mas em intervalos curtos de tempo, o fluxo líquido em resposta ao vento local é dominante.

Ainda de acordo com Smith (1994), o balanço de sal pode ser discutido em termos de transporte através de uma sessão, e quanto a ganhos e perdas varia de acordo com a localidade. Segundo o autor, o transporte de sal ocorre por advecção e difusão. Em longo prazo, o equilíbrio de sal tem a capacidade de manter as condições hipersalinas de uma laguna costeira, contudo, desequilíbrios podem alterar significativamente a distribuição de sal.

Para Wang et al., (2007), o grau de hipersalinidade é influenciado pelo equilíbrio de água doce da região e trocas das massas hipersalinas do sistema com as águas menos salinas do mar. O processo de cambio entre as águas hipersalinas interiores com as massas menos salinas do oceano costeiro adjacente são governados em grande escala por difusão turbulenta, circulação termohalina e advecção (WANG et al., 2007).

Segundo Salamena; Martins; Ridd (2016), a extensão da hipersalinidade de um sistema aquático costeiro depende do balanço de água doce da região, que está altamente associado às características sazonais. Ou seja, entre o verão e o inverno, a dimensão espacial da hipersalinidade pode diminuir ou aumentar. A Lagoa de Araruama, têm sua distribuição sazonal de salinidade regida desta forma, pois durante o verão a áreas de maior salinidade estão restritas ao centro do sistema enquanto suas extremidades apresentam águas menos salinas ou equivalentes a salinidade do mar. Durante o inverno, a as altas concentrações de sal são expandidas no sentido de suas extremidades (GOMES, 2009).

### 3.3 PROCESSOS TRÓFICOS EM AMBIENTES LAGUNARES

A importância de compreender o balanço hidrico e de sal em lagoas vai além do papel que a salinidade desempenha em determinar as características estuarinas da laguna. Esse parametro, pode desempenhar influência sobre a qualidade da água e interferir nos processos tróficos em ambientes costeiros (LOITZENBAUER; MENDES, 2011)

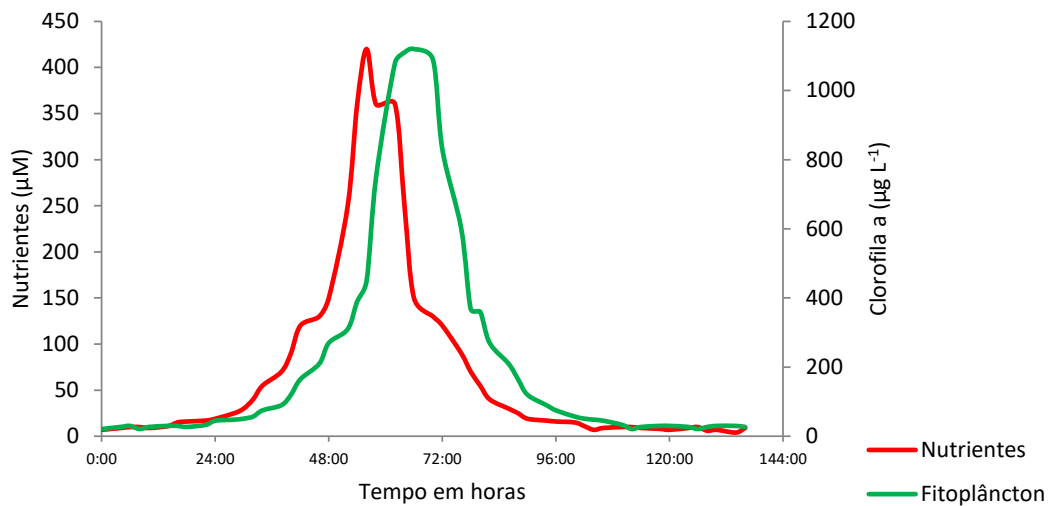
Segundo (CARMOUZE; KNOPPERS; VASCONCELOS, 1991), os processos metabólicos das lagoas costeira são controlado pela produção primária e pela mineralização da matéria orgânica. De acordo com os estudos destes autores na lagoa de Saquarema, foi possível identificar a importância das variações diurnas nos processos pelágicos (relativos à

coluna d'água) e bênticos (relativos ao sedimento) onde ocorre alternância de autotrofia e heterotrófica, ou seja, de produção de matéria orgânica e pela mineralização da matéria orgânica.

Estes autores advertem a complexidade desses processos e que sua variabilidade em diferentes escalas de tempo, podem levar a disponibilização de nutrientes na coluna d'água, e desta maneira desencadear florações algais. Outro aspecto relevante do estudo de Carmouze; Knoppers; Vasconcelos (1991), está na relação entre os estoques de matéria orgânica e nutrientes presentes no sedimento e a produção de microalgas na coluna d'água. Com base em outros estudos Carmouze et al. (1998); Carmouze; Sampaio; Domingos (1994); Cunha; Wasserman (2003); Wasserman et al. (1999), os autores puderam observar que a mineralização de nutrientes para a coluna d'água contribui mais para produção primária e consequentes florações algais do que os aportes de nutrientes oriundos dos esgotos domésticos.

De acordo com a Lei de Liebig, todo ambiente aquático necessita de um elemento (ou fator) limitante à produção primária (RICKLEFS, 1993). Por exemplo, se um sistema com nitrogênio, carbono, fósforo, molibdênio, luz e etc. abundantes, mas, pouco ferro, significa dizer que a produção primária será sempre controlada pela disponibilidade deste último elemento. Ou seja, o nutriente limitante, será o elemento em menor disponibilidade no ecossistema.

Logo, caso ocorra algum aporte deste elemento limitante no ambiente, a produção primária responde imediatamente (Figura 1) (WASSERMAN, 2016). Portanto, florações algais podem ocorrer sempre que há desequilíbrio químico na água com excesso do nutriente limitante. Uma outra forma de desencadear o florescimento de algas seria através da disponibilização de nutrientes na coluna d'água através do processo de remineralização dos nutrientes (nitrogênio e fósforo) estocados no sedimento (CARMOUZE et al., 1998).



**Figura 1** - Gráfico mostrando o enriquecimento em um nutriente limitante e a resposta em termos de produção primária do fitoplâncton.  
Fonte: WASSERMAN, 2016.

Quando esse aporte de nutriente limitante passa a ocorrer de forma perene, pode fornecer algum desequilíbrio para o ambiente. De acordo Silva e Rosman (2016), lagunas costeiras são ecossistemas propícios à acumulação de nutrientes de origem natural e antrópica, principalmente do tipo sufocada que apresentam pequenas trocas de massa. Desta forma, esses ecossistemas costeiros estão, naturalmente, sujeitas ao processo de eutrofização (CARLONI et al., 2010). Segundo, Ricklefs (1993), eutrofização pode ser definida como:

Qualquer substância que intensifica a produtividade de um habitat pode ser considerada fertilizante... Os nitratos e fosfatos e outros fertilizantes inorgânicos (...) aumentam a produção biológica. Uma consequência desta fertilização artificial, muitas vezes chamada de eutroficação, é a mudança das condições biológicas e químicas de um corpo d'água.

O processo de eutrofização pode ser classificado de acordo com origem do material aportado (ESTEVES; MEIRELLES-PERIRA, 2011; XAVIER; DIAS; BRUNKNOW, 2005). Segundo os autores, quando os lagos são gradualmente preenchidos pelo aporte de nutrientes trazidos pela chuva e pelas águas que erodem e lavam a superfície terrestre (tempo em escala geológica), denomina-se eutrofização natural ou envelhecimento dos lagos. Quando os nutrientes são de origem antrópica (*e.g* agricultura, esgotos domésticos, lixiviação dos espaços urbanos e indústrias) e provocam profundas modificações qualitativas e quantitativas nas comunidades aquáticas, nas condições físicas e químicas do meio e no nível de produção do sistema, denomina-se eutrofização cultural.

A eutroficação cultural é responsável por desequilíbrios ecológicos intensos, reduzindo a biodiversidade, provocando mortandades de peixes e outros organismos de interesse comercial, aumentando a produção de matéria orgânica que em última instância provoca incremento no processo de colmatação (assoreamento) dos ambientes costeiros, incluindo as lagunas (WASSERMAN, 2016).

Segundo Vollenweider (1992), ao atingir o ecossistemas costeiros chamados lênticos como lagos e lagunas costeiras, os nutrientes são rapidamente convertidos em produção primária. Em estudos realizados com fanerógama marinha *Syringodium filiforme*, (SHORT et al., 1985; SHORT; MCROY, 1984) observaram uma retirada de nutrientes da água era tão intensa que podia esgotar rapidamente suas concentrações. O processo de retirada dos nutrientes pelos produtores primários é bastante complexo, de forma que o conjunto de condições reinantes vai determinar a espécie dominante no processo. Por exemplo, em ambientes muito rasos, existe uma tendência à dominância de macroalgas ou macrófitas (WASSERMAN, 2016).

Por outro lado, em um sistema dominado pelo fitoplâncton, os processos são muito mais complicados e dinâmicos do que nos dominados por macroalgas. Em vez do domínio de apenas uma espécie, o que ocorre é uma sucessão de florações mais ou menos intensas, cada vez com uma espécie diferente (WASSERMAN, 2016). Dentre estas espécies, algumas podem ser florações algais nocivas (FAN, ou HAB), as quais costumam ser responsáveis por mortandades de peixes (HALLEGRAEFF; ANDERSON; CEMBELLA, 2004).

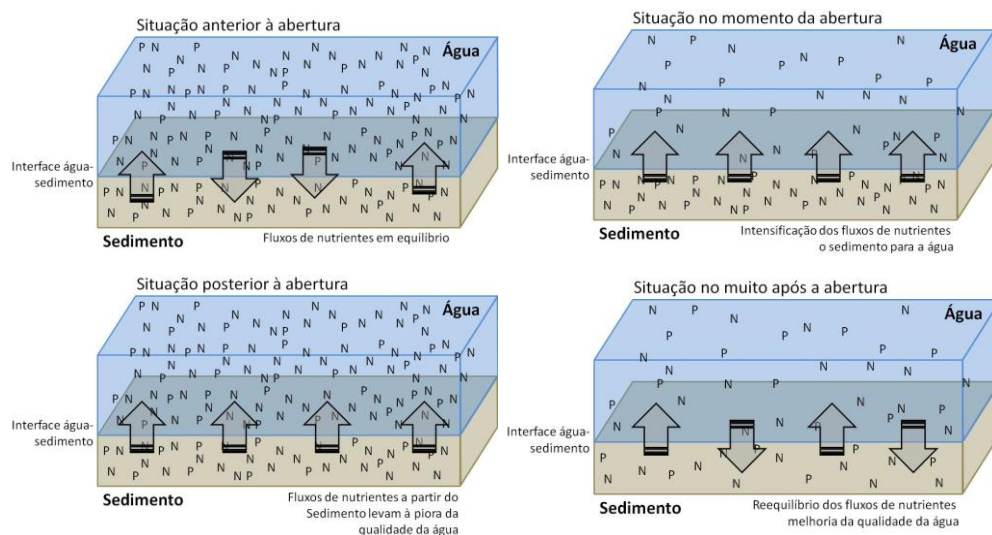
Como demonstrado na Figura 1, aportes intensos de nutrientes que podem ser oriundos de fontes naturais ou antrópicas geram uma resposta imediata na produção primária e podem levar a florações algais. Além destes processos, a difusão de nutrientes do sedimento para a coluna d'água também podem ser um fator de ocorrência de floração de microalgas (CARMOUZE; KNOPPERS; VASCONCELOS, 1991; WASSERMAN et al., 1999).

Esse processo de difusão de nutrientes do sedimento para coluna d'água pode ser desencadeado por mudanças abruptas na salinidade. Estas por sua vez, podem ser ocasionadas pelo evento de abertura de uma nova conexão com o mar em um sistema lagunares. Neste ponto, o estoque de nutrientes no sedimento, tem uma relevância importante quanto ao impacto gerado com a abertura de conexões com o mar. Wasserman (2000), observou que a abertura de um novo canal de barra intensificou as trocas de água entre a laguna de Saquarema e o mar promovendo o processo de remineralização (difusão) dos nutrientes do

sedimento, devido à formação de um maior gradiente de concentração entre o sedimento e a coluna d'água.

A figura 2 representa a formação deste gradiente para as situações antes da abertura, no momento da abertura, após a abertura e muito após a abertura. De acordo com o autor, a redução na concentração de nutrientes na coluna d'água só ocorre muito após a abertura quando o sistema retomar o equilíbrio entre liberação e captura do nutriente para o sedimento. O tempo necessário para melhoria da qualidade da água dependerá do tamanho do estoque de nutrientes no sedimento e da dinâmica de transferência destes nutrientes para a coluna d'água, podendo ser um processo milenar (WASSERMAN, 2016).

Em um estudo posteriores, realizado por (AZEVEDO, 2005; CARLONI et al., 2010) também na Lagoa de Saquarema após a abertura da Barra Franca na laguna de Saquarema em 2002, ficou demonstrado que não houve melhoria significativa da qualidade da água. Após abertura da barra grande ocorreu um aumento nas concentrações de nitrogênio inorgânico total, principalmente através do amônio. Os resultados do estudo indicaram que o equilíbrio da laguna ainda não havia sido atingido nestes primeiros anos após a abertura da conexão com o mar.



**Figura 2** - Esquema de evolução da disponibilidade de nutrientes durante o processo de abertura de barra em lagunas costeiras.

Fonte WASSERMAN, 2016.

Tendo em vista o exposto, fica evidente que os processos que suportam a eutroficação nos ecossistemas costeiros são bem complexos, concorrendo para sua intensificação as atividades agrícolas e de criação de animais, os despejos de esgotos domésticos *in natura* e de

efluentes de estação de tratamento, a lixiviação de calçamentos urbanos, a lixiviação de solos degradados e as indústrias. Além destes processos, há mecanismos naturais como a difusão de nutrientes do sedimento para a coluna d'água e a decomposição da matéria orgânica (seja antrópica ou não). Assim, o entendimento dos mecanismos responsáveis pelas florações algais não pode ser visto como uma situação de causa e efeito direto, mas de uma composição de fatores.

### 3.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE GESTÃO DE AMBIENTES COSTEIROS

Tendo em vista que as Lagunas costeiras ocupam cerca de 13% da costa mundial e são ambientes altamente produtivos (SUJITHA et al., 2017). Esses sistemas costeiros estão suscetíveis a interferências antrópicas, devido ao desenvolvimento da indústria local, despejo de efluentes e obras de engenharia civil (AMARAL; ROSMAN; AZEVEDO, 2003). Segundo Rosman (2001), em face à complexidade dos processos ecológicos que ocorrem nesses corpos d'água, principalmente lagos, é inquestionável a necessidade de estudos e o desenvolvimento de métodos a fim de auxiliar a sua gestão.

Uma metodologia sugerida seria a modelagem matemática, pois é uma ferramenta capaz de descrever o domínio físico em linguagem computacional e simular os processos químicos e biológicos do sistema aquático (AMARAL et al., 2006; FRAGOSO JR; FERREIRA; MARQUES, 2009; WASSERMAN et al., 2006). Uma vez que as equações que regem esses sistemas raramente podem ser resolvidas analiticamente, por causa de suas não linearidades e pelas limitações impostas pelas complexas condições de contorno existentes (SANTOS, 2012). Desta forma, com a utilização de uma abordagem numérica pode ser possível obter respostas adequadas e mais condizentes com a realidade observada sobre o fenômeno de interesse (BÁRBARA et al., 2010; BRITO, 2008; CUNHA et al., 2011).

Outro motivo importante para o uso da modelagem ambiental é o fator econômico, uma vez que modelos calibrados e validados permitem a obtenção de respostas rápidas e com boa aproximação da realidade, o que os tornam ferramentas essenciais para o gerenciamento de sistemas aquáticos e facilita a tomada de decisão (RAJAR; CETINA; SIRCA, 1997).

Com o aumento da capacidade de cálculo dos computadores, a modelagem matemática de fenômenos físicos vem se tornando cada vez mais aplicada na solução de problemas ambientais, sua previsão e gestão (BRUSH; HARRIS, 2010; GOBBI; GOBBI; RESKSIDLER, 2005).

O campo de aplicabilidade de modelos é diversa, podendo ser, por exemplo, para estudos de eutrofização (SMAHA; GOBBI, 2003; TUCCI et al., 2007a, 2007b), caracterização da circulação hidrodinâmica de ambientes hipersalinos (ANDUTTA; RIDD; WOLANSKI, 2011; SALAMENA; MARTINS; RIDD, 2016), na previsão de impactos ambientais como abertura de canal de barra (SILVA; ROSMAN, 2016), estudos de maré (ALVES et al., 2014) e monitoramento e previsão da dispersão do aporte de esgotos e contaminantes (HARARI et al., 2013; ROVERSI; ROSMAN, 2016).

Para subsidiar esses modelos numéricos vários são os softwares desenvolvidos. Um dos primeiros foi o MoHid, desenvolvido por Ramiro Neves do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa em linguagem Fortran 77 em 1985, constituindo uma simulação Euleriana da circulação residual, induzida pela maré e pelo vento para o estuário do Rio Sado em Portugal (NEVES, 1985). Outros softwares de fonte aberta (que permitiam sua modificação pelo usuário) foram desenvolvidos como o POM (Princeton Oceanic Modeling), já mais focado na circulação oceânica. Outros softwares passaram a ser desenvolvidos como os holandeses Mike 21 e Delft 3D e o islandês Aquasea. Para o Brasil, temos software SisBaHiA<sup>®</sup> desenvolvido e aperfeiçoado por Paulo Cesar Rosman durante sua pós-graduação (ROSMAN, 1987).

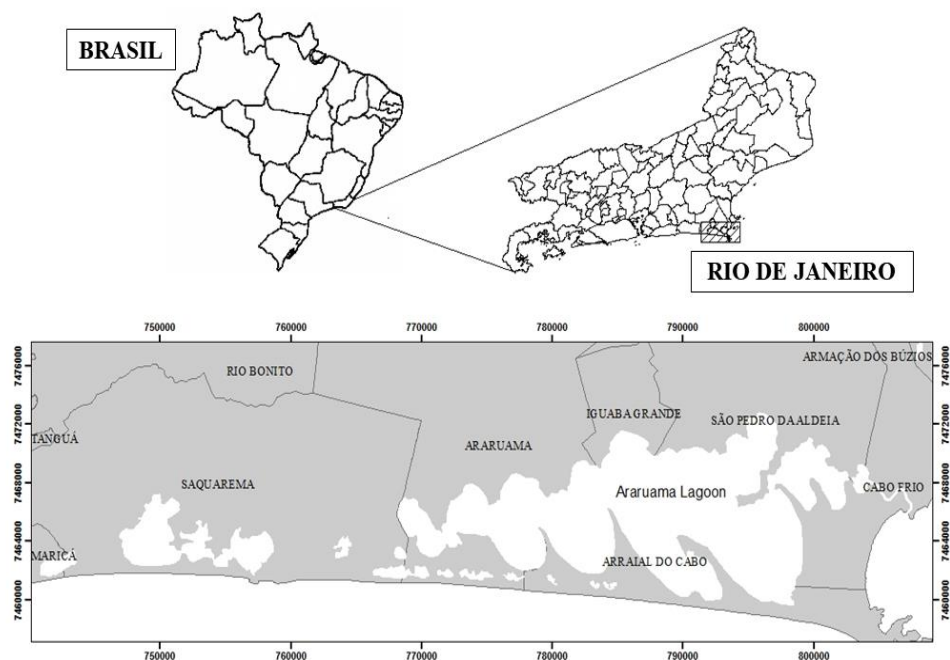
Alguns exemplos deste tipo de aplicação de modelos matemáticos podem ser encontrados na extensa literatura sobre o assunto (COPELAND et al., 2003; DONEKER; NASH; JIRKA, 2004; GHEZZO et al., 2010; MEULÉ et al., 2001; RAJAR et al., 2000; RAJAR; CETINA; SIRCA, 1997; RASMUSSEN; JOSEFSON, 2002).

O uso de modelos para representar a realidade física sempre esteve presente na ciência (SANTOS, 2012). Um modelo é uma hipótese de como um sistema funciona (BRUSH; HARRIS, 2010). Segundo Fragozo JR. et al., (2009), um modelo seria a representação de algum objeto ou sistema em uma linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas perante diferentes entradas.

Para Rosman (1997), a modelagem pode ser entendida como um processo de traduções em diferentes etapas: modelo conceitual, o modelo matemático, modelo numérico, modelo computacional, pós processamento, calibração e por fim relatório de resultados. Dentre as etapas da modelagem, a calibração é a parte mais difícil, uma vez que a complexidade dos sistemas naturais conta com enorme número de variáveis. Desta forma, os resultados são aproximações mais ou menos representativas da realidade.

#### 4 ÁREA DE TRABALHO

A lagoa de Araruama situa-se na Região dos Lagos, costa litorânea do estado do Rio de Janeiro, entre as latitudes  $22^{\circ}49' - 22^{\circ}57' S$  e as longitudes  $042^{\circ}00' - 042^{\circ}25' W$ , com área de  $210 \text{ km}^2$ ,  $40 \text{ km}$  de comprimento, largura máxima de  $13 \text{ km}$  e profundidade média de  $2,9 \text{ m}$  e volume de  $618$  milhões de  $\text{m}^3$ . A laguna encontra-se na Mesorregião das Baixadas Litorâneas, Microrregião dos Lagos, integrando o sistema de lagoas costeiras do sul do estado do Rio de Janeiro (Figura 3).



**Figura 3** - Mapa de localização da Área de Trabalho

A passagem de comunicação com o mar se dá através de um único canal natural, com embocadura estável, localizado na porção leste da Lagoa no território do município de Cabo Frio, denominado Canal Itajuru. Sua geomorfologia é meandrada com largura variando de  $100$  a  $300$  metros e comprimento de  $5,5 \text{ km}$ . O canal compreende a região entre a entrada da Enseada das Palmeiras e a embocadura do sistema lagunar (PRIMO; BIZERRIC, 2002).

Quanto a bacia hidrográfica da laguna, a mesma está inserida no território dos municípios de Araruama, Saquarema, Iguaba Grande, São Pedro da Aldeia, Arraial do Cabo e Cabo Frio, basicamente as mesmas cidades que margeiam seu espelho d'água. A bacia hidrográfica do sistema lagunar abrange cerca de  $404 \text{ km}^2$ , dentre esses, aproximadamente,  $60 \text{ km}^2$  são de salinas e  $6 \text{ km}^2$  correspondem às lagoas situadas em sua periferia. Sua bacia é

formada por um conjunto de 20 pequenas sub-bacías que compreende todos os cursos fluviais, intermitentes ou não, que abastecem a lagoa.

Por fim, é importante salientar que o gerenciamento de recursos hídricos é conduzido pelo Subcomitê das Bacias Hidrográficas da Lagoa de Araruama e do Rio Una, ligado ao Comitê da Bacia Lagos São João, criado em 2005, em conjunto com o Consórcio Intermunicipal Lagos São João (GOMES, 2009).

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS

A lagoa de Araruama é composta por sete células elípticas de tamanhos variáveis, delimitadas por pontas arenosas (KJERFVE et al., 1996). A formação desses esporões (pontas arenosas) está associada às correntes de deriva, formadas pelas ondas da laguna, um processo sedimentar complexo (ALVES et al., 2014). Morfologicamente a Lagoa pode ser entendida como um estuário de restinga frontal. Esse tipo de estuário é caracterizado por dimensões em planta (x e y) muito maiores que a profundidade (z), apresentando um ou mais canais de maré, que podem ser estáveis ou não, e possuir vazão de água doce muito menor que a vazão de água salgada (DYER, 1973).

Permanecendo na linha de classificação por similaridade estuarina, a laguna também pode ser classificada como um estuário negativo, uma vez que, o somatório das vazões afluentes (fluviais e pluviais) é inferior à vazão de evaporação (PRITCHARD, 1952). De acordo com a quantidade de água trocada com o oceano e a intensidade da maré do interior do sistema, a Lagoa de Araruama pode ser caracterizada como uma lagoa costeira do tipo sufocada (KJERFVE, 1994). Além disso, seu canal atual meandrado atua um filtro dinâmico que restringe a propagação da amplitude de maré para além do sistema lagunar (KJERFVE, 1986).

As lagunas, principalmente as do tipo sufocada, podem evoluir, conforme as condições hídricas e meteorológicas, para sistemas marinhos de concentração ou diluição. No primeiro caso, as lagunas são denominadas hipersalinas, pois o balanço negativo de água doce (precipitação + descarga fluvial - evaporação < 0) dá origem a um corpo d'água mais salino que a região costeira adjacente. Por conseguinte, são ambientes que respondem rapidamente a variações de condições meteorológicas sinóticas e sazonais, tornando-se também bastante vulneráveis a ações antrópicas (MIRANDA et al, 2002).

#### 4.2 BALANÇO HÍDRICO DA LAGOA DE ARARUAMA

O balanço hídrico de um sistema lagunar pode ser analisado a partir das variáveis precipitação, descarga fluvial e evaporação, e o resultado entre seus quantitativos podem variar desde um balanço hídrico positivo a um balanço hídrico negativo (precipitação + descarga fluvial – evaporação).

Segundo os estudos de Schetinni (1994) os principais cursos e únicos que apresentam vazão perene são os rios das Moças e Mataruna, que deságuam no município de Araruama, e o Rio Salgado, cuja foz está situada em Iguaba Grande. Esses principais rios representam 80% do aporte de toda água fluvial para laguna. Além desses, outra contribuição de água doce para a Lagoa de Araruama seria a vazão transposta da bacia do Rio São João, proveniente da adutora de Juturnaíba para abastecimento das cidades que compreendem a bacia de drenagem do sistema lacustre (KJERFVE et al., 1996) (Tabela 1).

Essa vazão adicional chega posteriormente à laguna, através da descarga de esgotos *in natura* e de efluentes das estações de tratamento. As águas da transposição da bacia representam um adicional de mais de 50% no aporte de água doce. A contribuição de água servida para o sistema sofre variações sazonais de acordo com a população flutuante que se desloca para região dos lagos no período de veraneio, onde conseqüentemente a vazão afluente aumenta, quando no inverno o contrário acontece com o esvaziamento desse contingente de turistas.

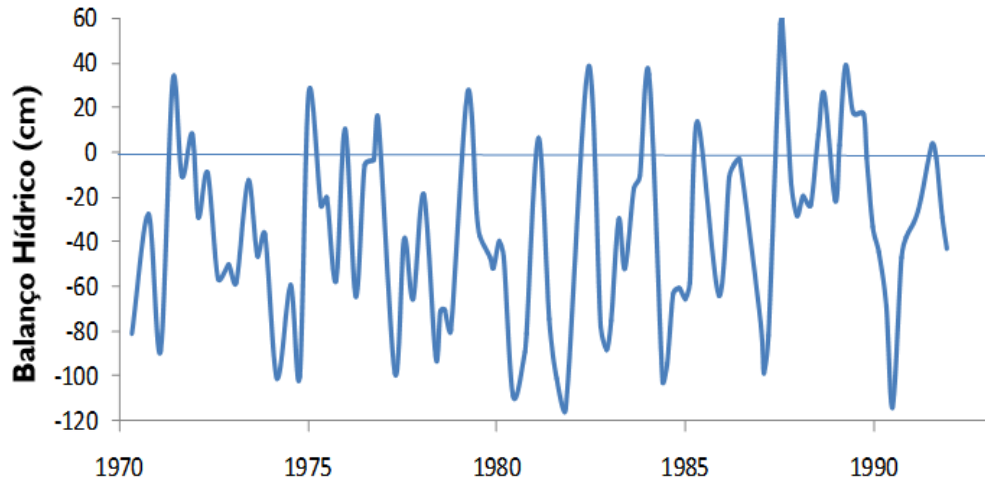
**Tabela 1 - Vazão Média dos Principais Rios e Represa de Juturnaíba**

<b>Rios</b>	<b>Localização da Foz</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>
<b>Moçasa*</b>	Araruama	1,02
<b>Mataruna*</b>	Araruama	0,51
<b>Salgado*</b>	Iguaba Grande	0,32
<b>Adutora de Juturnaíba**</b>	-	1,00

FONTE: SCHETINNI, 1994\* KJERFVE et al., 1996\*\*.

Quanto as condições meteorológicas acerca de chuva e evaporação, segundo os estudos realizados por Kjerfve et al. (1996) o balanço entre precipitação e evaporação na região da lagoa de Araruama é tipicamente negativo. A figura 4 demonstra que durante poucas ocasiões o balanço hídrico (precipitação – evaporação) fica positivo. Nas medições apresentadas na forma de médias bimensais (em centímetros) obtidas a partir dos dados da estação meteorológica em Arraial do Cabo, dos 96 valores apresentados na figura 4, apenas

19 são positivos, sendo que o maior valor de déficit é de 114 cm, enquanto o maior valor de superávit hídrico não ultrapassa 60 cm. A média para o período é de -36,8 cm mensais.



**Figura 4** - Balanço hídrico (pluviosidade - evaporação) na laguna de Araruama. Estação Meteorológica da Companhia Nacional de Álcalis/Arraial do Cabo.

Fonte: Adaptado de KJERFVE et al., 1996.

Ao levar em consideração o baixo aporte de águas fluviais, mais a contribuição das águas transportadas pela adutora de Juturnaíba (tabela 1) em contraposição com a análise da figura 4 (déficit médio de -36,8 cm mensais), torna-se possível conotar que a evaporação tem um peso consideravelmente maior no balanço hídrico do sistema do que as contribuições de água doce (fluvial e precipitação). Logo, a região da Lagoa de Araruama está inserida no contexto de um balanço hídrico negativo ( $\text{precipitação} + \text{descarga fluvial} - \text{evaporação} < 0$ ).

Desta forma, ponderando que as condições climáticas têm influência sobre o balanço de sal de uma laguna sufocada. Logo, a hipersalinidade da laguna de Araruama é resultado de suas condições climáticas, pequena contribuição de do aporte fluvial e entrada do tipo sufocada, que confere ao sistema uma salinidade média de 52 (KJERFVE et al., 1996).

### 4.3 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

Os estudos de Barbière (1984), pautados nas interpretações de 10 anos (1971 – 1980) de informações climáticas em postos meteorológicos situados em Iguaba Grande e Cabo Frio, indicam que a região da lagoa de Araruama seria regida por dois microclimas distintos a uma distância bastante reduzida. O primeiro microclima, atuando na porção oeste (Iguaba Grande – Araruama), poderia ser enquadrado como um tipo de transição entre o Tropical com chuvas

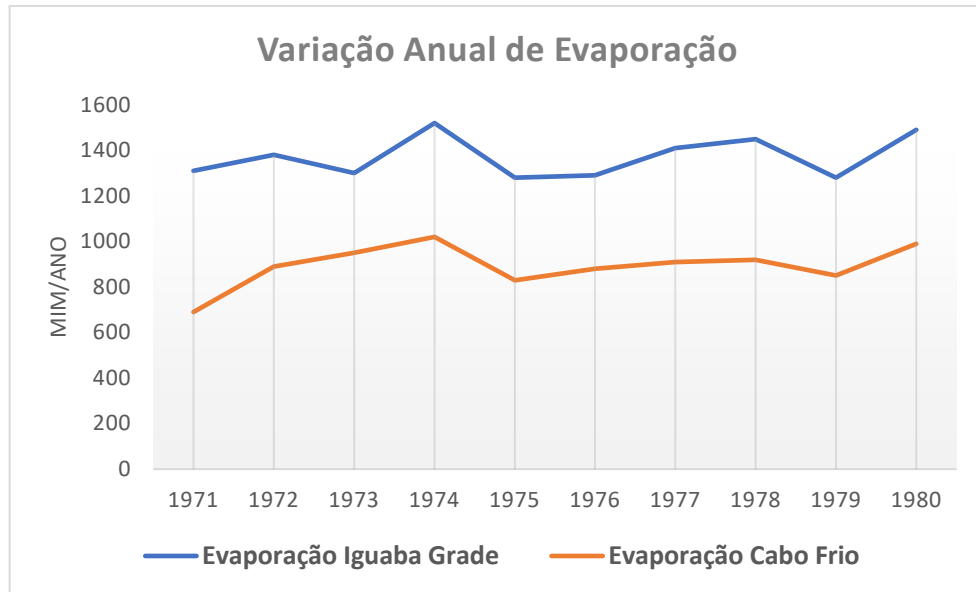
de Verão e Secas de Inverno (AW), e Semiárido Quente (BSh). Já o segundo microclima, identificado para porção leste (Cabo Frio), apresenta uma variação climática Semiárido Quente (BSh).

Segundo o autor, a ocorrência desses dois microclimas certamente influencia na diversidade do teor de salinidade observado na lagoa de Araruama, produção de sal e nos demais componentes que integram o sistema geocológico local. Ademais, a tabulação desses valores permitiu chegar aos atributos habituais (“normais”) climáticos, nas duas localidades.

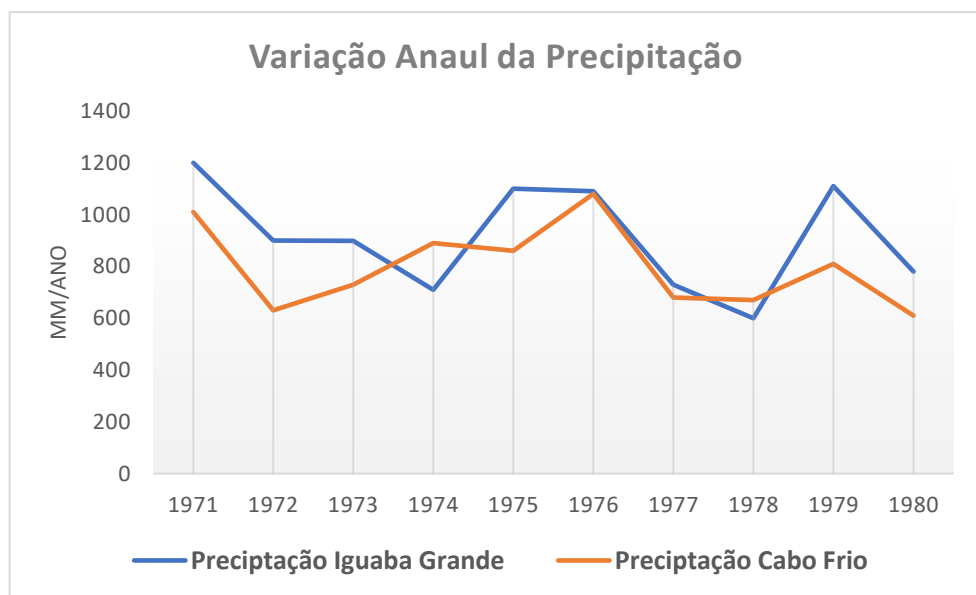
#### **4.3.1 Evaporação e Precipitação**

Os valores de evaporação mostram que existe uma grande diferença entre Iguaba Grande, de cerca de 53% com uma taxa de evaporação média anual de 1.372mm/ano em relação a Cabo Frio com evaporação equivalente a 844mm/ano. (BARBIÉRE, 1984). Como ilustrado pela figura 4, durante o todo o período de estudo a evaporação em Iguaba Grande esteve acima da registrada em Cabo Frio.

Em publicação mais recente do mesmo autor, a média anual de precipitação para Iguaba Grande seria 934mm/ano e para Cabo Frio cerca de 820mm/anuais, o que representa uma diferença de pouco mais de 20% entre as duas localidades (Figura 5). Ademais, o regime de chuvas segue o padrão sazonal onde o período de maior índice pluviométrico ocorre no verão (novembro a janeiro) com precipitação média de 238mm para Iguaba e 240mm para Cabo Frio, e o período seco ocorre no inverno (junho a agosto) com 169,2mm e 127mm respectivamente (BARBIÉRE; COE-NETO, 1999).



**Figura 5** - Variação Anual de Evaporação entre Iguaba Grande e Cabo Frio.  
Fonte: Adaptado de BARBIÉRE, 1984.



**Figura 6** - Variação Anual de Precipitação entre Iguaba Grande e Cabo Frio.  
Fonte: Adaptado de BARBIÉRE, 1984.

#### 4.3.2 Vento

O regime de ventos da lagoa de Araruama é marcado por uma forte frequência de nordeste com intensidade de média de 5m/s, mas frequentemente podem atingir 10m/s (KJERFVE et al., 1996). Em termos de sazonalidade, durante o verão (novembro a janeiro) os ventos reinantes são de origem nordeste com intensidades médias variando de 4 a 7m/s e durante o inverno (julho a outubro), com a passagem de frentes frias, ocorre um significativo

surgimento de ventos do quadrante sudoeste com uma variação média de 3 a 4m/s, contudo, podem ocorrer picos de até 25m/s (KJERFVE et al., 1996).

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DA MARÉ

O litoral de Cabo Frio se caracteriza por um regime de micromaré mista, semi-diurna, com altura média de 1,1 m e número de forma,  $K = (K_1 + O_1/M_2 + S_2)$ , igual a 0,3 (Pond & Pickard 1983). Ao entrar no canal, a maré sofre um amortecimento e atraso progressivo, deixando de ser percebida na altura de São Pedro D' Aldeia, a 14 km da embocadura (Accetta 1986). Na laguna, o nível d'agua oscila em resposta aos eventos meteorológicos, sendo registradas, de acordo com marégrafos da Secretaria Estadual de Rios e Lagoas (SERLA), no interior da mesma, variações de até 0,25 m com a passagem de uma frente fria e aumento da pluviosidade (LESSA, 1991).

Dentre as componentes harmônicas que regem a variação da maré na área da embocadura do Canal Itajuru, a  $K_1$  possui uma significativa amplitude de 2,2cm. Enquanto a maré semi-diurna é removida durante a propagação através do Canal de Itajuru, a componente  $K_1$  de maré-diurna diminui 44% em comparação com Cabo Frio e leva 3,0 horas para percorrer o comprimento do canal. A amplitude da componente harmônica  $S_2$  também alcança uma altura significativa de 2,2 cm. Em geral, a variabilidade do nível da água no Boqueirão é pequena com numerosas flutuações de alta frequência (KJERFVE et al., 1996).

#### 4.5 ESTUDOS DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA EM ARARUAMA

Uma vez que não existem dados de medições de velocidade e direção de correntes ou nível da água, a caracterização da hidrodinâmica da Lagoa de Araruama vem ocorrendo por meio de modelos matemáticos ou computacionais. Os principais estudos buscaram simular as condições hidrodinâmicas do sistema sobre diversas óticas como a própria condição geomorfológica natural, após intervenções no seu canal de ligação com o mar até abertura de um canal de barra.

Os estudos de Kjerfve; Oliveira (1996), utilizaram um modelo bidimensional de dispersão-circulação de maré na Lagoa de Araruama para calcular as respostas da lagoa frente a forçantes como maré, ventos e evaporação em um sistema de coordenadas cartesianas. Segundo os autores, tendo em vista que a lagoa não apresenta estratificação vertical um

modelo bidimensional seria razoável. O ponto de partida do modelo foi o código de Blumberg (1977a, 1977b).

Sobre a perspectiva de três cenários com condições idênticas de maré e evaporação-precipitação, mas com diferentes forçantes de vento (nordeste e sudoeste) os autores identificaram que os ventos são as principais forçantes que dirigem a circulação na Lagoa de Araruama criando numerosas células de circulação ciclônica na porção norte onde o sentido das células de circulação altera de rotação à medida que os ventos mudam de nordeste para sul-oeste.

Além disso, as marés diurnas e semidiurnas são efetivamente filtradas no Canal Itajuru, mas a componente de maré Mm de baixa frequência produz uma mudança significativa no nível do mar dentro da lagoa no período de 27,5 dias.

Motivado em estudar quais seriam os efeitos do projeto “Desobstrução do Canal de Itajuru”. Cunha (2003), avaliou o comportamento hidrodinâmico do sistema lagunar de Araruama antes e após a dragagem (-3 m) do canal de ligação desse sistema com o mar utilizando o software SisBaHiA<sup>®</sup>. Sobre cenários de calmaria, ventos usuais de nordeste e sudoeste o resultados do autor comungaram com as conclusões do (KJERFVE; OLIVEIRA, 1996) acima citado.

Quanto aos resultados da dinâmica após dragagem do canal, o autor observou que não ocorreram mudanças no padrão de circulação no interior da lagoa, as alterações ficaram restritas à área de intervenção do projeto (Península de São Pedro da Aldeia até a embocadura do canal de Itajuru) onde o efeito níveis de maré (amplitude) diminuiram na Lagoa das Palmeiras, pois, com a dragagem, um volume de água consideravelmente maior passa da Lagoa das Palmeiras para o corpo principal da lagoa, oriundo dos fluxos nas marés enchentes e vazantes.

