

---

## Viabilidade hidro-sedimentológica de um canal de maré projetado no oeste da Lagoa de Araruama – RJ

*Hydro-Sedimentary viability of a projected tidal inlet on the western side of Araruama Lagoon– RJ*

Rodrigo Amado Garcia Silva<sup>1</sup> e Paulo Cesar Colonna Rosman<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

rodrigoamado@oceanica.ufrj.br; pccrosman@ufrj.br

Recebido: 07/04/15 - Revisado: 11/08/15 - Aceito: 16/10/15

---

### RESUMO

A Lagoa de Araruama, maior laguna hipersalina do Brasil, é um importante sistema estuarino situado na Região dos Lagos, sudeste do estado do Rio de Janeiro. A lagoa tem forma oblonga, estendendo-se por cerca de 40 km de oeste a leste em seu eixo maior. Por apresentar um balanço hídrico negativo e apenas uma ligação com o mar, através do longo Canal de Itajuru em sua extremidade leste, a laguna apresenta pouquíssima renovação de águas, o que a torna naturalmente propensa a eutrofização. A criação de uma nova conexão com o mar em sua extremidade oeste tiraria proveito dos ventos reinantes de ENE, criando uma deriva de leste para oeste que promoveria maior renovação das águas e, conseqüentemente, melhora da qualidade ambiental do corpo hídrico. Este artigo analisa a viabilidade hidro-sedimentológica de tal canal através de modelos computacionais. Inicialmente discute-se o dimensionamento de um canal estável, com análise baseada em critérios bem estabelecidos para estabilidade de canais de maré, com modelagem computacional 1D específica ao caso. Posteriormente, via modelagem hidro-sedimentológica 2DH, analisa-se a evolução morfodinâmica da Lagoa de Araruama, canais de ligação com o mar e região marítima próxima, considerando a situação projetada. Após 365 dias, as alterações batimétricas observadas na maior parte da laguna foram muito pequenas. O canal idealizado permaneceu desobstruído durante todo o tempo.

**Palavras Chave:** Estabilidade de Canais de Maré. Modelagem hidro-sedimentológica. Lagoa de Araruama.

### ABSTRACT

The Araruama Lagoon, Brazil's largest hypersaline lagoon, is an important estuarine system located in the southeast of the state of Rio de Janeiro. This lagoon is oblong-shaped and extends for circa 40 km from west to east at its longest axis. Since it has a negative water balance and only one connection with the open sea, through the long Itajuru Channel, there is very little water renewal, which causes a natural tendency to eutrophication. Creating a new maritime connection on the western side of the Lagoon would take advantage of the very frequent ENE winds, generating a drift from east to west that would increase water renewal and, consequently, enhance the quality of the environment. This paper analyses the hydro-sedimentological viability of this tidal inlet using computer models. Initially the sizing of a stable inlet is discussed considering an analysis based on well established criteria of stability of tidal inlets and with 1D computational modeling. Afterward, through 2DH hydro-sedimentological modeling, the morphodynamic evolution of the lagoon, its tidal inlets and adjacent maritime region, are analyzed considering the projected situation. The inlet considered changed very little in the lagoon's bathymetry and remained unobstructed during the 365 days of simulation.

**Keywords:** Stability of Tidal Inlets. Hydrosedimentary Modeling. Araruama Lagoon.

## INTRODUÇÃO

A Lagoa de Araruama, maior laguna hipersalina do Brasil, é um importante sistema estuarino situado no sudeste do estado do Rio de Janeiro, localizado entre as latitudes de 22°49' e 22°57' S e longitudes 42°00' e 42°30' W. A geometria deste corpo d'água é bastante complexa, havendo um número significativo de enseadas e pontais de areia que, em sua maioria, se estendem na direção noroeste – sudeste.

Apesar do nome, esta laguna é na verdade um sistema lagunar, com aproximadamente 200 km<sup>2</sup> de espelho d'água, 40 km de extensão no sentido leste-oeste, largura máxima de 13 km, perímetro de 190 km e volume de 618 milhões de m<sup>3</sup> (KJERFVE et al., 1996). A profundidade máxima está em torno 10 m, enquanto a média é próxima de 3 m. A única conexão com o Oceano Atlântico é feita através do Canal de Itajuru, situado no extremo leste da laguna, no município de Cabo Frio. Este canal tem cerca de 5 km de comprimento e largura de seção transversal variando entre 60 m a 350 m, com média em torno de 120 m. A profundidade média é inferior a 3 m, com máximo de 7 m.

O clima semiárido regional confere ao sistema lagunar um balanço hídrico fortemente negativo, acarretando na hipersalinidade. Desta maneira, exceto em épocas de grandes chuvas, a renovação de águas é irrelevante, tornando este um ambiente acumulador por natureza.

As belas praias deste trecho do litoral fluminense, conhecido como Região dos Lagos, atraem uma população significativa. A ocupação desordenada do território trouxe, ao longo do tempo, consequências ruins à Lagoa de Araruama. Segundo Bidegain e Bizerril (2002), durante décadas este corpo d'água depurou toneladas de esgoto sem qualquer tratamento prévio. Desta maneira, episódios de eutrofização sempre foram frequentes.

Segundo as companhias de saneamento que atendem os municípios do entorno da Lagoa, o esgoto coletado nas re-

sidências é tratado antes de ser lançado na laguna (ÁGUAS DE JUTURNAÍBA, 2015; PROLAGOS, 2015). Parte deste esgoto recebe tratamento terciário. 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). A região apresenta uma população fixa próxima de 400 mil habitantes, que se multiplica por cinco em épocas de veraneio, de acordo com Prolagos (2015).

Apesar dos progressos alcançados em termos de saneamento, a Lagoa de Araruama se encontra atualmente em estado hipertrófico. Assim como outros autores, Guerra (2008) afirma que em meados de 2005 este sistema lagunar deixou de ser um ambiente com características mesotróficas, passando para o estado trófico atual e não mais retornando à situação anterior. O acúmulo de nutrientes se dá em função de este corpo hídrico ser um sistema naturalmente acumulador. Tanto os nutrientes de origem natural, quanto os provenientes de esgoto tratado ou não, tendem a acumular no interior da Lagoa por conta do balanço hídrico negativo, mesma razão pela qual o sal se acumula. Nos últimos dez anos algumas intervenções foram realizadas na região do Canal de Itajuru para aumentar as trocas de água com o mar (GELELETE, 2012; ROSMAN, 2005). No entanto, estas intervenções não alteraram de maneira significativa a dinâmica das regiões central e oeste da laguna.

