



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

ANÁLISE DA VIABILIDADE HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA DE UM CANAL DE MARÉ PROJETADO NO OESTE DA LAGOA DE ARARUAMA – RJ

Rodrigo Amado Garcia Silva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro
Dezembro 2013

**ANÁLISE DA VIABILIDADE HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA DE
UM CANAL DE MARÉ PROJETADO NO OESTE DA LAGOA DE
ARARUAMA – RJ**

Rodrigo Amado Garcia Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinado por:

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph. D.

Prof. Gilberto Olympio Mota Fialho, D.Sc.

Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araújo, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO de 2013

Silva, Rodrigo Amado Garcia

Análise da Viabilidade Hidro-Sedimentológica de um Canal de Maré Projetado no Extremo Oeste da Lagoa de Araruama – RJ/ Rodrigo Amado Garcia Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

xv, 83 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Ambiental, 2013

Referências Bibliográficas: p. 76-77

1. Lagoa de Araruama; 2. Canal de Maré; 3. Estabilidade de Canais de Maré; 4. Modelagem Computacional; 5. Modelo hidro-sedimentológico; 6. Modelo unidimensional I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Análise da Viabilidade Hidro-Sedimentológica de um Canal de Maré Projetado no Extremo Oeste da Lagoa de Araruama – RJ

*“Disciplina é liberdade; Compaixão é fortaleza;
Ter bondade é ter coragem.”*
(Renato Russo)

Dedico este trabalho a meus pais, que procuraram sempre transmitir os ensinamentos de que o tamanho de nossas conquistas é proporcional à dimensão de nossos sonhos e ao volume de suor empregado na busca deles, que ir mais longe é apenas uma questão de querer e perseverar, que nada deve parecer impossível de mudar.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo investimento na minha formação.

Às agências de fomento à pesquisa e desenvolvimento científico: CNPQ, CAPES e PIBIC, por todo o tempo durante o qual custearam minhas bolsas de iniciação científica.

Aos professores da UFRJ, em especial aos do curso de Engenharia Ambiental. Hoje, mais do que nunca, tenho certeza de que o nível de excelência que o nosso curso e a nossa universidade têm é em grande parte resultado do trabalho de vocês. Obrigado por todos os ensinamentos acadêmicos e extraclasse.

Ao Prof. Paulo Rosman, pela oportunidade de desenvolver este trabalho sob sua orientação. Foi um grande prazer e, acima de tudo, um grande aprendizado.

À Patricia Rosman, por todo o auxílio prestado e o empenho empregado na tarefa de fazer o modelo computacional utilizado funcionar.

À Marise Cardoso, brilhante secretária e mãe adotiva de todos os alunos da AECO. Obrigado pelo carinho e por facilitar tanto as nossas vidas!

A todos os meus amigos da Engenharia Ambiental, em especial: Tomás, Isa, Friburgo, Nina, Hélinah, Paulo, Rodrigo, Bia, Luiza, Ágatha (e César), Camila, Mini, Bel, Nanda, Kéla, Juan, Diego e Banzay (toda a “Galera Maneira”). Obrigado pela amizade, por serem as pessoas que são e, principalmente, por fazerem parte da minha vida da forma que vocês fazem.

Aos também amigos : Gabi Laport, Mari Rodrigues, Priscilla Menezes, Henrique Crespo, Celina Oliveira, Lucas Lima, Ester Wegbryat e Olivia Mercadante. Obrigado pela amizade e pelas ótimas experiências compartilhadas na faculdade e fora dela.

A todos os meus amigos da Área de Engenharia Costeira da COPPE: Mario, Ludmila, Tathi, Clara, Eduardo, Anton, Taoan, Diego, Daniel, Renato, Monica, Mariana, Rodrigo, Isa, Andreia, Paulo Tadeu, Paulo Sigaúque, Felipe, Jeane, Loani e Leonardo. Muito obrigado por cada momento dos dias de vocês gasto me passando ensinamentos de Engenharia Costeira, SisBaHiA[®], modelagem, Excel, ou qualquer outra coisa. Obrigado

principalmente pela amizade e pelos bons momentos que vivemos juntos diariamente. É um grande prazer trabalhar e conviver com todos vocês.

À querida Monica, que apareceu tão de repente e na hora certa. Obrigado pelo apoio, pelo carinho e pelo auxílio com os detalhes finais deste trabalho.

Àqueles que estão sempre presentes e que seguram a barra nas horas mais difíceis: minha mãe, meu pai e meu irmão. Sem vocês, chegar até aqui teria sido muito mais difícil, se não impossível. Ao meu irmão, obrigado por estar sempre lá quando foi preciso. Aos meus pais, obrigado pelo investimento. Obrigado por acreditarem na educação como alicerce para um futuro bem construído. Obrigado por acreditarem e me ensinarem que o talento ajuda bastante, mas que uma boa dose de trabalho árduo é fundamental na busca pelo sucesso. Obrigado pelo amor, carinho e apoio incondicionais.

A Deus, fundamentalmente, pois nada disso faria sentido sem a saúde, sem a paz, sem a família e sem os amigos que Ele proporciona em todos os dias da minha existência. Muito obrigado!

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Análise da Viabilidade Hidro-Sedimentológica de um Canal de Maré Projetado no Oeste da Lagoa de Araruama – RJ

Rodrigo Amado Garcia Silva

Dezembro / 2013

Orientador: Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

Curso: Engenharia Ambiental

A Lagoa de Araruama é um importante sistema estuarino situado na Região dos Lagos no sudeste do estado do Rio de Janeiro. O clima regional semiárido faz com que o corpo d'água tenha um balanço hídrico negativo, apresentando águas hipersalinas. Estendendo-se por uma faixa de aproximadamente 40 km do litoral fluminense, a Lagoa de Araruama é a maior laguna hipersalina do Brasil.