Posteriormente Gava (2008), prosseguiu com os estudos de Cunha (2003), contudo, além de estudar a hidrodinâmica da lagoa após dragagem completa do canal, o autor avaliou os efeitos da abertura de um canal de barra na porção extremo oeste quanto a dinâmica da circulação e renovação das águas utilizando o software de modelagem SisBaHiA<sup>®</sup>. Os resultados do autor em simulação com a lagoa de Araruama em situação atual com o canal completamente dragado apresentaram o mesmo padrão hidrodinâmico evidenciado por (CUNHA, 2003).

Em termos de dinâmica de circulação após abertura do segundo canal de ligação com o mar, o autor observou que os efeitos da maré poderiam ser sentidos até o Canal Itajuru

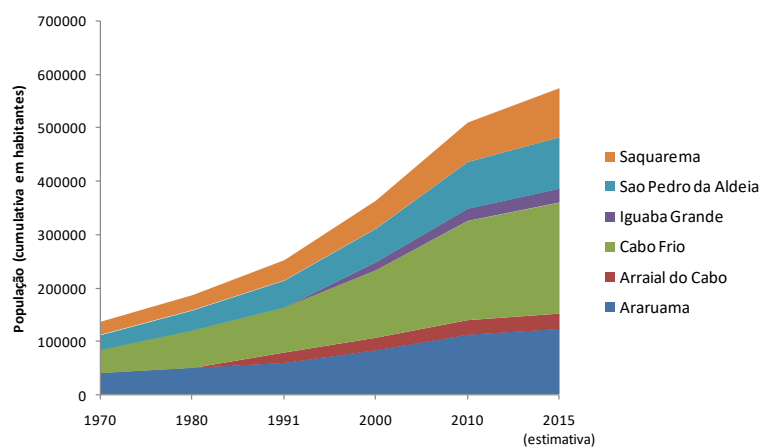
provocando alterações na direção e magnitude das correntes. Além disso, pode ser identificada uma circulação intensa na porção oeste expondo a enseada da praia seca a significativas oscilações de nível. Essa intensa circulação alcançaria para além da ponta do anzol.

Quanto a diluição das águas (renovação), o autor percebeu que com a inserção deste segundo canal as trocas de massas seriam aumentadas principalmente na porção oeste. As águas dessa região seriam rapidamente diluídas e essa diluição iria se expandir no sentido do centro da lagoa, como também incrementaria a diluição advinda pelo Canal Itajurú.

#### 4.6 DESENVOLVIMENTO URBANO E SANEAMENTO AMBIENTAL

No início dos anos 70, com a facilitação do acesso à região dos lagos pela construção da ponte Rio - Niterói e a criação do Sistema Financeiro de Habitação (COSTA, 1993), a região da lagoa de Araruama vivenciou um crescimento populacional exponencial sem acompanhamento de infraestrutura, impelindo uma degradação ambiental rápida ao sistema (SILVA et al., 2015).

A crescente ocupação do entorno da laguna nos últimos 45 anos pode ser expressa em um percentual total da ordem de 421% (Figura 7). De acordo com IBGE (2010), a soma das populações residentes no entorno da região hidrográfica da lagoa equivale a 566.461 habitantes. Ademais, com os dados do censo do IBGE de 2010, é possível verificar que os setores amostrais que concentram a maior quantidade populacional estão nas imediações ou vizinhança da Lagoa de Araruama.



**Figura 7** - Crescimento populacional dos municípios do entorno da Lagoa de Araruama. Fonte: Adaptado de WASSERMAN, 2016.

Segundo Gomes (2009), este rápido crescimento populacional, entretanto, não foi acompanhado de obras de saneamento. O abastecimento de água foi, durante muitos anos, um problema crônico na Região dos Lagos. Para solucionar o problema de abastecimento, foi inaugurada em 1977 a adutora de Juturnaíba, ampliando a oferta de água na bacia Kjerfve et al., (1996). Contudo, sem acompanhamento das devidas obras de esgotamento sanitário, as águas servidas da população foram destinadas para lagoa sem qualquer tratamento, desta forma, com a taxa de crescimento populacional excepcional da região verifica-se um abaixamento dos níveis de salinidade da lagoa.

Assim, assumindo um consumo per capita de 250 litro por dia de água é possível calcular um aporte atual de  $1,66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , comparado com o aporte de  $0,40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  calculado para a década de 1970. É importante ressaltar que não está sendo contabilizado nestes números o aumento populacional dos meses de verão, quando a população deve duplicar.

Analisando a Tabela 2, que apresenta os valores mínimos e máximos de salinidade da laguna medidos por diversos autores ao longo dos anos, torna-se possível observar uma redução da salinidade no decorrer do tempo. Contudo, é importante destacar que os valores de salinidade estão intrinsicamente relacionados ao balanço hídrico da região, portanto, picos máximos e mínimos podem estar atrelados a períodos de estiagem ou chuva.

**Tabela 2 - Variação temporal da salinidade na lagoa de Araruama desde o início dos anos 1990**

	(TURCQ et al., 1999)	(SOUZA, 1993)	(SOUZA, 1997)	(MELLO, 2007)
Amostragem	1990	1991/1992	1994	2005/2006
Mínimo	36	44	41	37
Máximo	46	51	62	55
Média	41	48	52	48

Fonte: Adaptado de WASSERMAN, 2016.

Atualmente, de acordo com as companhias de saneamento que atendem aos municípios do entorno da lagoa, o esgoto doméstico recebe tratamento terciário ou secundário antes de ser lançado na laguna (ÁGUAS DE JUTURNAÍBA, 2015; PROLAGOS, 2015). Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, em 2013 os índices de coleta e tratamento de esgoto nestes municípios variavam entre 90 e 100% (SNIS, 2014).

#### 4.7 EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DE ARARUAMA (LEVANTAMENTO HISTÓRICO)

Após as primeiras mudanças na aparência estética da lagoa de Araruama, a qualidade de suas águas e evolução do seu estado trófico, passaram a ser objetivo de pesquisa de diversos trabalhos nos últimos anos.

Objetivando estudar o comportamento metabólico da lagoa de Araruama em condições de balanço hídrico positivo (menores valores de salinidade), Moreira-Turcq (2000), observou que mudanças climáticas seriam responsáveis por alterações no metabolismo da lagoa onde a produção primária anteriormente dominada pela comunidade bentônica, passou a ser gerida pela comunidade planctônica o que provocou a redução da transferência da água.

Souza (1993), trabalhando com o mesmo objetivo avaliou o sistema em suas condições normais (semiáridas). O autor observou que a boa qualidade do ecossistema da lagoa seria por conta de suas águas serem oligotróficas (pouca contaminação por nutrientes), associada a uma pequena produção primária, além do sistema ser altamente limitado pelo fósforo. Souza (1993) observou também, que o sistema apresenta grande parte de sua produção fitobentônica no sedimento e por esta razão a laguna teria suas águas perfeitamente transparentes. A associação da produção algal no sedimento, indica que os nutrientes que seriam incorporados na laguna tendem a se acumular no sedimento.

Embora o autor não tenha mencionado isto de maneira explícita, é possível sugerir que aporte de nutrientes ao longo dos anos foram sendo acumulados continuamente no sedimento. Esta conclusão pode ser corroborada pelo modelo desenvolvido por Cunha e Wasserman (2003) para a laguna de Piratininga, onde o sedimento constitui o principal reservatório que alimenta a produção primária da laguna, sendo a contribuição dos esgotos domésticos responsáveis por menos de 10% das necessidades das plantas. De acordo com os autores, os aportes de esgotos são prejudiciais quando as contribuições ocorrem persistentemente durante muitos anos. No caso de Araruama, verificando o crescimento populacional desde os anos 1970 (Figura 9), é possível sugerir que os estoques de nutrientes do sedimento já devem ter aumentado várias vezes, tendo em vista que a comunidade não absorve todo quantitativo de efluente lançados na lagoa (WASSERMAN, 2016).

Posteriormente, Souza (1997), buscou identificar as fontes de nutrientes para o ecossistema, avaliando os aportes oriundos dos rios da região (Rio das Moças, Mataruna e Rio Salgado). Ele observa que os principais rios, responsáveis por mais de 90% dos aportes de

água doce estão na porção Oeste da laguna que é a parte mais restrita e mais distante da renovação do canal de Itajurú e mais sujeita à degradação. Souza (1997) conclui que a intensificação dos aportes de nutrientes para o ecossistema poderia promover uma mudança de produção fitobentônica para fitoplanctônica, condição irreversível, visto que o desenvolvimento da produção biológica do sedimento depende da transparência da água, mas com as microalgas na coluna d'água, a luz não penetra mais e não mais é possível a produção fitobentônica.

Ainda no final da década de 1990 foram feitas avaliações da capacidade de retenção de nitrogênio o fósforo pelas macroalgas da laguna. Neste estudo, Lourenco et al., (2005) estudaram as variações nas concentrações dos nutrientes nas espécies *Acanthophora spicifera*, *Chaetomorpha crassa*, *Derbesia vaucheriaeformis*, *Gracilaria cervicornis*, *Gracilariopsis tenuifrons*, *Hypnea valentiae*, *Rhizoclonium afficanum*, e *Ulva lactuca*, observando que o elemento determinante da produção era o fósforo. A intensa retirada do fósforo da coluna d'água pelas algas promovia a restrição na produção primária fitoplanctônica, mesmo nas áreas onde os aportes eram mais significativos, como nas praias de São Pedro da Aldeia e do centro de Araruama.

No trabalho de Mello (2007), que objetivou caracterizar os processos biogeoquímicos da lagoa, foi possível identificar a mudança de sistema controlado pela produção bentônica (anterior a 2005) para planctônica, o que atribuiu à água da laguna a coloração acastanhada. Outras observações relevantes do estudo são, por exemplo, a melhor qualidade da água pode ser observada no Canal de Itajurú, apesar da presença de inúmeras fontes antrópicas (incluindo a estação de tratamento da PROLAGOS). Além disso, os dados da autora sugerem a evolução da condição trófica do sistema aquático de oligotrófico para mesotrófico.

No ano seguinte, Guerra (2008) estudou a composição da matéria orgânica do sedimento da lagoa, identificando a presença de aportes de esgoto doméstico nos sedimentos, principalmente na região do Centro de Araruama. Os dados do autor também sugeriram uma nova evolução na condição trófica do ecossistema costeiro de mesotrófico para eutrófico.

Atualmente, existem diversos programas de monitoramento da laguna de Araruama, realizados por demanda do Comitê de Bacias Lagos-São João, do Consórcio Intermunicipal Lagos-São João e de outras instituições locais que estão sendo executados pelos gestores dos recursos hídricos, incluindo a PROLAGOS.

## 5 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste na aplicação de modelos hidrodinâmicos e de transporte de sal para caracterização qualitativa do comportamento hipersalino da Lagoa de Araruama frente a cenários de balanço hídrico positivo e negativo, dragagem do canal de conexão com o mar e abertura de um canal de barra.

Segundo Tucci (1998), o gerenciamento de ecossistemas aquáticos é um campo de ação multidisciplinar, com um grande número de alternativas de planejamento, considerando usos, disponibilidades e preservação. Em razão dessa diversidade de alternativas, utilizam-se metodologias que melhor qualifiquem e quantifiquem os processos, auxiliando nas etapas de análise e na tomada de decisão, como a modelagem aplicada a esse ecossistema (FRAGOSO JR; FERREIRA; MARQUES, 2009).

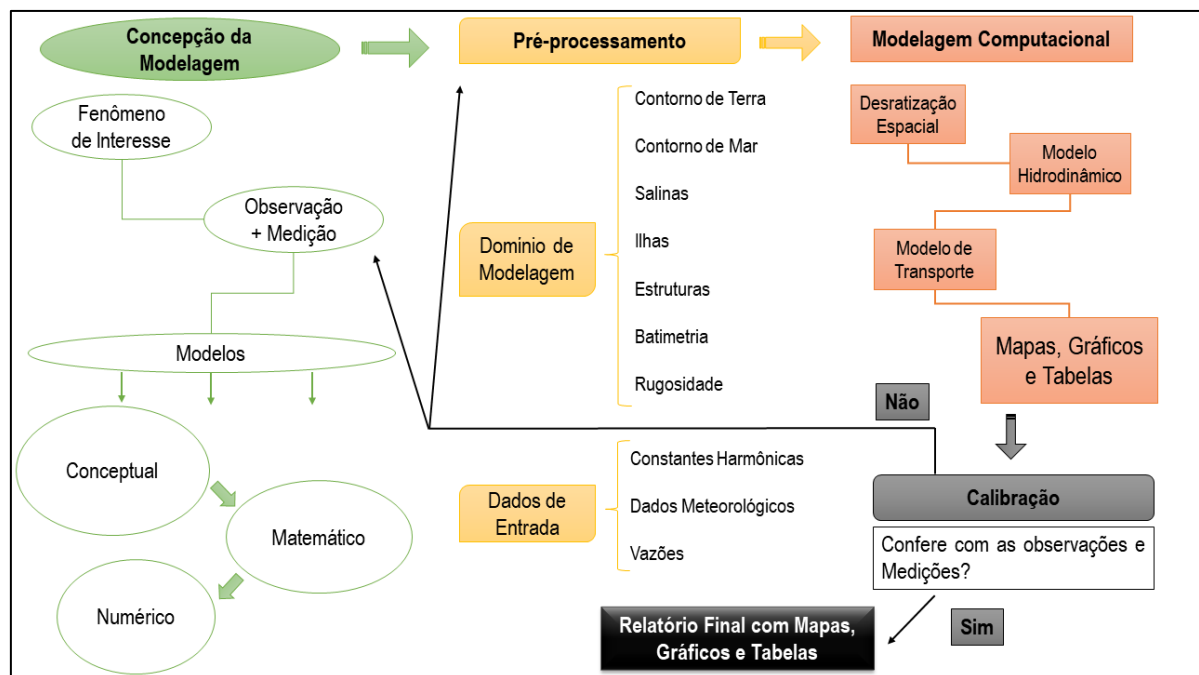
Devido às características da Lagoa de Araruama, como possuir um corpo d'água raso, com influência de ventos intensos e frequentes, onde a estratificação da salinidade e da temperatura na coluna d'água não é significativa Souza et al., (2003), optou-se por modelos bidimensionais promediados na vertical (2DH). Esta aproximação possibilita uma análise consistente da área e diminui o custo computacional da modelagem (GOMES, 2009).

Os modelos computacionais empregados para modelagem da Lagoa de Araruama fazem parte do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBAHIA<sup>®</sup>. Este software encontra-se continuamente sendo ampliado e aperfeiçoado na COPPE/UFRJ desde 1987, através de inúmeras teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa na área de engenharia costeira e oceanográfica. O sistema tem sido adotado largamente em estudos e projetos contratados à Fundação Coppetec envolvendo modelagem de corpos de água naturais (ROSMAN, 2012).

O processo de modelagem apresentado neste trabalho seguiu a fundamentação demonstrada na figura 8. A etapa da concepção da modelagem se define o fenômeno de interesse, são realizadas observações e coletas de dados medidos em campo e formulação do modelo conceitual. Os modelos matemáticos e numéricos já estão inseridos no programa SisBAHIA<sup>®</sup>. A etapa de pré-processamento ocorre o levantamento de dados de entrada (constantes harmônicas, dados meteorológicos e dados de vazão), e processamento do domínio de modelagem por meio da confecção de mapas de contorno de terra e mar utilizando dados batimétricos e rugosidade de fundo.

Durante a etapa da modelagem computacional ocorre a discretização do domínio de modelagem, confeccionado através da malha de elementos finitos quadráticos (produzida no próprio software), desenvolvimento de modelo hidrodinâmico (inserção de dados de entrada, condições de contorno e condições iniciais), desenvolvimento de modelo de transporte de sal (prescrição de contornos e condições iniciais). Posteriormente, com os dados de velocidade e direção da corrente é possível o desenvolvimento do modelo de transporte de sal.

A calibração é a etapa mais importante do processo, pois é onde corre a validação do modelo pela comparação dos resultados obtidos conferem com o que se observa e mede a respeito do fenômeno de interesse. Se a resposta for negativa, a duas rotas que podem ser feitas. A mais comum é a rota curta que leva à caixa do pré-processamento, o que corresponde ao usual procedimento de calibração via ajustes de montagem e de parâmetros, acertos de dados de entrada e coeficientes em qualquer tipo de modelo. A menos comum, é a rota longa é a que leva novamente para o modelo conceitual.



**Figura 8** - Roteiro da Modelagem Ambiental.  
Fonte: Adaptado de ROSMAN, 2012.

Caso a resposta seja positiva, o modelo está válido e o processo de modelagem termina com a produção do relatório final que nada mais é que o grande objetivo do processo de modelagem, ou seja, produzir informações organizadas para auxiliar um processo de tomada de decisões.

## 5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA E MODELOS ADOTADOS

Segundo Gomes (2009) o SisBaHiA<sup>®</sup> é um sistema composto por modelos numéricos com módulos hidrodinâmico, de transporte de escalares euleriano, de transporte de escalares lagrangeano, de qualidade de água, de geração e propagação de ondas, com representações tridimensionais, bidimensionais promediado na horizontal ou na vertical. Além disso, o sistema de arquivos do programa SisBaHiA<sup>®</sup> utiliza banco de dados Access para armazenamento de informações, com interface amigável em ambiente Windows. A versão utilizada neste estudo é a 9.0.

O cálculo das variáveis no sistema de modelagem é realizado por um modelo numérico denominado FIST3D (*Filtered in Space and Time*). No FIST a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem semelhantes às empregadas na simulação de grandes vórtices (*Large Eddy Simulation - LES*) (ROSMAN, 1997). Segundo Rosman (2012), no desenvolvimento das equações governantes, no SisBaHiA<sup>®</sup>, são consideradas as seguintes aproximações: meio contínuo, referencial Euleriano, referencial não-inercial, aproximação hidrostática e aproximação de Boussinesq.

## 5.2 MODELO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA 2DH PARA CORPOS D'ÁGUA RASOS

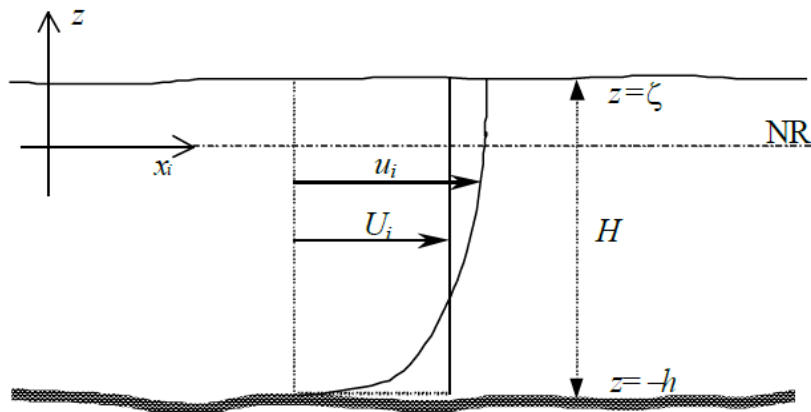
A formulação matemática do modelo hidrodinâmico 2DH aplicado ao estudo, ocorre com base na mecânica do movimento para escoamento em regime turbulento, governada pelas equações de Navier-Stokes (ROSMAN, 2012). Tais equações representam o princípio da conservação da quantidade, associadas à equação da continuidade, a uma equação de estado, e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado que se pretende compor o modelo matemático fundamental para qualquer corpo de água (ROSMAN, 2012).

A discretização espacial do modelo permite ótimas aproximações de contornos e batimetrias complexas, que são características em corpos d'águas estuarinos. Para a discretização espacial, o SisBaHiA<sup>®</sup> utiliza o método de elementos finitos para resolver numericamente as equações.

Esse método consiste em discretizar (transformar o meio físico em linguagem computacional) o domínio da modelagem em unidades finitas (elementos) em que as equações da conservação da energia e de momento que governam a circulação hidrodinâmica são resolvidas numericamente para cada elemento e as variáveis de saída de um elemento são

valores de entrada nos elementos adjacentes, para cada intervalo de tempo. A discretização temporal do modelo SisBaHiA é via um esquema implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem (ROSMAN, 2012).

A figura 9 ilustra o esquema de promediação das velocidades empregadas no modelo 2DH, onde: NR: Nível de referência adotado;  $U_i$ : velocidade promediada na vertical;  $u_i$ : perfil de velocidade no modelo 3D;  $i$ : representa os eixos  $x$  e  $y$ ;  $H$ : profundidade instantânea é  $H = z_{\text{super.}} - z_{\text{fundo}} = h$ , também chamada de coluna d'água.



**Figura 9** - Sistema de Coordenadas do Sistema de Modelagem promediado na vertical (3D e 2DH).  
Fonte: Rosman, 2012.

### 5.2.1 Equações Governantes

Para cada intervalo de tempo, o módulo 2DH determina as componentes das velocidades médias na vertical, na direção  $x$  e  $y$ ,  $U(x, y, t)$  e  $V(x, y, t)$ , respectivamente, e as elevações da superfície livre,  $z = -h(x, y, t)$ . As componentes da velocidade resolvível, média na vertical, conforme ilustrada na Figura 10, podem ser definidas como:

$$U(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u(x, y, z, t) dz \quad \text{e} \quad V(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v(x, y, z, t) dz \quad (\text{Eq. 1})$$

- *Equação da continuidade do volume – 2DH*

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \underbrace{+q_p - q_e + q_i}_{\Sigma q} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$z$  = elevação da superfície livre;

$U, V$  = componentes da velocidade média na vertical, nas direções  $x$  e  $y$ ;

$H$  = altura instantânea da coluna d'água ( $H = z + h$ );

$q_e$  = fluxo de precipitação por unidade de área;

$q_e$  = fluxo de evaporação por unidade de área;

$q_i$  = fluxo de infiltração por unidade de área. Os fluxos de infiltração podem ser afluentes ou efluentes, assumindo valores positivos ou negativos.

Como o balanço hídrico (Evaporação-precipitação) é significativo na Lagoa de Araruama e as taxas de evaporação superam as de precipitação,  $\Sigma_q$  é negativo. Contudo, por falta de informações sobre os valores de infiltração afluente e efluente, estas parcelas não forma contabilizadas.

- *Equação de conservação da quantidade de movimento na direção  $x$*

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\hat{\rho} / \rho_0)}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial(H\hat{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\hat{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E) - \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ &+ 2\Phi \text{sen}\theta V - \frac{U}{H} \Sigma q \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3})$$

- *Equação de conservação da quantidade de movimento na direção  $y$*

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\hat{\rho} / \rho_0)}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial(H\hat{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\hat{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B - \tau_y^E) - \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ &- 2\Phi \text{sen}\theta U - \frac{V}{H} \Sigma q \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$\hat{\rho}$ : é a massa específica da água promediada na coluna de água;

$\tau_i^S - \tau_i^B$ : são as tensões de atrito na superfície livre e no fundo, respectivamente;

$\tau_x^E$ : é a tensão devido a estruturas inseridas no escoamento;

$S_{ij}$ : representam as chamadas “tensões de radiação” geradas por ondas de curto período, especialmente em águas rasas (i ou j =1 representa a componente x, e 2 a componente y).

### 5.3 MODELO DE TRANSPORTE EULERIANO ADVECTIVO-DIFUSIVO

O modelo de transporte é um dos mais básicos utilizados para análises de problemas ambientais em corpos de água naturais. Segundo Rosman (2012), este modelo é o mais adequado para simular o transporte de escalares que se encontram dissolvidos na coluna de água, tais como substâncias genéricas, contaminantes, ou parâmetros de qualidade da água.

O modelo de transporte Euleriano advectivo-difusivo (MTEADR) utilizado neste estudo é bidimensional promediado na vertical e também da linhagem FIST. Os esquemas numéricos do MTEADR presentes no SisBaHiA<sup>®</sup> são os mesmos do modelo hidrodinâmico. No MTEADR apenas reações cinéticas sem sinergia são consideradas. Portanto, o transporte de cada substância é feito como se não houvesse interferências de outras substâncias. Trata-se de uma abordagem de sistema binário formado pela água e pela substância de interesse (ROSMAN, 2012).

Os dados de elevação da superfície livre e de intensidade de correntes gerados pelo modelo hidrodinâmico são os dados de entrada dos modelos de transporte no cálculo da advecção e difusão dos escalares quando o modelo de transporte é executado desacoplado ao modelo hidrodinâmico.

#### 5.3.1 Formulação Matemática do Modelo de Transporte

O modelo de transporte advectivo-difusivo (MTEADR) utiliza os mesmos princípios de filtragem adotados para derivação da equação governante do modelo hidrodinâmico, como mostra a equação 4.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + V \frac{\partial c}{\partial y} = -\frac{c}{H} (q_P - q_E) + \frac{(C_{Ia} - c)}{H} q_{Ia} + \Sigma R +$$

$$\frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left( \underbrace{H \left[ D_{xx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right]}_{T_{xx}} \frac{\partial c}{\partial x} + \underbrace{H \left[ D_{xy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right]}_{T_{xy}} \frac{\partial c}{\partial y} + \underbrace{H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right|}_{T_{xt}} \frac{\partial c}{\partial t} \right) +$$

$$\frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left( \underbrace{H \left[ D_{yx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right]}_{T_{yx}} \frac{\partial C}{\partial x} + \underbrace{H \left[ D_{yy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right]}_{T_{yy}} \frac{\partial C}{\partial y} + \underbrace{H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right|}_{T_{yt}} \frac{\partial C}{\partial t} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$C$  = concentração da substância de interesse;

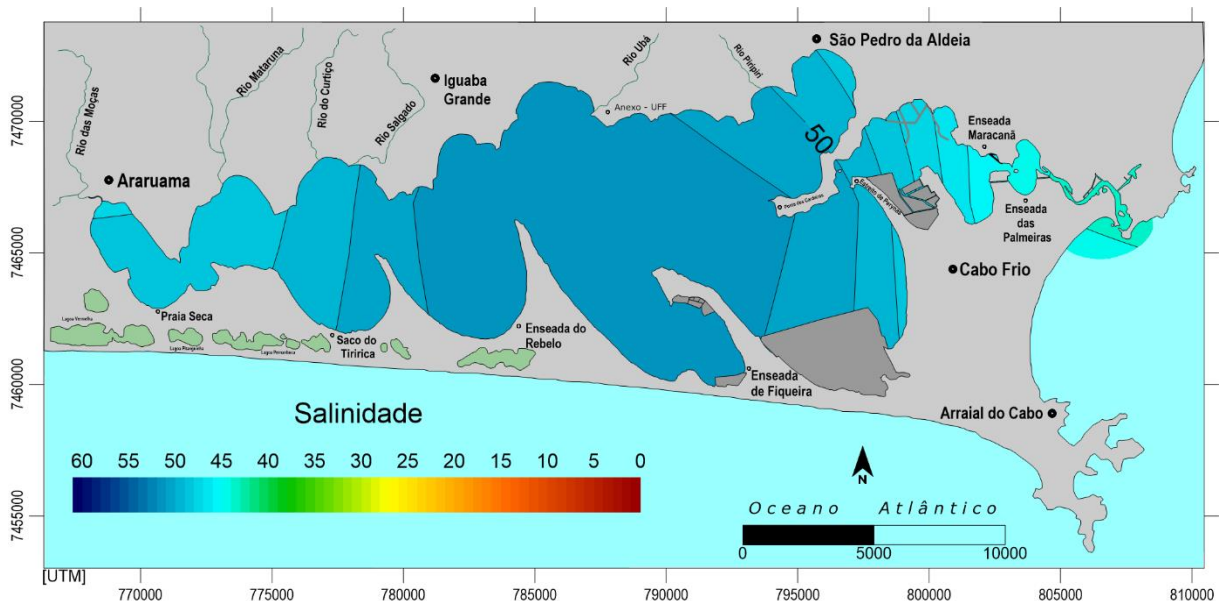
$q_P$ ,  $q_E$  e  $q_I$  = valores dados de vazões por unidade de área, respectivamente, de precipitação, evaporação e infiltração;

$\Sigma R$  = somatório das reações cinéticas consideradas, fontes e sumidouros;

$D_{ij}$  = termo que representa os coeficientes de difusão e dispersão horizontal.

#### 5.4 CONDIÇÕES INICIAIS

As condições iniciais do modelo hidrodinâmico 2DH são: os valores de elevação da superfície livre e as componentes de velocidade,  $u$  e  $v$ , no instante inicial de simulação,  $t_0$ , para todos os nós do domínio. Para o modelo de transporte de sal, a condição inicial prescrita é a concentração de sal nos diversos nós de cálculo. Essa definição da concentração seguiu a distribuição espacial gerada a partir de dados de salinidade medidos na Lagoa de Araruama do por Silva, (2014) como mostra a figura 10.



**Figura 10** – Distribuição de salinidade utilizada como condição inicial do modelo de transporte.

## 5.5 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

De acordo com o objetivo geral e específico proposto, foram definidos os seguintes cenários de simulação descritos a seguir, de forma a avaliar as trocas de sal entre o mar e a lagoa de Araruama em:

- Condições de balanço hídrico positivo;
- Condições de balanço hídrico negativo;
- Dragagem do Canal Itajuru em diferentes profundidades;
- E abertura de um canal de barra;

### 5.5.1 Simulação em Condições de Balanço Hídrico Positivo e Negativo

Com o objetivo de avaliar a resposta da concentração de sal na laguna em momentos de balanço hídrico positivo (situação atípica) e comparar com o padrão de concentração de sal distribuído em período de balanço hídrico negativo (situação típica), foram desenvolvidos dois modelos hidrodinâmicos e posteriormente seus respectivos modelos de transporte:

- 1) Modelo Hidrodinâmico em um ano de balanço hídrico positivo (2009);
- 2) Modelo Hidrodinâmico em um ano de balanço hídrico negativo (2015);

Em ambos os casos, a sazonalidade entre os períodos de verão (janeiro) e inverno (julho) foram analisadas. Os dados de entrada como: vento, evaporação, precipitação, vazão média dos rios, carga de esgoto e constantes harmônicas da maré estão de acordo com cada período simulado dos respectivos anos de estudo, ou seja, procurou-se montar os cenários com dados reais, ou próximos, de forma que as respostas obtidas dos modelos fossem as mais fidedignas possível.

Desta forma, pretende-se analisar a influência do déficit hídrico positivo na condição hipersalina da lagoa ao comparar o resultado deste cenário, uma situação atípica para região, com a resposta do modelo quando simulado em um ano típico de balanço hídrico negativo.

### **5.5.2 Dragagem do Canal em 2,5, 3,0 e 4,0 metros**

Para avaliar as trocas de sal entre o mar e a lagoa de Araruama em situação de diferentes profundidades de dragagem e estimar o fluxo de entrada do mar capaz de comprometer os valores de salinidade da Lagoa de Araruama, foram desenvolvidos quatro modelos:

- 1) Modelo Hidrodinâmico com Canal Itajuru em condições de batimetria atuais (2016);
- 2) Modelo Hidrodinâmico com Canal Itajuru dragado 2,5 metros;
- 3) Modelo Hidrodinâmico com Canal Itajuru dragado 3,0 metros;
- 4) Modelo Hidrodinâmico com Canal Itajuru dragado 4,0 metros;

Em todos os modelos foi considerado apenas o verão do ano de 2015 onde as condições climáticas encontram-se normais (déficit hídrico negativo) para região. Além disso, é o período de maior “estresse” para o sistema lagunar com aumento da população, descarte de efluente e estação chuvosa elevando sua vulnerabilidade. Os dados de entrada como: vento, evaporação, precipitação, vazão média dos rios, carga de esgoto e constantes harmônicas da maré são reais, alterando-se apenas a batimetria do Canal de Itajuru.

Assim, ao se comparar o resultado do cenário atual (batimetria 2016) com as demais situações projetadas de dragagem espera-se estimar os valores de vazão mínima, e máxima em:

- a. Fluxo de entrada com condições atuais do sistema;
- b. Fluxo de entrada admissível para o sistema que mantenha ou eleve a salinidade,
- c. Fluxo de entrada admissível para o sistema que possa reduzir sua concentração de sal, em função da entrada de água do mar com salinidade inferior à da Lagoa.

### **5.5.3 Abertura de um Canal de Barra**

Para avaliar o impacto da abertura de um canal de barra sobre a distribuição de sal da lagoa de Araruama, foi desenvolvido um modelo hidrodinâmico com uma segunda fronteira aberta e posteriormente seu respectivo modelo de transporte:

- 1) Modelo Hidrodinâmico com um canal de barra na porção oeste sob condições de balanço hídrico negativo.

A configuração deste segundo canal seguiu as mesmas aplicadas ao estudo prévio de Gava (2008). A implementação do canal ocorre através de duas conexões, a primeira ligando o mar até a lagoa de Pitanguinha, e a segunda da lagoa de Pitanguinha até Lagoa de Araruama. Largura em torno de 100 metros, comprimento em torno de 1km, batimetria estimada em 2 metros e fixação de dois guias de corrente na embocadura do canal.

Os dados de entrada são referentes ao ano de 2015 onde as condições climáticas encontram-se normais (déficit hídrico negativo) para região. Assim como nos cenários de influência do balanço hídrico, a abertura da barra foi simulada em período de verão e inverno, afim de caracterizar qual seria o comportamento sazonal do sistema após a intervenção antrópica.

## 5.6 DADOS DE ENTRADA

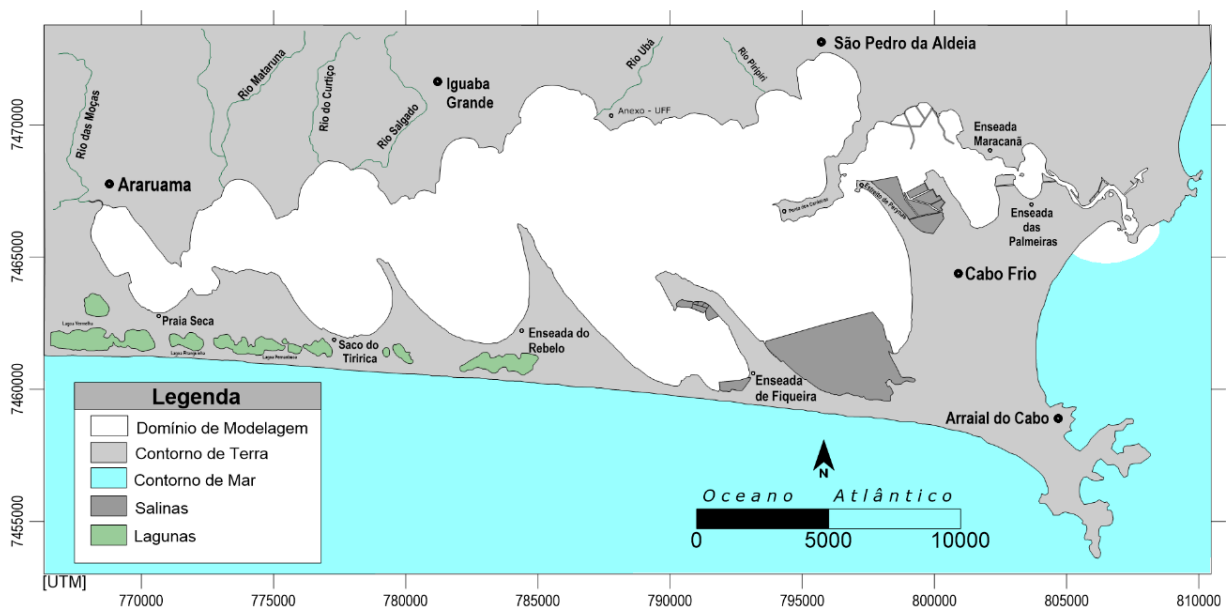
Neste item são descritos os dados utilizados no desenvolvimento dos modelos hidrodinâmicos e de transporte de sal, incluindo considerações sobre a discretização espacial e as condições de contorno e dos dados de entrada dos modelos. Quando aos dados de entrada referentes as variáveis climáticas como vento, precipitação e evaporação estão descritos de forma estatística neste trabalho, contudo os mesmos não são necessariamente inseridos no modelo computacional desta forma. Para mais informações, acessar literatura disponível em Rosman (2012).

### 5.6.1 Domínio de Modelagem, Batimetria e Rugosidade

O domínio de interesse é uma etapa fundamental do processo de modelagem, devendo ser feita na fase de pré-processamento. Para tanto, faz-se necessária a confecção de mapas de

contorno de terra e mar, juntamente com outros contornos relevantes para área como ilhas, salinas e atracadouros (Figura 11).

Os dados utilizados para confecção dos mapas foram obtidos utilizando o aplicativo Google Earth®, onde foram criadas as projeções dos polígonos que delimitam todos os contornos pertinentes à área de estudo. O arquivo exportado pelo aplicativo em formato .kml foi convertido com o auxílio do SisBaHiA® para um arquivo compatível com o programa de confecção de mapas Surfer® onde foram produzidos os mapas base, mapas de contorno de terra e mapas de contorno de mar adicionados ao sistema de modelagem.

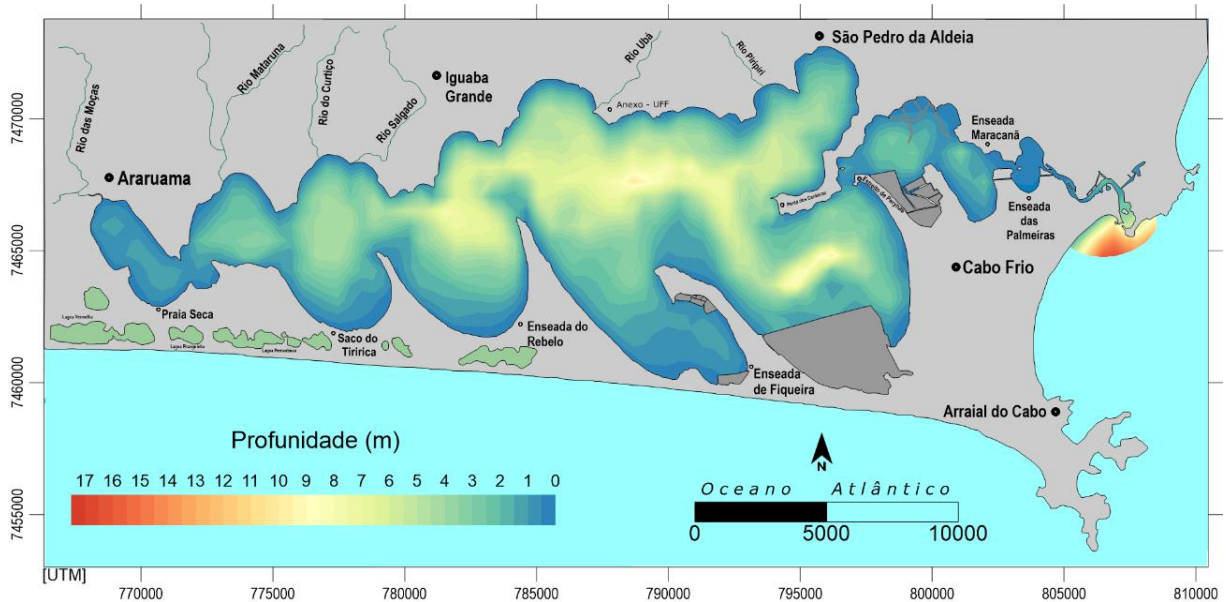


**Figura 11** - Domínio de Modelagem da Lagoa de Araruama.

Os dados batimétricos foram levantados em duas campanhas, a primeira em 2005 do corpo principal da lagoa e posteriormente em 2016 atualizando a batimetria do Canal Itajuru, pela equipe REMADS da Universidade Federal Fluminense – UFF. Estes dados batimétricos foram corrigidos pelo DATUM vertical de Imbituba - IBGE. A batimetria da região de influência de maré foi obtida através de cartas náuticas fornecidos pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil) onde o nível de referência adotado é o nível médio do mar no Porto de Arraial do Cabo.

Para que houvesse compatibilidade entre os níveis de referências batimétricas, os valores de fundo encontrados nas cartas náuticas foram corrigidos de acordo com a referência do DATUM Imbituba para padronização de toda batimetria da lagoa. A partir desses dados foi composta a malha batimétrica aplicada ao estudo (Figura 12).

Os dados morfológicos (rugosidade de fundo) do sistema lagunar foram obtidos de trabalhos prévios realizados na Lagoa de Araruama (GAVA, 2008; GOMES, 2009). Estes dados foram originalmente levantados pela CPRM em 1984 e atualizados por LESSA (1990) no Canal de Itajuru (Mapa disponível em Gomes, 2009).