### Abertura de um Novo Canal de Maré

Uma forma de intensificar a renovação de águas e a circulação hidrodinâmica em toda a Lagoa de Araruama seria a abertura de um canal em sua porção oeste, formando uma nova e permanente conexão com o mar. A figura 1 mostra um mapa batimétrico da Lagoa, considerando a construção de tal canal. O local escolhido, mostrado na figura 2, é aquele que promoveria o melhor resultado em termos de renovação de águas, uma vez que os ventos dominantes da região, vindos de

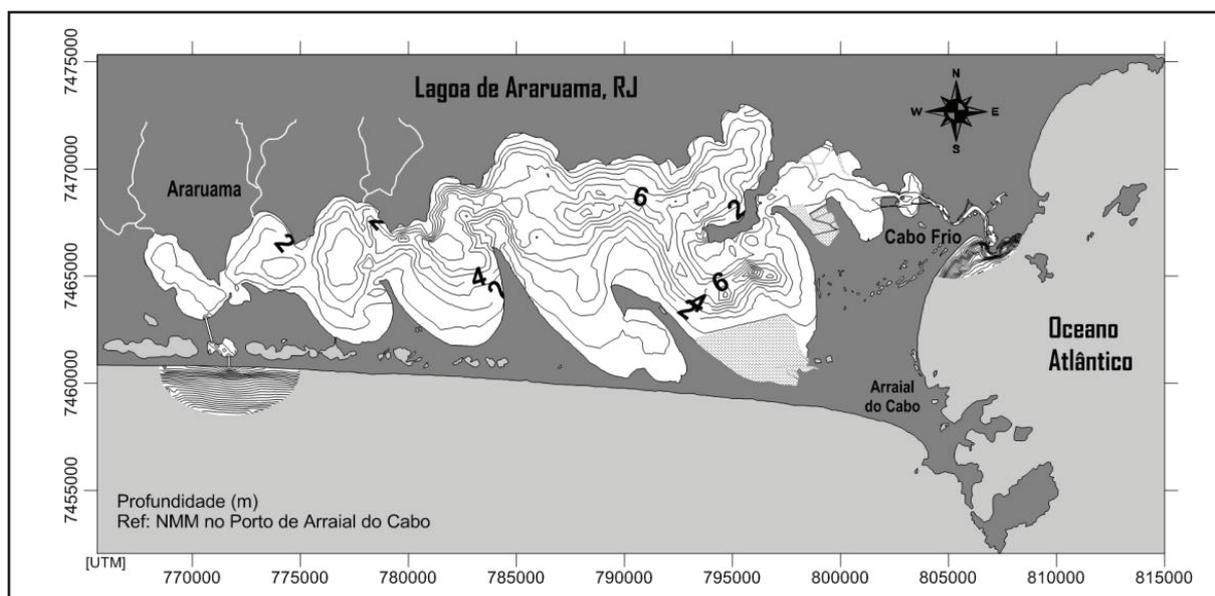
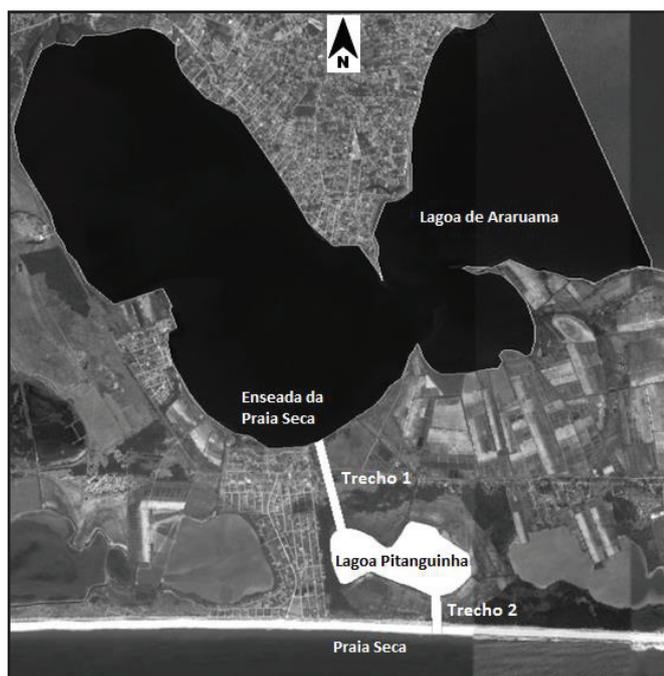


Figura 1 - Lagoa de Araruama com canal de maré em seu extremo oeste. A batimetria mostrada foi obtida, em sua maioria, de uma compilação de dados medidos em 2005, 2006 e 2009



**Figura 2 - Esquema do Canal Oeste (em branco) idealizado para conectar ao mar o lado oeste da Lagoa de Araruama (em preto). (Modificado do Google Earth)**

leste-nordeste, causam uma deriva no sentido oeste, empilhando água na região da Enseada da Praia Seca (GAVA, 2008). Seria criada uma circulação persistente de leste para oeste, havendo mais entrada do que saída de água através do Canal de Itajuru e mais saída de água do que entrada pelo canal do lado oeste.

Na região escolhida há a possibilidade de utilizar como ligação uma pequena lagoa costeira, conhecida como Lagoa Pitanguinha. Na figura 2 se observa ainda um esquema idealizado desta ligação com o mar, composta pela Lagoa Pitanguinha, no centro, e por dois canais que a conectariam à Lagoa de Araruama, ao norte, e ao mar, ao sul. A embocadura lagunar se situaria na região conhecida como Enseada de Praia Seca, enquanto a embocadura marítima se situaria na Praia Seca. Este artigo usará a denominação Canal Oeste para este sistema esquematizado na figura 2. Os trechos retificados deste canal serão referidos como trecho 1 e trecho 2. Como se pode ver, atualmente não há ocupação no local.

A configuração sugerida para o Canal Oeste propiciaria também renovação das águas e intensificação da circulação na Lagoa Pitanguinha, que hoje é um corpo d'água estagnado, cercado por salinas e segmentado por vários marnéis (BIDEGAIN; BIZERRIL, 2002). As mudanças tornariam este ambiente mais agradável do ponto de vista cênico, podendo vir a tornar-se área de lazer.

Gava (2008) estudou, através de modelagem computacional, as alterações que ocorreriam na hidrodinâmica e renovação de águas da Lagoa de Araruama com a implantação do Canal Oeste. Segundo o autor, a troca de massas d'água e a diluição aumentaram significativamente em toda a Lagoa no cenário considerado. As correntes na porção oeste se mostraram bastante amplificadas em relação àquelas observadas no cenário atual. O nível médio nas diferentes regiões da laguna

variou poucos centímetros, sendo que na extremidade oeste, por conta do novo canal propiciar saída para o mar, a sobrelevação de vento diminuiu até 0,1m.

### Estabilidade hidro-sedimentológica de canais de maré

Um canal de maré (CM) é dito hidro-sedimentologicamente estável se os fluxos de maré enchente e vazante são capazes de expelir o excesso de sedimentos depositados em seu leito, mantendo-o naturalmente desobstruído e com suas características morfológicas variando pouco em torno de uma geometria média.

A estabilidade de um CM depende do balanço entre forças provocadas por agentes desestabilizadores, que propiciam o acúmulo de sedimentos na embocadura do canal e seu consequente fechamento, e forças provocadas por agentes estabilizadores, que propiciam a mobilização dos sedimentos e que fazem com que estes sejam expelidos para o mar ou para o interior da lagoa, mantendo assim o canal aberto. Os agentes estabilizadores são: as velocidades das correntes de maré no canal e o volume de água a ser escoado a cada ciclo de maré. Como agentes desestabilizadores, destacam-se os processos sedimentológicos, que estão diretamente ligados à geometria da calha do canal e à taxa de transporte de sedimentos.

Uma maneira de analisar as condições de estabilidade de um CM é o uso associado de critérios empíricos, que representam relações entre os agentes citados acima. Os seguintes critérios são de especial interesse para este trabalho:

- Relação entre Velocidade Média Máxima e Área da Menor Seção Transversal do Canal (ESCOFFIER, 1940);
- Relação entre Capacidade de Resposta e Área da Menor Seção Transversal do Canal. (SKOU, 1990).