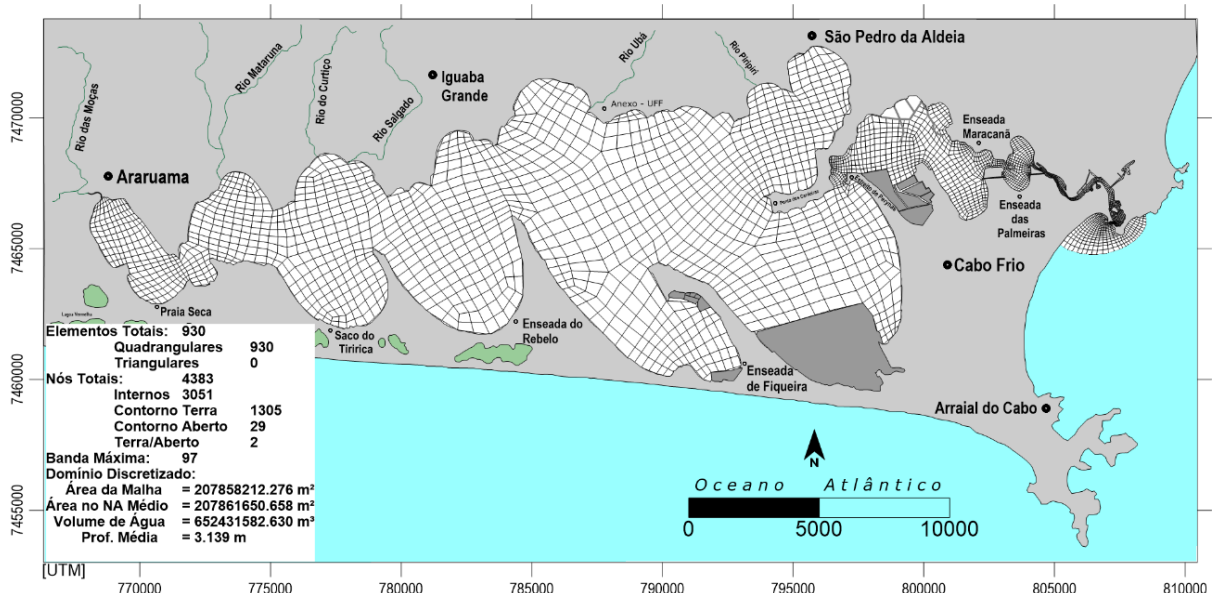
**Figura 12** - Mapa da batimetria geral da Lagoa de Araruama, com os dados de 2005 e 2016 da UFF.

### 5.6.2 Discretização Espacial

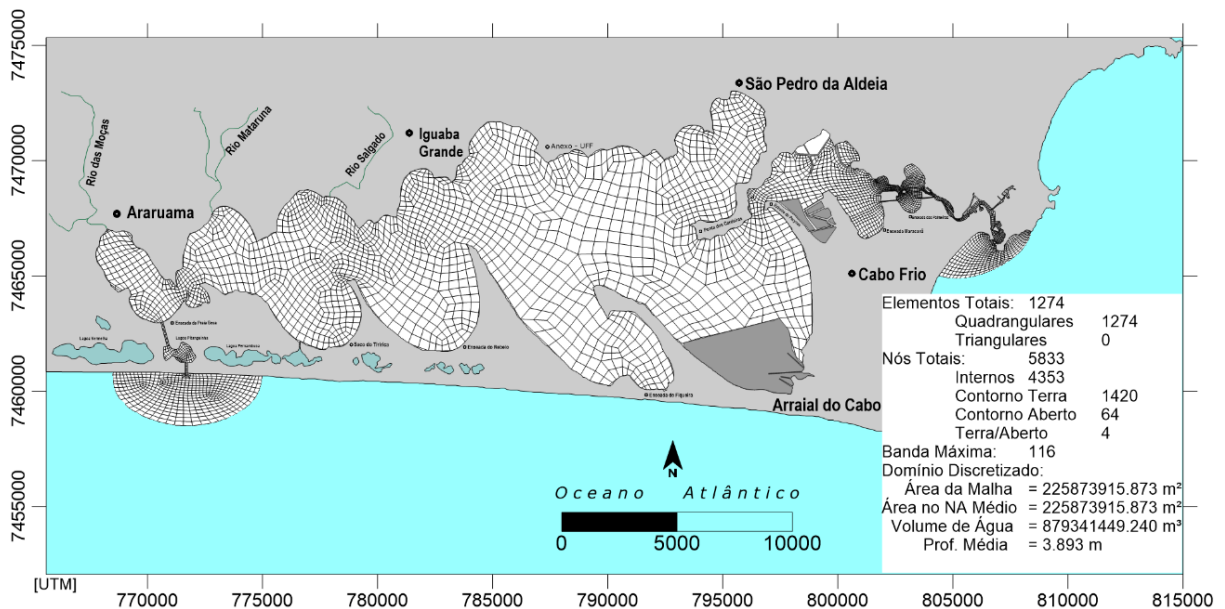
A discretização espacial compõe um passo fundamental da modelagem, nesta fase a dedicação do modelador irá definir a qualidade da malha de modelagem que influenciará diretamente no bom desempenho do modelo, diminuição da incidência de erros de natureza numérica e resultados coerentes.

O domínio modelado foi discretizado em elementos finitos Lagrangeanos. Durante o processo buscou-se desenvolver uma malha harmônica, sem grandes diferenças entre os tamanhos dos elementos vizinhos. A densidade da malha da embocadura até o estreito de Perynas foi intensificada a fim de ser uma boa discretização física que caracterize a forma meandrante do canal e de seus estrangulamentos hidráulicos. As malhas foram confeccionadas inteiramente no SisBaHiA<sup>®</sup>. De acordo com os cenários definidos anteriormente, foi confeccionada pelo autor a malha de elementos quadráticos número 1 e malha número 2 foi disponibilizada pelo Prof. Rosman (COPPE-UFRJ) utilizada no trabalho de (GAVA, 2008).

- *Malha 1*: Para os cenários da influência do balanço hídrico e dragagem do canal Itajuru. A malha é composta de 930 elementos quadráticos com 4383 nós. (Figura 13);
- *Malha 2* – para o cenário de abertura da barra no canal oeste. A malha é composta de 1274 elementos quadráticos com 5833 nós. (Figura 14);



**Figura 13** - Malha de discretização da Lagoa de Araruama para os cenários 1 e 2. O quadro em destaque descreve as informações da malha.



**Figura 14** - Malha de discretização da Lagoa de Araruama para o cenário 3. O quadro em destaque descreve as informações da malha.

### 5.6.3 Ventos

Para elaboração das informações de entrada do modelo foram utilizados dados de vento da estação meteorológica automática localizada no município de Arraial do Cabo - Rio de Janeiro, entre a latitude  $22^{\circ} 58' 31.68''$  e a Longitude  $42^{\circ} 1' 17.22''$ , operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. O período de amostragem compreende janeiro de 2009 a dezembro de 2015.

Para atender aos cenários propostos neste trabalho foram utilizados os anos de 2009 e 2015. Estes anos possuem condições climatológicas que representam bem o antagonismo entre um período de balanço hídrico positivo (2009) e negativo (2015), além de possuírem os padrões de vento (intensidade e direção) tidos como característicos para o sistema lagunar. Os ventos de nordeste são frequentes durante a maior parte do ano, e os ventos provenientes de sudoeste são mais comuns com a chegada de passagens frontais durante o inverno (BARBIÉRE, 1984; KJERFVE et al., 1996).

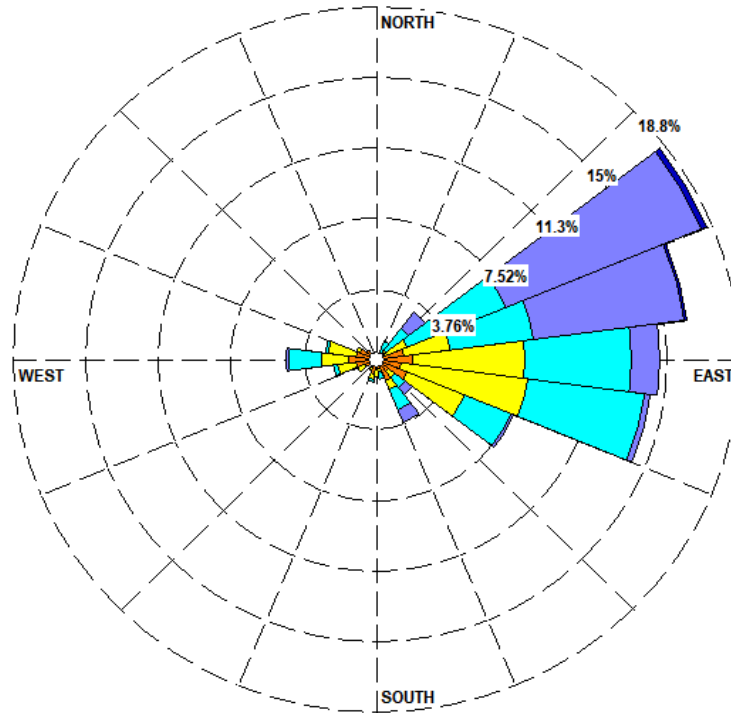
- *Ventos – 2009*

O cenário de verão deste ano foi caracterizado pelo mês de janeiro, onde mais de 50% da incidência dos ventos são de direção NE, representando o padrão esperado para esta estação. Os ventos de direção SW apresentam uma frequência relativamente alta para o período, que pode ser explicado pela ocorrência de frentes frias que atribuíram a este ano um balanço hídrico positivo (Figura 15).

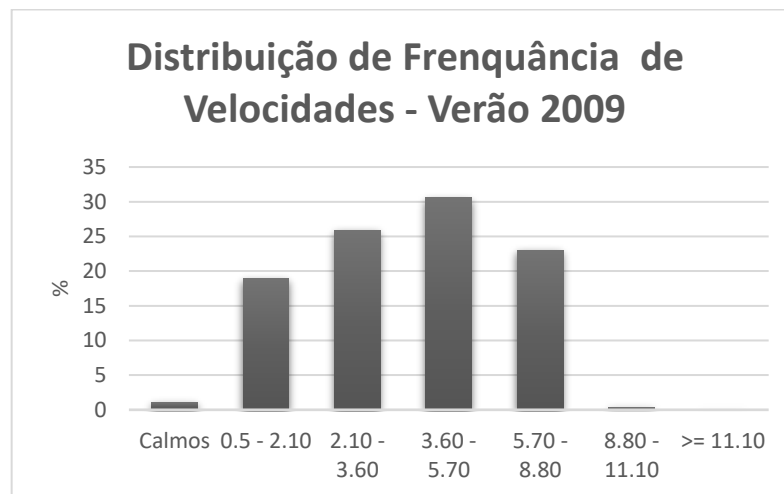
Durante o verão de 2009 mesmo que a frequência dos ventos com velocidades médias – indo de  $2 \text{ m s}^{-1}$  a pouco mais de  $5 \text{ m s}^{-1}$  – predominassem, os ventos fortes acima de  $6 \text{ m/s}$  correspondem a uma fatia relevante de 20% (Figura 16).

Para caracterização dos cenários de inverno, foi utilizado o mês de julho, pois apesar do vento nordeste continuar presente, é perceptível a diminuição da sua frequência dando lugar a uma maior incidência de ventos oriundos do quadrante SW – pouco mais de 25% (Figura 17).

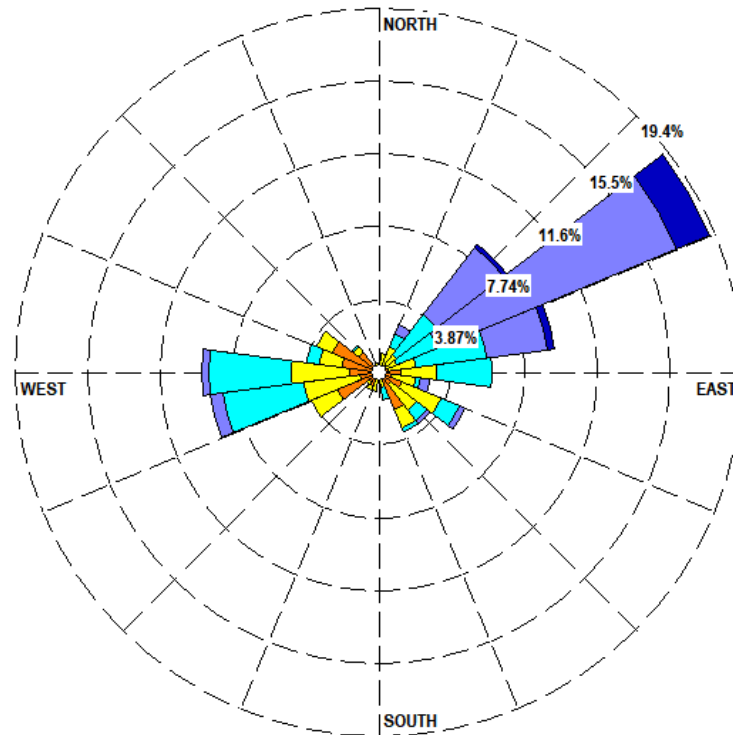
No decorrer do inverno de 2009 a distribuição dos ventos sofre uma pequena alteração, os ventos mais fortes – acima de  $6 \text{ m s}^{-1}$  - aparecem com uma porcentagem superior ao período de verão, totalizando pouco mais de 30%. Contudo, os ventos médios ainda representam uma parcela maior do período (Figura 18).



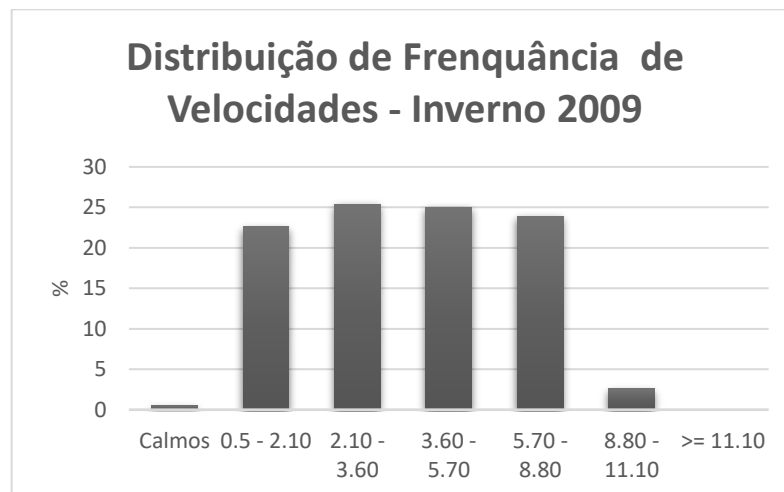
**Figura 15** - Rosa dos ventos de janeiro de 2009 da estação meteorológica de Arraial do Cabo. Imagem gerada utilizando o programa WRPLOT.



**Figura 16** - Intensidade dos ventos de janeiro de 2009, da estação meteorológica de Arraial do Cabo.



**Figura 17** - Rosa dos ventos de julho de 2009 da estação meteorológica de Arraial do Cabo. Imagem gerada utilizando o programa WRPLOT.



**Figura 18** - Intensidade dos ventos de julho de 2009, da estação meteorológica de Arraial do Cabo.

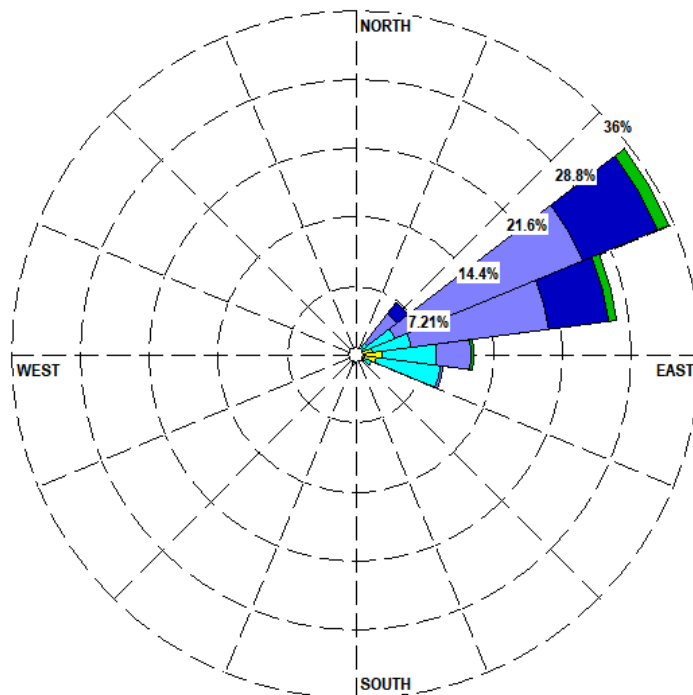
- Ventos – 2015

O cenário de verão do ano de 2015 também foi caracterizado pelo mês de janeiro. Ao contrário do período úmido que ocorreu em 2009, 2015 apresenta um balanço hídrico negativo, portanto, no mês de janeiro não houve passagem de frente fria, não computando

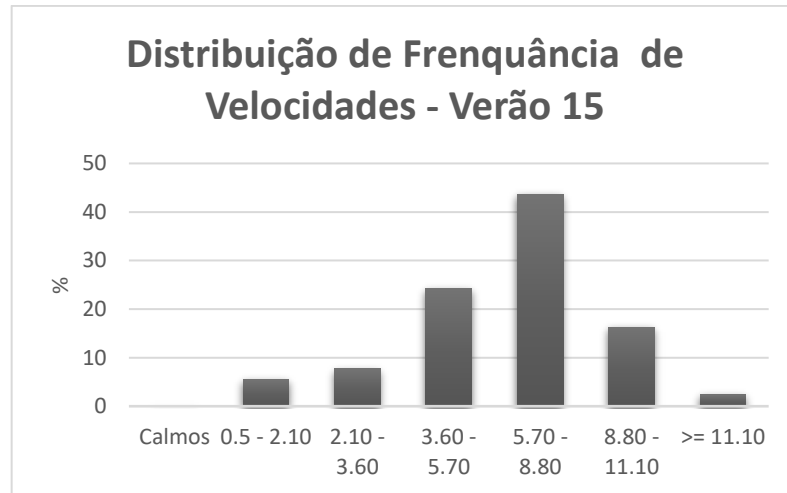
incidência de ventos SW. Majoritariamente os ventos de verão seguem o padrão esperado para a estação com 80% de ventos NE (Figura 19). A distribuição das classes de frequência mostra que no verão de 2015 ocorreram ventos de forte intensidade que representam um pouco mais que 50 % de toda amostragem do período, opondo-se ao verão de 2009 com ventos de intensidade média (Figura 20).

O cenário de inverno também se enquadra no padrão típico da estação com ocorrência de ventos do quadrante SW, entretanto, este comportamento não se mostrou tão acentuado como no mesmo período em 2009. A reduzida ocorrência pode estar associada ao balanço hídrico negativo do ano de 2015, onde a pluviosidade foi pouco significativa, diminuindo a incidência de frentes frias para região de Araruama (Figura 21).

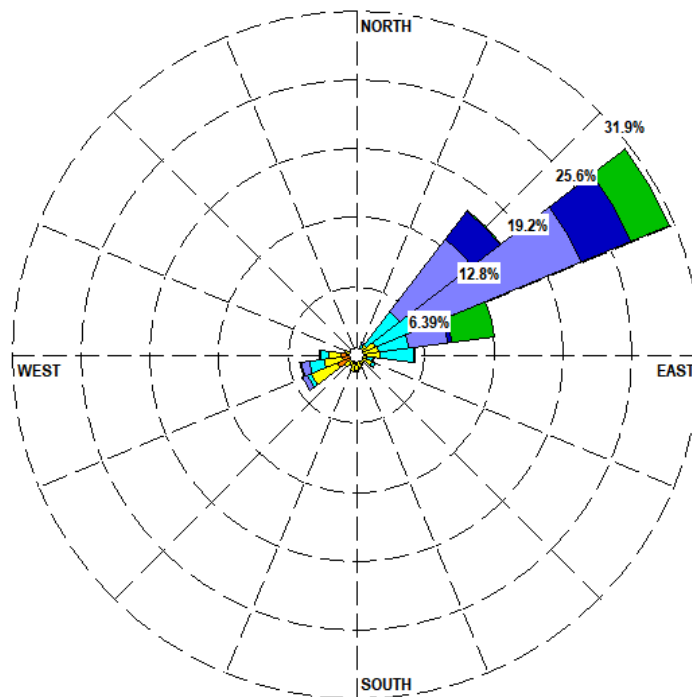
A distribuição das classes de frequência no inverno de 2015 mostra uma semelhança com verão do mesmo ano, incidência de ventos fortes com velocidade acima de 6m/s, divergindo apenas no significativo aumento da frequência de ventos com velocidade maior ou igual a 11m/s (Figura 22).



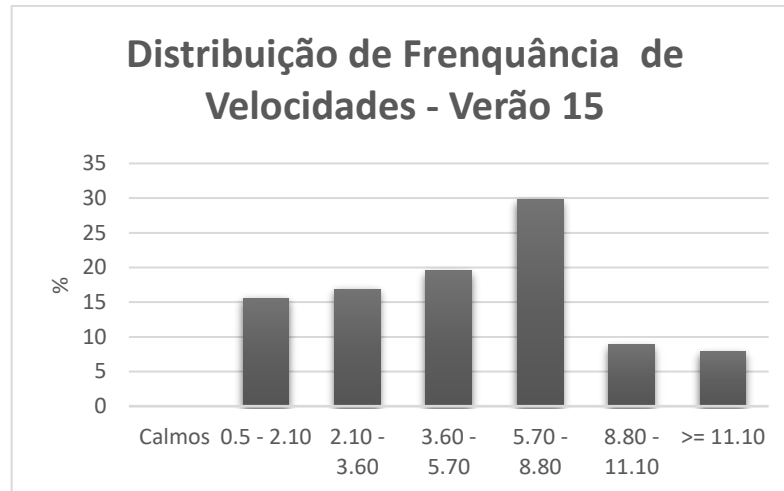
**Figura 19** - Rosa dos ventos de janeiro de 2015 da estação meteorológica de Arraial do Cabo. Imagem gerada utilizando o programa WRPLOT.



**Figura 20** - Intensidade dos ventos de janeiro de 2015, da estação meteorológica de Arraial do Cabo.



**Figura 21** - Rosa dos ventos de julho de 2015 da estação meteorológica de Arraial do Cabo. Imagem gerada utilizando o programa WRPLOT.



**Figura 22** - Intensidade dos ventos de julho de 2015, da estação meteorológica de Arraial do Cabo.

#### 5.6.4 Balanço Hídrico: Evaporação, Precipitação e Vazão Afluente

Os dados de evaporação e precipitação utilizados neste trabalho referem-se aos estudos de BARBIÉRE (1984) e informações disponibilizadas pelo SADMET (Seção de Armazenamento de Dados Meteorológicos do INMET) referentes às estações meteorológicas de Arraial do Cabo, citada anteriormente no item 4.3.3, e outra no município de Iguaba Grande – RJ. Quanto aos dados de vazão afluentes por não existirem medições contínuas capaz de gerar um hidrograma, os valores inseridos no modelo foram inferidos segundo o método racional de Emil Kuichling (1890).

- *Evaporação e Precipitação*

Ao implementar essas duas estações buscou-se impor ao modelo as diferenças de evaporação e precipitação entre as regiões evidenciadas por BARBIÉRE (1984). Ademais, o período de amostragem segue o mesmo dos dados de vento, bem como a escolha dos anos para simulação dos cenários (2009 e 2015).

As estações meteorológicas escolhidas para o estudo não possuem equipamentos para medição de evaporação e apenas a estação de Arraial do Cabo possuía as variáveis climáticas necessárias para serem aplicadas ao método de estimativa indireta adotada no estudo. Portanto, o parâmetro, evaporação, foi estimado para região de Arraial e Cabo segundo o modelo de Linacre (1993) e para Região de Iguaba Grande os dados foram extraídos dos estudos de Barbière (1984).

Os valores de evaporação foram inferidos pelo modelo de Linacre, (1993) indicado pela equação (5). O autor simplificou a equação de Penam de 1956 para verificar a taxa de evaporação em três lagos nos EUA. O modelo de Linacre foi testado por Vieira et al., (2016) em uma avaliação da eficiência de outros modelos de estimativa de evaporação em dois reservatórios em Minas Gerais, tendo como referência os resultados medidos por estações meteorológicas próximas e um tanque Classe A. A análise dos autores mostrou que o modelo de Linacre estimou valores de evaporação satisfatoriamente, pois ao comparar estatisticamente os resultados da equação com as estações da barragem os valores eram próximos.

$$E_0 = (0.015 + 0.00042T + 10 - 6z) [0.8R_s - 40 + 2.5Fu(T - T_d)] \quad (\text{Eq.5})$$

Onde:

$E_0$  = evaporação (mm/dia<sup>-1</sup>);

T = Temperatura do ar (°C);

z = Altitude do local (m);

$R_s$  = radiação solar na superfície do reservatório (W/m<sup>2</sup>);

F = Fator de correção devido a altitude local (adimensional);

u = velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>);

$T_d$  = Temperatura de orvalho.

De acordo com o modelo de Linacre, (1993), a radiação solar na superfície do reservatório pode ser calculada com base em dados de precipitação (VIEIRA et al., 2016). Contudo, por dispormos de dados medidos da estação de Arraial do Cabo, os mesmos foram utilizados no cálculo da equação. Desta forma, após aplicação do modelo e levantamento dos dados contidos nos estudos de Barbière (1984), foram listados na Tabela 3 os valores utilizados na modelagem.

Os dados de precipitação utilizados no estudo são oriundos exclusivamente das duas estações meteorológicas do INEMET (Iguaba e Arraial). Os valores utilizados na modelagem foram organizados pelos períodos de verão/inverno dos anos de interesse (2009 e 2015) e estão listadas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Dados de evaporação utilizados na modelagem.**

		Período Húmido			Período Seco		
		Precipitação (mm/mês)	Evaporação (mm/mês)	P - E	Precipitação (mm/mês)	Evaporação (mm/mês)	P - E
Verão	Arraial do Cabo	248	80*	168	0	172*	-172
	Iguaba	170	110*	60	0.2	118**	-117.8
Inverno	Arraial do Cabo	26	57*	-31	13	98*	-85
	Iguaba	77	90**	-13	25	100**	-75

Fonte: Elaborada pelo autor.

\*Dados produzidos segundo o modelo de Linacre (1993).

\*\*Dados obtidos do estudo de Barbière (1984).

#### ▪ *Vazões Afluentes – Rios*

As vazões afluentes atribuídas à modelagem são compostas pelas contribuições fluviais dos rios das Moças, Mataruna e Salgado além da colaboração dos efluentes descartados em seus canais de drenagem. Como não existem registros das vazões dos rios, os valores foram inferidos pelo Método Racional de Emil Kuichling (1890) citado em Fragoso Jr et al., (2009) e Gomes, (2009) representado pela equação (6).

$$Q = \frac{i_m AC}{3.6} \quad (6)$$

Onde:

Q = Vazão, em Q (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>);

i<sub>m</sub> = Intensidade média de precipitação na bacia de drenagem (mm/h);

A = Área drenada (Km<sup>2</sup>);

C = Coeficiente de escoamento superficial (adimensional).

Os valores de i<sub>m</sub> aplicados à equação (6) correspondem à média da pluviosidade do mês de janeiro e julho dos intervalos de 2009 a 2011 e 2013 a 2015, que na amostragem total (2009 a 2015) o primeiro intervalo representa o período úmido atípico da região da laguna e o

segundo caracterizando o período típico seco. Assim, o momento de cheias refere-se ao mês de janeiro e de estiagem ao mês de julho. O valor de C que é em função do tipo de ocupação do solo, optou-se por utilizar um valor único igual a 0,4, levando em consideração que a área de estudo compreende áreas rurais até regiões pavimentadas.

A partir da resolução da equação 8, foram obtidas as vazões médias para os rios das Moças, Salgado e Mataruna, apresentadas na Tabela 4 e 5.

**Tabela 4 - Vazão Média 2009**

Rio	Geomorfologia		Verão – janeiro		Inverno – julho	
	Área de Drenagem (Km <sup>2</sup> )	C	Pluviosidade (mm/mês)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Pluviosidade (mm/mês)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
<b>Moças</b>	94	0,4	150	2,18	61	0,88
<b>Mataruna</b>	55,1	0,4	150	1,28	61	0,52
<b>Salgado</b>	24,2	0,4	150	0,56	61	0,23

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 5 - Vazão Média 2015.**

Rio	Geomorfologia		Verão – janeiro		Inverno – julho	
	Área de Drenagem (Km <sup>2</sup> )	C	Pluviosidade (mm/mês)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Pluviosidade (mm/mês)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
<b>Moças</b>	94	0,4	49.67	0,7	53	0,78
<b>Mataruna</b>	55,1	0,4	49.67	0,42	53	0,46
<b>Salgado</b>	24,2	0,4	49.67	0,19	53	0,20

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.6.5 Condições de Contorno

- *Modelo Hidrodinâmico - Maré*

A variação de nível do mar na fronteira aberta foi modelado a partir das constantes harmônicas do Porto do Forno, em Arraial do Cabo, conforme estudos pretéritos na região Cunha (2003), Gava (2008) e Gomes (2009), reunindo um total de 16 constantes harmônicas, listadas na tabela 5. As constantes harmônicas geraram uma curva de mar

sintética (figura 23) aplicada como condição de contorno aos modelos hidrodinâmicos e de transporte de sal desse projeto. O nível de referência corresponde ao nível médio do mar no local de estudo.

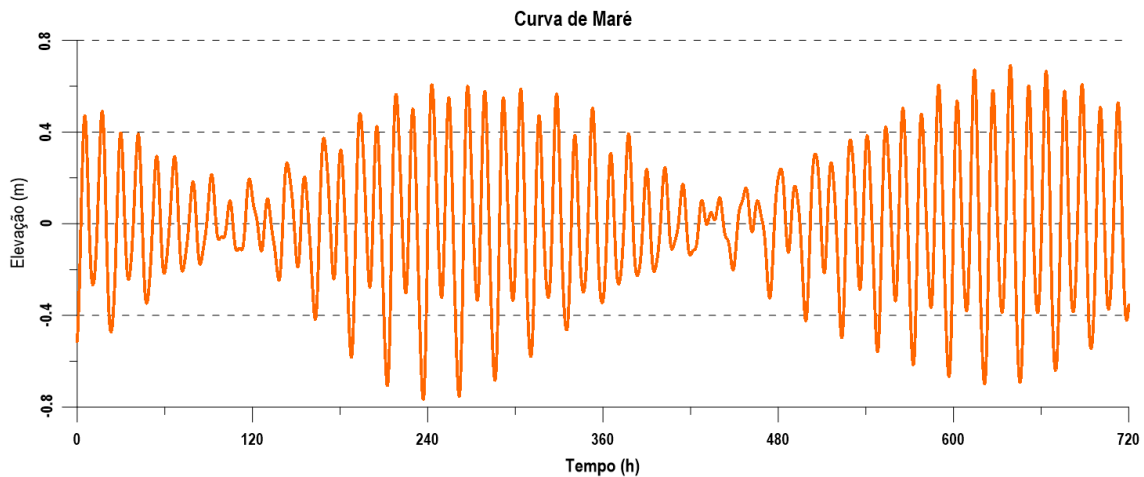


Figura 23 - Curva de Maré Sintética (720h).

**Tabela 6 – Constantes harmônicas utilizadas na modelagem.**

Nome	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (rad)
<b>M2</b>	44714.16	0.3256	1.370607062
<b>S2</b>	43200.00	0.1718	1.539729466
<b>O1</b>	92949.63	0.0999	1.524894167
<b>K1</b>	86164.09	0.0504	2.568482527
<b>K2</b>	43082.05	0.0467	1.553517567
<b>N2</b>	45570.05	0.0418	1.609891702
<b>Q1</b>	96726.08	0.0267	1.312313065
<b>L2</b>	43889.83	0.0222	1.611986097
<b>M4</b>	22357.08	0.0193	0.429176463
<b>P1</b>	86637.20	0.0167	2.490235777
<b>KQ1</b>	77681.65	0.0145	0.358665161
<b>M1</b>	89399.69	0.0140	0.800757061
<b>MNS2</b>	42430.07	0.0108	2.244144352
<b>T2</b>	43259.22	0.0101	1.532922682
<b>MS4</b>	21972.02	0.0100	2.011666496
<b>J1</b>	83154.52	0.0098	2.162462943

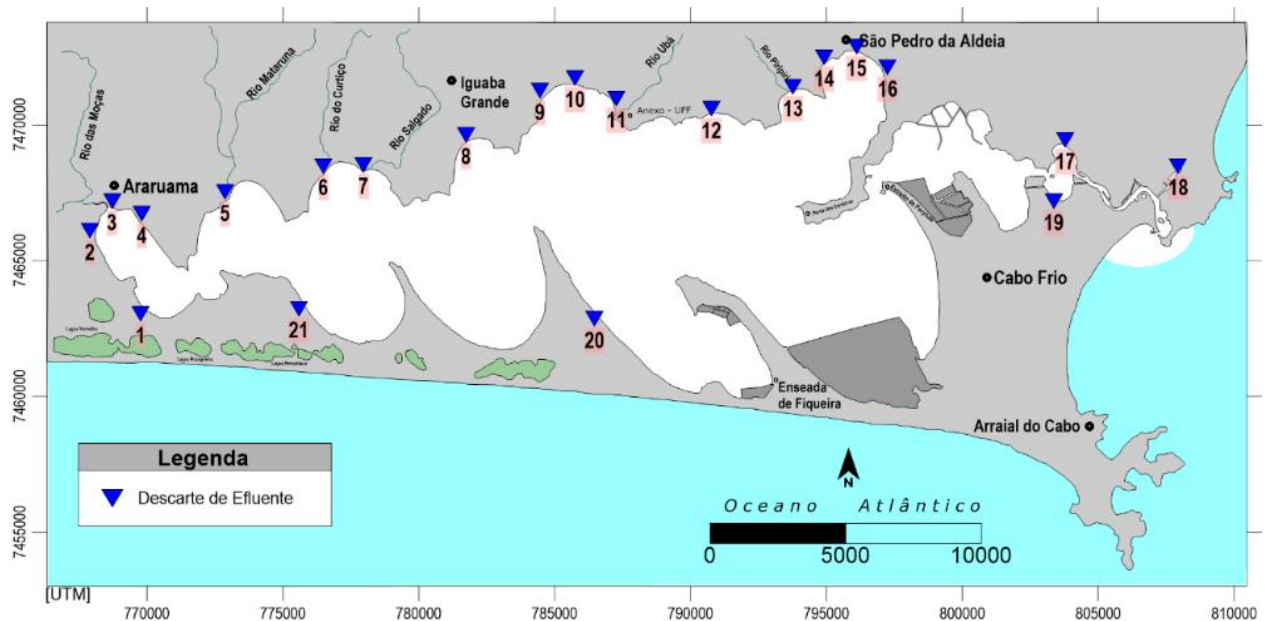
Fonte: DHN.

- *Modelo de Sal – Concentração Afluente (Rios e Maré)*

Foram prescritos para condição de contorno de fronteira aberta e de terra dos modelos de transporte os seguintes valores de concentração de sal: fluxos oriundos dos rios  $C = 0$  e para o fluxo que entra pelo mar  $C = 37$ .

- *Vazões Afluentes – Esgoto*

Quanto à parcela da vazão afluente, referente aos esgotos, os dados inseridos no modelo são provenientes do estudo de Gomes (2009). Em seu trabalho a autora estimou os lançamentos de efluentes e levantou as vazões das estações de tratamento de esgoto da região que são descartados na laguna. A tabela 8 lista as vazões dos efluentes e a figura 24 ilustra seus respectivos pontos de descarte.



**Figura 24** - Pontos de descarte de efluentes.

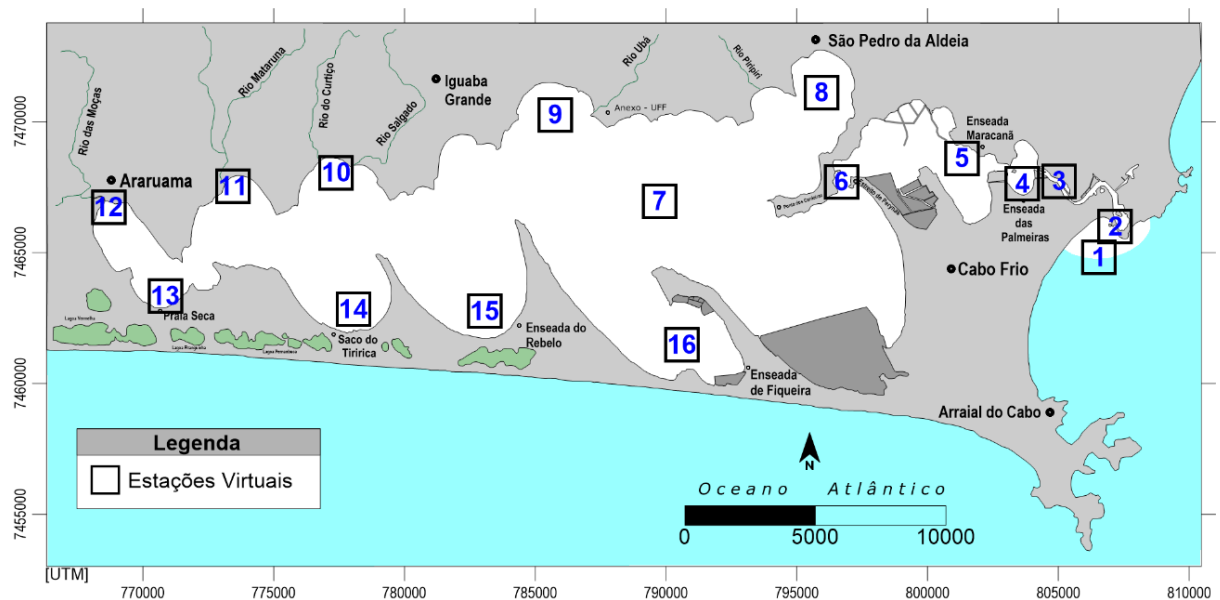
**Tabela 7 - Vazões de esgoto afluentes e respectivos pontos de descarte. ETE – Araruama – ETE São Pedro – ETE Cabo Frio.**

	<b>Pontos de Descarte</b>	<b>Verão</b> <b>(m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Inverno</b> <b>(m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>
<b>1</b>	Valas e canais de interligação com a lagoa de Araruama	0,0054	0,0027
<b>2</b>	Rio do Congo	0,003	0,0015
<b>3</b>	Rio das Moças	1.0906	0,6178
<b>4</b>	Valas do Barreto e outros canais	0,0144	0,0072
<b>5</b>	Rio Mataruna e valas	0,6809	0,383
<b>6</b>	Rio do Cortiço e valas	0,0192	0,0096
<b>7</b>	Rio Salgado e vales	0,02991	0,1682
<b>8</b>	Valas Iguabinha	0,0092	0,0046
<b>9</b>	Rio Iguabaça	0,0316	0,0158
<b>10</b>	Costa do Sol Valas	0,026	0,013
<b>11</b>	Rio Uba - Valas	0,0242	0,0121
<b>12</b>	Rio Uba	0,0214	0,0107
<b>13</b>	Praia do Balneário	0,0324	0,0162
<b>14</b>	Córrego Piriri	0,012	0,006
<b>15</b>	Base Naval	0,016	0,008
<b>16</b>	Canal Mossoró	0,0684	0,0342
<b>17</b>	Norte do Canal das Palmeiras	0,0158	0,0079
<b>18</b>	Canal Ogiva	0,0948	0,0474
<b>19</b>	Canal Excelsior	0,2822	0,1411
<b>20</b>	Figueira	0,0176	0,0088
<b>21</b>	Praia Seca	0,0326	0,0163

Fonte: Adaptado de GOMES, 2009.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão, são apresentados e discutidos os resultados obtidos da aplicação dos modelos hidrodinâmicos e de transporte de sal para as situações projetadas. Os resultados são apresentados sob a forma de mapas de distribuição de sal e gráficos de séries temporais em estações virtuais definidas ao longo do sistema lagunar que estão listadas na tabela 9 e podem ser visualizadas na figura 26. Foram inseridas dezesseis estações de observação com o intuito de cobrir o domínio de modelagem, de forma a representar as particularidades do sistema. Além disso, os locais das estações foram estrategicamente posicionados próximos de pontos onde existem medições, possibilitando, assim, comparações com dados de campo.



**Figura 25** - Mapa com a localização das estações virtuais.

Os resultados da sessão são apresentados na seguinte ordem:

1. Caracterização do padrão de circulação hidrodinâmica da Lagoa de Araruama, conforme evidenciado na literatura. Mostrando que o sistema pode ser dividido em dois compartimentos onde o primeiro (corpo lagunar) tem sua circulação regida pelos ventos e o segundo (Canal Itajuru) tem seu movimento ditado pela oscilação da maré;
2. Análise da influência do balanço hídrico sobre a salinidade do sistema lagunar, evidenciando como a diferença entre a evaporação e a precipitação exerce domínio sobre o comportamento e manutenção da hipersalinidade da Lagoa de Araruama;

3. Avaliação das trocas de sal entre o mar e a lagoa de Araruama em situação de dragagem estimando o maior fluxo de entrada admissível para o sistema que comprometa os valores de salinidade da Lagoa de Araruama;
4. Estudo do impacto da abertura de um segundo canal de comunicação com o mar na condição hipersalina do sistema lagunar.

**Tabela 8 - Localização e Coordenadas das Estações Virtuais.**

<b>Número</b>	<b>Coordenada UTM</b>		<b>Localização</b>
<b>1</b>	806555.19	7464813.979	Mar
<b>2</b>	807185.8355	7465982.945	Embocadura
<b>3</b>	805032.31605	7467719.396	Canal Itajuru
<b>4</b>	803632.6466	7467628.157	Ens. Palmeiras
<b>5</b>	801315.8178	7468593.502	Ens. Maracanã
<b>6</b>	796706.2936	7467700.558	Estrito de Perynas
<b>7</b>	789755.807	7466952.415	Centro Lagunar
<b>8</b>	795958.151	7471103.4	São Pedro
<b>9</b>	785773.7574	7470258.723	Iguaba Grande
<b>10</b>	777395.6891	7468048.564	Foz Rio Salgado
<b>11</b>	773450.4836	7467523.315	Foz Rio Mataruna
<b>12</b>	768688.2238	7466729.605	Foz Rio das Moças
<b>13</b>	770859.1715	7463332.37	Ens. Praia Seca
<b>14</b>	778050.9944	7462825.564	Ens. do Ingá
<b>15</b>	783070.7903	7462753.163	Ens. do Rabelo
<b>16</b>	790600.4842	7461474.08	Ens. do Figueira

Fonte: Elaborada pelo autor.

As simulações tiveram duração entre um e três meses de acordo com o objetivo de cada cenário. O instante escolhido para representação dos mapas de distribuição da salinidade corresponde à estufa de maré vazante.

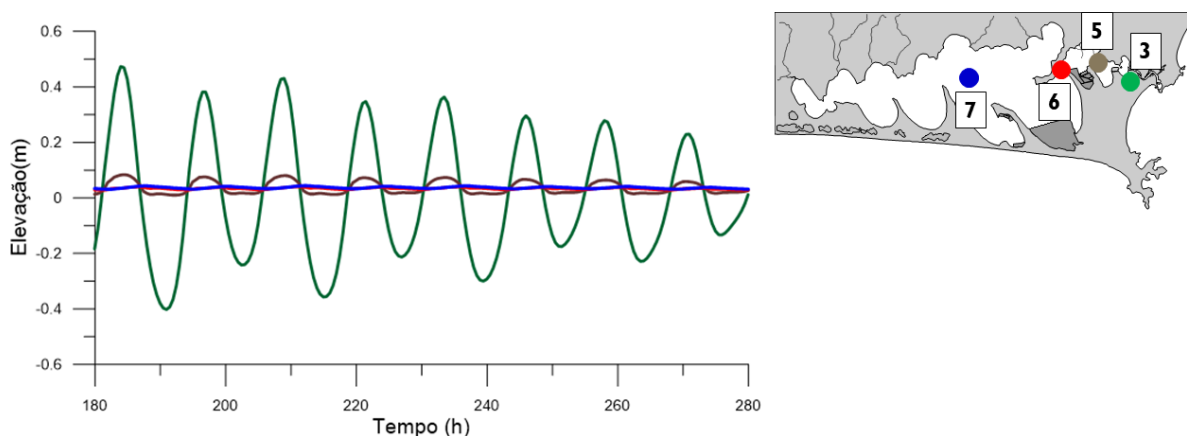
## 6.1 ANÁLISE DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

A seguir é apresentado o comportamento hidrodinâmico sob o efeito dos ventos e da maré em diversos compartimentos da Lagoa de Araruama.

### 6.1.2 Dinâmica de Circulação

Os resultados do modelo hidrodinâmico desenvolvido para esse estudo estão de acordo com trabalhos pretéritos realizados por Cunha (2003); Gava (2008); Gomes (2009), que também utilizaram o software SisBaHiA<sup>®</sup>. Vale ressaltar, novamente, que por não existirem medições efetivas de direção e velocidade de corrente, a caracterização da hidrodinâmica do sistema lagunar tem sido inferida através de modelagem computacional. Com base nesses estudos, e também de Kjerfve et al., (1996) possibilitou-se concluir que a Lagoa apresenta dois compartimentos hidrodinâmicos. Um dominado pela ação dos ventos e outro pela ação da Maré.

Como pode ser visualizado pela figura 26, a região entre o Canal de Itajuru e o Estreito de Perynas é a que mais sofre influência da maré. Analisando atentamente a figura, torna-se possível observar que o decaimento é bem intenso até o final do canal e depois, com uma amplitude bem próxima de zero continua decaindo progressivamente até o centro da Lagoa. Segundo Gomes (2009), este resultado está associado à configuração meandrante e estreita do canal, à medida que a onda vai se propagando rumo ao interior do estuário sua energia vai sendo dissipada. A partir do Estreito de Perynas a principal forçante hidrodinâmica passa a ser o vento.



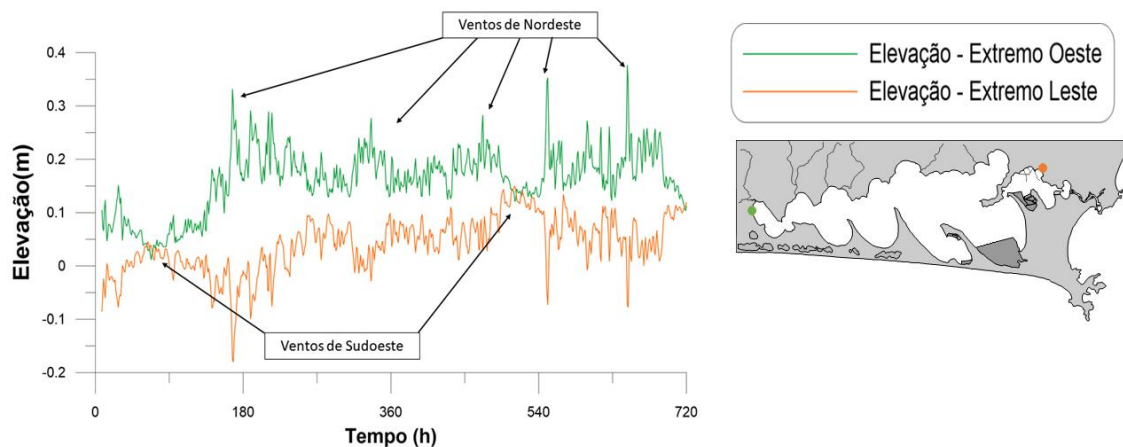
**Figura 26** - Elevação da superfície livre entre estações 3, 4, 6 e 7.

De acordo com trabalhos anteriores, os ventos frequentes e intensos que forçam a Lagoa de Araruama impulsionam a circulação das correntes principalmente na área interna do sistema (CUNHA, 2003; GAVA, 2008; GOMES, 2009; KJERFVE; OLIVEIRA, 1996). O regime local, caracterizado por ventos dominantes de nordeste durante todo ano, com ocorrência de ventos sudoeste que estão associados à passagem de frentes frias governam o

comportamento hidrodinâmico, salino e da qualidade de água da laguna (GOMES, 2009).

Os efeitos acima descritos podem ser visualizados na figura 27, que demonstra a elevação da superfície em dois pontos situados nas margens extremas da lagoa. No decorrer de um mês de verão, é possível visualizar a atuação de ventos de nordeste e sudoeste (menor frequência, decorrente de frente frias), promovendo um empilhamento de água no extremo oeste da Lagoa e o consequente abaixamento do nível no extremo leste. Observando atentamente a figura 27, quando a curva do extremo oeste apresenta picos positivos, correspondem a ventos soprando de leste (vide eixos indicativos no gráfico), desta forma, ocorre sobrelevação (ou empilhamento) na extremidade oeste e subelevação da extremidade leste.

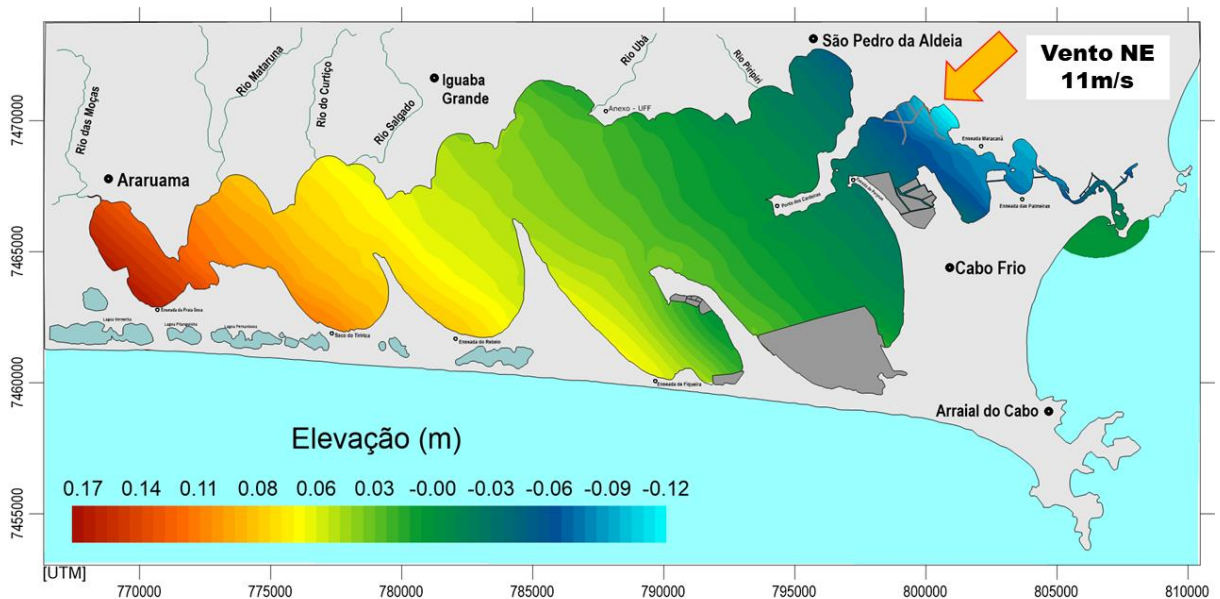
A Figura 28 mostra através do mapa de elevação da superfície livre sobre atuação de ventos de nordeste, a diferença de nível entre as extremidades, além de destacar a tendência das isolinhas em se comportarem de forma perpendicular à linha de atuação do vento.



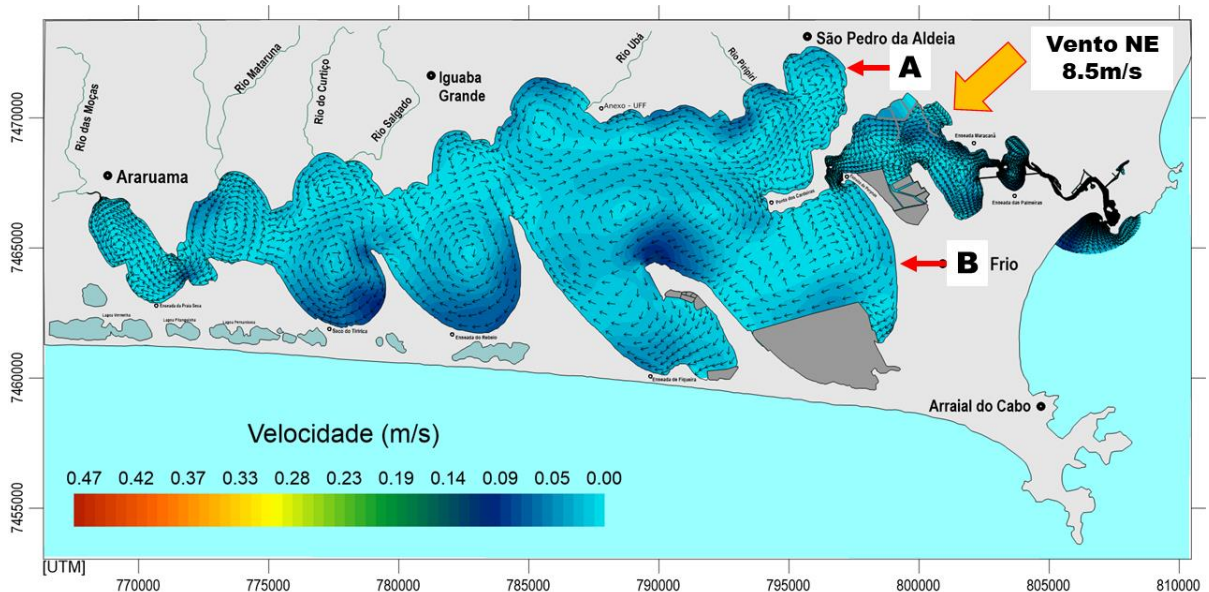
**Figura 27** - Elevação da superfície livre entre dois pontos de malha nas extremidades Leste e Oeste da Lagoa de Araruama durante o verão.

Em termos de corrente, os constantes ventos de nordeste, durante o verão, geram grandes vórtices no corpo principal da Lagoa, girando no sentido horário, junto à margem sul e, no sentido anti-horário, junto à margem norte (figura 29). De acordo com Gomes (2009), este resultado está associado a diferença de nível causada pelo vento que promove um gradiente de pressão barotrópico, que gera uma corrente de retorno pelo eixo central da Lagoa, onde a batimetria é mais profunda. Este padrão de surgimento dos vórtices foi sugerido primeiramente por (KJERFVE; OLIVEIRA, 1996).

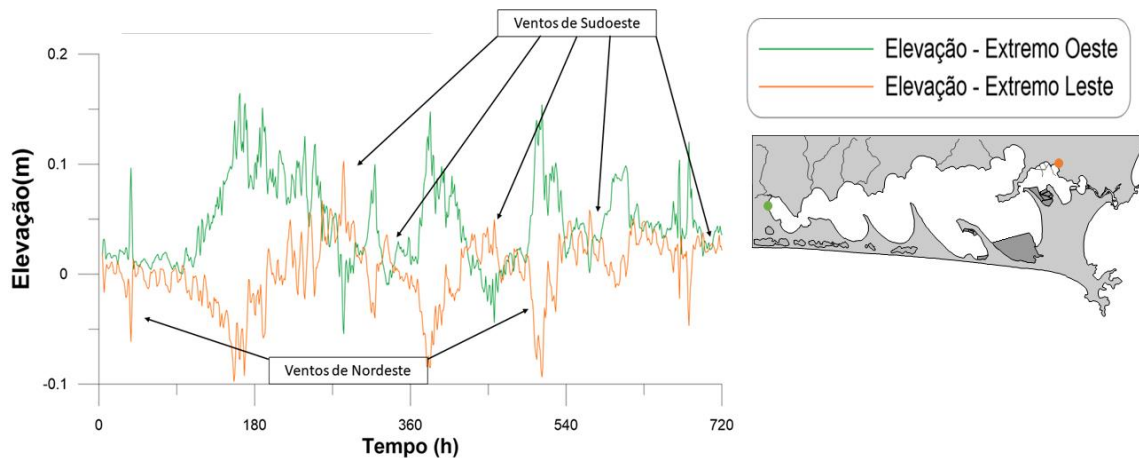
Com a mudança de estação para o inverno, há uma inversão no padrão de circulação e nível. Avaliando a figura 30, tendo como referência a curva do extremo leste, quando ocorre picos positivos, corresponde à atuação de ventos de sudoeste, que implica no aumento do nível na extremidade leste e consequente abaixamento da extremidade oeste (Figura 31). É importante observar que mesmo durante o inverno, os ventos de nordeste continuam atuantes na região, o que ocorre é a diminuição de sua frequência para uma atuação mais persistente de ventos do quadrante sudoeste devido à passagem de frentes frias.



**Figura 28** - Mapa de elevação da superfície livre sob atuação de ventos de nordeste.



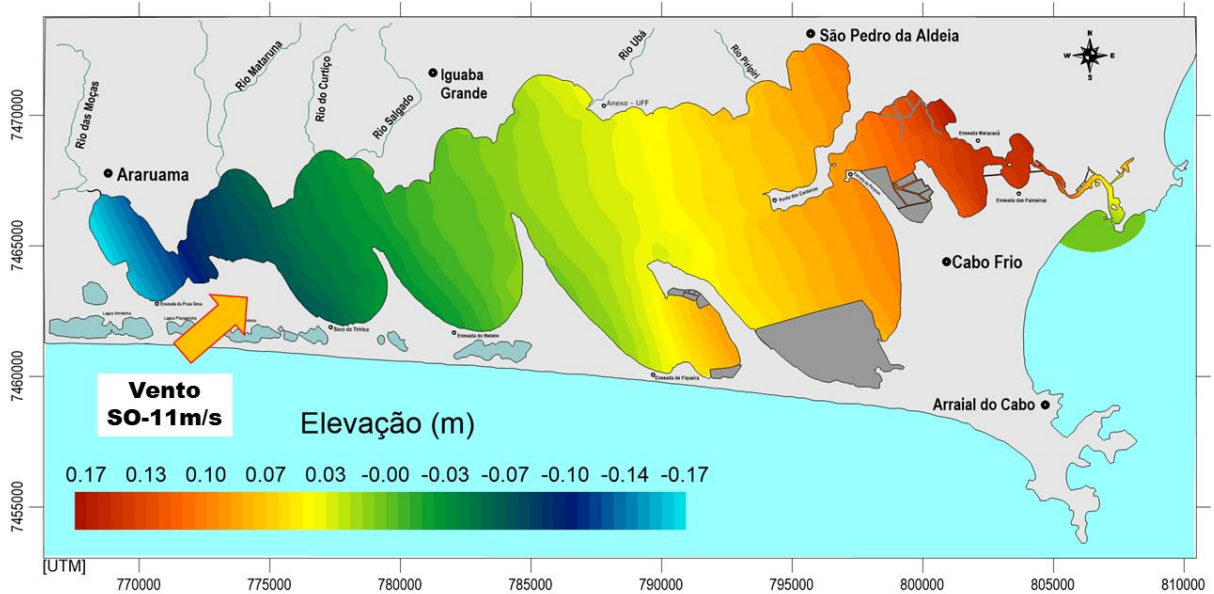
**Figura 29** - Mapa de circulação hidrodinâmica sobre atuação de ventos de nordeste. Seta A: Vórtices sentido anti-horário; Seta B: vórtice sentido horário.



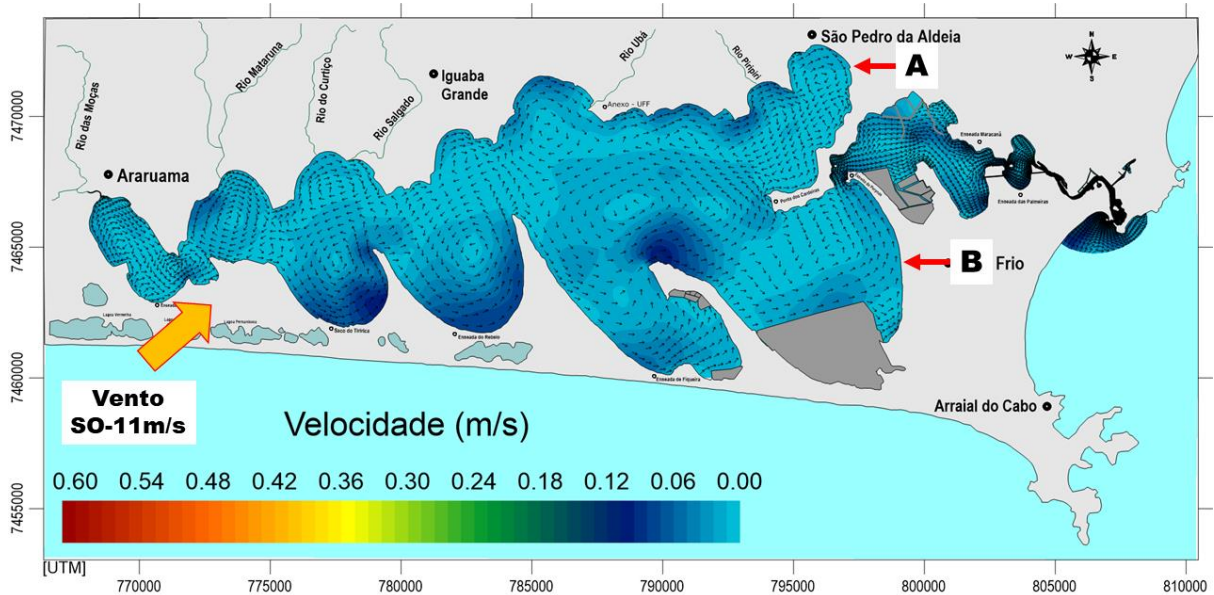
**Figura 30** - Elevação da superfície livre entre dois pontos de malha nas extremidades Leste e Oeste da Lagoa de Araruama durante o inverno.

Analisando a figura 33, observa-se a inversão no sentido dos vórtices. Desta vez girando no sentido anti-horário, junto à margem sul e no sentido horário, junto à margem norte. Como evidenciado por Cunha (2003); Gava (2008); Gomes (2009); Kjerfve; Oliveira (1996), a sazonalidade dos ventos confere o sentido das células de circulação e desnível entre as extremidades da lagoa à medida que os ventos mudam de nordeste para sul-oeste. A figura 34 mostra com detalhe a diferença de direção das correntes provocada pela mudança dos ventos entre o cenário de verão e inverno.

Em termos de magnitude, as sobrelevações e subelevações geradas pelo vento local, mostradas na Figura 27 e na Figura 30, giram em torno de 30 a 40 centímetros.



**Figura 31** - Mapa de elevação da superfície livre sob atuação de ventos de sudoeste.



**Figura 32** - Mapa de circulação hidrodinâmica sobre atuação de ventos de nordeste. Seta A: vórtice sentido horário; Seta B: vórtice sentido anti-horário.

Com o objetivo de ilustrar a existência de dois compartimentos, como sugerido pelos autores acima citados, apresenta-se a seguir os resultados de um modelo hidrodinâmico em cenário de calmaria, ou seja, sem ação dos ventos, apenas com a forçantes de maré, vazão fluvial, precipitação e evaporação. A Figura 35 apresenta o padrão de circulação sobre regime de calmaria, em situação de enchente e a figura 36 o detalhe da região do Canal de Itajuru. A Figura 37 apresenta o padrão de circulação sob regime de calmaria, em situação de vazante e a figura 38 detalha a região do canal de Itajuru.

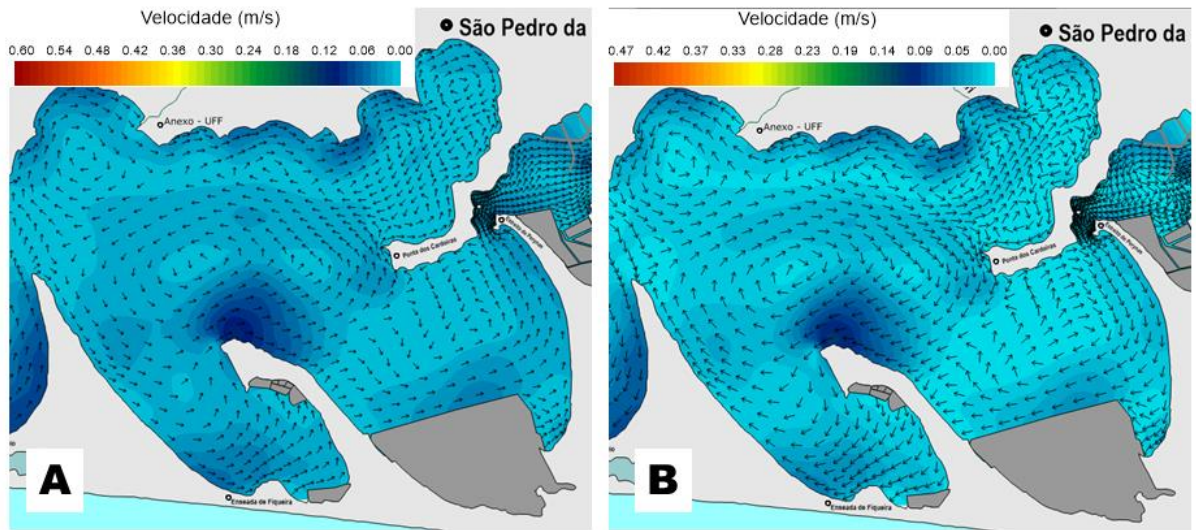


Figura 33 - Comparação entre os padrões hidrodinâmicos sob atuação de ventos de NE e de SW.

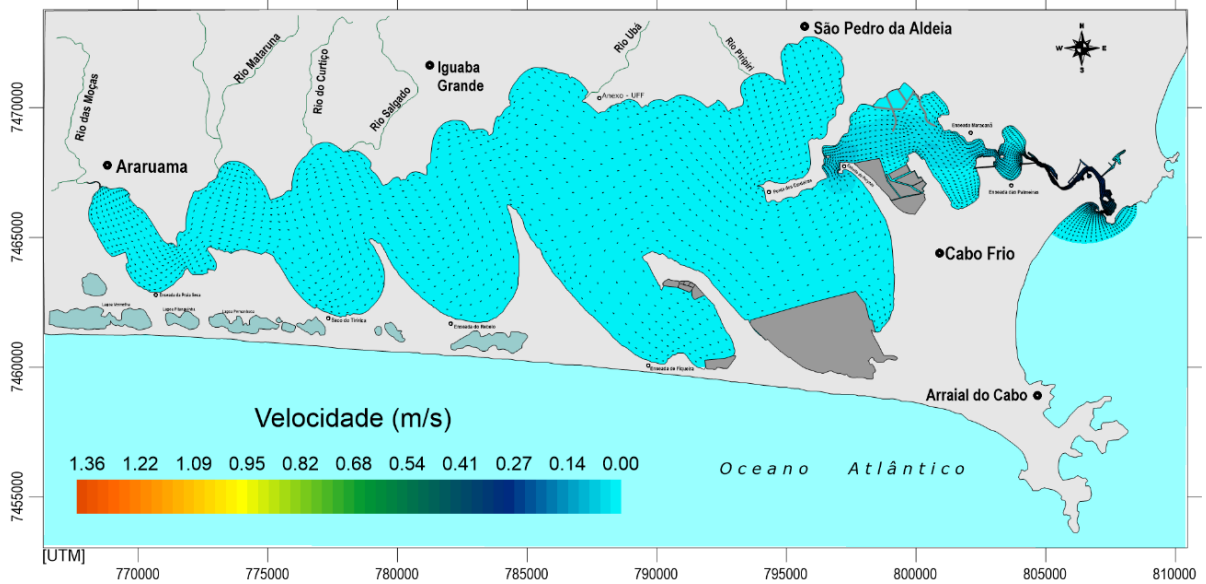
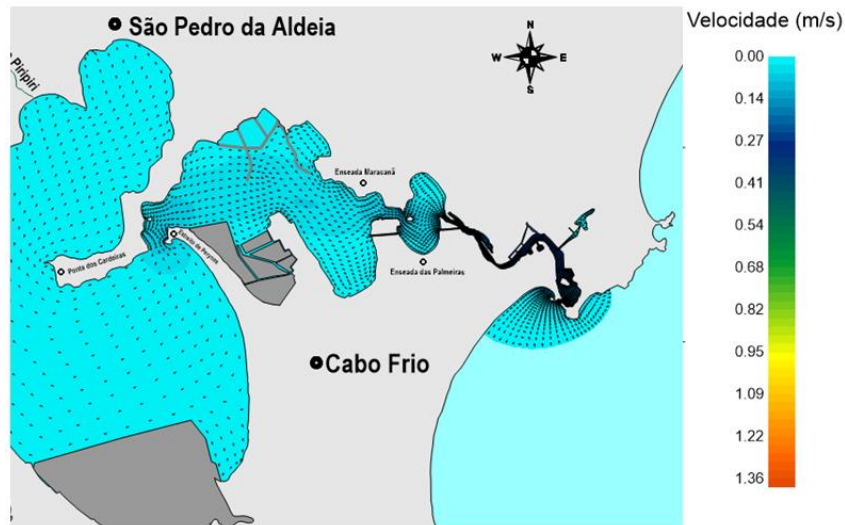
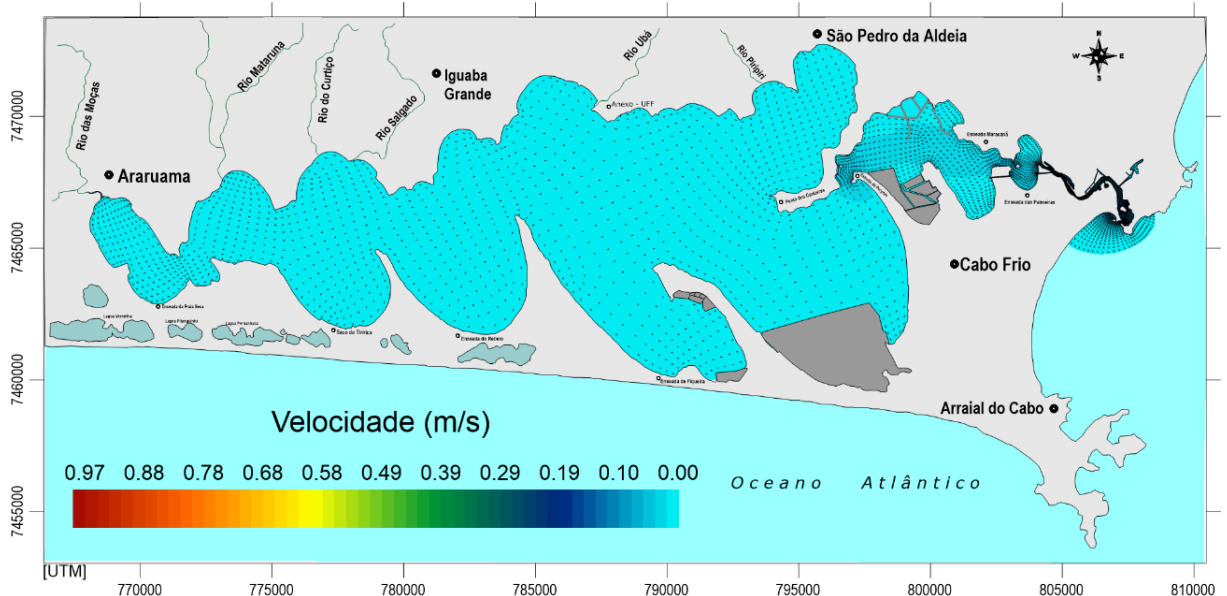


Figura 34 - Mapa de circulação hidrodinâmica em situação de calma, momento de enchente.

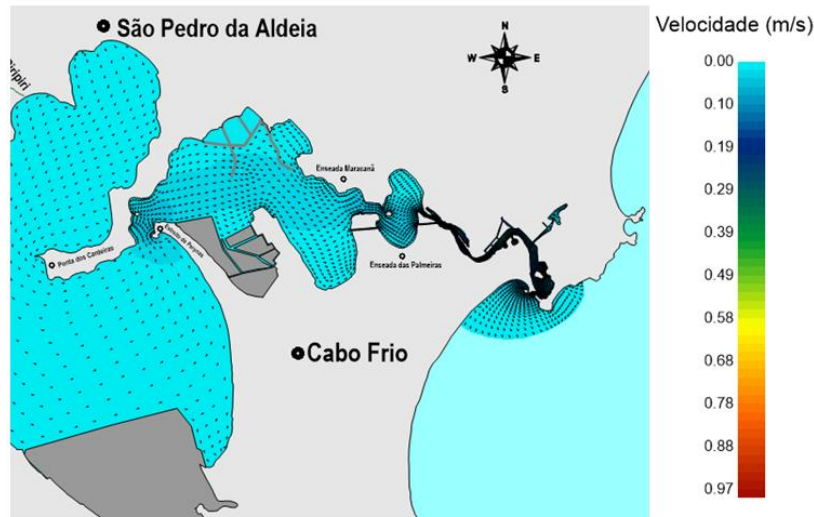


**Figura 35** - Detalhe da Corrente de Enchente no Canal Itajurú.

Analisado as figuras 34, 35, 36 e 37, torna-se possível perceber que as correntes geradas pela propagação da maré, enchente ou vazante no interior da lagoa é mínima, as correntes forçadas pela oscilação da maré têm uma intensidade maior no canal da Lagoa. Este resultado pode estar associado a configuração meandrante do canal Itajurú que faz com que o mesmo se comporte como um filtro de maré, cessando gradativamente a amplitude da maré de enchente que adentra pela embocadura até atingir o interior da lagoa.



**Figura 36** - Mapa de circulação hidrodinâmica em situação de calmaria, momento de vazante.



**Figura 37** - Detalhe da Corrente de Vazante no Canal Itajurú.

Estes resultados reafirmam, assim, a teoria de que a dinâmica de circulação da Lagoa apresenta dois compartimentos, um que a circulação hidrodinâmica é forçada pelo regime de ventos, na área compreendida entre o Estreito de Perynas e o extremo oeste, e outro que a circulação de suas correntes são governadas pela ação da maré, região que vai da embocadura do canal até o Estreito de Perynas.

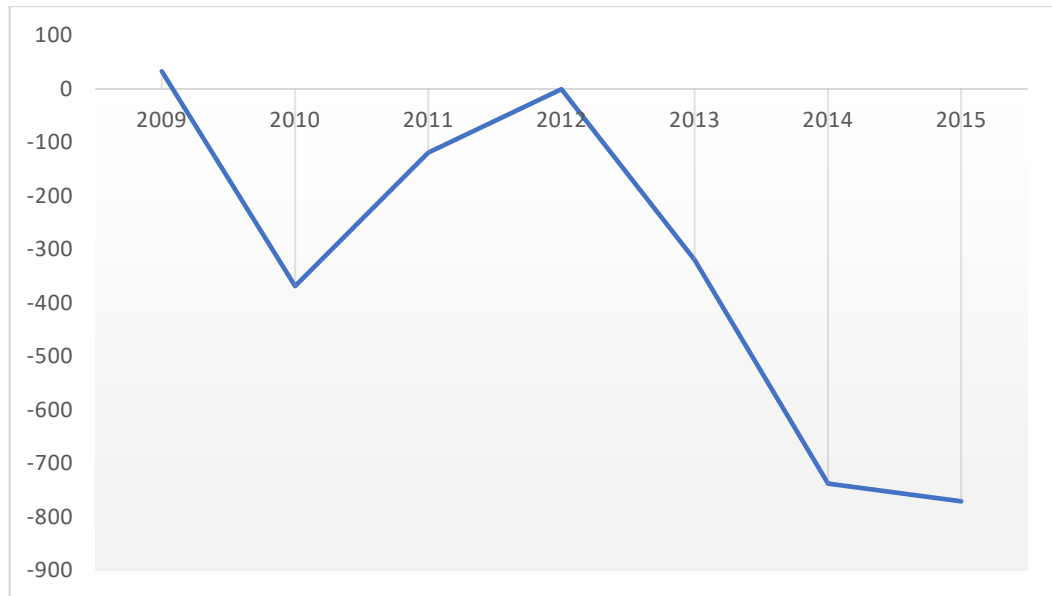
## 6.2 INFLUÊNCIA DO BALANÇO HÍDRICO SOBRE A SALINIDADE DA LAGOA DE ARARUAMA

Como proposto no objetivo desse trabalho, buscou-se caracterizar o padrão hipersalino do sistema lagunar em cenários antagônicos de balanço hídrico positivo e negativo. Apresenta-se agora o comportamento climático do período de 2009 e 2015, em seguida são interpretados os mapas da distribuição da salinidade por todo sistema de forma setorizada (porção oeste, central e leste), e o comportamento temporal da salinidade ao longo da simulação com o balanço hídrico, encerrando a sessão é apresentada uma comparação dos resultados obtidos com dados medidos e modelagens pretéritas.

### 6.2.1 Precipitação e Evaporação: 2009 a 2015

Segundo os estudos realizados por Barbière (1984) e Kjerfve et al. (1996) o balanço hídrico (precipitação - evaporação) na região da lagoa de Araruama é tipicamente negativo. Porém, ainda que eventualmente ocorram períodos com saldo de chuva acima da evaporação,

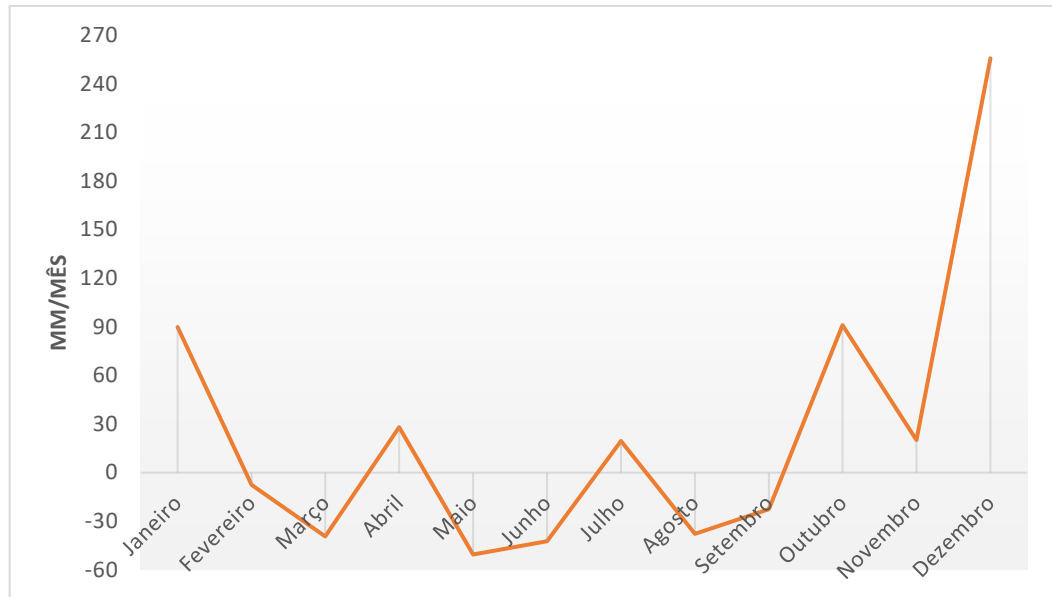
a região tende a encerrar o ano com déficit hídrico. Portanto, analisando o balanço precipitação - evaporação do período de estudo (Figura 38), é possível observar esse comportamento oscilante entre saldo positivo e negativo de 2009 a 2015. Contudo, dos 7 anos, cinco estiveram abaixo de zero, e apenas um com balanço positivo (2009) e outro neutro (2012).



**Figura 38** - Balanço Hídrico entre a pluviosidade e evaporação anual, estação meteorológica de Arraial do Cabo (INMET), de janeiro de 2009 a dezembro de 2015.

O ano de 2009, escolhido para representar o período úmido, a precipitação acumulada para Iguaba Grande registrou 1.211 mm/ano, Arraial do Cabo, 940 mm/ano e quanto à evaporação calculada para região de Arraial, o valor obtido atingiu 906 mm/ano. Comparando esses resultados com as médias anuais encontradas por Barbière e Coe-Neto, (1999), a precipitação em Iguaba Grande, superou em 22,6% a média anual de 940 mm/ano e por proximidade, Arraial do Cabo superou em 14% a pluviosidade média em Cabo Frio de 832 mm/ano. Esta comparação demonstra o quanto o ano de 2009 diverge do comportamento climático tido como típico para bacia hidrográfica da área de estudo.

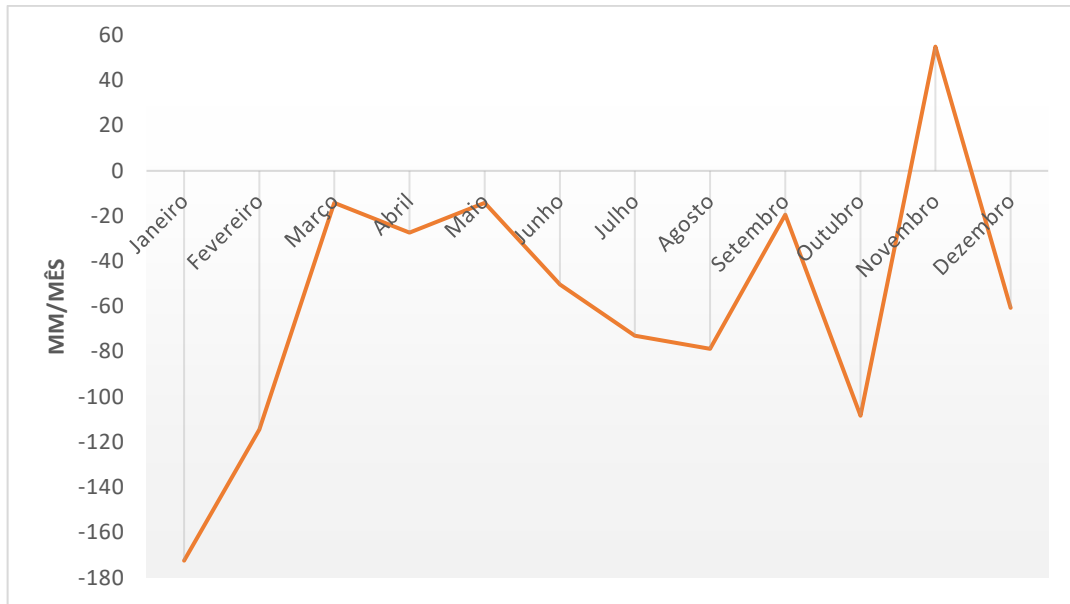
Avaliando isoladamente o balanço hídrico em 2009 (Figura 39), ao menos em seis meses, o saldo da precipitação mensal superou a evaporação. Dentre esses, tanto janeiro como julho, definidos como meses representativos de verão/inverno, tiveram superávit hídrico. No quantitativo total do ano em questão, o superávit de chuva é de 33mm/ano.