Estas relações usam as seguintes definições:

Área da Menor Seção Transversal do Canal ( $A_c$ ): é a área hidráulica relativa ao nível médio do mar da menor seção transversal na zona da embocadura do CM;

Velocidade Média Máxima ( $V_{máx}$ ): é o máximo valor da velocidade média em  $A_c$ ;

Capacidade de Resposta ( $C_r$ ): é uma função que exprime a taxa de variação de agentes restauradores da estabilidade em razão da ocorrência de eventos desestabilizadores.

A função Capacidade de Resposta pode ser expressa pelo negativo da taxa de variação de  $V_{máx}$  em relação a  $A_c$ , como expresso pela equação 1:

$$C_r = -\frac{\partial V_{máx}}{\partial A_c} \quad (1)$$

Bruun e Gerritsen (1960), O'Brien e Dean (1972) e Bruun (1978) também desenvolveram critérios empíricos de

estabilidade, levando em conta o prisma de maré no corpo d'água interior conectado ao mar e o valor do transporte litorâneo total de sedimentos ao longo do litoral adjacente à embocadura do canal.

O critério de Escoffier (1940) considera o efeito dos agentes desestabilizadores, através das variações da área da menor seção transversal, e o efeito dos agentes estabilizantes, através da velocidade média máxima nesta seção. A metodologia consiste em uma análise empírica do comportamento de  $V_{m\acute{a}x}$  em função  $A_c$ . Para valores de  $A_c$  menores que um valor crítico,  $A_{c^*}$ , o canal tenderá a ser assoreado, até ter sua embocadura bloqueada por completo. Para valores de  $A_c > A_{c^*}$ , a ação de agentes desestabilizadores tende a ser compensada pela ação de um agente estabilizante. No caso de eventos desestabilizadores, tais como grandes ressacas, causarem a deposição de sedimentos no canal, diminuindo a área de sua seção transversal, há tendência para incremento na velocidade média máxima, aumentando a capacidade de remover o sedimento depositado. Deste modo, a geometria do canal tende a variar em torno de uma situação de equilíbrio  $A_c$ .

O critério de Skou (1990) considera o comportamento da função  $C_r$  em relação à variação de  $A_c$ . Este método busca identificar o valor de  $A_c$  no qual a capacidade de resposta  $C_r$  tem seu valor máximo. Em outras palavras, busca-se o valor de área no qual a ação dos agentes desestabilizadores, que mudam  $A_c$ , causaria a máxima resposta dos agentes estabilizadores, que mudam  $V_{m\acute{a}x}$ , implicando em retorno mais rápido ao equilíbrio. Este método é considerado o mais rigoroso para a análise de estabilidade de canais de maré, pois exige não apenas que a área da menor seção transversal seja maior que a área limite  $A_{c^*}$ , mas também que a resposta a um evento desestabilizador seja máxima.

Na natureza, o valor de  $A_c$  varia por conta de eventos que causam erosão ou deposição de sedimentos no canal. Estes eventos podem ocorrer em função dos seguintes fatores: o aporte de sedimentos causado pelo transporte litorâneo gerado na zona de arrebentação das ondas, vazões líquidas e sólidas de origem continental, magnitude das correntes de maré no canal que podem variar em função das fases da maré e das características morfológicas do corpo d'água interior. Desta maneira, ao considerar a variação de  $A_c$ , os critérios de Escoffier (1940) e Skou (1990) incorporam a influência de todos estes fatores. É um engano comum, se entender que, por não estarem explicitamente destacados, efeitos de ondas na zona costeira adjacente sejam desconsiderados em tais critérios.

Os métodos apresentados acima são citados com frequência em estudos recentes, como por exemplo: Stive et al. (2010), Tung et al. (2009) e Tung et al. (2012), dentre outros. Uma descrição sobre o emprego destas relações é destacada no Coastal Engineering Manual (USACE, 2012).

A viabilidade de um dado CM ser estável depende ainda de ocorrerem com frequência suficiente marés que gerem escoamentos no canal com  $V_{m\acute{a}x}$  maior ou igual ao mínimo necessário, condizente com o valor de  $A_c$  estabelecido (O'BRIEN; DEAN, 1972). Pinto (1999), Rosman, Filho e Neves (1992) e Silva (2013) exemplificam em detalhes esta análise de viabilidade, bem como o uso associado dos critérios empíricos descritos acima.

## OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade de um canal de maré que possa ser implantado no oeste da Lagoa de Araruama. Um canal estável em termos hidro-sedimentológicos foi dimensionado, de forma que não fossem necessárias dragagens ou outras intervenções deste tipo para que sua calha permanecesse desobstruída. O dimensionamento deste CM baseou-se em critérios de estabilidade comprovados e teve auxílio de modelagem computacional específica ao caso. Posteriormente, realizou-se uma modelagem morfodinâmica de toda a Lagoa de Araruama, a fim de avaliar as alterações batimétricas que ocorreriam neste sistema lagunar devido à nova conexão marítima. A análise dos resultados foca na região do Canal Oeste, onde houve as alterações batimétricas mais relevantes. Apesar de o propósito deste CM ser o aumento da circulação e renovação de águas da Lagoa, aspectos relativos à qualidade de água fogem do escopo deste trabalho.

## METODOLOGIA

A primeira e principal etapa deste estudo diz respeito ao dimensionamento do Canal Oeste. Nesta etapa foram analisadas suas condições de estabilidade, utilizando as relações [ $V_{m\acute{a}x}$  versus  $A_c$ ] (ESCOFFIER, 1940) e [ $C_r$  versus  $A_c$ ] (SKOU, 1990), com suporte do modelo computacional M1DAC8. Este modelo, específico para este tipo de estudo, foi desenvolvido e é devidamente fundamentado por Pinto (1999). O programa resolveu a hidrodinâmica na Lagoa de Araruama e seus canais marítimos em termos de velocidades e níveis médios. A partir dos resultados desta modelagem, levando em conta as características da maré na região, pôde-se analisar a viabilidade do Canal Oeste, definindo a área hidráulica ótima para os seus trechos retificados (trechos 1 e 2).

Tendo sido definida a geometria do CM estudado, utilizou-se modelos do SisBaHiA<sup>®</sup> para simular a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em toda a Lagoa de Araruama, incluindo seus canais marítimos e a região costeira adjacente aos mesmos. Fundamentação teórica sobre o SisBaHiA<sup>®</sup> está descrita em sua referência técnica, disponível em [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br). As simulações realizadas utilizaram um modelo morfodinâmico sujeito à ação de ondas locais geradas por vento, o que implica em três modelos diferentes interagindo entre si e, por isso, rodando acoplados: um modelo hidrodinâmico, um modelo de transporte de sedimentos e um modelo de geração de ondas.

### 1ª Etapa – DIMENSIONAMENTO DE UM CANAL ESTÁVEL

O interesse principal nas simulações feitas nesta etapa está em saber como se comporta a velocidade média máxima na menor seção transversal do Canal Oeste para um determinado valor de sua área hidráulica e para diferentes amplitudes de maré. Quanto maior a amplitude da maré, maior é o valor da velocidade média máxima na seção. Em várias simulações no

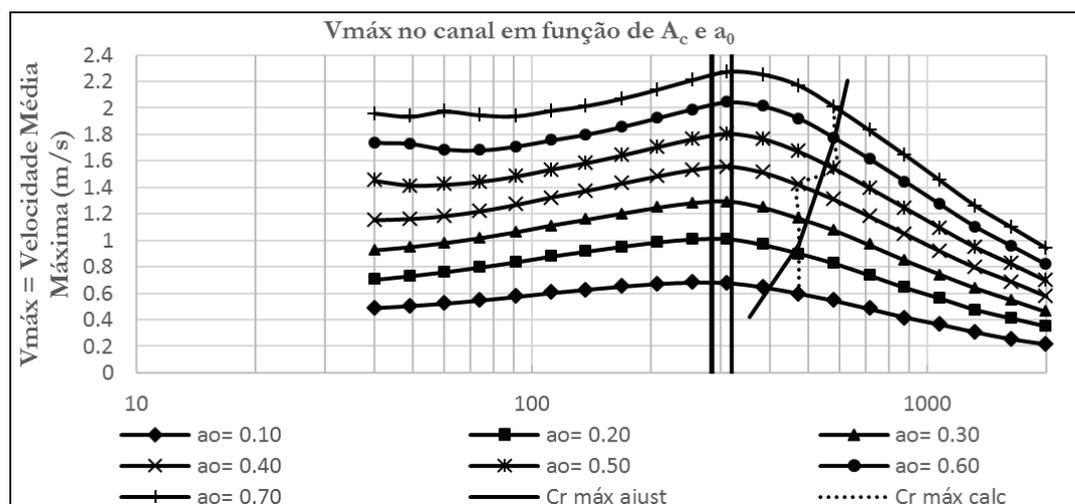


Figura 3 - Gráfico de  $V_{máx}$  em função de  $A_c$  no Canal Oeste. As curvas são referentes a marés que variam de 0,10 a 0,70 m de amplitude. De acordo com o critério de Escoffier (1940), o canal é instável para áreas de seção hidráulica menores que 280 m<sup>2</sup>, e estável para áreas maiores que 320 m<sup>2</sup>. Entre estes valores pode ocorrer estabilidade ou instabilidade. As curvas pontilhadas indicam valores calculados e ajustado de  $Cr_{máx}$

tempo, o programa calculou valores de velocidade para diversas seções transversais igualmente espaçadas no domínio de modelagem. O programa simulou várias situações para as seções transversais do Canal Oeste, variando o valor das áreas dentro de uma faixa de valores definida, variando também a amplitude da maré dentro de um intervalo definido. O objetivo foi gerar o diagrama [ $V_{máx}$  versus  $A_c$ ] mostrado na figura 3. Cada ponto deste gráfico é resultado de uma simulação, considerando um mesmo valor de área para todas as seções que compõem o canal e um valor de amplitude para uma maré senoidal. O modelo simulou várias vezes o escoamento na Lagoa, com as áreas das seções hidráulicas do Canal Oeste variando de 40 a 2000 m<sup>2</sup>, e amplitudes de maré variando entre 0,10 m e 0,70 m.

As simulações correram por um período de três dias, suficiente para equilíbrio hidrodinâmico. O tempo necessário para o aquecimento do modelo é menor que dois dias.

#### Discretização unidimensional

Para as simulações com o modelo M1DAC8, toda a região modelada foi discretizada por meio de 258 seções transversais espaçadas igualmente de 200 m e distribuídas ao longo de um eixo de 51 km de comprimento. Esta discretização, mostrada na figura 4, compreende toda a Lagoa de Araruama, seus canais de maré e a região marítima próxima aos mesmos. A área hidráulica de cada seção foi aproximada pela área de um trapézio. A figura 5 exhibe em detalhe a discretização adotada na região de maior interesse.

#### Batimetria

A batimetria utilizada (Figura 1) consistiu numa compilação de dados medidos em campanhas da Universidade Federal Fluminense – UFF, em 2005, e da Superintendência Estadual de Rios e Lagoas – SERLA, em 2006, bem como de um pro-

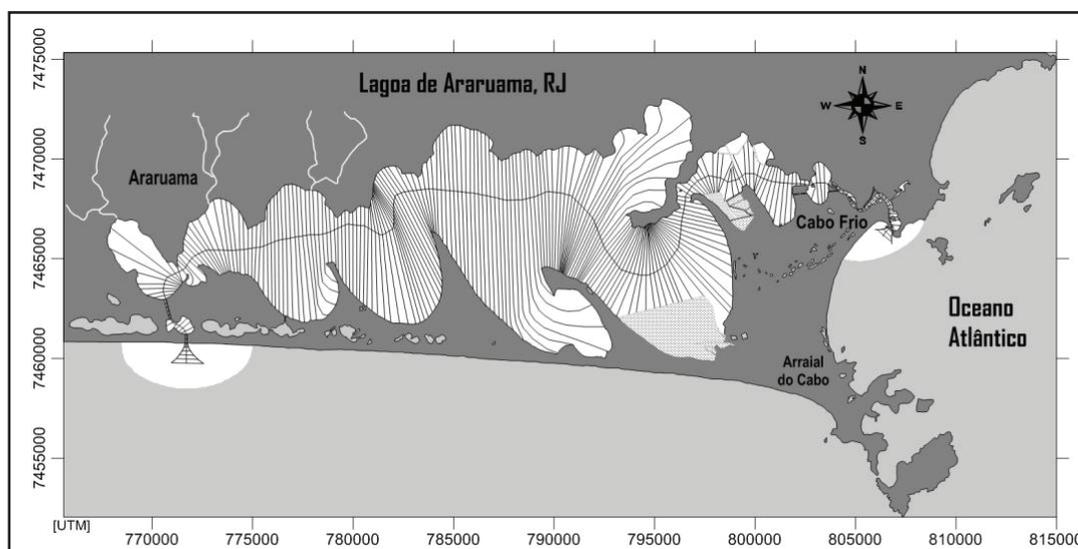


Figura 4 - Discretização unidimensional da região modelada para a primeira etapa do estudo. O modelo M1DAC8 considerou 258 seções transversais espaçadas igualmente de 200 m e distribuídas ao longo de um eixo de 51 km de comprimento

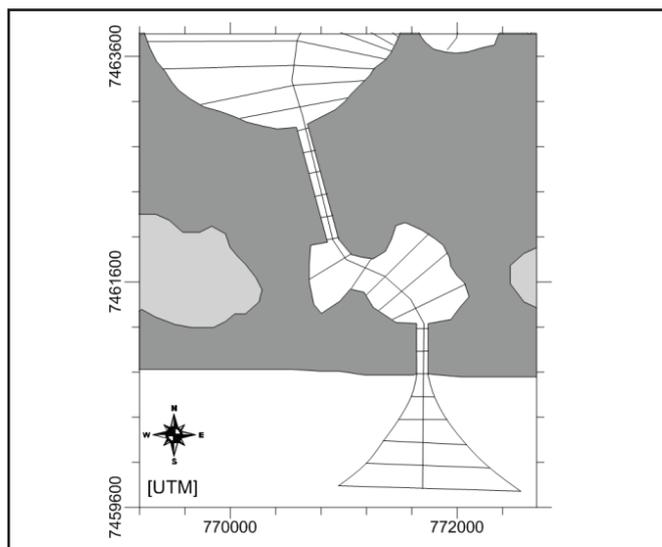


Figura 5- Vista em detalhe da discretização do Canal Oeste

jiato de dragagem realizado pela SERLA, em 2009, próximo ao Canal de Itajuru. As cotas batimétricas das regiões marítimas foram obtidas de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) – Marinha do Brasil. A batimetria da Lagoa Pitanguinha foi inferida com base em imagens do Google Earth.

### Amplitude da Rugosidade do Fundo

Adotou-se o valor de rugosidade do fundo  $\epsilon = 0,03$  m para todas as seções, dado que para este tipo de simulação o valor recomendado para leito de areia varia entre 0,01 e 0,05 m, como indica Pinto (1999). O cálculo da tensão no fundo utiliza um coeficiente de atrito dinâmico, que varia com a profundidade instantânea e a rugosidade do fundo em cada local.