**Figura 39** - Balanço Hídrico entre a pluviosidade e a evaporação mensal, estação meteorológica de Arraial do Cabo (INMET), de janeiro a dezembro de 2009.

O ano de 2015, que representa o ano seco, em vez de superávits de chuva, em comparação com o ano de 2009, observam-se déficits. A precipitação acumulada na estação meteorológica de Iguaba Grande registrou 614 mm/ano, 521 mm/ano em Arraial do Cabo e quanto à evaporação calculada para região de Arraial, o valor obtido atingiu 1.292mm/ano. Contrapondo esses resultados com os valores tidos como habituais por Barbière e Coe-Neto, (1999), as precipitações registradas para Iguaba Grande e Arraial do Cabo estiveram abaixo 46 e 44%. Contudo, ainda que os montantes de chuvas estejam aquém do esperado, os valores de evaporação superam a pluviosidade do ano de 2015, conferindo-lhe a característica típica de balanço hídrico negativo.

Analisando separadamente o balanço hídrico mensal no ano de 2015 (Figura 40), é nítida a contradição com o comportamento apresentado em 2009. Em 2015, com exceção de novembro, todos os outros meses tiveram déficit hídrico. Dentre esses meses, tanto janeiro como julho, definidos como períodos representativos de verão/inverno, estiveram com seu balanço hídrico mensal negativo.

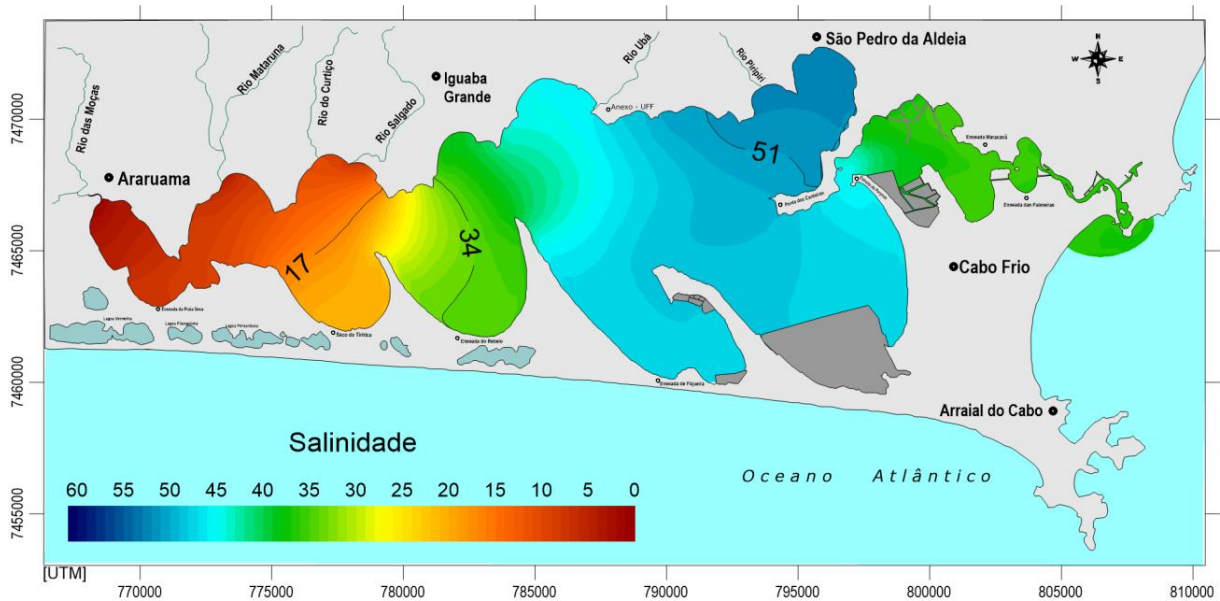


**Figura 40** - Balanço Hídrico entre a evaporação e pluviosidade mensal, estação meteorológica de Arraial do Cabo (INMET), de janeiro a dezembro de 2015.

### 6.2.2 Distribuição da Salinidade: 2009

Como discutido no item 5.2.1, o mês de janeiro do ano de 2009 obteve um balanço hídrico positivo, com saldo de chuva de 33 mm acima da evaporação (Figura 39). Desta forma, o aumento da pluviosidade somado à elevada vazão afluyente (rios e esgotos) característica para a estação de verão com a população flutuante, provocaram uma redução intensa da salinidade na porção oeste do sistema lagunar (Figura 41).

As estações, 10, 11 e 12 localizadas próximas a foz do rio das Moças, Mataruna e Salgado é marcaram salinidade variando de 5 a 10. De acordo com a modelagem de transporte de sal realizada por Gomes (2009), em condições típicas de verão, as diminutas concentrações de sal da região oeste não avançam além da Praia Seca. No cenário estudado, sobre a influência do aporte fluvial elevado, a salinidade permaneceu menor que 37 (concentração do mar) até a Ponta da Acaíra.

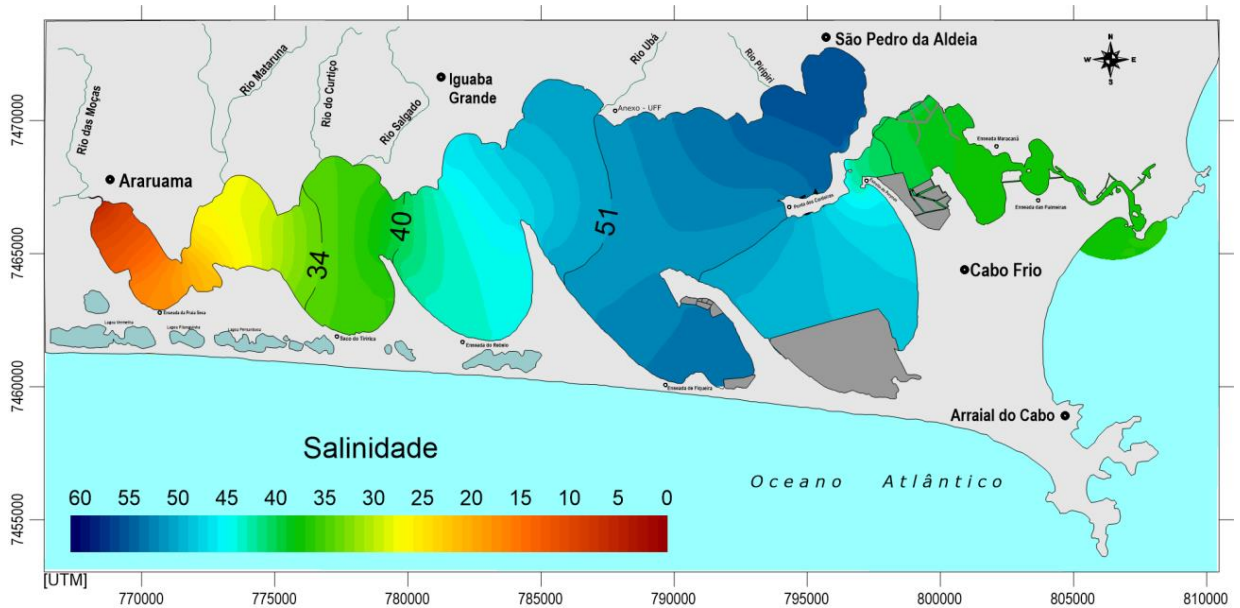


**Figura 41** - Mapa de distribuição de salinidade período de verão com balanço hídrico positivo, 2009. Momento de estofa vazante em maré de sizígia – Instante: 2426400(s), equivalente ao vigésimo sétimo dia de simulação.

As áreas da região central, durante toda simulação mantiveram os maiores valores de salinidade. A estação 7 no meio da lagoa, finalizou a modelagem com concentração de sal igual a 48. Este resultado pode estar associado ao volume de água que ajuda na manutenção da salinidade. Quanto à estação 16 na enseada da Figueira com salinidade equivalente a 47 e à estação 8 em São Pedro d'Aldeia com 52, este fato pode estar atrelado à pequena circulação hidrodinâmica que associada a uma batimetria muito rasa, intensifica a ação da evaporação. Este comportamento está de acordo com os resultados obtidos por Souza (1993), o qual sugere que o esporão da Ponta da Acaíra funcione como uma barreira à circulação hidrodinâmica, de forma que na região da Figueira e São Pedro predomine o efeito da evaporação, responsável pelas altas concentrações de sal.

Para a região leste, as estações 4,5 e 6 apresentaram constante oscilação da salinidade, resultado da influência do aporte de água do mar pelo Canal Itajuru. Tal comportamento está de acordo com os resultados encontrados por Gomes (2009); Kjerfve et al., (1996).

Quando em cenário de inverno, mesmo em condições de balanço hídrico positivo, é possível visualizar o aumento da concentração de sal em toda lagoa. Esta resposta é um comportamento sazonal característico da laguna, ou seja, menores salinidades no verão, e maiores no inverno (Figura 42).



**Figura 42** - Mapa de distribuição de salinidade período de inverno com balanço hídrico positivo, 2009. Momento de estufa vazante em maré de quadratura – Instante: 2498400(s), equivalente ao vigésimo oitavo dia de simulação.

Na região oeste torna-se perceptível o aumento da concentração de sal com o avanço da frente salina que parte do centro da laguna. Este resultado pode estar associado à redução da vazão afluente, bem como à diminuição da intensidade das chuvas. Comparando o período de verão e inverno é possível observar a influência da sazonalidade reconfigurando a distribuição horizontal de salinidade mesmo em um período úmido para área da bacia.

Na região central da laguna, e estação 7 obteve-se salinidade equivalente a 51. As estações 8 e 16 registraram a maior concentração de sal com valor correspondente a 56. Além disso, na porção leste, estação 6 também ocorreu elevação da salinidade, mas a constante oscilação é mantida como resultado da influência do aporte de água do mar pelo Canal Itajuru.

Este mesmo padrão sazonal de baixa salinidade durante um verão húmido e alta salinidade no decorrer de um inverno seco também pode ser observado nos estudos de Meng et al., (2016), na Laguna de Dapeng. Os autores verificaram quedas nos valores de salinidade da laguna em período de severas chuvas devido à diluição provocada pelo aumento da precipitação e vazão dos rios afluentes, que podem ter ocasionado florações algais por toda Laguna de Dapeng.

Eventos extremos de precipitação devem aumentar em um futuro próximo, com isso, os efeitos associados às chuvas também serão mais pronunciando (MILLY et al., 2002; PALMER; RALSANEN, 2002; POWER et al., 2013; TAN et al., 2015). É importante

ressaltar que a drenagem dos rios em eventos de intensas chuvas pode aumentar substancialmente as quantidades de nutrientes inorgânicos dissolvidos e matéria orgânica particulada e dissolvida em ecossistemas costeiros próximos incrementando a produção primária, além de diluir a salinidade (CHEN et al., 2006, 2009; CHILDERS et al., 2006; DAGG et al., 2004).

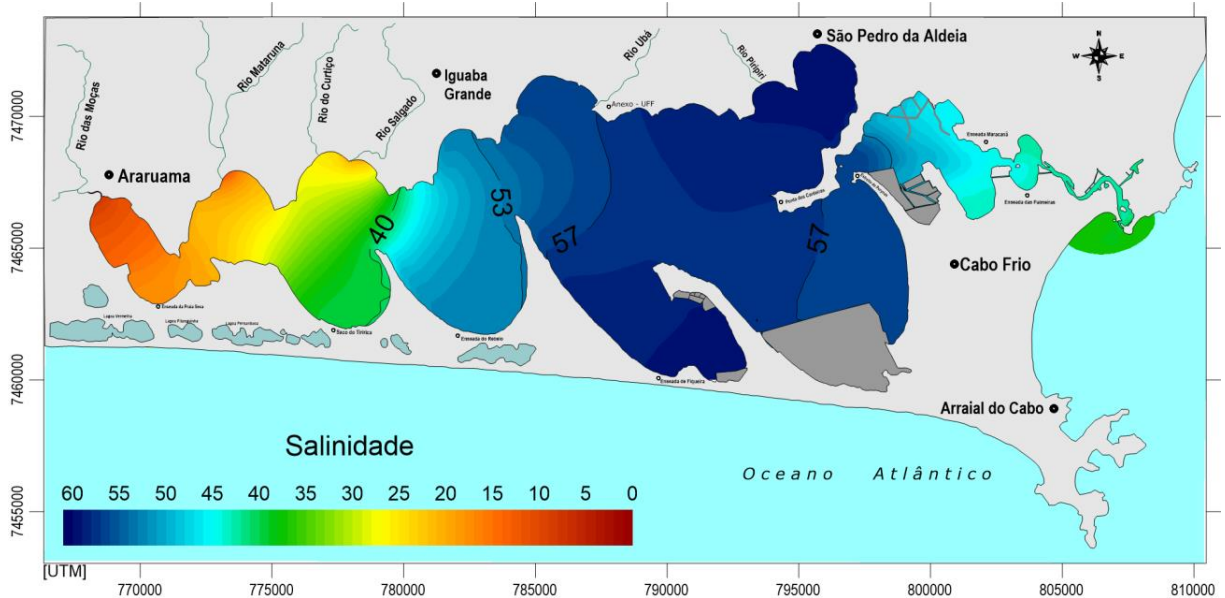
Tendo em vista o exposto acima, medidas de monitoramento e gestão bem como estudos dos efeitos de intensas chuvas em ecossistemas costeiros salinos devem ser desenvolvidos, pois, a maioria dos estudos relacionados ao efeito das chuvas severas estão restritos a ambientes de água doce, ou seja, poucos são estudos que se concentraram nos efeitos da intensidade da chuva em ecossistemas costeiros, especialmente em regiões tropicais (STAEHR et al., 2012).

### **6.2.3 Distribuição da Salinidade: 2015**

Em condições de balanço hídrico negativo, padrão climático regional, o mapa da distribuição de sal é oposto aos resultados encontrados em períodos de balanço hídrico positivo. Em cenário de verão (Figura 43), ainda é possível visualizar salinidades com valores menores que 37 em volta da foz dos rios, entretanto, a isolinha de valor 40 avançou no sentido oeste, finalizando a simulação na área da Ponta das Coroinha.

Avaliando a porção central, é possível observar o aumento da concentração de sal em um período seco, onde os valores de salinidade variaram de 57 no meio da lagoa (estação 7), até próximo de Perynas (estação 6) e 59 na região da Enseada do Figueira e São Pedro d'Aldeia (estação 16 e 8). Este padrão concorda com os resultados obtidos em simulação do transporte de sal, após dragagem do Canal Itajuru realizadas por (GOMES, 2009).

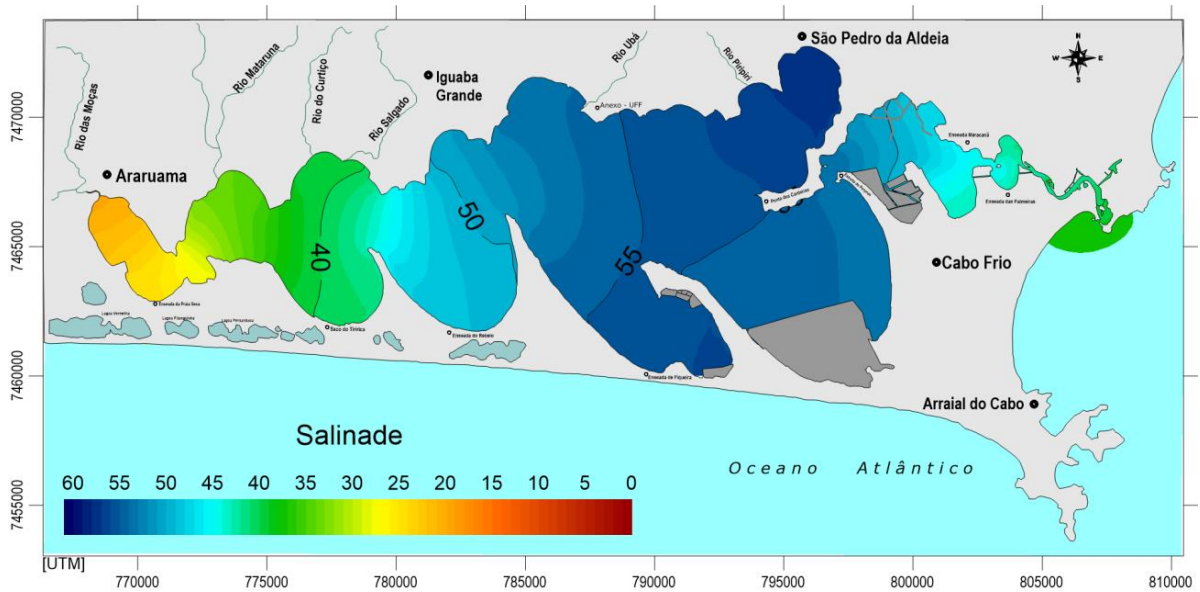
Outro ponto importante a ser observado, é a distribuição de sal na porção leste. A concentração de sal exportada em estufa de maré vazante também se elevou. Na enseada do Maracanã e das Palmeiras foram registrados valores de salinidade equivalentes a 45 e 43. Este resultado mostra que em momentos que a evaporação se sobrepõe à precipitação, a influência da salinidade do mar torna-se reduzida na região do canal Itajuru. Quando contrário, como pode ser visto no cenário de verão e inverno em 2009 (Figura 41 e 42) o valor da concentração 37 governa da entrada do canal até as imediações de Perynas (estação 6).



**Figura 43** - Mapa de distribuição de salinidade período de verão com balanço hídrico negativo, 2015. Momento de estofa vazante em maré de quadratura – Instante: 2584800(s), equivalente ao vigésimo nono dia de simulação.

Em cenário de inverno, o ganho na concentração de sal é visível apenas na porção oeste, com a diminuição no aporte fluvial, a isolinha de valor 40 avança um pouco além da Ponta das Coroinhas (Figura 44). Na porção central, ainda que após a simulação apresentasse concentração de sal superior ao período úmido, é perceptível um decaimento da salinidade em comparação com o verão do mesmo ano. Enquanto no verão de 2015 a estação 8 e 16 registraram salinidade equivalente a 59, durante o inverno as concentrações diminuíram para 55 e 57.

Este resultado pode estar relacionado a uma inversão do padrão sazonal de chuvas. Tipicamente, o verão é chuvoso e o inverno é seco (BARBIÉRE, 1984). No ano de 2015, durante o verão, ocorreu uma estação seca, enquanto que no inverno surgiram precipitações no decorrer do mês de estudo, o que pode ter provocado um decaimento da salinidade na porção central. Na porção leste, no entanto, o padrão de exportação de sal com concentração acima de 40 manteve-se.



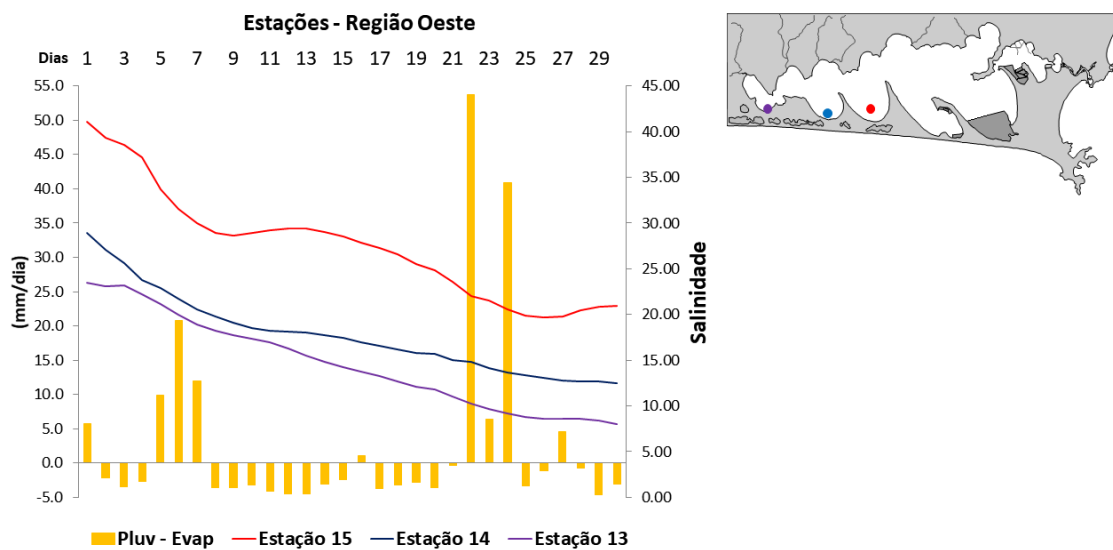
**Figura 44** - Mapa de distribuição de salinidade período de inverno com balanço hídrico negativo, 2015. Momento de estufa vazante em maré de quadratura – Instante: 2584800(s), equivalente ao vigésimo nono dia de simulação.

Mesmo que o ano de 2015 tenha invertido o padrão climático, tal fato não impediu a visualização da influência do balanço hídrico sobre a concentração de sal na lagoa de Araruama, pelo contrário, evidenciou que a menor alteração, neste caso uma elevação da pluviosidade, gerou um desequilíbrio para o sistema.

#### 6.2.4 Avaliação da Influência do Balanço Hídrico

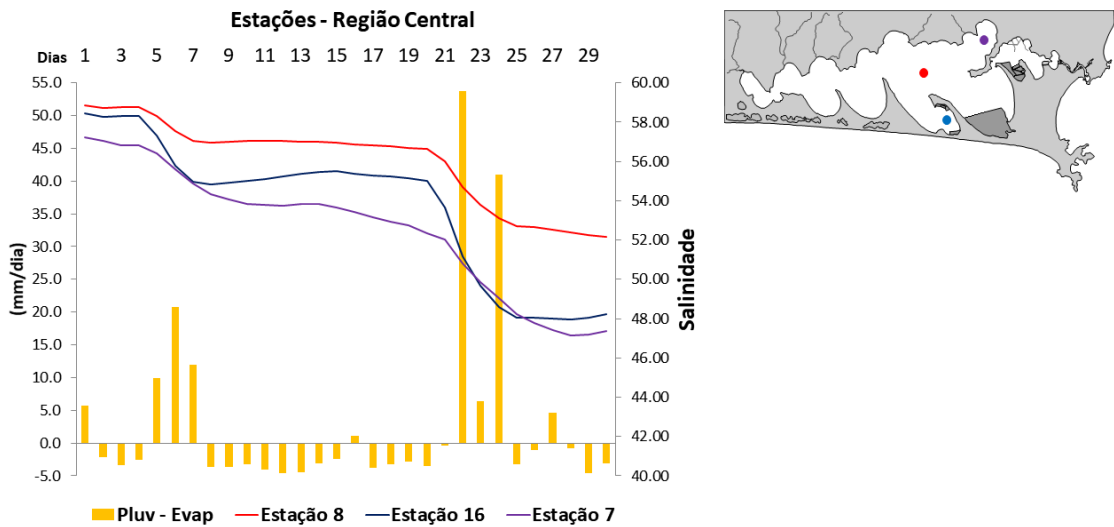
A avaliação das séries temporais de salinidade com a variação do balanço precipitação-evaporação, do verão de 2009 e 2015, demonstram que em determinadas regiões do sistema lagunar, como a porção central, o balanço hídrico influencia a variação da salinidade mais fortemente que nos outros setores.

Em cenário de verão, simulado em condições de superávit hídrico é possível observar pelo registro das estações na porção oeste, principalmente, 13 e 14 (Praia Seca e Enseada do Ingá) um declínio contínuo da concentração de sal, sem que houvesse uma recuperação durante a ausência de chuvas, como pode ser notado para a estação 15 (Enseada do Rabelo) (Figura 45). Esta análise permite observar a potencial interferência do aporte de água doce na salinidade da Lagoa de Araruama, corroborando os resultados apresentados por (KJERFVE et al., 1996; SOUZA, 1997) que apontam para o aumento da vazão afluyente como uma das principais causas de alterações na salinidade e na qualidade da água.



**Figura 45** - Variação da concentração de sal nas estações virtuais da região oeste 13, 14 e 15, durante um mês de simulação, em verão de 2009.

A análise das estações 8, 7 e 16 na porção central sugere que o comportamento da salinidade está sob uma forte influência da variação climática (Figura 46). Em momentos de saldo positivo de chuva as estações apresentam abaixamento nos valores de salinidade, entretanto, suas concentrações são mantidas a partir do momento em que a evaporação aumenta.

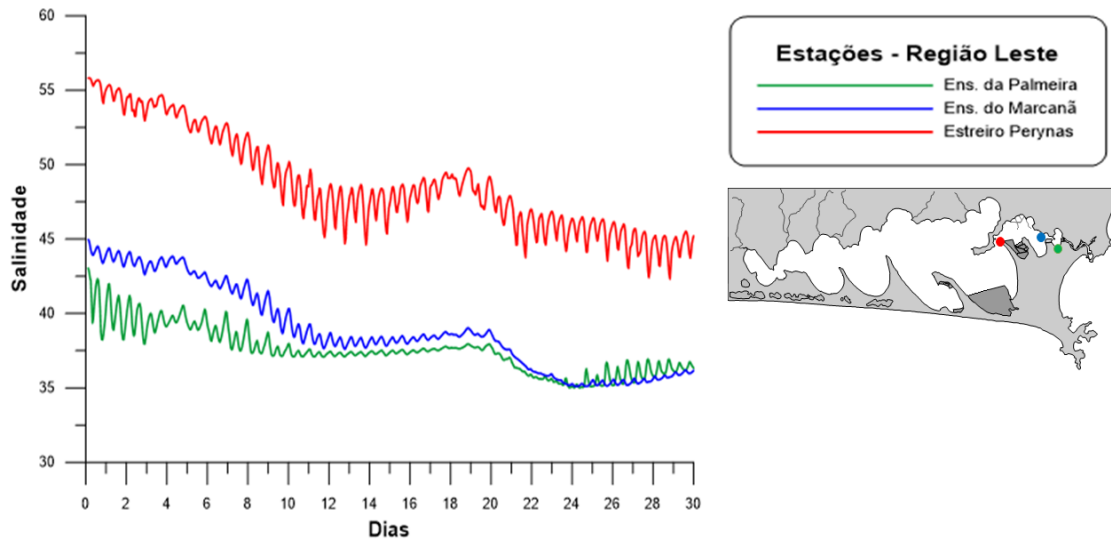


**Figura 46** - Variação da concentração de sal nas estações 7, 8 e 16, virtuais da região central durante um mês de simulação, em verão de 2009.

Outra observação pertinente é que a curva das estações 8 e 16 respondem simultaneamente às mudanças meteorológicas. A baixa profundidade das áreas onde estão localizadas as estações favorece perda (precipitação) e ganho (período seco) de salinidade facilmente. A curva da estação 7, no entanto, tem um decaimento e um aumento gradual. A batimetria tem novamente relevância, pois as porções com maiores profundidades levam um tempo maior para alterar a salinidade em função do volume.

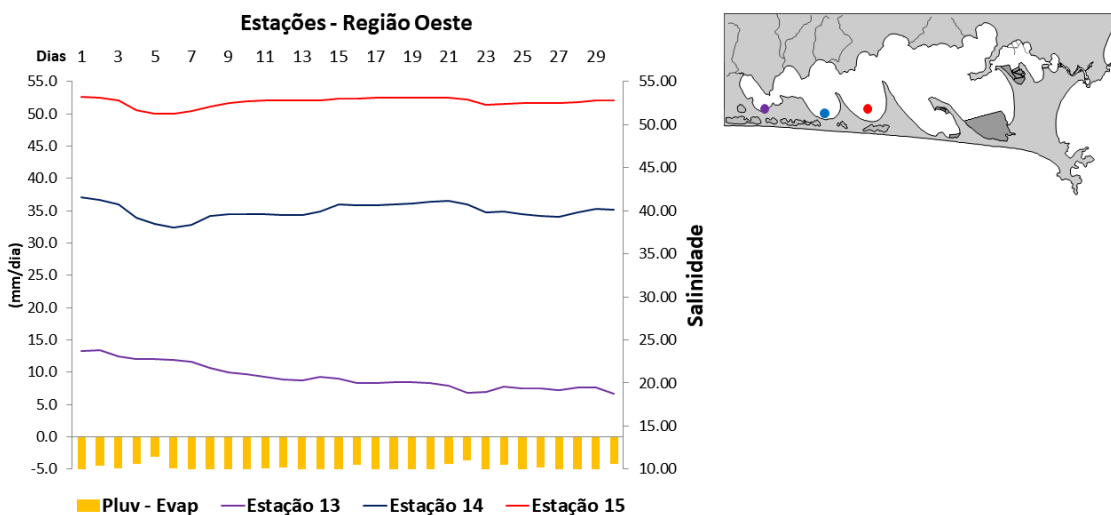
Quanto à região leste, os gráficos até então apresentados representam a média diária da salinidade não permitindo demonstrar o caráter transitório da salinidade no Canal de Itajuru proposta em trabalhos pretéritos (GOMES, 2009; KJERFVE et al., 1996; SOUZA, 1997). Para visualizar este comportamento é necessário observar na figura 47 que a curva das estações 3, 4 e 5 tem um comportamento senoidal, assim como a curva de maré. Logo, a salinidade no canal é resultado mistura das massas de água que são liberadas do interior da lagoa em momento de maré vazante e as massas de água que adentram o canal em momento de maré enchente com salinidade 37.

Não obstante, quando a pluviosidade provoca diluição na concentração de sal no interior da lagoa, permite que concentração de sal advinda do mar provoque uma homogeneização que pode ser vista através da curva da estação 5 e 6 com concentração equivalente a 37 ao final da simulação.



**Figura 47** - Variação da concentração de sal nas estações virtuais 3, 4 e 5 da região leste, durante um mês de simulação, em verão de 2009.

Em cenário de verão, simulado em condições de déficit hídrico é possível observar pelo registro das estações 14 e 15 nas enseadas do Ingá e do Rabelo, a manutenção da salinidade durante todo tempo de simulação (Figura 48).

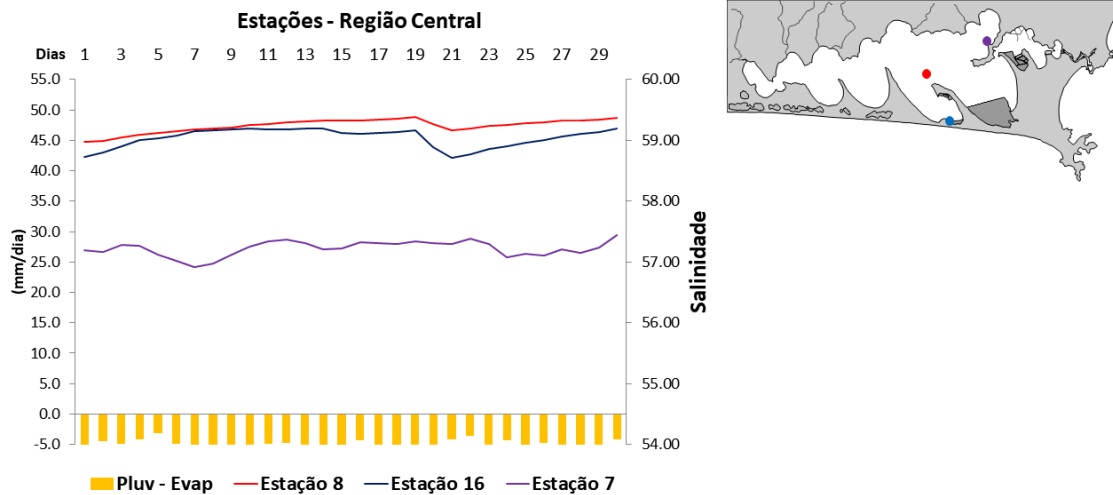


**Figura 48** - Variação da concentração de sal nas estações virtuais da 13, 14 e 15 na região oeste, durante um mês de simulação, em verão de 2015.

Contudo, a curva da estação 13 em Praia Seca demonstra decaimento da salinidade. A vazão do Rio das Moças representa a maior fatia de aporte fluvial entre os principais afluentes. Portanto, mesmo em condições climáticas padrão, sempre serão encontrados no extremo oeste da lagoa, os menores valores de salinidade. Reafirmando, assim, o potencial prejuízo da descarga de água doce para diminuição da salinidade da Lagoa.

Segundo Souza (1997), a salinidade tem grande importância para o equilíbrio bioquímico da Lagoa de Araruama, favorecendo o aumento da produtividade primária devido à diminuição da retenção de fósforo nas regiões de maior gradiente salino, exercendo, desta maneira, uma influência direta na manutenção da qualidade da água. Ainda de acordo com o autor, o decréscimo acentuado da salinidade na Lagoa pode resultar na aceleração do processo de eutrofização.

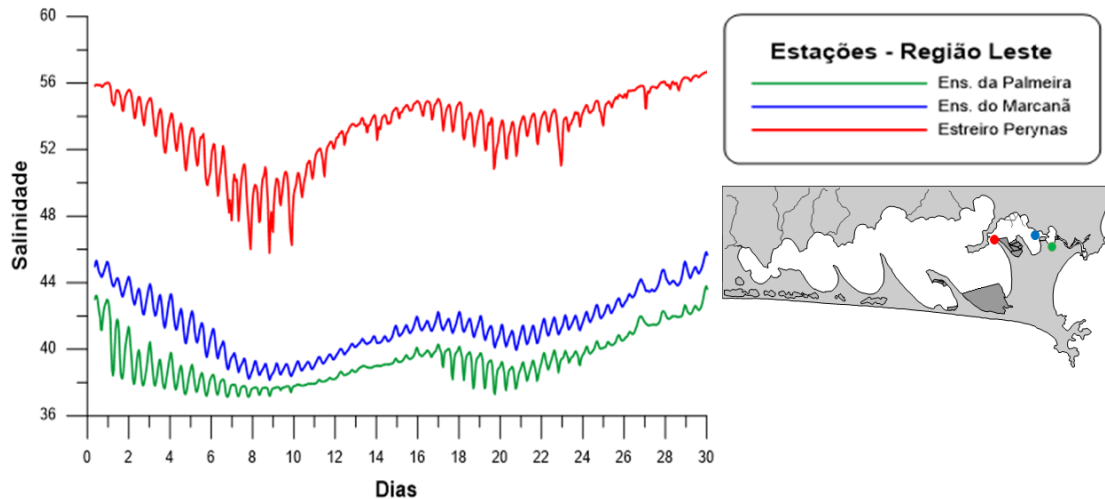
Para a porção central, houve manutenção e magnificação da salinidade durante toda simulação (Figura 49). As estações 7 e 8 em São Pedro da Aldeia e a enseada da Figueira mantiveram concentração de sal acima de 58. A salinidade no meio da laguna permaneceu com valor equivalente em torno de 57 durante todo o desenvolvimento do cenário.



**Figura 49** - Variação da concentração de sal nas estações virtuais da região central, durante um mês de simulação, em verão de 2015.

Quanto à região leste, ao contrário do que foi evidenciado em período úmido, o balanço hídrico negativo favorece o aumento da salinidade no Canal Itajuru, uma vez que, a concentração de sal exportada da laguna encontra-se muito elevada (Figura 50).

É possível validar essa afirmação com a curva da estação de Perynas com salinidade variando entre 47 e 57. Claramente a entrada de água do mar continua influenciando a distribuição de sal no canal, vide o comportamento sinótico das curvas e que as estações de Palmeiras e Maracanã permanecerem com a salinidade inferior a Perynas. Durante quase a metade da simulação, é perceptível um decréscimo da salinidade associado ao aporte de sal, advindo em período de maré de sizígia e quadratura, contudo, com a manutenção do déficit hídrico durante o mês de estudo, a salinidade no canal tende a aumentar.



**Figura 50** - Variação da concentração de sal nas estações virtuais 3, 4 e 5 da região Leste, durante um mês de simulação, em verão de 2015.

### 6.2.5 Comparação com Dados de Campo e Software

Neste item os resultados do verão de 2009 e verão/inverno de 2015, são comparados a dados medidos em campo disponíveis na literatura (dissertações, teses e relatórios) além de resultados de outros modelos aplicados ao estudo da salinidade. As informações coletadas para comparação seguiram o critério do período de coleta, preferencialmente pós dragagem, e condições climáticas próximas às que foram aplicadas ao modelo.

Desta forma, para esta análise foram selecionados os dados da publicação de Mello (2007), que realizou medições mensais de salinidade em um verão com chuvas acima da evaporação entre os meses de dezembro de 2005 e janeiro de 2006. Os valores obtidos por Mello (2007), não representam um ciclo anual e as coletas foram realizadas alternadamente entre a margem e o meio da lagoa durando o verão. Além desses, utilizou-se também os dados de salinidade do trabalho de Silva (2014) sobre condições semiáridas. Os dados da autora referem-se a uma única coleta realizada em agosto do ano de 2014. Os valores de salinidade utilizados para calibração podem ser visualizados na tabela 9 que agrupa os dados disponíveis nos dois estudos após a dragagem do canal Itajuru.

Ao comparar os dados medidos por Mello (2007), e os resultados obtidos através da modelagem do verão húmido de 2009, percebe-se que o modelo reproduziu satisfatoriamente a distribuição de salinidade na Lagoa de Araruama em condição de superávit de chuva (Figura 51). Ainda que os valores da porção central estejam divergentes, associados provavelmente ao volume de chuva, ou ponto de coleta, os resultados para a região oeste e leste estão próximos.

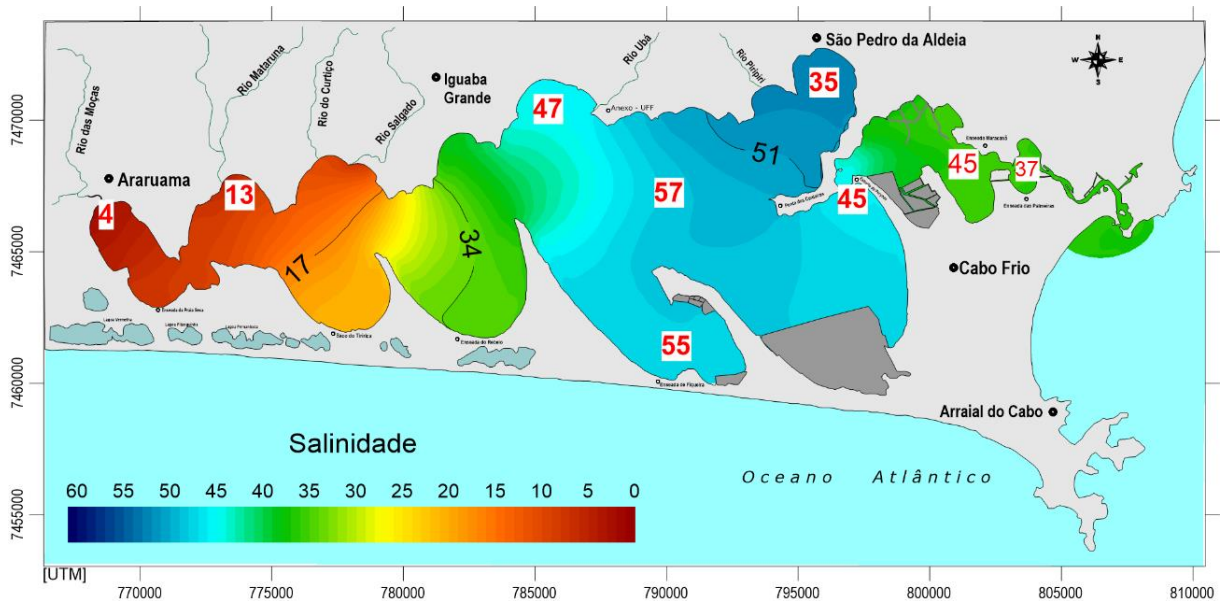
Quando comparado aos dados medidos por Silva (2014) e os resultados do inverno seco, também é perceptível que o modelo reproduziu adequadamente a distribuição horizontal da salinidade em condições climáticas padrão (figura 52). Mesmo não havendo dados medidos nos pontos amostrais do Rio das Moças e São Pedro da Aldeia, nas demais localidades os resultados encontrados pelo autor, principalmente para região leste, apresentam uma forte semelhança.