### Maré

Seguindo o procedimento usual para este tipo de análise, as oscilações do nível d’água nas fronteiras abertas do modelo (primeira e última seção transversal) foram dadas em função de uma maré senoidal semidiurna, uma vez que a componente M2, semidiurna, é a componente harmônica que domina a maré na região. Destaca-se que na modelagem final adotou-se maré real. Cada rodada do modelo considerou uma maré senoidal com uma amplitude definida. Para um mesmo valor de área hidráulica do Canal Oeste realizou-se sete simulações, considerando marés com amplitudes entre 0,10 e 0,70 m, com uma diferença de fase de 3,5 minutos entre as embocaduras do Canal Oeste e do Canal de Itajuru. Essa diferença de fase foi estimada considerando a velocidade de propagação da onda de maré entre estes dois canais, estimada com base na diferença de fase da constante M2 das estações maregráficas de Arraial do Cabo e de Ponta Negra. As amplitudes de maré na região raramente apresentam amplitudes maiores que 0,70 m. Lembrando que a amplitude de maré é definida como a diferença entre o nível de uma preamar e o nível médio, ou entre o nível de baixa-mar e o nível médio.

Todos os dados utilizados nas modelagens são referidos ao Nível Médio do Mar (NMM) no Porto do Forno, em Arraial do Cabo. O NMM nas embocaduras do Canal de Itajuru e do Canal Oeste é suposto o mesmo.

### Resultados da 1ª etapa – Condições de Estabilidade e Viabilidade

Os resultados da simulação realizada nesta etapa permitiram a construção do gráfico da figura 3, que mostra as curvas  $[V_{m\acute{a}x} \text{ versus } A_c]$  para várias amplitudes de marés. Os dados mostrados neste gráfico são referentes à seção transversal situada na região mediana do canal que liga a Lagoa Pitanguinha ao mar (trecho 2 da Figura 2). De acordo com o critério de Escoffier (1940), o Canal Oeste é instável para áreas hidráulicas menores que  $280 \text{ m}^2$ . Isto significa que um canal com esta seção hidráulica tenderá, muito provavelmente, a ser assoreado ao longo do tempo. Da mesma maneira, a estabilidade ocorre para seções transversais maiores que  $330 \text{ m}^2$ . Na faixa entre  $280 \text{ m}^2$  e  $330 \text{ m}^2$  pode ocorrer instabilidade ou estabilidade, dependendo das condições de maré. As linhas pontilhadas no gráfico ligam os pontos de máxima capacidade de resposta, que ocorre na área  $473 \text{ m}^2$  para as curvas das quatro marés mais baixas e na área  $581 \text{ m}^2$  para as curvas das três marés mais altas. A curva contínua, sem pontos, representa um ajuste da curva de Máxima Capacidade de Resposta calculada.

A figura 6 mostra a frequência acumulada das amplitudes de maré que ocorrem no Porto do Forno. O percentual de excedência representa o percentual de tempo em que ocorrem marés com amplitude maior ou igual à mostrada. Por este gráfico, percebe-se que a maré apresenta amplitude maior que 0,10 m em mais de 95 % do tempo, enquanto amplitudes maiores que 0,50 m ocorrem em menos de 5 % do tempo.

A observação conjunta das figuras 3 e 6 permite construir o gráfico da figura 7, que mostra o percentual de ocorrência de amplitudes de maré que satisfazem as condições de estabilidade dos critérios utilizados. Decidiu-se escolher um valor de  $A_c$  que satisfizesse em 100% do tempo o critério da Máxima Capacidade de Resposta (SKOU, 1990). Desta maneira,  $350 \text{ m}^2$  é um valor que atende a esta condição e também ao critério de Escoffier (1940). Um canal com seção transversal de  $350 \text{ m}^2$  é viável, portanto, considerando os dois critérios utilizados. Este foi então definido como o valor da área hidráulica dos trechos 1 e 2 do Canal Oeste para a simulação seguinte.

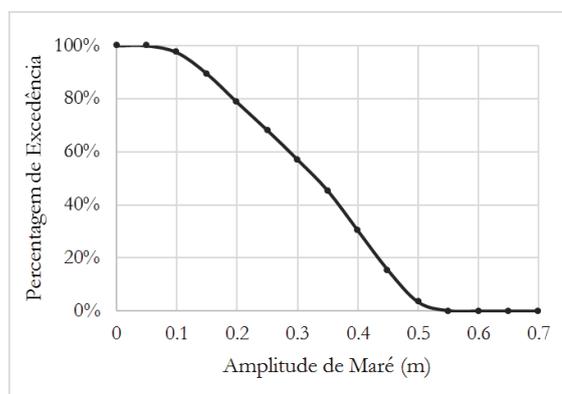


Figura 6 - Gráfico de frequência acumulada de ocorrência de amplitudes de maré. Dados obtidos de uma maré sintética gerada pelo SisBaHiA® para o intervalo de um ano. Maré característica do Porto do Forno – Arraial do Cabo

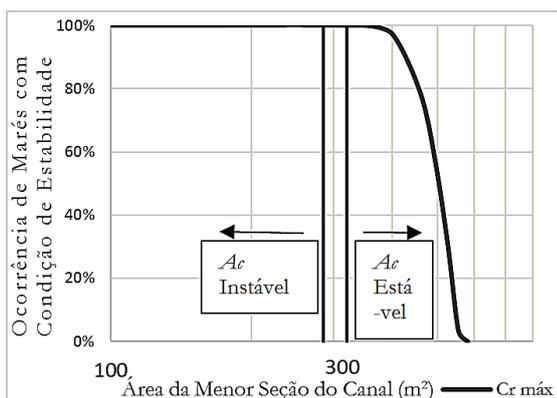


Figura 7 - Diagrama de porcentagem de ocorrência de marés com condição de estabilidade para diferentes valores de área do Canal Oeste. Gráfico utilizado para a análise da viabilidade do canal

## 2ª ETAPA – MODELAGEM MORFODINÂMICA DA LAGOA DE ARARUAMA

A modelagem feita com o SisBaHiA<sup>®</sup> simulou a hidrodinâmica, geração de ondas, e a dinâmica sedimentológica de toda a Lagoa de Araruama ao longo de doze meses. O objetivo foi observar a evolução morfológica do corpo d'água, com foco na região do Canal Oeste. Os trechos 1 e 2 tem seção hidráulica retangular de 350 m<sup>2</sup>, com 3,5 m de profundidade por 100 m de largura, buscando respeitar a relação entre profundidade e largura mostrada na figura 8. Esta relação foi obtida por Mehta (1976), por meio de observações de campo para uma variedade de canais de maré estáveis, e confirmada por modelos de laboratório. O trecho 1 apresenta 1060 m de comprimento, enquanto o trecho 2 tem um comprimento próximo de 450 m.

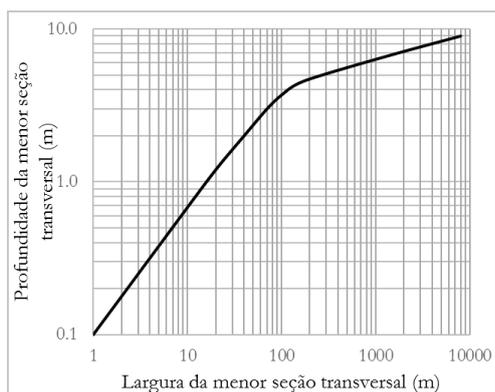


Figura 8 - Relação entre largura e profundidade da menor seção transversal para canais de maré. Os valores no gráfico são referentes ao NMM

Fonte: Modificado de Mehta (1976)

### Malha de Elementos Finitos Quadrangulares

A malha utilizada é composta de 1274 elementos finitos quadrangulares biquadráticos e 5833 nós de cálculo. Toda a área da Lagoa, dos Canais Oeste e de Itajuru e das regiões marítimas próximas estão contidas na malha, como se observa na figura 9. A figura 10 mostra em detalhes a discretização espacial na

região do Canal Oeste.