**Tabela 9 - Dados de salinidade medidos por (MELLO, 2007) em dezembro de 2005 e janeiro de 2006, pelo REMADS (2014) e os resultados relativos ao estudo de (GOMES, 2009) e o desta pesquisa.**

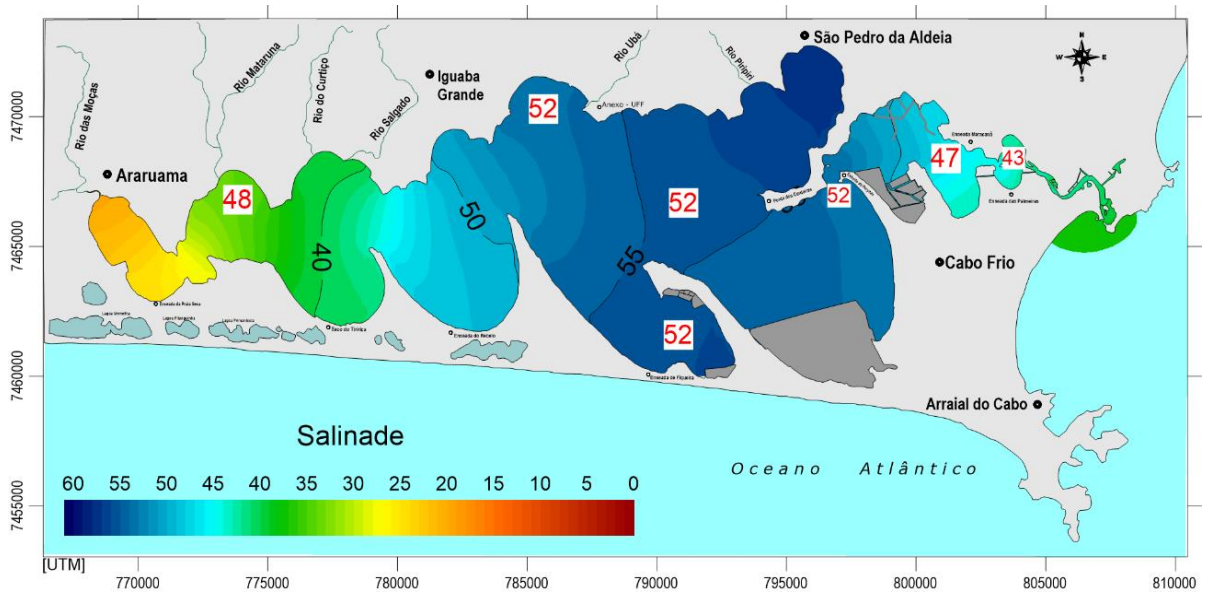
	Mello (2007)	Silva (2014)	Carvalho (2018)	
	Verão 2005/2006	Inverno 2014	Verão húmido	Inverno Seco
Pontos de Medição	Salinidade			
<b>Foz do Rio das Moças</b>	4	-	2	20
<b>Foz do Rio Mataruna</b>	13	48	8	35
<b>Iguaba Grande</b>	47	52	38	53
<b>Centro Lagunar</b>	57	52	48	55
<b>São Pedro da Aldeia</b>	35	-	52	57
<b>Enseada do Figueira</b>	55	52	47	56
<b>Estreito Perynas</b>	45	52	44	53
<b>Enseada Maracanã</b>	45	47	37	45
<b>Enseada da Palmeira</b>	37	43	37	42

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante salientar que os dados medidos representam a salinidade encontrada em um instante determinado, no que concerne a condições climáticas e hidrológicas, tais condições, como observado na discussão das seções anteriores, exercerem bastante influência na salinidade da Lagoa. A concentração de sal varia bastante conforme observado na tabela 11, principalmente em função das flutuações no aporte de água doce (rios e esgotos) e nas taxas de evaporação e precipitação.



**Figura 51** - Distribuição de salinidade obtida através do modelo, em cenário de verão e valores medidos por Mello, (2007), no verão de dez05/jan06 (em vermelho).



**Figura 52** - Distribuição de salinidade obtida através do modelo, em cenário de verão e valores medidos por Silva (2014), no inverno de agos/14 (em vermelho).

### 6.3 DRAGAGEM DO CANAL ITAJURU

Com proposto no objetivo desse estudo, buscou-se averiguar o fluxo de entrada do mar capaz de promover mudanças na distribuição horizontal da salinidade na Lagoa de Araruama através de sucessivas dragagens no Canal Itajuru. Para lograr tal meta, inicialmente dragou-se virtualmente o canal a 2,5 m, depois a 3,0 m e por fim a 4,0 m de profundidade e avaliaram-se os mapas da distribuição da salinidade por todo sistema. Em seguida realizou-se a análise do

comportamento horizontal da salinidade ao longo das simulações sob condições climáticas semiáridas, caracterizadas pelo ano de 2015, as tabelas e gráficos de vazão registrado pelas estações virtuais foram avaliadas, e por fim comparou-se os diferentes cenários criados.

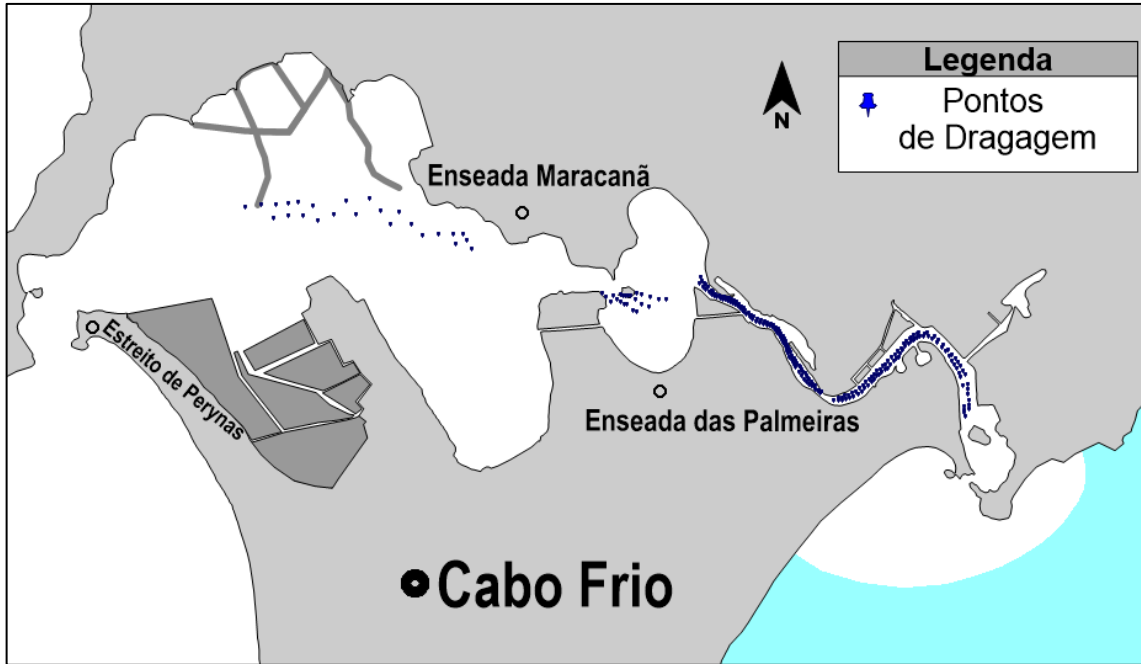
### **6.3.1 Método da Dragagem**

Para que o Canal Itajuru pudesse ser virtualmente dragado para as simulações, os nós da malha de elementos finitos tiveram sua batimetria alterada da seguinte forma: dentro de um canal com aproximadamente 60 metros de largura que se inicia do Estreito de Perynas até a embocadura do canal, todos os nós da malha com profundidade inferior a 2,5 metros deveriam ser aprofundados inicialmente para 2,5m, ou seja, todos os nós de malha sinalizados foram alterados (Figura 53).

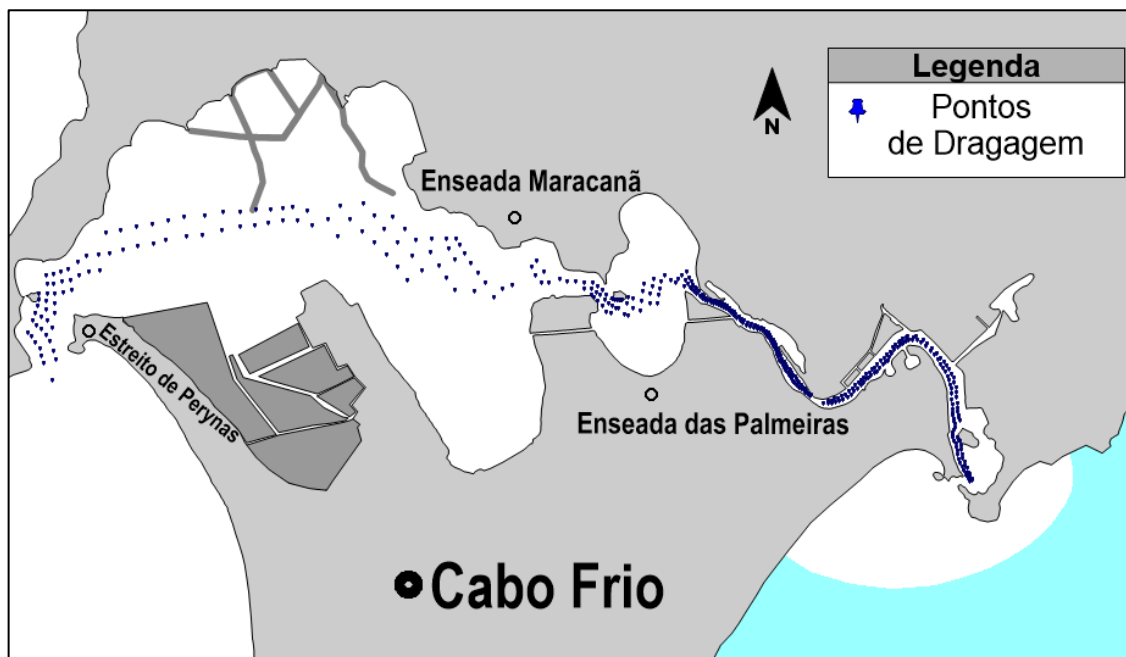
Desta maneira, seria criado um “caminho” favorável para as trocas de massa de água entre o mar e a lagoa, através da diminuição dos bloqueios hidráulicos associados a cotas batimétricas. O mesmo critério foi aplicado para atingir as profundidades designadas de 3,0 m e 4,0 m.

Após a realização da primeira dragagem, realizou-se a segunda alteração com 3,0 metros de profundidade, como pode ser visualizado na figura 54, o número de pontos dragados aumenta em comparação com a primeira intervenção, pois as cotas com batimetria inferior a 2,5 m dentro do canal projetado estavam entre a orla de Cabo Frio até a Ilha do Japonês.

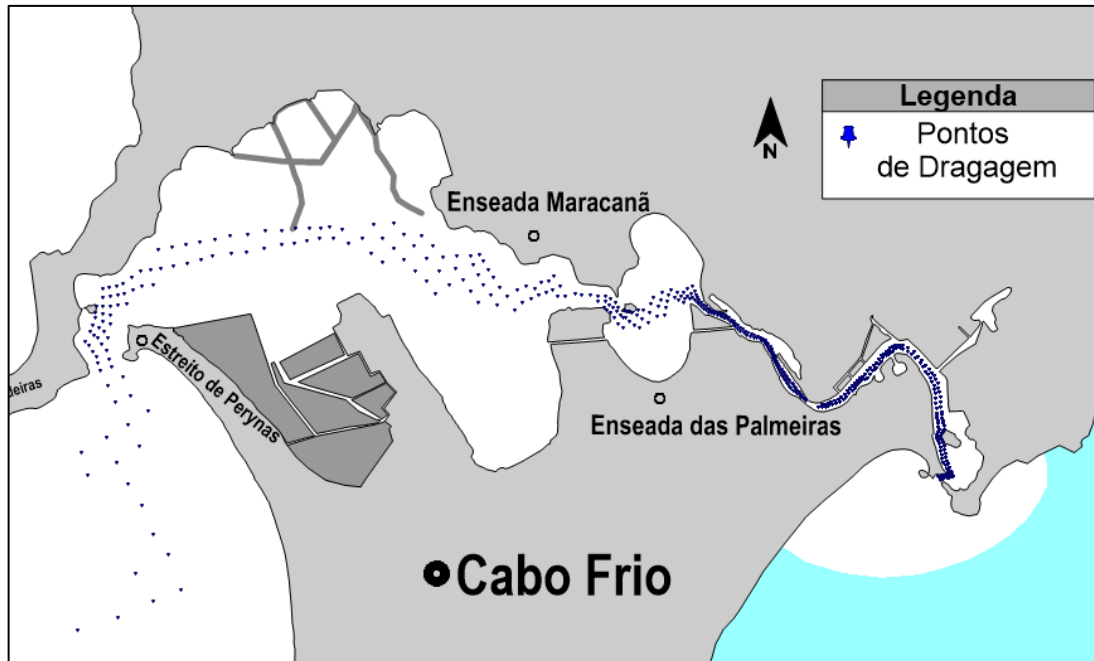
Por fim, realizou-se a última alteração na batimetria do canal com 4,0 metros de aprofundamento (Figura 55), o número de pontos dragados aumentou em comparação às últimas intervenções, pois as cotas batimétricas na região do Estreito de Perynas estavam discrepantes com a batimetria do interior da lagoa, o que gerava uma espécie de barreira que poderia prejudicar o fluxo de saída, portanto, a dragagem avançou para além de Perynas, afim de homogeneizar a batimetria do canal projetado.



**Figura 53** - Mapa do Canal Itajuru com os pontos de todos os nós com a batimetria alterada para 2,5m.



**Figura 54** - Mapa do Canal Itajuru com os pontos de todos os nós com a batimetria alterada para 3,0m.

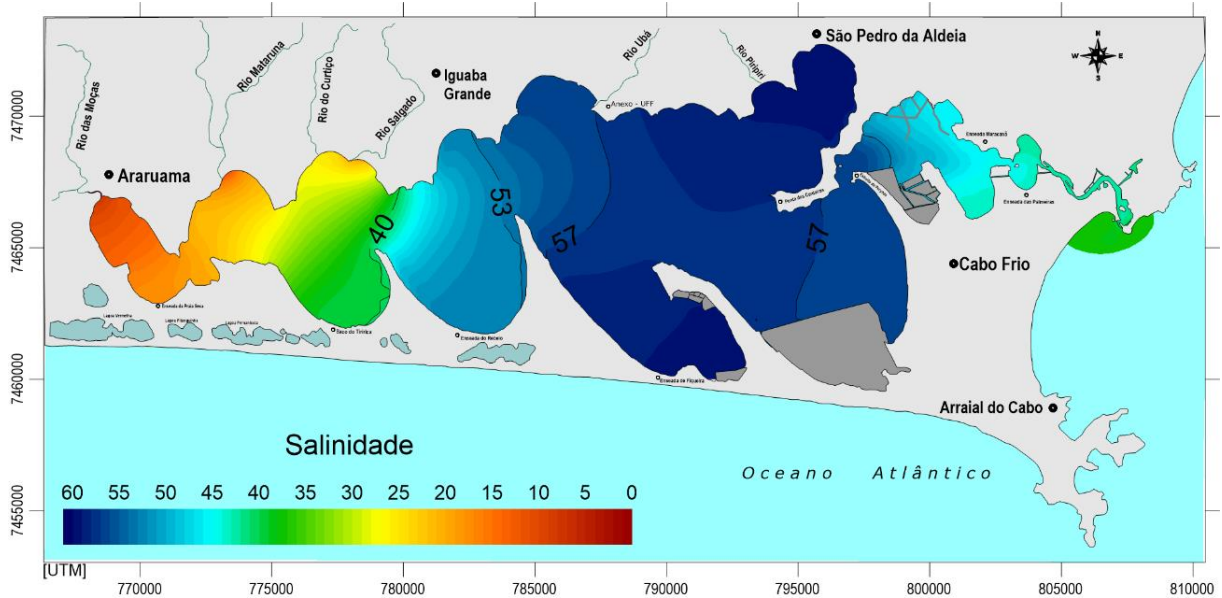


**Figura 55** - Mapa do Canal Itajuru com os pontos de todos os nós com a batimetria alterada para 4,0m.

### 6.3.2 – Distribuição Horizontal da Salinidade: 2015

Os mapas de distribuição de salinidade apresentados a seguir se referem ao mesmo período, verão de 2015, pois optou-se simular o cenário no momento de maior vulnerabilidade da laguna, uma vez que, durante o verão o número da população flutuante aumenta consequentemente cresce o *input* das descargas afluentes sendo também a estação onde ocorrem as chuvas (GOMES, 2009; KJERFVE et al., 1996; SOUZA, 1993, 1997).

Para iniciar as análises precisa-se rever os resultados do tópico 5.2.3 que retrata a condição salina do sistema lagunar com a batimetria do Canal Itajuru inalterada (Figura 56). Resumidamente, a região oeste detém os menores valores de salinidade, fruto do excessivo aporte de água doce (rios e esgoto), a porção central concentra os maiores valores de salinidade entre 57 e 59, e quanto à porção leste a concentração de sal elevada nas estações 4, 5 e 6 localizadas em Estreito de Perynas, Enseada do Maracanã e das Palmeiras – salinidade equivalente a 57, 45 e 43 respectivamente – são resultado da massa de sal liberada do interior lagoa em períodos de maré vazante.

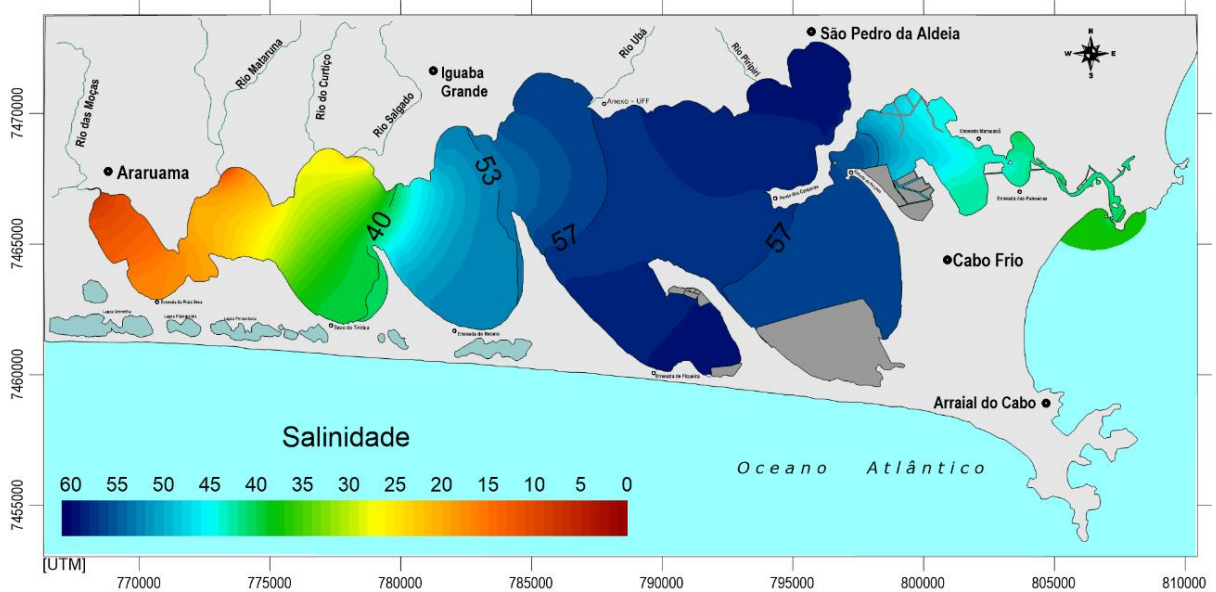


**Figura 56** - Mapa de distribuição horizontal de salinidade em período de verão com Canal Itajuru inalterado.

Quando simulado o cenário com o Canal Itajuru dragado em determinados pontos para 2,5 m, tornam-se perceptíveis algumas alterações na distribuição horizontal da salinidade principalmente na porção leste (próprio canal). Ao analisar a figura 57, visualiza-se que as áreas do Estreito de Perynas, Enseada do Maracanã e das Palmeiras apresentam um padrão de isolinhas azul claro e verde escuro, mostrando um abaixamento da salinidade no setor leste. Com a alteração da profundidade do canal, estas estações registraram salinidade final de 56, 44 e 42.

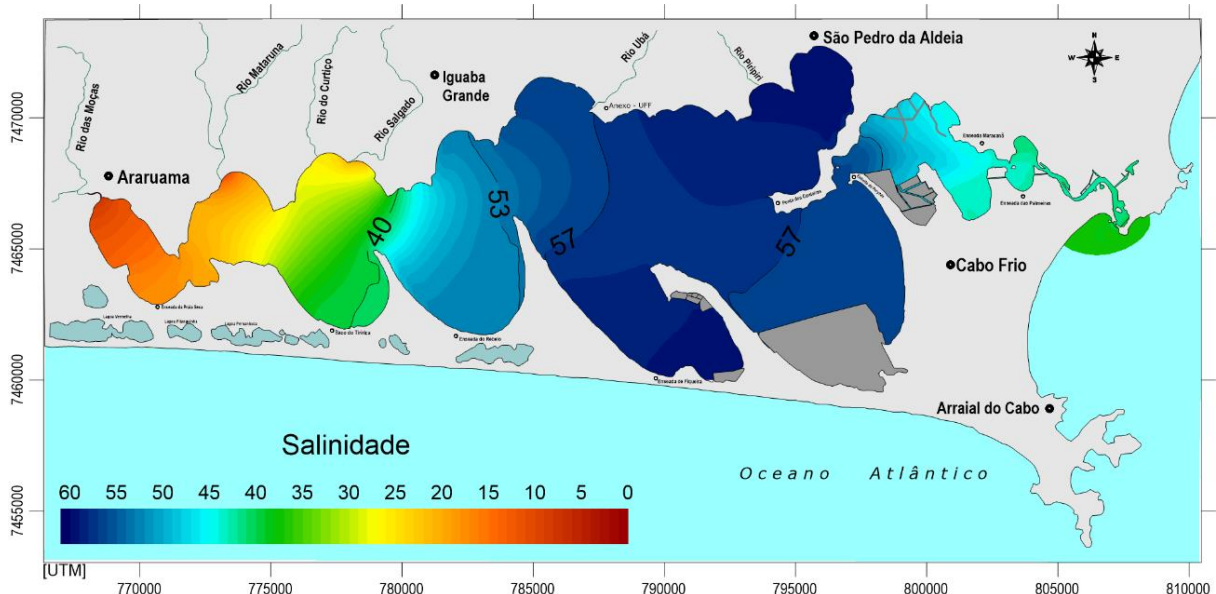
Esta resposta pode estar associada à nova batimetria que permitiu, entre o processo natural de troca de massas, uma influência maior do aporte de água do mar com salinidade equivalente a 37 provocasse uma diluição da salinidade no cenário projetado.

Ao avaliar a resposta da distribuição da salinidade com o canal dragado para 3,0 metros o quadro de perda é revertido para um de ganho de salinidade, contudo as alterações estão restritas apenas à porção leste da lagoa de Araruama. As estações 4, 5 e 6 registraram salinidade final igual a 56, 45 e 43 (Figura 58).



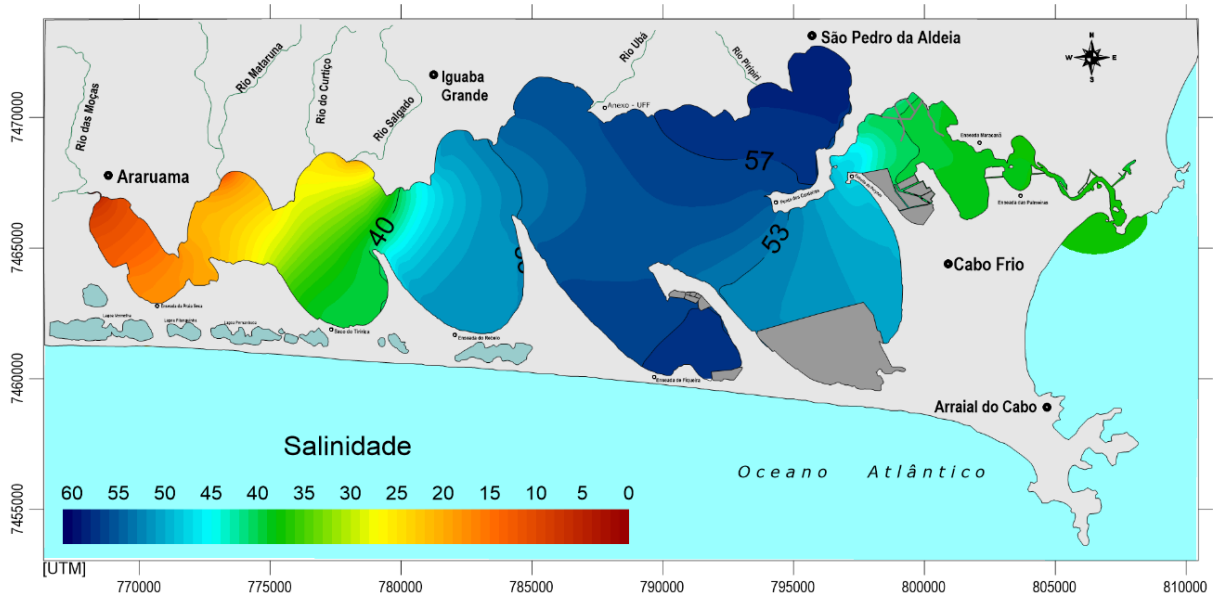
**Figura 57** - Mapa de distribuição horizontal de salinidade em período de verão com Canal Itajuru dragado (-2.5m).

A partir das duas primeiras dragagens não foi possível interferir na distribuição horizontal da salinidade no interior da lagoa (setor central e oeste). Até aqui, a concentração de sal apresentou um ganho ao invés de perda, mesmo após uma dragagem (-3,0m) mais invasiva, quando levamos em consideração o número de nós de malha alterados para atender ao cenário projetado. Ou seja, o canal possivelmente pode ser dragado a 3 metros, sem que ocorra queda na concentração de sal, no interior da lagoa.



**Figura 58** - Mapa de distribuição horizontal de salinidade em período de verão com Canal Itajuru dragado (-3.0m).

Quando simulado o cenário com o Canal Itajuru dragado para 4,0 metros de acordo com o ilustrado na figura 56 no item 5.3.1. é possível observar uma mudança considerável no padrão de distribuição horizontal da salinidade em condições climáticas típicas. Com esta última dragagem, não só a porção leste como o setor central tem sua concentração de sal diminuídas (figura 59).



**Figura 59** - Mapa de distribuição horizontal de salinidade em período de verão com Canal Itajuru dragado (-4.0m).

As estações 7, 8 e 16 localizadas na porção central da lagoa registraram um decréscimo da concentração de uma unidade de sal, enquanto que nos outros cenários a salinidade se manteve praticamente inalterada com valor equivalente a 59 para São Pedro e a Enseada da Figueira e entre 58 e 57 para o meio da lagoa. Após o aprofundamento do canal para 4,0m as estações 7, 8 e 16 registraram 58 para São Pedro, 56 para o meio da lagoa e para a Enseada do Figueira salinidade equivalente a 57.

Quanto à região leste, com a nova batimetria, a influência do mar é novamente retomada. É possível observar a mesma homogeneização que ocorreu em período de chuva intensa. As estações 4, 5 e 6 localizadas na região leste registraram concentração de sal equivalente 38 para Enseada das Palmeiras, 39 para Enseada do Maracanã e a 48 para o Estreito de Perynas.

Os resultados obtidos com a última dragagem podem estar associados à harmonização proposta na metodologia de dragagem em que o aprofundamento do canal se inicia de dentro da Lagoa até a embocadura. Com a batimetria original, onde o canal detém cotas

batimétricas mais rasas e a lagoa cotas mais fundas, o fluxo de saída é retido, ou seja, a água do mar adentra o sistema lagunar passando por um declive na região de Perynas, mas ao sair, encontra uma barreira. Portanto, uma vez que este bloqueio deixa de existir, é possível conectar de forma eficaz a laguna com o mar, permitindo uma maior influência do mesmo sobre a distribuição horizontal de salinidade.

Outra observação pertinente quanto aos resultados encontrados diz respeito às condições climáticas do cenário simulado. De acordo com (SMITH, 1994), forçantes meteorológicas de uma forma ou de outra podem gerar significativos desequilíbrios, redistribuir a salinidade dentro da lagoa e produzir variações no padrão salino do sistema. Portanto, pode-se inferir que mesmo com um decréscimo da concentração da salinidade na porção central da Laguna, uma dessalinização maior não ocorreu em detrimento das condições semiáridas típicas, e durante o mês modelado (janeiro de 2015) não ocorreram chuvas, ou seja, a evaporação corroborou com a manutenção da salinidade.

Desta forma, se o cenário estivesse sob um balanço hídrico positivo e com a dragagem do Canal Itajuru em 4,0 metros, a Lagoa de Araruama teria sua distribuição horizontal de salinidade com valores muito inferiores ao encontrado apenas com a resposta a precipitação intensa (verão de 2009). Logo, o sistema poderia enfrentar adversidades ambientais como eutrofização, mortandade de peixes, e mudanças na produção primária, visto que as alterações severas de salinidade refletem na qualidade da água da Laguna de Araruama (SOUZA, 1997).

### **6.3.3 Balanço de Massas de Água**

Com o intuito de verificar a sugestão proposta no item anterior acerca do resultado da distribuição de salinidade após o aprofundamento do canal em 4 metros, onde a lagoa não estaria conseguindo reter a mesma quantidade de massa de água necessária para manutenção do padrão de salinidade, reuniu-se na tabela 10 o volume e vazões máximas e mínimas de entrada e saída em uma seção. Essa seção se inicia na embocadura do Canal Itajuru e termina no Estreito de Perynas (Figura X). Os valores presentes na tabela 10 são referentes aos cenários onde a batimetria não foi alterada e após as mudanças batimétricas sugeridas na metodologia.

Os valores de vazão em uma seção são exportados do software SisBaHiA com base nos resultados de uma série de nós elencados de maneira que se forme a seção de cálculo da vazão. Para obtenção destes valores é necessário selecionar o tipo de saída em termos de

tempo, como segundos, horas ou dia, e definir o ângulo da seção com o eixo x. Para este estudo definiu-se o tempo de saída dos dados em hora e o ângulo da seção com o eixo x igual a zero, dentro de um intervalo de tempo que se iniciou no momento inicial do modelo – 0,8 horas – até o final da modelagem – 719 horas (aproximadamente 1 mês).



Figura 60 - Seção de cálculo determinada para obtenção das vazões de entrada e saída do sistema.

Antes de avaliar os resultados, é importante ressaltar que os valores disponíveis na tabela 10 tem uma faixa de erro considerável, tendo em vista que a modelagem digital do terreno é passível de erros quanto ao contorno de terra e batimetria de fundo. As informações batimétricas ao serem inseridas e processadas no modelo computacional sempre serão uma aproximação da realidade, principalmente quando levamos em conta que a malha de elementos finitos muitas vezes não comporta o número de pontos com cotas batimétricas levantadas em campo. Normalmente, após a inserção dos valores batimétricos, o modelador precisa corrigir manualmente os valores com base nos dados reais.

Analisando os resultados da tabela 10 após sucessivas dragagens do canal é possível perceber um aumento progressivo das variáveis expostas. Tanto as vazões máximas e médias, bem como o volume total de água que entrou e saiu pela sessão em 718,12 horas foi gradual. Este resultado pode ser corroborado por Gomes (2009), a autora constatou que após a dragagem (-2.5m) do Canal de Itajuru em 2005 ocorreu um importante aumento no fluxo de enchente e vazante, intensificando a troca de massas d'água. Além disso, ao comparar a

distribuição da salinidade antes e após a dragagem, a autora averiguou que esta intervenção representou efeitos significativos na dinâmica da Laguna. Ademais, levando em consideração a coluna de balanço entre os volumes totais que entraram e saíram pela seção (tabela 10), torna-se possível perceber em quais cenários o volume residual se encontra, ou na lagoa, ou no zona costeira adjacente.

Tabela 10 – Vazão Máxima, Mínima e o volume total de água de entrada e saída durante 718,12 horas.

Cenários	Entrada			Saída			Balanço
	$Q_{\text{máx}}$ ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ )	$Q_{\text{med}}$ ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ )	*Vet ( $\text{m}^3$ )	$Q_{\text{máx}}$ ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ )	$Q_{\text{med}}$ ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ )	**Vst ( $\text{m}^3$ )	Vet – Vst ( $\text{m}^3$ )
2015	1.775,3	962,9	376.449,9	2.488,5	1.242,3	397.535,3	-21.085,4
(-2.5m)	4.284,3	2.233,2	866.500,7	5.135,0	2.613,5	849.389,1	17.111,6
(-3.0m)	4.386,1	2.265,8	883.676,5	5.069,0	2.580,9	833.616,9	50.059,6
(-4.0m)	5.258,7	2.525,9	947.219,8	5.603,6	2.885,8	975.398,7	-28.178,8

Q – Vazão Média (med) e Vazão Máxima (máx)

\*Vet – Volume de entrada total

\*\*Vst – Volume de saída total

Com o aprofundamento do canal em 2,0 e 3,0m existe um saldo positivo entre o balanço de entrada e saída, ou seja, sobre estas condições a quantidade de massas de água que adentram o sistema é maior do que de saída. Por outro lado, quando aprofundado o canal em 4,0 metros, o balanço entre os volumes é negativo, ou seja, a quantidade de volume de água saindo está maior que o volume de água entrando. Tais resultados podem auxiliar na justificativa das respostas encontradas na distribuição horizontal de salinidade evidenciadas anteriormente no item 6.3.2.

Quando o volume residual, ou seja, a diferença entre o volume de entrada e saída é negativo, significa dizer que possivelmente isso estaria afetando a distribuição horizontal da salinidade como pode ser visualizado na figura 59. Quando acontece o contrário, o valor do volume residual é positivo, o sistema lagunar nos dois cenários de dragagem não apresentou alterações significativa (figura 57 e 58).

Como mencionado anteriormente no item 3.2, fatores morfológicos influenciam diretamente o balanço de sal de um sistema lagunar. A configuração do canal controla os níveis do fluxo de saída da água e a batimetria de fundo, controla a influência da maré que por

sua vez controla o transporte advectivo (SMITH 1994). Portanto, alterações batimétricas podem provocar mudanças no balanço de sal da Lagoa de Araruama.

De acordo com os estudos de Kjerfve et al., (1996), o balanço de sal da Lagoa de Araruama é mantido primeiramente pelo balanço entre as massas de água do mar advindas da zona costeira e a exportação das massas de água do interior da laguna para o oceano, e em segundo lugar, pela condição meteorológica que favorece a elevação da salinidade para lagoa através da concentração de sal pela perda de massa d'água por evaporação.

Quando levadas em consideração as referências acima, o resultado do balanço de massa de entrada e saída, e conseqüentemente a resposta da distribuição horizontal da salinidade, pode-se considerar que quando o Canal de Itajuru foi dragado para 4,0 metros ocorreu um desequilíbrio no balanço de sal da lagoa. Ou seja, possivelmente, com a harmonização da desproporcionalidade batimétrica entre a laguna e o canal citada anteriormente, o sistema não estaria conseguindo a concentrar a quantidade de massa de água necessária para manter o equilíbrio de sal e conferir a distribuição horizontal de salinidade visualizada até dragar o canal em 3,0m.

Desta forma, é possível sugerir que uma determinada quantidade de massas d'água (volume residual) precisam ser retidas no interior da lagoa para que a evaporação possa atuar e obter os valores característicos de salinidade ao sistema. Quando o volume de saída é maior que o de entrada, ocorrerá então, uma concentrada menor de sal pela ação da evaporação e a distribuição espacial de salinidade não será a mesma para Lagoa de Araruama.

Logo, uma intervenção desta magnitude pode trazer sérias conseqüências para distribuição de salinidade da lagoa principalmente durante o verão. A priori, a salinidade na porção oeste não foi alterada – zona mais crítica – as mudanças batimétricas não impediram a diminuição da salinidade, mas também não a acentuaram. Contudo, a longo prazo, não teríamos como prever ao certo as conseqüências desta mudança batimétrica do Canal Itajuru.

Provavelmente, sem a configuração batimétrica que favorecia a retenção de massa na lagoa e com a influência climatológica seu acúmulo no sistema, dois cenários podem ser cogitados: (1) ocorreria gradativamente uma exaustão do estoque de sal da lagoa igualando as concentrações de sal do sistema com a região costeira adjacente, ou (2) com o tempo, o sistema retomaria seu equilíbrio configurando uma distribuição horizontal com valores de salinidade menores, mas ainda sim maior que o valor de salinidade do mar.

### 6.3.4 Comparação entre os Cenários

Através do agrupamento das salinidades finais registrada pelas principais estações (tabela 12), torna-se possível uma melhor visualização da variação da salinidade frente às intervenções antrópicas simuladas utilizando o método de dragagem.

**Tabela 11 - Salinidade para as diferentes condições batimétricas do Canal Itajuru.**

Estações	Setor	Salinidade			
		Batimetria Atual	Canal (-2.5m)	Canal (-3.0m)	Canal (-4.0m)
<b>Praia Seca</b>	Oeste	18	18	18	18
<b>Enseada Saco do Tiririca</b>		40	40	40	39
<b>Enseada do Rabelo</b>		53	53	53	52
<b>São Pedro da Aldeia</b>	Centro	59	59	59	58
<b>Centro Lagunar</b>		58	57	57	56
<b>Enseada do Figueira</b>		59	59	59	57
<b>Estreito de Perynas</b>	Leste	57	56	56	48
<b>Enseada Maracanã</b>		46	44	45	39
<b>Enseada das Palmeiras</b>		44	42	43	38

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dentre as estações localizadas a oeste, a Enseada do Saco da Tiririca e do Rabelo registraram queda da salinidade apenas durante a última alteração da batimetria do canal. A concentração de sal no meio da lagoa sofreu influência desde as primeiras modificações batimétricas do canal enquanto que as Enseadas de São Pedro da Aldeia e Figueira registraram mudanças com a última intervenção.

Como esperado, as áreas da região leste tiveram sua salinidade mais afetada, variando entre perdas (canal dragado em -2,5m e -4,0m) e ganho de salinidade (canal dragado em 3,0m). Esta análise reafirma que as alterações batimétricas simuladas, de alguma forma, interferiram no balanço de sal da Laguna de Araruama.

Ademais, é importante ressaltar que obras de dragagem consistem em impactos ambientais com efeito direto ou indireto sobre o meio ambiente que vão desde alteração das condições hidráulicas e sedimentológicas do escoamento, com possível alteração dos padrões de circulação e mistura da água, salinidade e turbidez, passando por poluição por substâncias tóxicas existentes no material de dragagem até impactos diretos sobre *habitats* da fauna e flora aquática, associada a redução da salinidade com entrada de massas menos salinas

advindas do mar (LEAL NETO, 2000; PORTO; TEIXEIRA, 2002; TORRES, 2000). Portanto, qualquer obra de dragagem direcionada ao sistema lagunar de Araruama deve ser acompanhando de um eficiente monitoramento de indicadores ambiência e ecológicos.

#### 6.4 ABERTURA DE UM CANAL DE BARRA NA PORÇÃO OESTE DA LAGOA DE ARARUAMA

Como proposto no objetivo desse trabalho, buscou-se avaliar o impacto da abertura de um canal de barra (região da Praia Seca) sobre a distribuição horizontal da salinidade na Lagoa de Araruama, além de caracterizar qual seria o comportamento sazonal da salinidade pós intervenção. Para tanto, estudou-se os mapas da distribuição da salinidade em período de verão e inverno, posteriormente realizou-se a análise do comportamento temporal da concentração de sal ao longo da simulação, encerrando a sessão com a comparação entre os resultados obtidos.

##### 6.4.1 Distribuição Horizontal da Salinidade – Verão 2015

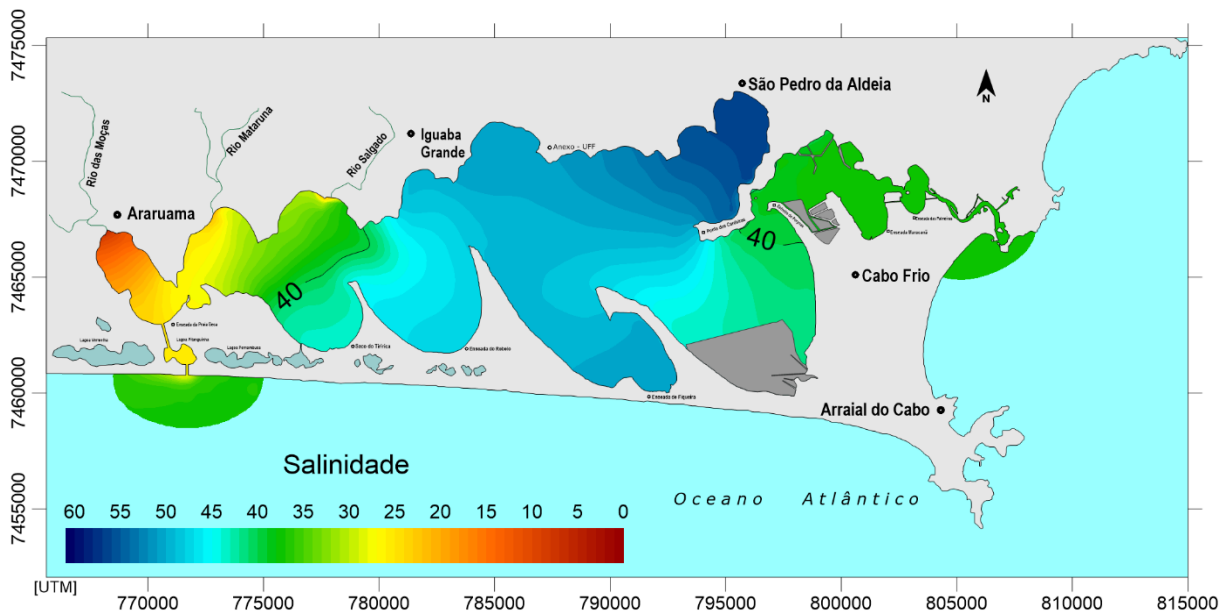
Para averiguar a longo prazo os efeitos da intervenção proposta, os cenários simulados tiveram duração de três meses, desta forma, seria possível acompanhar as mudanças na distribuição da salinidade. Portanto, são apresentados para discussão os resultados dos momentos de estufa de maré vazante de cada mês. As forçantes climáticas (precipitação e evaporação), vazão afluentes e oscilação da maré são referentes ao ano de 2015, pois como explanado anteriormente, buscou-se resultados sob condições típicas semiáridas.

Com base no resultado espacial do primeiro mês de simulação (figura 61), as imediações das desembocaduras dos rios marcaram salinidade abaixo de 37, mesma resposta do cenário antecedente à abertura da barra. Contudo, as estações 10, 11 e 12 registraram uma salinidade equivalente a 10 para a foz do Rio das Moças, 26 para o Mataruna e 31 para o Rio Salgado, a concentração de sal desta região apresentou um salto quando comparado ao cenário anterior à abertura do canal de barra. Possivelmente, a nova conexão com o mar através do Canal Oeste permitiu um acréscimo da salinidade na região graças ao sal advindo da zona costeira adjacente.

Quando observados os resultados iniciais para a região central da lagoa, os maiores valores de salinidade ainda são encontrados nesta área. A estação 7 e a 16 registraram

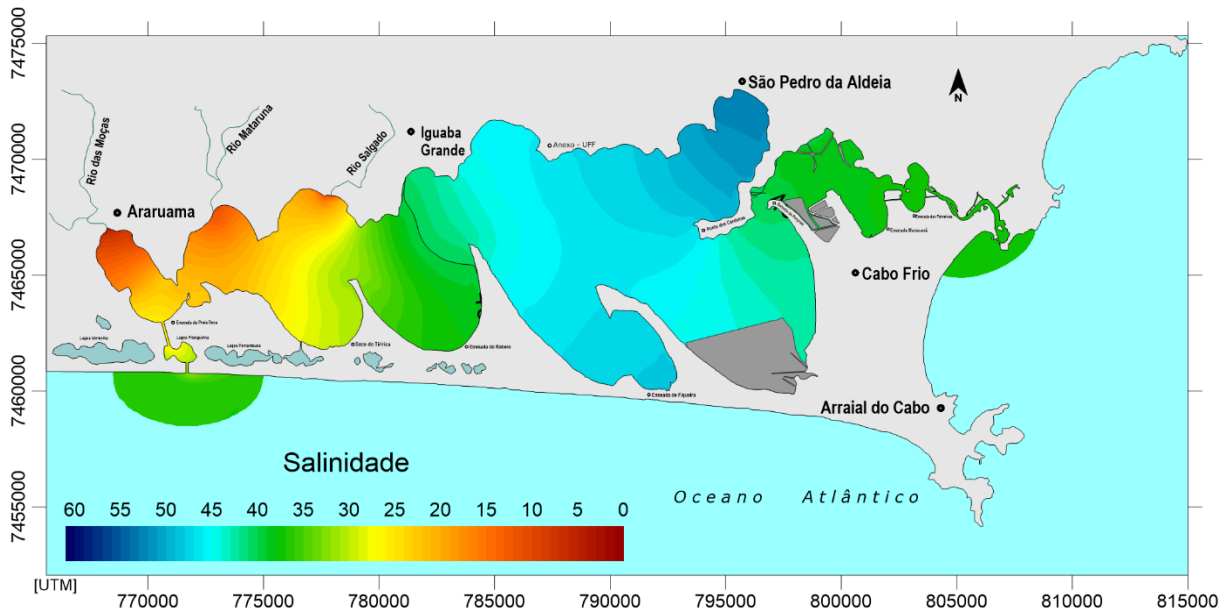
salinidade equivalente a 50, e a estação 8 marcou salinidade igual a 56. Resultado semelhante a este, ocorreu apenas sob forte chuva na Lagoa de Araruama.

A região leste sofreu homogeneização da salinidade ao igualar a concentração das estações 4 e 5 localizadas na Enseada do Maracanã e Palmeiras ao valor de 37 (concentração do mar), e a estação 6 no Estreito de Perynas registrou salinidade equivalente a 40. Portanto, torna-se possível inferir, que a abertura de um segundo canal provocaria mudanças na distribuição horizontal da salinidade logo no primeiro mês.



**Figura 61** - Mapa de distribuição de salinidade período de verão, 2015. Momento de estufa vazante – Instante: 2498400(s), equivalente ao vigésimo oitavo dia de simulação.

Após o segundo mês de simulação o quadro de dessalinização da porção oeste permanece. A isolinha de valor 40 deslocou-se no sentido da porção central da laguna (Figura 62). As estações virtuais 10, 11 e 12 na região oeste marcaram salinidade equivalente a 15, 12 e 7 para foz dos rios respectivamente.

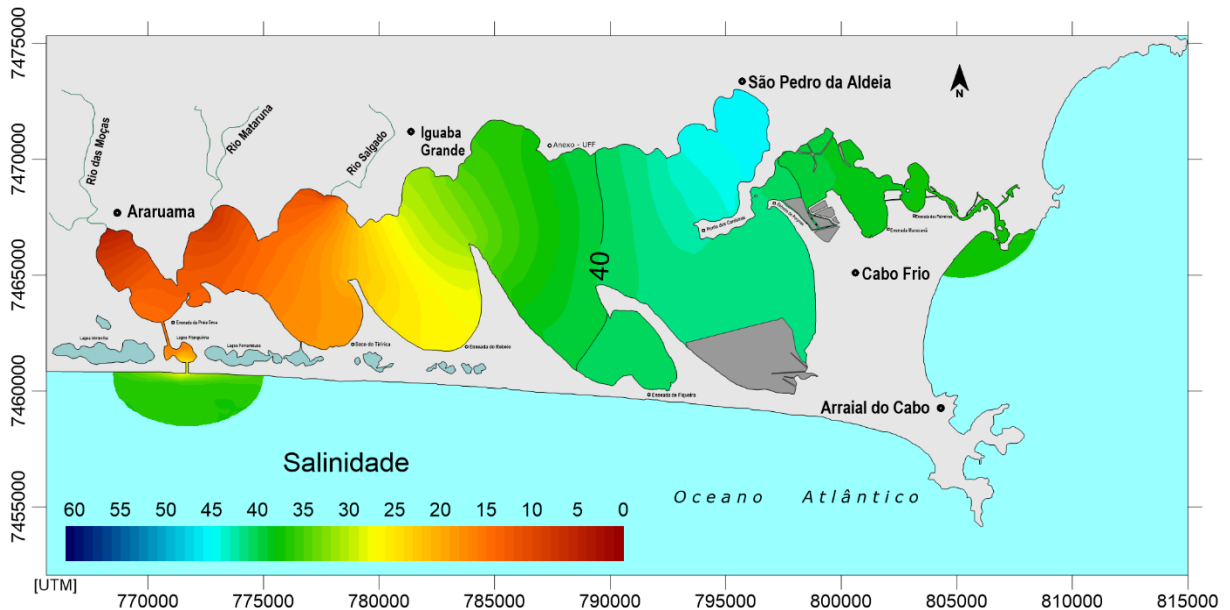


**Figura 62** - Mapa de distribuição de salinidade período de verão, 2015. Momento de estofa vazante – Instante: 5133600(s), equivalente ao quinquagésimo quinto dia de simulação.

A região central também continuou apresentando diminuição da concentração de sal, com valores de salinidade equivalente: 46 para estação 7 no meio da lagoa, 47 para estação 16 na Enseada do Figueira e 52 para estação 8 em São Pedro da Aldeia. A manutenção da salinidade para esta região, mesmo após abertura da barra, pode ainda estar associada à batimetria e geomorfologia das Enseadas da Figueira e São Pedro, bem como o meio da laguna.

A região leste manteve o padrão de salinidade do primeiro mês de simulação com concentração de sal nas estações 4 e 5 localizadas na Enseada do Maracanã e Palmeiras equivalente a 37 e a estação 6 no Estreito de Perynas registrando salinidade equivalente a 38.

Ao final do terceiro mês de simulação o retrato geral da lagoa apresenta uma massiva dessalinização, que acontece de oeste para leste com o deslocamento da isolinha de valor 40 para o meio da lagoa e uma pequena variação da homogeneização no canal (figura 63).



**Figura 63** - Mapa de distribuição de salinidade período de verão, 2015. Momento de estofa vazante – Instante: 7596000(s), equivalente ao octogésimo quinto dia de simulação.

As estações 10, 11 e 12 na porção oeste registraram salinidade equivalente a 11, 8 e 5 para a foz dos respectivos. Na porção central a estação 8 a 44 e a estação 7 e 16 salinidade equivalente a 40. Na porção leste no a estação 6 computou salinidade equivalente a 40 e as estações 4 e 5 mantiveram concentração igual ao mar (37).

Os resultados finais da modelagem são corroborados pelos estudos hidrodinâmicos, de trocas de massas e de diluição realizados por Gava (2008). O autor, ao simular a abertura de um segundo canal na mesma área deste estudo e com mesma Dimensão do canal hidráulico, encontrou resultados que apontaram para uma ampliação das trocas de massa do sistema após intervenção. Quando essas trocas ocorriam exclusivamente pelo Canal Itajuru o panorama era de aumento da salinidade, pois, graças ao balanço de sal favorável à lagoa e impulsionado pelas condições climáticas locais conferia ao sistema altos valores de salinidade (KJERFVE et al., 1996).

Anteriormente aos estudos de Gava (2008), outros autores como Kjerfve et al., 1996; SOUZA (1993) sugeriram que a proposta de abertura de um novo canal da Lagoa com o mar aumentaria significativamente o fluxo de águas menos salinas originadas na região costeira adjacente e poderia causar um aumento brusco do nível trófico da laguna, com prejuízos ao ecossistema lagunar e à economia da região.

Além disso, durante o verão ocorrem chuvas na região. No terceiro mês de simulação a estação meteorológica de Iguaba Grande marcou uma precipitação acumulada de 78 mm/mês e Arraial do Cabo de 102,8 mm/mês. Como constatado nos cenários anteriores,

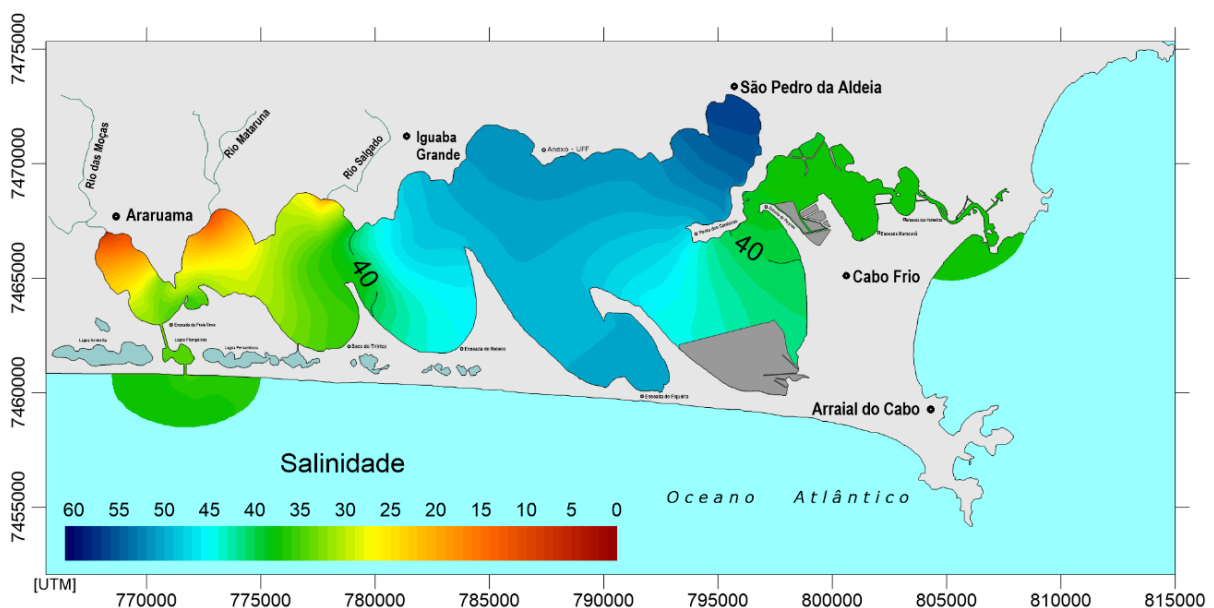
precipitações intensas são capazes de dessalinizar a laguna, como modificar a distribuição da salinidade por todo sistema, principalmente na porção central. Não obstante, é claro que a abertura do canal gera uma tendência inegável de dessalinização.

#### 6.4.2 Distribuição da Salinidade - Inverno 2015

Com base no resultado espacial do primeiro mês de simulação (figura 64) em período de inverno, o quadro da região oeste mostrou-se oposto ao período de verão. Com a diminuição do aporte afluyente nesta região, torna-se possível que as massas advindas pelo segundo canal auxiliem o aumento da concentração de sal desde a desembocadura (Praia Seca) até a enseada do Ingá. Contudo, as estações virtuais 10, 11 e 12 registraram salinidade equivalente a 22, 13 e 10 para a foz dos rios.

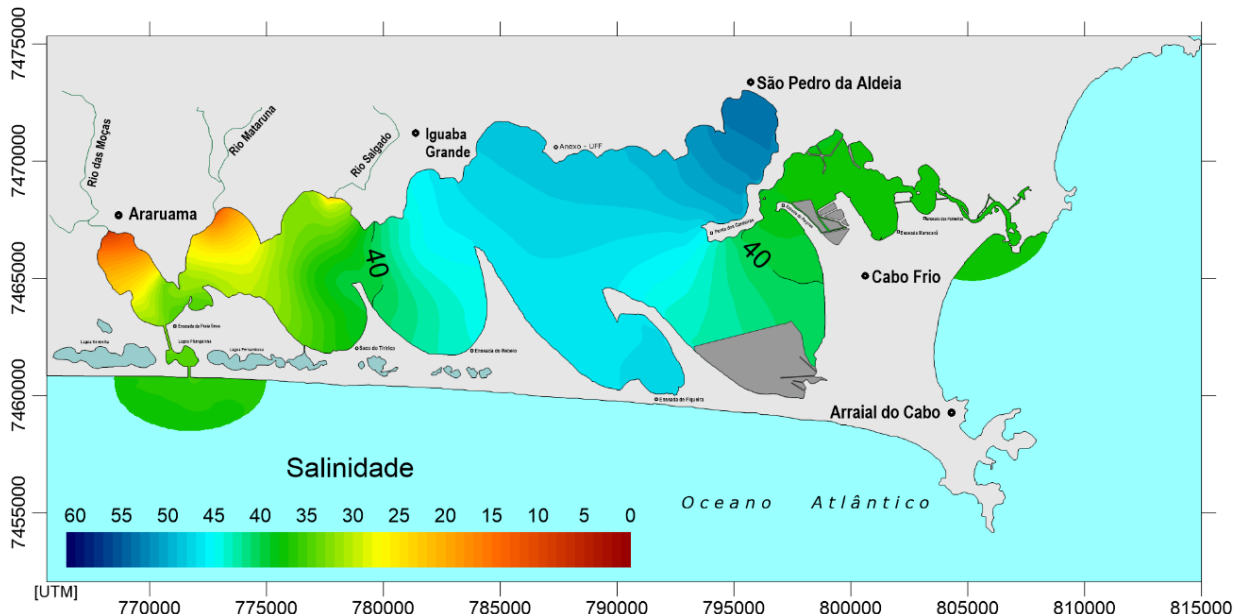
Quanto a porção central, após um mês de simulação, as estações 7 e 16 registraram salinidade equivalente a 50 e para estação 8 a salinidade registrada foi 56, resultado semelhante foi observado no período de verão. A região leste manteve o padrão de homogeneização da salinidade ao igualar a concentração das estações 4 e 5 para o valor de 37 (concentração do mar), a estação 6 registrou salinidade equivalente a 38.

Até aqui, a resposta espacial da salinidade após abertura da barra, mesmo em período de inverno, onde se espera uma elevação da concentração de sal por todo sistema, o quadro geral da lagoa após um mês é semelhante ao período de verão.



**Figura 64** - Mapa de distribuição de salinidade período de inverno, 2015. Momento de estofa vazante – Instante: 2545200(s), equivalente ao vigésimo nono dia de simulação.

Após o segundo mês de simulação a distribuição horizontal da salinidade continuou semelhante ao primeiro mês, a isolinha de valor 40 não se deslocou da Ponta das Coroinhas. Visivelmente a foz dos rios mudaram seu padrão de isolinha para amarelo e verde mostrando o aumento da salinidade na área (Figura 65).



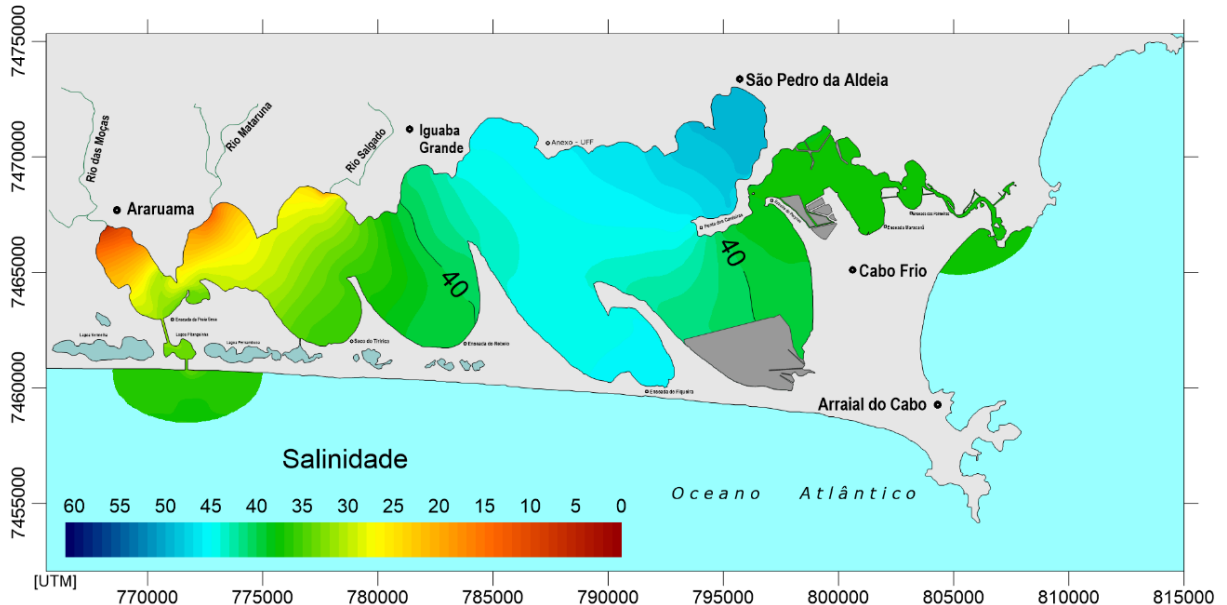
**Figura 65** - Mapa de distribuição de salinidade período de inverno, 2015. Momento de estufa vazante – Instante: 5094000(s), equivalente ao quinquagésimo sexto dia de simulação.

As estações virtuais 10, 11 e 12 na região oeste marcaram salinidade equivalente a 27, 16 e 11 respectivamente, para a foz dos rios. Este resultado está de acordo com os dados hidrológicos da Lagoa, o Rio das Moças e Mataruna, os quais detêm a maior contribuição de água doce, superando o aporte do rio Salgado mesmo durante o inverno.

A região central também continuou apresentando diminuição da concentração de sal, com valores de salinidade equivalentes a 47 para estação 7 e 16 e 53 para estação 8. Mesmo assim, esta porção apresentou uma dessalinização menos acentuada do que a que ocorreu durante o verão, tendo em vista que não houve avanço da isolinha de valor 40 no sentido do centro lagunar.

Durante o período de inverno a incidência de chuvas é normalmente menor, portanto permite que a evaporação exerça uma influência maior no padrão de salinidade. Contudo, com a adição de um novo canal que viabiliza trocas de massa de água menos salina para dentro do sistema, espera-se que, gradativamente, provoque uma diminuição da concentração de sal na principal região do ecossistema lacustre e de certa forma, supere o domínio que o balanço hídrico atualmente impele a Lagoa de Araruama.

Ao final do terceiro mês de simulação o retrato geral da lagoa durante o período de inverno apresenta uma distribuição espacial de salinidade com valores maiores que o final do verão (Figura 66).



**Figura 66** - Mapa de distribuição de salinidade período de inverno, 2015. Momento de estufa vazante – Instante: 7642800(s), equivalente ao octuagésimo quinto dia de simulação.

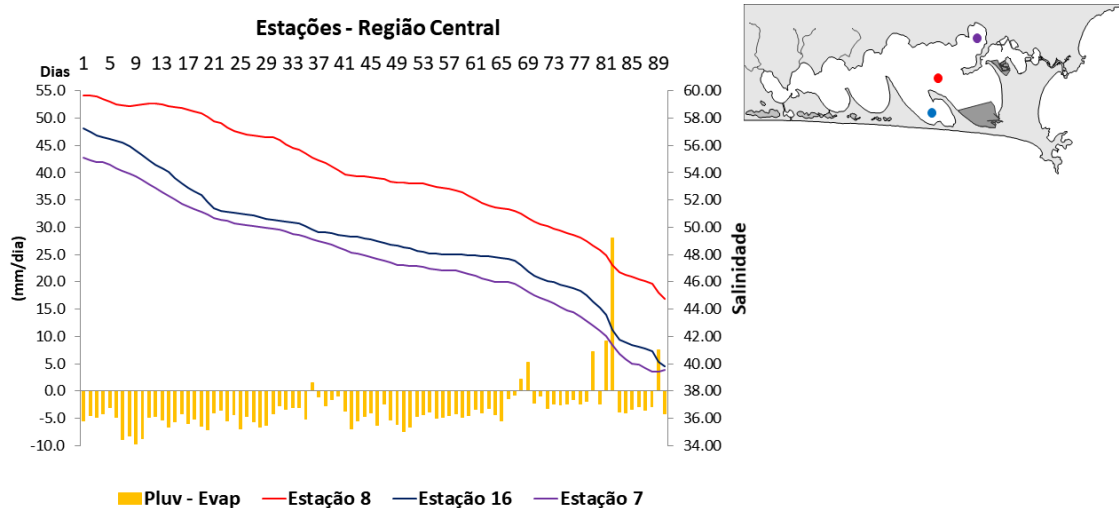
Mesmo com a porção oeste detendo os menores valores de salinidade, o aporte de água do mar favorece a região com o aumento da salinidade variando entre 37 e 40 nas estações 13 e 14. Este aporte propiciado pelo canal oeste cria uma espécie de barreira que restringe o adoçamento das águas pelo aporte fluvial não muito além da foz dos rios. Ademais a dessalinização na porção central é menor, mesmo que tenham ocorrido chuvas durante a estação.

Por fim, as estações virtuais 10, 11 e 12 na porção oeste registraram salinidade equivalente a 28, 17 e 12, respectivamente para a foz dos rios. Na porção central, as estações 7 e 18 registraram concentrações de sal equivalentes a 45 e a estação 8 marcou 49. A porção leste, manteve o mesmo resultado dos dois primeiros meses.

#### 6.4.3 Série Temporal de Salinidade

A análise da variação da salinidade durante o verão de 2015, demonstra que o clima da região da Lagoa de Araruama não exerceria, como foi possível visualizar na primeira modelagem de transporte de sal sem abertura do Canal Oeste, a mesma influência na distribuição espacial de sal da porção central (Figura 67).

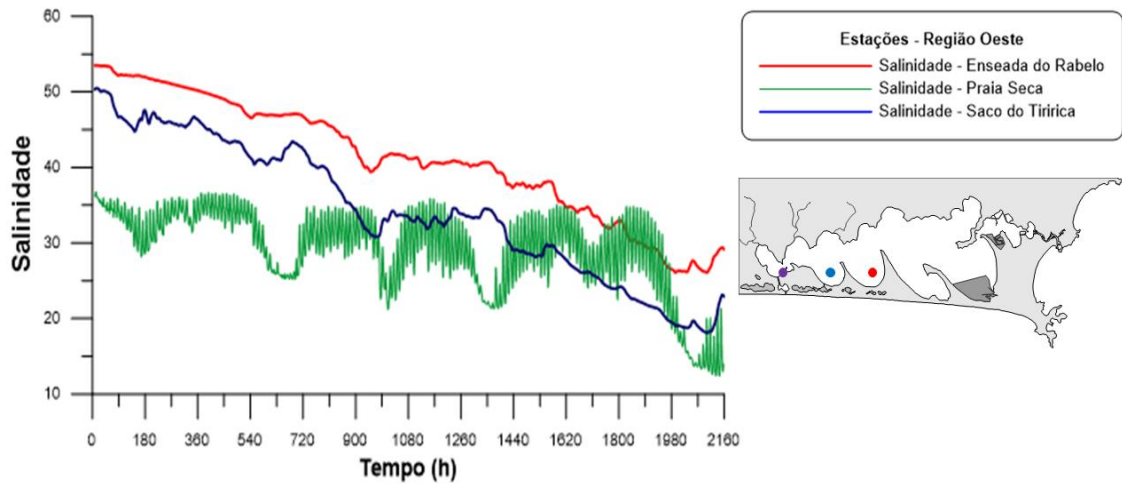
A abertura do canal de barra na porção Oeste promoveu para o sistema duas comunicações com o mar, desta forma, o meio da lagoa sofreu uma espécie de desestabilização. O ambiente que antes era favorável à concentração do sal, passou para um sistema de diluição. A precipitação para região central, assim como outras, seria uma atenuação do processo de dessalinização.



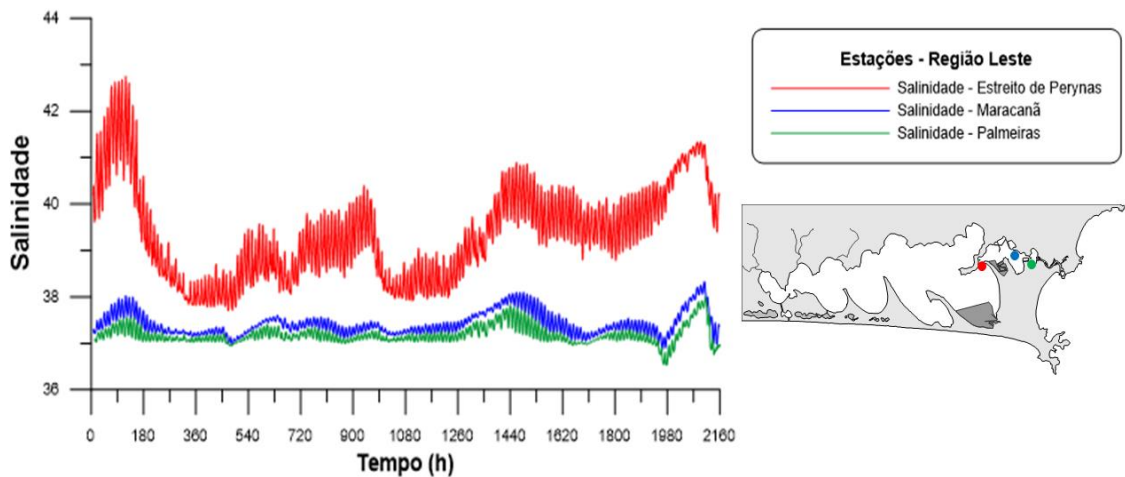
**Figura 67** - Variação da concentração de sal nas estações virtuais 7, 8 e 16 da região central, durante um mês de simulação, em verão de 2015.

A variação da salinidade na porção oeste também sofreu modificação, a região da Praia Seca (desembocadura do segundo canal), após intervenção adquiriu o mesmo comportamento transitório do Estreito de Perynas pré-intervenção (Figura 68). A curva desta estação 13 adquiriu comportamento senoidal, sob influência quase que exclusiva das mudanças de maré (sizígia e quadratura).

O comportamento das curvas das estações 4, 5 e 6 na porção Leste mantém o padrão de variação evidenciado antes da intervenção, onde a concentração de salinidade do canal Itajurú é resultado das trocas de massa entre a lagoa de Araruama e a zona costeira adjacente (Figura 69). Como reportado durante a observação horizontal da salinidade, após abertura do canal acontece homogeneização entre as concentrações das estações 4 e 5 na Enseada do Maracanã e Palmeiras. Este resultado pode estar associado a observação feita por Gava, (2008), que após a intervenção as enchentes seriam maiores na porção leste.



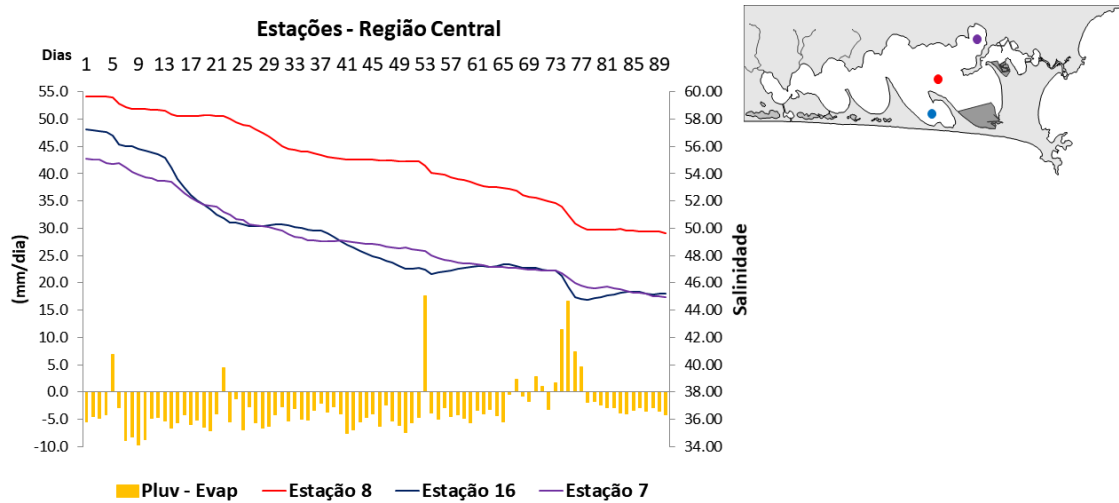
**Figura 68** - Variação da concentração de sal das estações virtuais 13, 14 e 15 na região oeste, durante um mês de simulação, em verão de 2015.



**Figura 69** - Variação da concentração de sal das estações virtuais 4, 5 e 6 na região Leste, durante um mês de simulação, em verão de 2015.

O resultado da variação da salinidade durante o inverno de 2015 demonstra similaridade com o período de verão, a dessalinização é contínua, mas acontece com intensidade menor em intervalos maiores (Figura 70). Durante o período de inverno é possível observar entre uma precipitação e outra que ocorre a manutenção da salinidade na estação 8 em São Pedro da Aldeia.

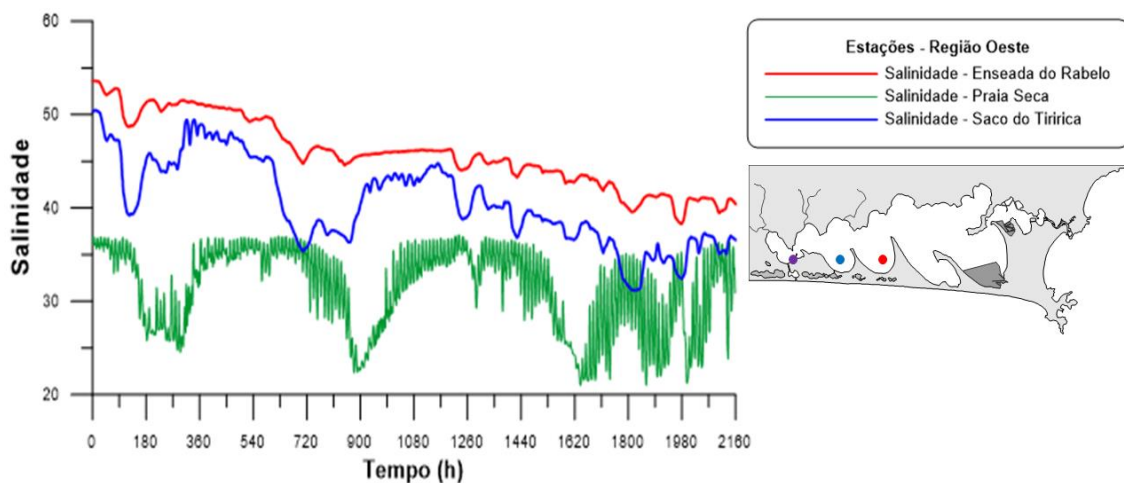
A curva da estação 7, localizada no meio da lagoa, apresenta um declínio praticamente contínuo, mas se dada a máxima atenção, sua curva tem, muito discretamente, um comportamento similar à curva da estação 8 em São Pedro da Aldeia, variando entre declínio e estabilidade. Quanto a curva da estação 16 na enseada do Figueira, é possível observar o mesmo decréscimo e estabilidade das outras estações da área, mas também ocorrem discretos aumentos.



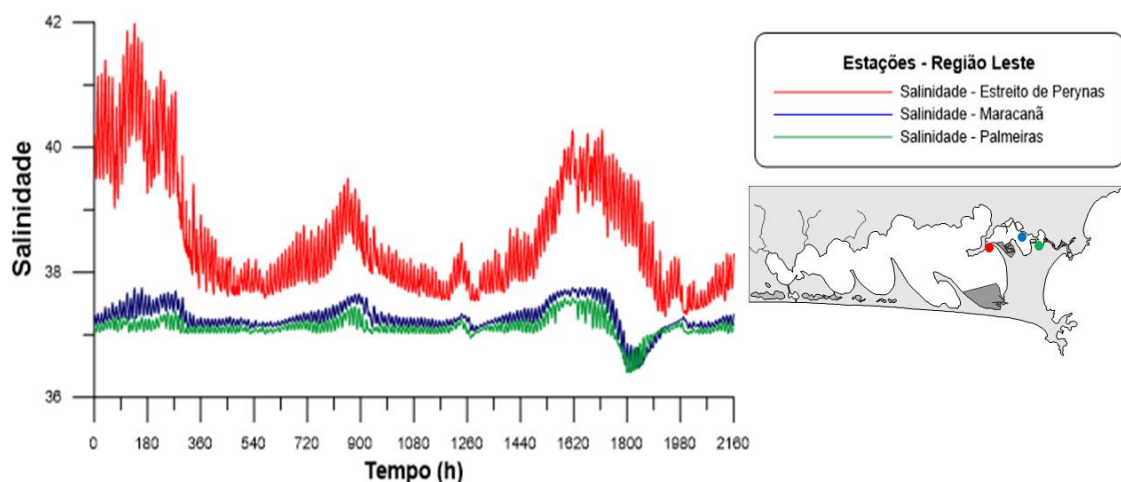
**Figura 70** - Variação da concentração de sal das estações virtuais 7, 8 e 9 da região central, durante três meses de simulação, em inverno de 2015.

As curvas das estações 13, 14 e 15 na porção oeste apresentam alternância entre estabilidade e redução da salinidade (Figura 71). A variação na estação 13 em Praia Seca permanece determinada pelas oscilações da maré de sizígia/quadratura e suas enchentes e vazantes. Além disso, a curva das estações 14 e 15 ocorre uma resposta aos momentos de precipitação através da queda da concentração de sal.

O comportamento das curvas das estações 4,5 e 6 da porção Leste continua com o padrão de caráter transitório (Figura 72). Ademais, a homogeneização entre as concentrações das estações 4 e 5, para a salinidade igual a do mar, permanece.



**Figura 71** - Variação da concentração de sal nas estações virtuais 13, 14 e 15 da região Leste, durante três meses de simulação, em inverno de 2015.



**Figura 72** - Variação da concentração de sal nas estações virtuais da 4, 5 e 6 região Leste, durante três meses de simulação, em inverno de 2015.

#### 6.4.5 Análise do Padrão Sazonal

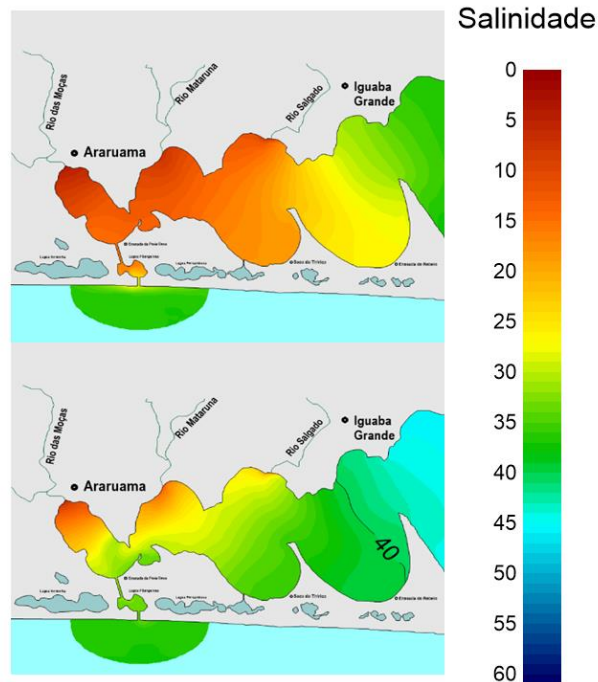
Com base no agrupamento dos valores mensais das salinidades a cada estufa de maré vazante (tabela 11), torna-se possível uma melhor visualização da variação da salinidade frente às mudanças entre o período de verão e inverno. A seguir são apresentados também mapas detalhados da distribuição horizontal de salinidade por setor para reforçar qual seria o comportamento sazonal da salinidade após a abertura do canal.

**Tabela 12-** Salinidade em diferentes estofas de maré vazante para o verão e inverno 2015.

Estações Virtuais	Verão			Inverno		
	Sal Janeiro	Sal Fevereiro	Sal Março	Sal Julho	Sal Agosto	Sal Setembro
Rio das Moças	10	7	5	10	11	12
Rio Mataruna	26	12	8	13	16	17
Rio Salgado	31	15	11	22	27	28
Centro Lagunar	50	46	41	50	47	45
São Pedro da Aldeia	56	52	44	56	53	49
Enseada do Figueira	50	47	40	50	47	45
Estreito Perynas	38	40	41	38	38	38
Enseada Maracanã	37	37	37	37	37	37
Enseada da Palmeira	37	37	37	37	37	37

Fonte: Elaborada pelo autor.