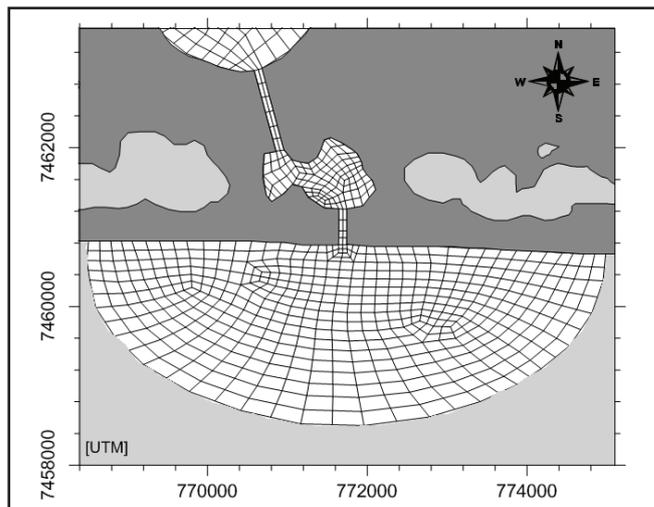


Figura 10 - Visualização em detalhes da malha de elementos finitos na região do Canal Oeste

### Maré

Os níveis d'água utilizados como condição de contorno nas fronteiras abertas da malha foram dados em função das constituintes harmônicas características da maré na região, obtidas da Fundação de Estudos do Mar – FEMAR, referentes à Estação Maregráfica Arraial do Cabo, situada no Porto do Forno. A figura 11 mostra a oscilação da maré ao longo do primeiro mês da simulação.

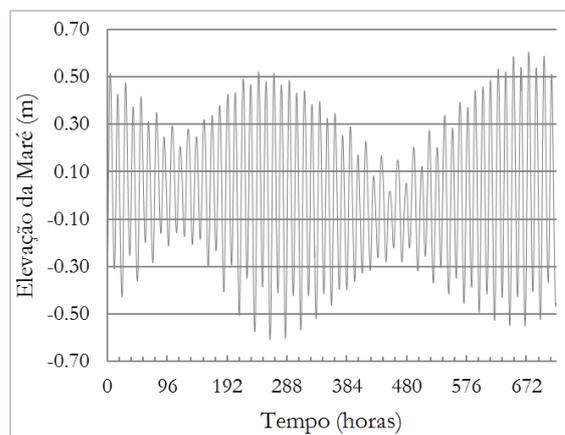


Figura 11 - Maré na fronteira aberta para o primeiro mês de simulação. O nível médio (0.0 m) é o NMM no Porto do Forno, em Arraial do Cabo

### Ventos

A série temporal de direção e intensidade de ventos utilizada neste estudo é parte de uma base de dados medidos durante um período de 21 anos (de 12/07/76 a 22/07/97) na estação meteorológica 83759, situada em São Pedro D'Aldeia. A figura 12 ilustra o comportamento do vento, que sopra predominantemente de leste-nordeste. A série utilizada no modelo, com dados espaçados de uma hora, contempla ventos característicos do ano de 1996.

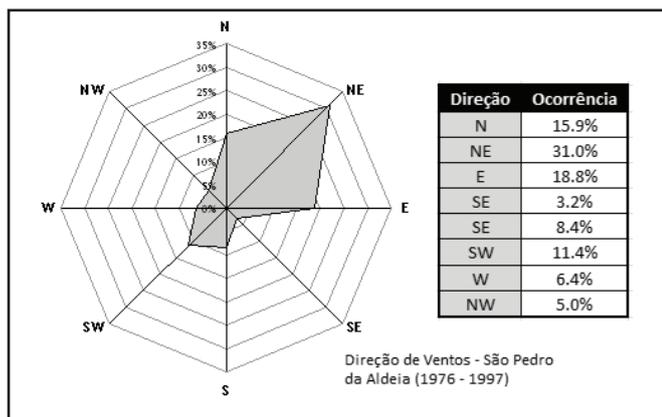


Figura 12 - Estatística de direção de ventos medidos na estação meteorológica da Base Aérea Naval de São Pedro da Aldeia (Fonte: VALENTINI et al., 2002)

### Distribuição Espacial do Sedimento de Fundo

A distribuição do sedimento de fundo procurou reproduzir os levantamentos feitos por Lessa (1990), bem como as medições da Companhia de Pesquisa de Recurso Mineral - CPRM, realizadas em 1984 e sintetizadas em Bidegain e Bizerril (2002). No Canal de Itajuru o diâmetro mediano do sedimento variou entre 0,062 mm e 0,5 mm. No interior da Lagoa de Araruama, no Canal Oeste e nas regiões marítimas adotou-se sedimento com diâmetro mediano de 0,25 mm.

### Amplitude da Rugosidade do Fundo

Foi adotado para quase todo o domínio de modelagem valores de  $\epsilon$  entre 0,01 e 0,03 m, exceto no trecho do canal de Itajuru mais próximo à sua embocadura, onde a amplitude da rugosidade variou entre 0,05 e 0,13 m por conta do fundo rochoso. O cálculo da tensão no fundo é feito da mesma maneira descrita para o modelo utilizado na primeira etapa.

### Resultados da 2ª etapa

Após simular com o SisBaHiA® doze meses da dinâmica hidro-sedimentológica de toda a Lagoa de Araruama, não houve pontos de assoreamento ou erosão maiores que 1 cm nas regiões afastadas dos canais marítimos. Foram observadas maiores alterações de batimetria apenas nos canais de maré e proximidades.

No Canal de Itajuru observou-se pontos de erosão de até 3,20 m e assoreamento de até 1,30 m. Esta expressiva acomodação do leito pode ser atribuída ao fato de a batimetria utilizada para este trecho ser de um período anterior à dragagem realizada em 2009 nas proximidades deste canal. Não se dispunha, no entanto, de dados batimétricos mais atuais deste trecho. Os resultados observados para o Canal de Itajuru são bastante similares aos obtidos por Sigaúque (2013), que modelou a Lagoa sem o Canal Oeste e utilizou os mesmos dados. Desta maneira, pode-se concluir que o Canal Oeste não afetou a dinâmica de sedimentos nas porções central e leste da laguna e no Canal de Itajuru.

A figura 13 mostra a variação da batimetria após 12 meses no Canal Oeste, além da localização de quatro estações nas quais se acompanhou a evolução morfológica do fundo.

Observando a figura 14, que mostra a variação batimétrica no tempo para cada uma destas estações, percebe-se que o leito do canal sofreu uma acomodação inicial, chegando posteriormente a uma situação próxima do equilíbrio, uma vez que todas as curvas apresentam tendência assintótica. Nota-se, ainda, que

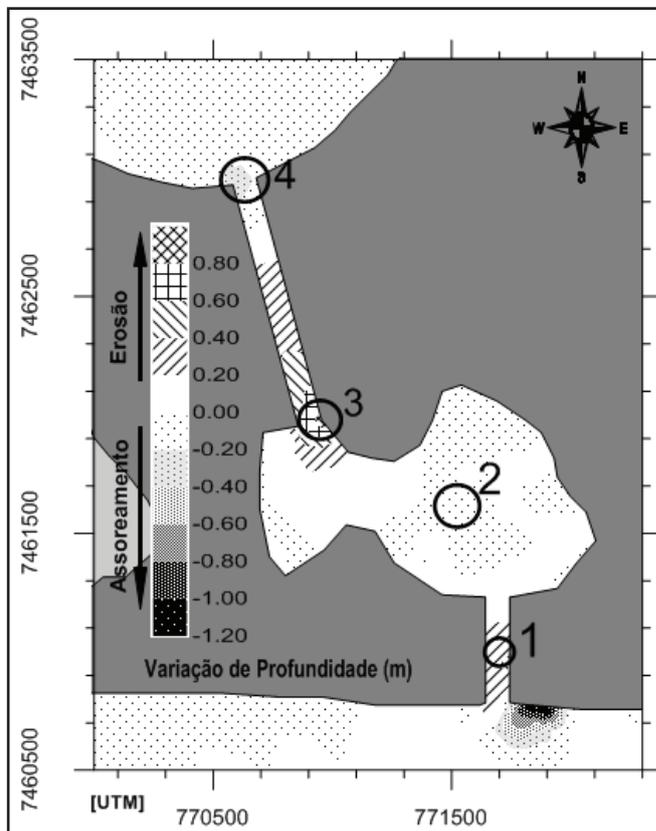


Figura 13 - Variação da profundidade no Canal Oeste após 12 meses de simulação. No mapa está ainda a localização de quatro estações, nas quais se registrou a variação da profundidade ao longo do tempo, cf. Figura 14

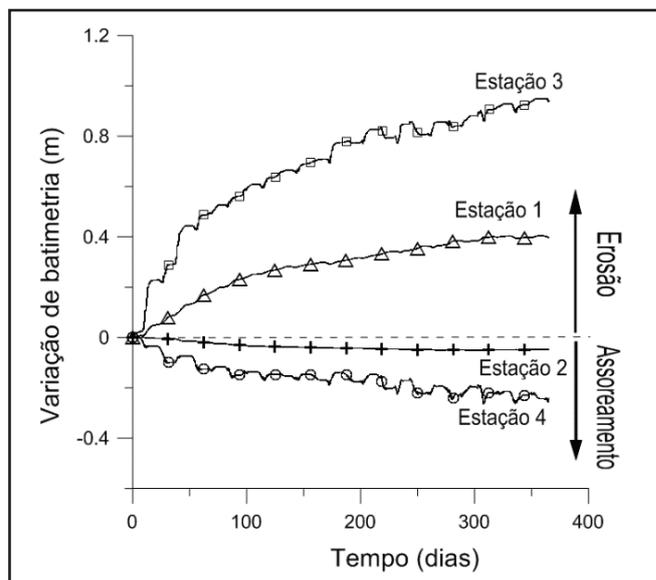


Figura 14 - Variação da batimetria ao longo do tempo em quatro estações na região do Canal Oeste, cf. Figura 13

o Canal Oeste apresentou tendência predominantemente de erosão. Os trechos 1 e 2 do canal apresentaram valores máximos de erosão 0,40 e 0,90 m, respectivamente (Estações 3 e 1). O sedimento erodido nestes trechos foi em parte depositado na Lagoa Pitanguinha, onde houve assoreamento máximo de 0,08 m (Estação 2), e na embocadura lagunar da Enseada de Praia Seca, onde houve assoreamento máximo de 0,20 m (Estação 4). O resto do sedimento erodido foi expulso por completo da calha do Canal Oeste para o mar, vindo a depositar a leste de sua embocadura. Isto demonstra a tendência deste CM de expulsar sedimentos.

As figuras 15 e 16 mostram a batimetria da região do CM estudado no instante inicial e após 365 dias, respectivamente, ilustrando a acomodação do fundo ocorrida.

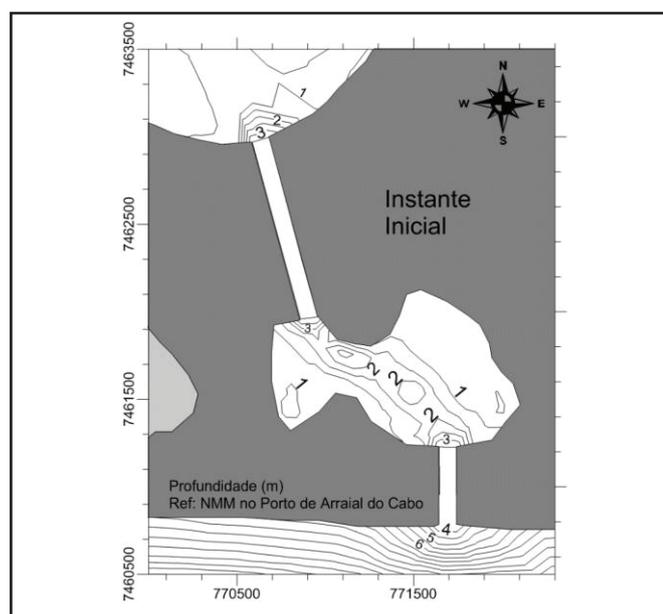


Figura 15 - Batimetria na região do Canal Oeste no instante inicial da modelagem

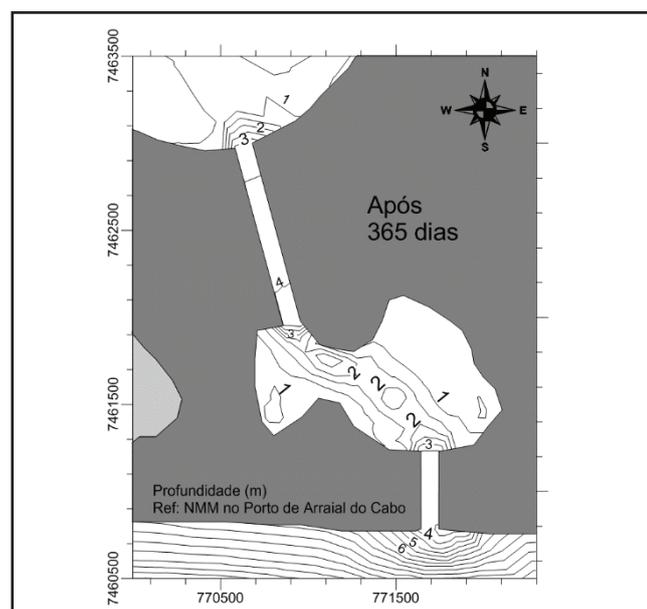


Figura 16 - Batimetria na região do Canal Oeste após 365 dias

## CONCLUSÃO

A análise feita sobre as condições de estabilidade do Canal Oeste, utilizando os critérios empíricos de Escoffier (1940) e Skou (1990), mostrou que o mesmo teria sua estabilidade mínima com uma área hidráulica em torno de 330 m<sup>2</sup>. Por definição, os critérios utilizados consideram, de maneira indireta, todos os fatores que interferem na morfologia da menor seção de um CM. A análise de viabilidade mostrou que uma seção de aproximadamente 350 m<sup>2</sup> configura a situação de estabilidade ótima do Canal Oeste, considerando um atendimento ao critério da Máxima Capacidade de Resposta em 100% do tempo. A área hidráulica de 350 m<sup>2</sup> foi então definida como a seção transversal para os trechos 1 e 2 (Figura 2) para a etapa seguinte do estudo.