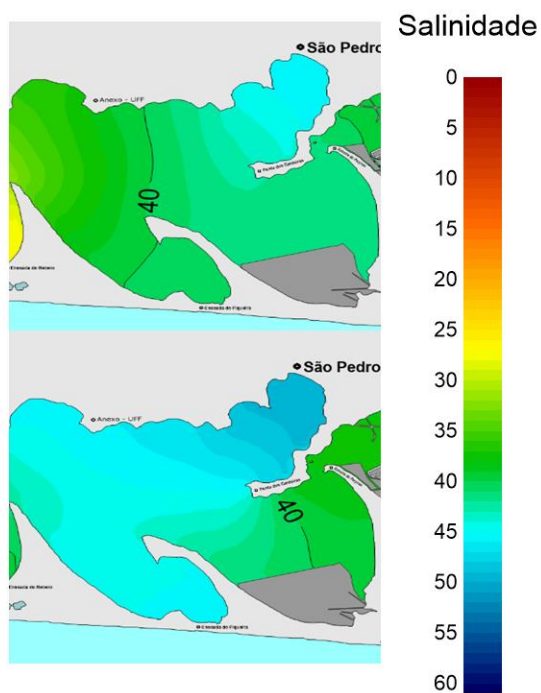
A distribuição horizontal da salinidade na porção oeste durante o verão demonstra que o aporte de água doce é tão intenso que provoca dessalinização até as imediações do primeiro do canal de barra que liga o oceano à Lagoa de Pitanguinha (Figura 73). Durante o inverno, por outro lado, com a redução do aporte fluvial em decorrência do esvaziamento da população flutuante a porção oeste tem um melhoramento no sentido de que a dessalinização é contida.



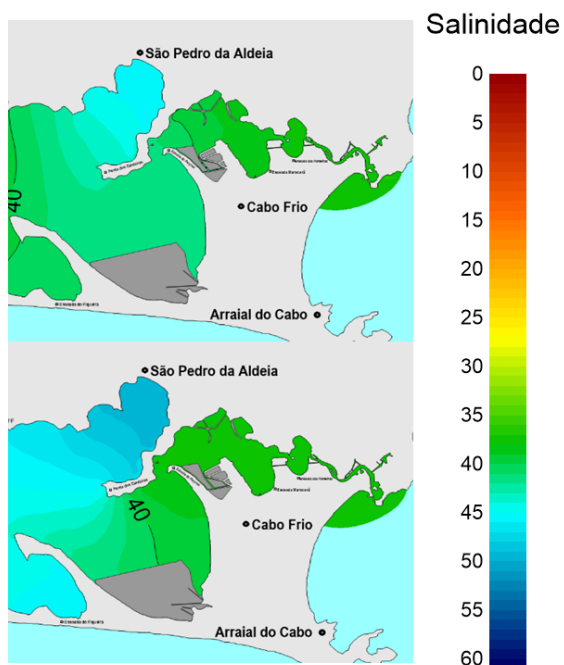
**Figura 73** - Acima detalhe da porção oeste, verão 2015. Abaixo, detalhe porção oeste, inverno 2015. Momento de última estufa vazante.

Quanto à porção central a dessalinização é menos acentuada no inverno que no verão. Tal comportamento é característico do padrão sazonal da salinidade com a mudança das estações, pois normalmente durante o inverno os valores de salinidade na lagoa de Araruama tendem a ser maiores (figura 74).

Para região Leste, logo após a abertura da barra, ocorre homogeneização da concentração da embocadura do Canal Itajuru até Perynas para o valor de 37 (mesma concentração do mar atribuída para a fronteira aberta) e assim permanece durante as simulações. Contudo, avaliando o estágio final dos dois períodos existe uma diferença durante o verão, possivelmente por conta das típicas precipitações, ventos de SW, mais o constante aporte dos afluentes, criou-se uma diluição de oeste para leste. Então no momento de maré vazante provocou-se mudanças variação de salinidade entre a estação 6 em Perynas até a estação 5 na Enseada do Maracanã (Figura 75).



**Figura 74** - Acima esquerda, detalhe da porção central, verão 2015. Abaixo detalhe da porção central, inverno 2015. Momento de ultima estofa vazante.



**Figura 75** - Acima, detalhe da porção leste, verão 2015. Abaixo, detalhe da porção leste, inverno 2015. Momento de ultima estofa vazante.

Torna-se possível sugerir que o período de verão será marcado por um quadro semelhante aos apresentados no estudo, onde ocorreu uma forte dessalinização em função do bombeamento de água doce pelos principais rios, além da contribuição das vazões de precipitação. O cenário de inverno, ao menos, poderá ser caracterizado por uma dessalinização menor, mas ainda persistente. A vantagem para o período de estiagem está numa provável melhoria da qualidade da água na porção oeste, com o impedimento do avanço da influência da água aportada pelos rios das Moças, Mataruna e Salgado.

Após a simulação da construção do canal, as águas menos salinas que adentram pelo Canal Oeste provocam diluição da concentração de sal por todo sistema. Esta modificação morfológica da lagoa poderá dar forças para ação das forçantes hidrológicas (aporte fluviais e efluentes) e da precipitação sobre a distribuição horizontal da salinidade.

Como sugerido por Carloni et al., (2010); Wasserman, (2000 e 2016), a importância da abertura de conexões com o mar está no consequente impacto no estoque de nutrientes no sedimento. Wasserman, (2000) observou que a abertura e a intensificação das trocas de água entre a laguna e o mar deveriam promover a intensificação do processo de remineralização (difusão) dos nutrientes do sedimento, devido à formação de um gradiente de concentração maior entre o sedimento e a coluna d'água. De acordo com o autor, a redução na concentração de nutrientes só ocorre muito após a abertura. O tempo necessário para melhoria da qualidade da água dependerá do tamanho do estoque de nutrientes no sedimento e da dinâmica de transferência destes nutrientes para a coluna d'água Wasserman, (2016).

Em um estudo realizado por Azevedo, (2005); Carloni et al., (2010) na Lagoa de Saquarema, ficou demonstrado que após um ano da abertura não houve melhoria significativa, o estoque de nutriente liberado após a intervenção não equilibrou. López (2003), observou em seus estudos realizados na laguna costeira Albufera d'Es Grau localizada na costa noroeste da ilha de Minorca, que a mudança repentina na salinidade da laguna provocou uma liberação substancial de nutrientes para coluna d'água incrementando nitrogênio no sistema e favorecendo a produção planctônica.

Para Ayukai e Wolanski (1997), mudanças na salinidade afeta não só as reações químicas que ocorrem nos sedimentos, mas também a estrutura do sedimento. Além disso, mudanças drásticas na salinidade da água podem induzir estresse fisiológico em organismos vivos e alterar a atividade biótica da macrofauna (CHEUNG, 1997; ROSAS et al., 1999) e comunidade microbiana (RYSGAARD; BERG, 1996).

A Lagoa de Araruama é um sistema, até então, retentor, significa dizer que devido suas características físicas e químicas há a tendência de acumular qualquer substância. Logo, é possível inferir que seus sedimentos (regiões de reservatórios naturais) são ricos em nutrientes, dado seu comportamento metabólico e o aporte intermitente de águas servidas tanto das estações de tratamento como por valas e canais. Portanto, se a abertura da barra provocar a mesma difusão que ocorreu na laguna de Saquarema, a laguna enfrentará sérios problemas ambientais associados ao processo de eutrofização. Possivelmente, até que o ecossistema entre em equilíbrio, ocorrerão florações algais, mortandades de peixes, sucessão de produtores primários e desenvolvimento de um estado trófico quase permanente eutrófico.

## 7 CONCLUSÕES

### ▪ **Modelo Hidrodinâmico**

O modelo hidrodinâmico foi capaz de simular a circulação e velocidade das correntes tendo em vista que existe compatibilidade entre as respostas de circulação do modelo com os dados da literatura. O modelo de transporte também forneceu resultados satisfatórios quando levamos que suas respostas estão adequadamente calibradas.

A dinâmica de circulação da Lagoa de Araruama apresenta dois compartimentos distintos, um onde a hidrodinâmica é forçada pelo regime de ventos, área compreendida entre o Estreito de Perynas e o extremo oeste, e outro que a circulação de suas correntes é governada pela ação da maré, região que vai da embocadura do canal até o Estreito de Perynas. A sazonalidade no regime de ventos confere o sentido das células de circulação e alternância entre sobrelevações e subelevações entre o extremo leste e oeste da lagoa, à medida que os ventos mudam de nordeste para sudoeste. Os resultados do modelo em cenário de calmaria corroboram a ideia dos compartimentos distintos.

### ▪ **Influência do Balanço Hídrico sobre a Distribuição Horizontal da Salinidade**

Variações entre o balanço precipitação-evaporação influenciam a distribuição horizontal da salinidade da Lagoa de Araruama, principalmente o setor central. As variações do clima têm a capacidade de manter, aumentar ou diminuir a salinidade. Durante um período atípico de chuvas intensa (2009), a concentração de salinidade apresenta redução drástica, com valores não ultrapassando 37 para a porção oeste, entre 47 até 52 para região central e provoca homogeneização na porção leste com salinidade equivalente à do mar. Mesmo em um ano de balanço hídrico positivo, a característica sazonal, faz com que ocorra uma recuperação nos valores de salinidade por todo sistema durante o inverno. Durante a estação seca a frente salina avança no sentido oeste da lagoa, favorecendo o aumento da salinidade nesta região, principalmente, devido à redução do aporte afluyente e diminuição da precipitação.

Em condições típicas semiáridas (clima de 2015) o quadro geral da distribuição de sal é oposto ao período húmido, em vez de queda da salinidade ocorre magnificação da concentração de sal por toda laguna. Durante o verão, os menores valores de salinidade ainda

são registrados na porção oeste e os maiores valores na região central. Quanto a porção leste, ocorre inversão no comportamento, a salinidade nas estações 4, 5 e 6 aumentam. Este resultado pode estar associado ao aumento da concentração de sal no interior da lagoa, desta forma, em momentos de vazante é exportado uma massa de água com densidade maior que a do mar, provendo assim, elevação dos valores de salinidade na porção leste. O quadro de ganho de salinidade com a mudança de estação é mantido para o período seco, mesmo que tenha ocorrido chuvas durante a simulação.

De modo geral, em função do aporte perene dos principais rios na porção oeste, independente do balanço hídrico ou estação do ano, esta região da lagoa deteve os menores valores de salinidade do sistema, mostrando assim o quanto o aporte de água doce pode alterar a salinidade desta região e prejudicar a qualidade da água.

A porção central por outro lado tem sua salinidade influenciada pelo clima. O meio da lagoa (estação 7), por deter maiores profundidades responde às mudanças de forma gradativa entre perdas e ganhos de salinidade. As áreas da Enseada da Figueira (estação 16) e São Pedro da Aldeia (estação 8) frente às mudanças climáticas respondem com perda ou ganho imediatamente de salinidade. Este resultado está associado à batimetria rasa dessas áreas que impulsiona a ação da evaporação ou da chuva. A porção leste, apresenta um padrão salino que varia de acordo com a concentração das massas trocadas entre o interior da lagoa e a área costeira adjacente.

#### ▪ **Dragagem do Canal Itajurú**

Os sucessivos cenários que simularam a dragagem do Canal Itajurú mostram que intervenções antrópicas podem causar alterações na distribuição horizontal da salinidade no interior do sistema. Os resultados de dragagem após dragagem apresentaram perdas e ganhos de salinidade para Lagoa de Araruama. Estas respostas podem estar associadas ao desequilíbrio do balanço de sal entre o ecossistema lagunar e oceano em função da alteração da batimetria do canal de comunicação com o mar.

De acordo com balanço entre o volume de entrada e saída, e a resposta espacial da salinidade, com o aprofundamento do Canal Itajurú para 4 metros ocorrem mudanças na distribuição horizontal da salinidade na porção central e leste da Lagoa de Araruama. Com a dragagem do canal para 4 metros possivelmente ocorreu um desequilíbrio no balanço de sal da lagoa. Provavelmente, com a harmonização da desproporcionalidade batimétrica entre a

laguna e o canal, que levou a um aumento entre as trocas de água, o sistema não estaria conseguindo a concentrar a quantidade de massa necessária para manter o equilíbrio de sal e conferir a distribuição horizontal de salinidade visualizada até dragar o canal em 3,0m.

É importante ressaltar que a longo prazo, não teríamos como prever ao certo as consequências desta mudança batimétrica do Canal Itajuru. Contudo, provavelmente, sem a configuração batimétrica que favorecia a retenção de massa de água na lagoa e com a influência climatológica o acúmulo de sal no sistema, dois cenários podem ser cogitados: (1) ocorreria gradativamente uma exaustão do estoque de sal da lagoa igualando as concentrações de sal do sistema com a região costeira adjacente, ou (2) com o tempo, o sistema retomaria seu equilíbrio configurando uma distribuição horizontal com valores de salinidade menores, mas ainda sim maior que o valor de salinidade do mar.

#### ▪ **Abertura de um Segundo Canal de Comunicação com o Mar**

A abertura de um segundo canal de barra aumenta as trocas de massas entre a lagoa e o mar, impactando diretamente sobre a distribuição horizontal da salinidade do sistema lagunar. A proposta de abertura de um novo canal de ligação com o mar aumentaria significativamente o fluxo de águas menos salinas originadas na região costeira adjacente.

A resposta sazonal da salinidade após abertura do canal, mostra que durante o verão o sistema lagunar estará sujeito a fortes perdas de salinidade graças às típicas chuvas da época, aumento da vazão dos afluentes, atrelada ao crescimento da população flutuante, que impulsionado pelo intensa trocas de massas trará possivelmente concentrações de sal equivalente a 40 ou menos. Além disso as séries temporais indicam diluição da concentração de sal durante os três meses de simulação em todas as estações virtuais de oeste até o Estreito de Perynas. Deste ponto até a embocadura do canal, a influência do mar passa a reger completamente sua salinidade.

Durante o inverno o quadro de diluição da concentração de sal é o mesmo do período de verão, contudo, em uma escala de tempo maior (leva mais tempo para dessalinizar). Um ponto positivo com a troca de estações consiste na região oeste que apresentou elevação da salinidade. Com a diminuição do aporte afluente, as massas advindas pelo canal oeste exercem uma influência muito maior na área da praia seca e saco do Tiririca, gerando uma espécie de barreira, impedindo o avanço das massas com salinidade menor que 37 se prolonguem para além da foz dos rios.

Portanto a abertura do canal de barra na porção Oeste promove uma espécie de desestabilização para o sistema lagunar. O ambiente que antes era favorável a concentração do sal, passou para um sistema de diluição. Logo, sobre este cenário, forçantes como precipitações, aporte de afluentes seriam fatores atenuantes do processo de dessalinização.

## 8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, A. R. et al. **Modelagem Numérica do Transporte Litorâneo na Lagoa de Araruama** - RJ. [S. l.: s.n.], 2014.
- AMARAL, P. J. et al. Modelagem Hidrodinâmica da Lagoa de Araruama. In: CONGRESSO AQUACIÊNCIA 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2006.
- AMARAL, K. J. do; ROSMAN, P. C. C.; AZEVEDO, J. P. S. de. Estuário Do Rio Macaé: Modelagem Computacional Como Ferramenta Para O Gerenciamento Integrado De Recursos Hídricos. **Mecânica Computacional**, v. 23, p. 1167–1185, 2003. Disponível em: <<http://www.oceanica.ufrj.br/costeira/arquivos/73.pdf>>. Acesso em: Abril 2006
- ANDUTTA, F. P.; RIDD, P. V.; WOLANSKI, E. Dynamics of hypersaline coastal waters in the Great Barrier Reef. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 94, n. 4, p. 299–305, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2011.06.009>> Acesso em: Abril 2006
- ANGUS, S. Monitoring and surveillance of a highly variable habitat: The challenge posed by Scottish saline lagoons. **Regional Studies in Marine Science**, v. 8, p. 20–26, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rsma.2016.08.004>> Acesso em: Abril 2006
- AYUKAI, T.; WOLANSKI, E. Importance of biologically mediated removal of fine sediments from the Fly River plume Papua New Guinea. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 44, p. 629– 639, 1997.
- AZEVEDO, F. B. B. **Modelagem Da Capacidade De Suporte Da Laguna De Saquarema–Rj Após a Abertura De Uma Conexão Permanente Com O Mar**. Niteroi, 2005. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal Fluminense, Niteroi, 2005.
- BAMBER, R. N. **Coastal saline lagoons and the Water Framework Directive. Natural England Commissioned Report NECR039**. [S.l.: s.n.], 2010.
- BÁRBARA, V. F. et al. Monitoramento sazonal da qualidade da água do rio Araguari / AP. **Revista Biociências**, v. 16, p. 57–72, 2010.
- BARBIÉRE, E. B. Cabo Frio e Iguaba Grande, dois microclimas distintos a um curto intervalo espacial. In: LACERDA, L. D. (Ed.). **Restingas: Origem, estrutura, processos**. Niteroi: CEUFF, 1984. p. 3–13.
- BARBIÉRE, E. B.; COE-NETO, R. Sapatial and Temporal Variation of Rainfall of the East Fluminense Coast and Atlantic Serra do Mar, State of Rio de Janeiro, Brazil. In: KNOPPERS, B. A.; BIDONE, E. D.; ABRÃO, J. J. (Eds.). **Enviromental Geochemistry of Costal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil**. 6. ed. Rio de Janeiro: UFF - Programa de Geoquímica Ambiental, 1999. p. 47–56.
- BASSANI, C. T. T. **Diatomáceas como Bioindicadores Ecológicos e Paleoecológicos nas Lagunas do Padre e de Araruama – RJ, Brasil**. Rio de Janeiro, 2000. 340 f. Tese

- (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- BLUMBERG, A. F. Numerical tidal model of Chesapeake Bay. **Journal of the Hydraulics Division, Proce Amer Soc Civil Eng**, v. 103, n. (HY1), p. 1–10, 1977a.
- BLUMBERG, A. F. On the dynamic balance of the Chesapeake Bay waters. **Chesapeake Sci**, v. 18, p. 319–323, 1977b.
- BOROWITZKA, M. A. Application of Biotechnology to Coastal Lagoons. In: KJERFVE, B. (Ed.). **Coastal Lagoon Processes**. [s.l.] : Elsevier, 1994. p. 443–470 (Elsevier Oceanography Series; v. 60).
- BRITO, D. C. **Aplicação do Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2Kw em Grandes Rios: O Caso do Alto e Médio Araguari – AP. Amapá**, 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) - Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2008.
- BRUSH, M. J.; HARRIS, L. A. Introduction to the special issue of Ecological Modelling: “Advances in Modeling Estuarine and Coastal Ecosystems: Approaches, Validation, and Applications”. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 7, p. 965–968, 2010.
- BRUUN, P. Engineering Projects in Coastal Lagoons. In: KJERFVE, B. (Ed.). **Coastal Lagoon Processes**. [S.l.]: Elsevier, 1994. p. 507–533. (Elsevier Oceanography Series; v. 60).
- CANFIELD JR, D. E. et al. Prediction of Chlorophyll a Concentrations in Florida Lakes: Importance of Aquatic Macrophytes. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, [s. l.], v. 41, p. 497–501, 1984.
- CARLONI, F. B. B. A. et al. Mudanças na qualidade da água de uma laguna do leste fluminense, geradas pela abertura permanente de conexão com o mar. **Geochimica Brasiliensis**, v. 24, p. 29–40, 2010.
- CARMOUZE, J.-P. et al. Ecological changes of a shallow brazilian lagoon related to dystrophic crisis. **Verh. Intern. Ver. Limnol**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 1053–1054, 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/03680770.1992.11900321>> Acesso em: Abril 2006
- CARMOUZE, J. P. et al. Benthic influence on the metabolism of a shallow tropical lagoon (Lagoa da Barra, Brazil). **Hydrobiologia**, v. 374, p. 89–100, 1998.
- CARMOUZE, J. P.; KNOPPERS, B.; VASCONCELOS, P. Metabolism of a subtropical Brazilian lagoon. **Biogeochemistry**, v. 14, n. 2, p. 129–148, 1991.
- CARMOUZE, J. P.; SAMPAIO, C. E.; DOMINGOS, P. Évolution des stocks de matière organique et de nutriments dans une lagune tropicale (Brésil) au cours d’une période marquée par une mortalité de poissons. **Rev. Hydrobiol. Trop.**, v. 27, p. 217–234, 1994.
- CHEN, C.-C. et al. Importance of planktonic community respiration on the carbon balance of the East China Sea in summer. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 20, n. 4, p. GB4001, 2006.
- CHEN, C.-C. et al. Effects of the Changjiang (Yangtze) River discharge on planktonic community respiration in the East China Sea. **J. Geophys. Res. Oceans**, v. 114, p. C03005,

2009.

CHEUNG, S. G. Physiological and behavioural responses of the intertidal scavenging gastropod *Nassarius festivus* to salinity changes. **Marine Biology**, v. 129, p. 301–307, 1997.

CHILDERS, D. L. et al. Relating precipitation and water management to nutrient concentrations in the oligotrophic upside-down estuaries of the Florida Everglades. **Limnology and Oceanography**, v. 51, n. 1\_part\_2, p. 602–616, 2006.

COPELAND, G. et al. Water quality in Sepetiba Bay, Brazil. **Marine Environmental Research**, v. 55, n. 5, p. 385–408, 2003.

CRAPEZ, M. A. C.; BISPO, M. G. S.; TOSTA, Z. T. Estudo preliminar da microbiota dos sedimentos da lagoa de Saquarema. **Acta Limnologica Brasiliensis**, v. 1, p. 1–10, 1993.

CUNHA, A. et al. Dam Effect On Stream Reaeration Evaluated With The Qual2kw Model: Case Study Of The Araguari River, Amazon Region, Amapá State/Brazil. In: BILIBIO, C.; HENSEL, O; SELBACH, J. (Ed.). **Sustainable water management in the tropics and subtropics - and case studies in Brazil**. Jaguarão: Fundação Universidade Federal do Pampa, Universität Kassel, PG Cult-Universidade Federal do Maranhão, 2011. p. 153–177.

CUNHA, A. C. B. **Uma Análise do Sistema Lagunar de Araruama – RJ, com Enfoque Hidrodinâmico**. Rio de Janeiro, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CUNHA, L. C.; WASSERMAN, J. C. Relationship between nutrients and macroalgal biomass in a Brazilian Coastal Lagoon: The impact of a lock construction. **Journal of Chemical Ecology**, v. 19, p. 283–298, 2003.

DAGG, M. et al. Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes. **Continental Shelf Research**, [s. l.], v. 24, n. 7, p. 833–858, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434304000329>>. Acesso em: Maio 2017.

DONEKER, R. L.; NASH, J. D.; JIRKA, G. H. Pollutant transport and mixing zone simulation of sediment density currents. **Journal of Hydraulic Engineering-Asce**, v. 130, n. 4, p. 349–359., 2004.

DUXBURY, J.; DICKINSON, S. Principles for sustainable governance of the coastal zone: In the context of coastal disasters. **Ecological economics**, v. 63, p. 319–330, 2007.

DYER, K. R. **Estuaries: a Physical Introduction**. Londres: John Wiley & Sons Ltd, 1973.

ESTEVEZ, F. A.; MEIRELLES-PERIRA, F. Eutrofização Artificial. In: ESTEVES, F. A. (Coord.). **Fundamentos de Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda., 2011. p. 625–655.

FRAGOSO JR, C. R.; FERREIRA, T. F.; MARQUES, D. da M. **Modelagem Ecológica em ecossistemas aquáticos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

GAVA, G. L. **Avaliação De Renovação De Águas Na Lagoa De Araruama – Rj, Via Abertura De Canal Com O Mar No Extremo Oeste**. Rio de Janeiro, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2008.

GHEZZO, M. et al. Changes in Venice Lagoon dynamics due to construction of mobile barriers. **Coastal Engineering**, v. 57, n. 7, p. 694–708, 2010.

GOBBI, M. F.; GOBBI, E. F.; RESKSIDLER, R. Modelagem Matemática. In: ANDREOLI, C. V.; CANEIRO, C. (Eds.). **Gestão Integrada de Mananciais de Abastecimento Eutrofizado**. Curitiba: Editora Gráfica Capital, 2005. p. 191–211.

GOMES, N. F. **Análises de Circulação Hidrodinâmica e de Transporte de Sal em um Estuário Hipersalino: Lagoa de Araruama - RJ**. Rio de Janeiro, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GRÄWE, U.; WOLFF, J.-O.; RIBBE, J. Mixing, hypersalinity and gradients in Hervey Bay, Australia. **Ocean Dynamics**, [s. l.], v. 59, p. 643–658, 2009. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10236-009-0195-4#citeas>>. Acesso em: Maio 2017.

GUERRA, L. V. **Processos microbiológicos e composição da matéria orgânica relacionados à eutrofização de uma lagoa costeira hipersalina, L. Araruama, Rj**. Niterói, 2008. Dissertação (Mestrado em Geociências - Geoquímica Ambiental) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.

HALLEGRAEFF, G. M.; ANDERSON, D. M.; CEMBELLA, A. D. Manual on Harmful Marine Microalgae. In: ENEVOLDSEN, H. O. (Ed.). **Monographs on Oceanographic Methodology**. 11. ed. [S.l.] : UNESCO, 2004. p. 793.

HARARI, J. et al. Modelagem numérica da hidrodinâmica e da dispersão de esgoto na baía de Santos , SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 205–14, 2013.

HEGGIE, D.; SKYRING, G. Flushing of Australian estuaries, coastal lakes and embayments: an overview with biogeochemical commentary. **AGSO J. Aust. Geol. Geophys.**, [s. l.], v. 17, p. 211–226, 1999. Disponível em: <<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84973565270&origin=inward&txGid=e32d00804cce823c475c613e6c9d9cbf>>. Acesso em: Maio 2017.

JONES, J. G. Freshwater Ecosystems – Structure and Response. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 50, p. 107–113, 2001.

KANG, Y.; KOCH, F.; GOBLER, C. J. The interactive roles of nutrient loading and zooplankton grazing in facilitating the expansion of harmful algal blooms caused by the pelagophyte, *Aureoumbra lagunensis*, to the Indian River Lagoon, FL, USA. **Harmful Algae**, v. 49, p. 162–173, 2015.

KJERFVE, B. Comparative Oceanography of Coastal Lagoons. In: WOLFE, D. A. (Ed.).

**Estuarine Variability**. [S.l.]: Elsevier, 1986. p. 63–81.

KJERFVE, B. Costal Lagoons. In: KJERFVE, B. (Ed.). **Costal Lagoon Processes**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1994. p. 1–8.

KJERFVE, B. et al. Hydrology and salt balance in a large hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 42, n. 6, p. 701–725, 1996.

KJERFVE, B.; OLIVEIRA, A. M. Modelling of Circulation and Water Exchange in a Hypersaline Coastal Lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 701–725, 1996.

KNOPPERS, B.; CARMOUZE, J. P.; MOREIRA-TURCQ, P. F. Nutrient dynamics, metabolism and eutrophication of lagoons along the East fluminense coast, State of Rio de Janeiro, Brazil. In: KNOPPERS, B.; BIDONE, E.; ABRAÃO, J. J. (Eds.). **Environmental Geochemistry of Costal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil**. 6. ed. Rio de Janeiro: FINEP, 1999. p. 123–154.

LAVERY, P. S.; LUKATELICH, R. J.; MCCOMB, A. J. Changes in the biomass and species composition of macroalgae in a eutrophic estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 1–22, 1991. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/027277149190067L>>. Acesso em: Maio 2017.

LEAL NETO, A. de C. **A expansão do terminal de contêineres de Sepetiba: uma aplicação da dinâmica de sistemas e considerações ambientais**. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.

LECUYER, C. et al. Water sources, mixing and evaporation in the Akyatan lagoon, Turkey. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 115, p. 200–209, 2003.

LESSA, G. C. Dinâmica De Maré E Transporte De Sedimentos No Canal De Itajuru - Laguna De Araruama ( Rj ). **Revista Brasileira de Geociências**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 378–386, 1991.

LINACRE, E. T. Data-sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 64, p. 237–256, 1993.

LOITZENBAUER, E.; MENDES, C. A. B. A dinâmica da salinidade como uma ferramenta para a gestão integrada de recursos hídricos na zona costeira: uma aplicação à realidade brasileira. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 11, n. 2, p. 233–245, 2011. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/rgci/rgci248.html>>. Acesso em Maio 2017.

LÓPEZ, P. Effect of changes in water salinity on ammonium, calcium, dissolved inorganic carbon and influence on water/sediment dynamics. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 56, n. 5–6, p. 943–956, 2003.

LOURENCO, S. O. et al. Seasonal variations in tissue nitrogen and phosphorus of eight macroalgae from a tropical hypersaline coastal environment. **Cryptogam, Algal**, v. 26, p. 355–371, 2005.

MELLO, T. B. M. **Caracterização Biogeoquímica da Lagoa de Araruama, RJ**. Niterói, 2007. Dissertação (Mestrado em Geociências - Geoquímica Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

MENG, P. J. et al. Relationship between magnitude of phytoplankton blooms and rainfall in a hyper-eutrophic lagoon: A continuous monitoring approach. **Marine Pollution Bulletin**, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.040>>. Acesso em: Maio 2017.

MEULÉ, S. et al. Numerical study of sedimentary impact of a storm on a sand beach simulated by hydrodynamic and sedimentary model. **Oceanologica Acta**, v. 24, n. 5, p. 417–24., 2001.

MILLY, P. C. D. et al. Increasing risk of great floods in a changing climate. **Nature**, v. 415, p. 514–517., 2002.

MIRANDA, L. B. de; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. 47. ed. São Paulo: EdUSP, 2002.

MOORE, N. H.; SLINN, D. J. The physical hydrology of a lagoon system on the Pacific coast of Mexico. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 19, p. 413–426, 1984.

MOREIRA-TURCQ, P. F. Impact of a low salinity year on the metabolism of a hypersaline coastal lagoon ( Brazil ). **Hydrobiologia**, [s. l.], v. 429, p. 133–140, 2000.

MOSS, B. Shallow lakes: biomanipulation and eutrophication. **Scope Newsletter**, v. 29, p. 1–45, 1998.

NEVES, R. J. J. Bidimensional model for residual circulation in coastal zones: application to the Sado estuary. **Annales Geophysicae**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 465–471, 1985.

NEWTON, A. et al. An overview of ecological status, vulnerability and future perspectives of European large shallow, semi-enclosed coastal systems, lagoons and transitional waters. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 140, p. 95–122, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771413002461>>. Acesso em: Maio 2017.

OLIVEIRA, A. M.; KJERFVE, B. Environmental Responses of a Tropical Coastal Lagoon System to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 37, n. 6, p. 575–591, 1993. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771483710747>>. Acesso em: Maio 2017.

PALMER, T. N.; RALSANEN, J. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. **Nature**, [s. l.], v. 415, p. 512–514, 2002.

PHLEGER, F. B. Some Generak Features of Coastal Lagoons. In: AYALA-CASTAÑARES, A. (Ed.). **Coastal Lagoons, a Symposium**. México: Universidad Autónoma de México, 1969. p. 5–26.

PORTO, M. M.; TEIXEIRA, S. G. **Portos e o desenvolvimento**. São Paulo: Lex Editora, 2002.

POWER, S. et al. Robust twenty-first-century projections of El Niño and related precipitation variability. **Nature**, [s. l.], v. 502, p. 541–545, 2013.

PRIMO, P. B. da S.; BIZERRIC, C. S. F. **Lagoa de Araruama - Perfil Ambiental do Maior Ecossistema Lagunar Hipersalino do Mundo**. Rio de Janeiro: Semads - RJ, 2002.

PRITCHARD, D. W. Estuarine Hydrography. In: LANDSBERG, H. E. (Ed.). **Advances in Geophysics**. New York: Academic Press, 1952. v. 1, p. 243–280. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065268708602083>>

RAJAR, R. et al. Three-dimensional modelling of mercury cycling in the Gulf of Trieste. **The Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 260, n. 1–3, p. 109–23, 2000.

RAJAR, R.; CETINA, M.; SIRCA, A. Hydrodynamic and water quality modelling: case studies. **Ecological Modelling**, [s. l.], v. 101, p. 209–28., 1997.

RASMUSSEN, B.; JOSEFSON, A. B. Consistent estimates for the residence time of microtidal estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 54, p. 65–73, 2002.

RICKLEFS, R. E. **A Economia da Natureza**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A, 1993.

ROSAS, C. et al. The effect of dissolved oxygen and salinity on oxygen consumption, ammonia excretion and osmotic pressure of *Penaeus setiferus* Linnaeus juveniles. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, [s. l.], v. 234, p. 41–57, 1999.

ROSMAN, P. C. C. **Modeling Shallow Water Bodies via Filtering Techniques**. Massachusetts, 1987. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Massachusetts Institute of Technology, 1987.

ROSMAN, P. C. C. Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos. In: EIGER, S.; ROSMAN, P. C. C.; ALMEIDA, A. B. (Eds.). **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. p. 231–348.

ROSMAN, P. C. C. Os Modelos para Recursos Hídricos. In: DOS SANTOS, M. A.; MAGRINI, A. (Eds.). **Gestão Ambiental em Recursos Hídricos**. Rio de Janeiro: Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, COPPE/UFRJ, 2001. v.3.

ROSMAN, P. C. C. **Referências Técnicas do SisBaHiA**®. 9. ed. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC - COPPE/UFRJ, 2012. Disponível em: <[http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V9a.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V9a.pdf)>. Acesso em: Maio 2017.

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C. Análise das Trajetórias das Águas Continentais Afluentes ao Sistema Estuarino de. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 21, p. 242–250, 2016.

RYSGAARD, S.; BERG, P. Mineralization in a northeastern Greenland sediment, mathematical modelling, measured sediment porewater profiles and actual activities. **Aquatic Microbial Ecology**, [s. l.], v. 11, p. 297–305, 1996.

SALAMENA, G. G.; MARTINS, F.; RIDD, P. V. The density-driven circulation of the coastal hypersaline system of the Great Barrier Reef, Australia. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 105, n. 1, p. 277–285, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.02.015>>

SANTOS, E. S. dos. **Modelagem Hidrodinâmica E Qualidade Da Água Na Foz Do Rio Araguari-Ap**. Amapá, 2012. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical). Universidade Federal do Amapá. Amapá, 2012.

SCHETINNI, C. A. F. **Determinantes Hidrológicos na Manutenção da Condição Hipersalina da Lagoa de Araruama, RJ**. Niterói, 1994. Dissertação (Mestrado em Geociências - Geoquímica Ambiental) Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1994.

SFRISO, A. et al. Annual variations of nutrients in the Lagoon of Venice. **Marine Pollution Bulletin**, v. 19, n. 2, p. 54–60, 1988. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0025326X88907801>>. Acesso em: Maio 2017.

SHEFFER, M. **Ecology of Shallow Lakes**. London: Springer Netherlands, 2000. v. 22 Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304377000001030>>. Acesso em: Maio 2017.

SHILO, M. Strategies of adaptation to extreme conditions in aquatic microorganisms. **Naturwissenschaften**, [s. l.], v. 67, p. 384–389, 1980.

SHORT, F. T. et al. Evidence for phosphorus limitation in carbonate sediments of the seagrass *Syringodium filiforme*. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 20, p. 419–430, 1985.

SHORT, F. T.; MCROY, C. P. Nitrogen uptake by leaves of the seagrass *Zostera marina*. **L. Bot. Mar**, [s. l.], v. 27, p. 547–555, 1984.

SILVA, K. M. **Distribuição espacial da concentração de nutrientes em sedimentos na laguna hipersalina de Araruama – RJ, para efeito de uma abertura de conexão com o mar**. Niterói, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Biologia Marinha) Instituto de Biologia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2014.

SILVA, K. M. et al. Distribuição espacial da concentração de nutrientes em sedimentos na laguna hipersalina de araruama – rio de janeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, 12., 2015, Poços de Caldas - MG. **Anais... Poços de Caldas - MG: Instituto Federal Sul de Minas, 2015**

SILVA, R. A. G.; ROSMAN, P. C. C. Hydro-Sedimentary viability of a projected tidal inlet on the western side of Araruama Lagoon – RJ. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 21, p. 25–35, 2016.

SMAHA, N.; GOBBI, M. F. Implementação de Um Modelo para Simular a Eutrofização do Reservatório do Passaúna - Curitiba – PR. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 8, n. iii, p. 59–69, 2003.

SMITH, N. P. Water, Salt and Heat Balance of Costal Lagoons. In: KJERFVE, B. (Ed.). **Costal Lagoon Processes**. Amesterdan: Elsevier Science Publishers, 1994. p. 69–100.

SOUZA, M. F. **Distribuição Espacial, Sazonal e Fontes Fluviais de Nutrientes na Lagoa de Araruama - RJ**. Niterói, 1993. Dissertação (Mestrado em Geociências - Geoquímica) Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1993.

SOUZA, M. F. L. et al. Nutrient budgets and trophic state in a hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 57, p. 843–858, 2003.

SOUZA, R. C.; KJERFVE, B. Fundamentos da maré e sua predição. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 20., 1997, Gramado - RS. **Anais...** Gramado - RS: Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computação, 1997.

SOUZA, W. F. L. **Dinâmica de Nutrientes na Laguna Hipersalina de Araruama, Dissertação**. Niterói, 1997. Dissertação (Mestrado em Geociências - Geoquímica Ambiental) Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1997.

STAEHR, P. A. et al. The metabolism of aquatic ecosystems: history, applications, and future challenges. **Aquatic Sciences**, [s. l.], v. 74, p. 15–29., 2012.

STILLER, M.; NISSENBAUM, A. Geochemical investigation of phosphorus and nitrogen in the hypersaline Dead Sea Geochim. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 63, p. 3467–3475, 1999.

SUJITHA, S. B. et al. Spatial variability of inorganic nutrients and physical parameters in the waters of Bahia Magdalena lagoon, Pacific Coast, Mexico. **Acta Ecologica Sinica**, v. 37, n. 3, p. 187–194, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187220321630083X>>. Acessado em: Maio 2017.

TAN, J. et al. Increases in tropical rainfall driven by changes in frequency of organized deep convection. **Nature**, [s. l.], v. 519, p. 451–454, 2015.

TETT, P. et al. Eutrophication and some European waters of restricted exchange. **Continental Shelf Research**, [s. l.], v. 23, n. 17, p. 1635–1671, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434303001663>>

TORRES, R. J. **Uma Análise Preliminar dos Processos de Dragagem do Porto do Rio Grande, RS**. Rio Grande, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2000.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1998.

TUCCI, C. E. M. et al. Simulação de eutrofização em Lagos Rasos: I - Modelo e Precisão Numérica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 12, p. 23–35, 2007a.

TUCCI, C. E. M. et al. Simulação de Eutrofização em Lagos Rasos II : Sistema do Taim (RS). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 12, p. 37–48, 2007b.

TURCQ, B. et al. Origin and Evolution of the Quarternary Costal Plain between Guaratiba and Cabo Frio, State of Rio de Janeiro, Brazil. In: KNOPPERS, B. A.; BIDONE, E.; ABRÃO, J. J. (Eds.). **Enviromental Geochemistry of Costal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil**. 6. ed. Rio de Janeiro: FINEP, 1999. p. 25–46.

VIEIRA, N. P. A. et al. Estimativa da evaporação nos reservatórios de Sobradinho e Três Marias usando diferentes modelos. **Journal of the Brazilian Association Of Agricultura Engineering**, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 433–448, 2016. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162016000300433&lng=pt&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162016000300433&lng=pt&nrm=iso&tlng=en)>

VOLLENWEIDER, R. A. Coastal marine eutrophication: principles and control. In: MARINE COASTAL EUTROPHICATION INTERNATIONAL CONFERENCE, 1992, **Anais...** [s.l: s.n.], 1992.

WANG, Y. et al. Flushing time of solutes and pollutants in the central Great Barrier Reef lagoon, Australia. **Marine And Freshwater Research**, Australia, v. 58, n. 8, p. 778–791, 2007.

WASSERMAN, J. C. et al. The impact of a canal lock upon the water balance and the trophic state of Piratininga Lagoon, State of Rio de Janeiro, Brazil. In: BIDONE, E.; KNOPPERS, B. A.; ABRÃO, J. J. (Eds.). **Enviromental Geochemistry of Costal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil**. Série Geoq ed. Niteroi: EDUFF, 1999. p. 161–169.

WASSERMAN, J. C. **Estudo do Impacto Ambiental da Abertura da Barra da Laguna de Saquarema**. Saquarema: s.n., 2000.

WASSERMAN, J. C. et al. Distribuição do Tempo de Residência de Águas em Ambientes Costeiros como Instrumento de Gestão da Qualidade da Água. In: CONGRESSO AQUACIÊNCIA, 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2006.

WASSERMAN, J. C. **Parecer Sobre Mortandade de Peixes na laguna de Araruama - Eventos Ocorridos em 2009 e 2011**. Niteroi: ProLagos, 2016.

WEBSTER, I. T. The hydrodynamics and salinity regime of a coastal lagoon - The Coorong, Australia - Seasonal to multi-decadal timescales. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 90, n. 4, p. 264–274, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2010.09.007>>

WOLANSKI, E. An evaporation-driven salinity maximum zone in Australian tropical estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 22, n. 4, p. 415–424, 1986.

XAVIER, C. F.; DIAS, L. N.; BRUNKNOW, R. F. Eutrofização. In: **Gestão Integrada de**

**Mananciais de Abastecimento Eutrofizado.** Curitiba: Ed.Gráf. Captial Ltda, 2005. p. 273–299.