A simulação de um período de doze meses ao longo de toda a Lagoa de Araruama, com o modelo morfodinâmico do SisBaHIA<sup>®</sup>, mostrou pouca movimentação de sedimentos na maior parte da laguna. Houve maiores variações batimétricas apenas nos dois canais de maré e em suas proximidades. Ao comparar os resultados deste com o de estudos anteriores, notou-se que o Canal Oeste não interferiu de maneira perceptível no transporte de sedimentos nas porções central e leste da laguna, bem como no Canal de Itajuru.

A análise hidro-sedimentológica mostrou ainda a tendência do Canal Oeste de expelir para o mar os sedimentos depositados em sua calha. O leito do canal sofreu uma acomodação inicial ao longo dos primeiros meses, tendo atingido uma situação próxima do equilíbrio ao fim do período simulado.

Este artigo buscou discutir e avaliar o dimensionamento de um canal de maré, aqui colocado com uma alternativa para o aumento da renovação de águas e da circulação hidrodinâmica em um corpo hídrico eutrofizado. A maior contribuição deste trabalho foi ter demonstrado, em sua 1<sup>a</sup> etapa, uma metodologia para concepção deste canal, que se mostrou uma alternativa viável para esta lagoa. Os passos aqui seguidos podem ser empregados em estudos similares, tanto em canais que projetados, quanto naqueles existentes que venham sofrendo processo de assoreamento. A 2<sup>a</sup> etapa do estudo mostrou que tal canal interferiria apenas na dinâmica de sedimentos do extremo oeste Lagoa de Araruama. A próxima etapa desta pesquisa contemplará o estudo dos processos litorâneos que ocorrem na região da embocadura marítima do Canal Oeste, bem como uma simulação de sua evolução morfológica, considerando o transporte de sedimentos gerado por ondas que incidem na costa.

## REFERÊNCIAS

ÁGUAS DE JUTURNAÍBA. *Companhia Águas do Brasil. Água e Esgoto*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.grupoaguasdobrasil.com.br/aguas-juturnaiba/agua-e-esgoto/ete/>>. Acesso em: 07 ago. 2015.

BIDEGAIN, P.; BIZERRIL, C. *Lagoa de Araruama: perfil ambiental do maior ecossistema lagunar hipersalino do mundo*. Rio de Janeiro, RJ: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2002.

- BRUUN, P. *Stability of tidal inlets: theory and engineering*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1978.
- BRUUN, P.; GERRITSEN, F. *Stability of Coastal Inlets*. Amsterdam, Netherlands: North-Holland, 1960.
- ESCOFFIER, F. F. The Stability of Tidal Inlets. *Shore Beach*, v. 8, n. 4, p. 114-115, 1940.
- GAVA, G. L. *Avaliação de Renovação de Águas na Lagoa de Araruama* – RJ, via Abertura de Canal com o Mar no Extremo Oeste. 2008. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- GELELETE, G.J.A. *Cronologia da Lagoa de Araruama: do Início da Poluição até as Medidas para sua Recuperação*. 2012. 41 f. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Ambiental) – FUNCEFET, Universidade Católica de Petrópolis, Rio de Janeiro, 2012.
- GUERRA, L. V. *Processos Microbiológicos e Composição da matéria Orgânica Relacionados à Eutrofização de uma Lagoa Costeira Hipersalina, L. Araruama*, RJ. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica Ambiental) – Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2008.
- KJERFVE, B.; SCHETTINI, C. A. F.; KNOPPERS, B.; LESSA, G.; FERREIRA, H. O. Hydrology and Salt Balance in a Large, Hypersaline Coastal Lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. Estuarine, *Coastal Shelf Sci.*, v. 42, n. 6, p. 701-725, June 1996.
- LESSA, G. C. *Hidráulica e Sedimentação do Canal de Itajuru* – Laguna de Araruama (RJ). 1990. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.
- MEHTA, A. J. Letter to the editor: Stability of some New Zealand Coastal Inlets. *New Zealand J. Marine Freshwater Res.*, v. 10, n. 4, p. 737-742, 1976.
- O'BRIEN, M. P.; DEAN, R. G. Hydraulics and Sedimentary Stability of Coastal Inlets.. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 13., 1972, Vancouver, Canada. *Proceedings ...* Vancouver, Canada: [s.n.], 1972. v. 2, p. 761-780.
- PINTO, A. C. B. *Um Modelo Numérico para análise da Estabilidade Hidráulico-Sedimentológica de Canais de Maré*. 1999. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- PROLAGOS. *Sistemas de coleta e tratamento de esgoto*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.prolagos.com.br/sistemas-de-coleta-e-tratamento-de-esgoto/>>. Acesso em: 07 ago. 2015.
- ROSMAN, P. C. C. *Modelagem Hidrodinâmica para Planejamento de Obras de Dragagem e Desobstrução de Canais na Lagoa de Araruama*, RJ. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. (Relatório/Projeto PENO – 5605).
- ROSMAN, P. C. C.; FILHO, E. M.; NEVES, C. F. Solução Conjunta dos Problemas de Erosão na Praia de Ipanema-Leblon e Qualidade da Água na Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1992. (Relatório COPPETEC-ET-170173).
- SIGAUQUE, P.J. Avaliação Hidro-Sedimentológica no Canal de Itajuru - Lagoa de Araruama-RJ, devido a Sobrelevação do Nível Médio do Mar por Mudança Climática. 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- SILVA, R. A. G. Análise da Viabilidade Hidro-Sedimentológica de um Canal de Maré Projetado no Oeste da Lagoa de Araruama - RJ. 2013. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- SKOU, A. On the Geometry of Cross-section Areas in Tidal Inlets. Lyngby: Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, 1990. (Series paper (Technical University of Denmark, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering; 51).
- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2013. Brasília, DF. Ministério do Meio Ambiente, 2014. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=105>>. Acesso em: 07 ago. 2015.
- STIVE, M. J. F.; JI, L.; BROUWER, R. L.; KREEKE, VAN DE J.; RANASINGHE, R. Empirical Relationship Between Inlet Cross-sectional Area and Tidal Prism: A Re-evaluation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 32., 2010, Shanghai, China. *Proceedings...* Shanghai, China: [s.n.], 2010. v. 3, p. 2333 – 2342.
- TUNG, T. T.; WALSTRA, D. J.; GRAAF, J.; STIVE, M. J. F. Cross-sectional Stability of Tidal Inlets: A Comparison between Numerical and Empirical Approaches. *Coastal Eng.*, v. 60, p. 21-29, Feb. 2012.
- TUNG, T. T.; WALSTRA, D. J.; GRAAF, J.; STIVE, M. J. F. Morphological Modeling of Tidal Inlet Migration and Closure. *J. Coastal Res.*, p. 1080-1084, 2009. Número especial 56.
- USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Coastal Engineering Manual*. Engineer Manual. Washington, D.C.: .U.S. Army Corps of Engineers, 2012.
- VALENTINI, E. M. S.; ROSMAN, P. C. C.; OLIVEIRA, V. N.; CUNHA, A. C. B. *Modelagem da Lagoa de Araruama*, RJ. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002. (Relatório/Projeto PEC – 1984)

**Contribuição dos autores:**

Rodrigo Amado Garcia Silva: Pesquisa bibliográfica, montagem e execução dos modelos, análise dos resultados e fechamento do texto.

Paulo Cesar Colonna Rosman: Suporte na montagem e execução dos modelos, análise dos resultados e fechamento do texto.