Apesar de sua importância para a região, que tem nas salinas e no turismo importantes atividades econômicas, a laguna é bastante impactada pela ocupação urbana desordenada que acomete grande parte da Região Lagos. Devido ao balanço hídrico negativo o corpo hídrico apresenta pouquíssima renovação de águas, o que o torna naturalmente propenso à eutrofização.

Este trabalho propõe a abertura de um novo canal de maré no extremo oeste da Lagoa de Araruama como forma de promover uma maior renovação das suas águas e uma consequente melhora de sua qualidade ambiental. O documento apresenta o dimensionamento de um canal estável em termos hidro-sedimentológicos, com análise calcada no estado da arte dos critérios de estabilidade de canais de maré e com suporte de modelagem computacional específica ao caso.

Após dimensionar o canal modelou-se três meses da hidrodinâmica e da dinâmica de sedimentos da Lagoa de Araruama para a situação projetada. As simulações mostraram que o canal proposto tem tendência a ser naturalmente estável.

Palavras-chave: Lagoa de Araruama, Canal de Maré, Estabilidade de Canais de Maré, Modelagem Computacional, Modelo hidro-sedimentológico, Modelo unidimensional.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Hydro-Sedimentary Feasibility Analysis of a Tidal Inlet Projected on the West of the Araruama Lagoon– RJ

Rodrigo Amado Garcia Silva

Dezembro / 2013

Advisor: Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

Course: Environmental Engineering

The Araruama Lagoon is an important estuarine system located in the Lakes Region, southeast of the state of Rio de Janeiro. The regional semiarid climate causes the water body to have a negative water balance, thus presenting hypersaline waters. With an extension of approximately 40 km along Rio de Janeiro's coast, the Araruama Lagoon is Brazil's largest hypersaline lagoon.

Despite its importance for the region, which has in salt production and tourism important economic activities, the lagoon is very impacted by the disorganized urban occupancy of the Lakes Region. The negative water balance turns the water body to have a very poor water renovation, what causes a natural tendency of eutrophication,

This work proposes the opening of a new tidal channel at the western side of Araruama Lagoon as a way to promote greater renewal of its water and a consequent improvement of its environmental quality. The document presents the dimensioning of a stable channel in hydro-sedimentology terms, with an analysis based on the state of the art of the criteria for stability of tidal inlets and with support of computational modelling specific for the case.

After dimensioning the inlet a three months simulation of the Araruama Lagoon's hydrodynamics and sedimentary dynamics in the projected situation was made. The modelling showed that the proposed channel tends to be naturally stable.

Palavras-chave: Araruama Lagoon, Tidal Inlet, Stability of Tidal Inlets, Computational Modelling, Hydrosedimentary Model, One-dimensional Model

CONTEÚDO

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo e Justificativa	1
1.2	Aspectos sobre Lagoas Costeiras.....	2
1.3	Aspectos sobre a Lagoa de Araruama.....	3
1.4	Abertura de um Novo Canal de Maré.....	5
1.5	Canais de Maré	6
2	METODOLOGIA.....	9
2.1	Considerações sobre Modelagem Computacional.....	10
2.2	Considerações sobre a Morfologia de Canais de Maré.....	12
2.3	Hidráulica de Canais de Maré.....	13
2.3.1	Equação da Conservação da Quantidade de Movimento Promediada na Seção Transversal	15
2.3.2	Equação da Continuidade Promediada na Seção Transversal.....	16
2.4	Estabilidade Hidro-Sedimentológica de Canais de Maré	16
2.4.1	Relação entre o Prisma de Maré e a Área da Menor Seção Transversal: $P \times A_c$	18
2.4.2	Relação entre o Prisma de Maré e o Transporte Litorâneo Total: P / M_t	19
2.4.3	Relação entre a Velocidade Média Máxima e a Área da Menor Seção Transversal: $V_{m\acute{a}x} \times A_c$	20
2.4.4	Relação entre Capacidade de Resposta e Área da Menor Seção Transversal: $C_r \times A_c$	23
2.5	Metodologia para Análise de Estabilidade de um Canal de Maré	23
2.6	Modelo MIDAC8	30
2.6.1	Equações Governantes	31
2.6.2	Condições de Contorno	32
2.6.3	Condições Iniciais	33
2.6.4	Características do Modelo Numérico	33
2.7	Modelo Hidrodinâmico - SisBaHiA®	33
2.7.1	Equações Governantes	34

2.7.2	Condições de Contorno	37
2.7.3	Condições Iniciais	38
2.8	Modelo Morfodinâmico Sujeito à Geração de Ondas Locais.....	38
2.8.1	Critério de Mobilidade dos Sedimentos	39
2.8.2	Fórmula de Transporte de Sedimentos.....	41
2.8.3	Atualização da Batimetria pelo Modelo Morfodinâmico.....	42
2.8.4	Condições Iniciais e de Contorno.....	43
3	SIMULAÇÃO COM O MIDAC8	43
3.1	Modelo Digital do Terreno	44
3.2	Discretização Unidimensional	46
3.3	Rugosidade de Fundo.....	48
3.4	Maré.....	48
3.5	Resultados , Análise de Estabilidade e Definição da Área de Projeto.....	49
4	SIMULAÇÃO COM O SISBAHIA®	54
4.1	Malha de Elementos Finitos Quadrangulares	54
4.2	Distribuição Espacial do Sedimento de Fundo	56
4.3	Amplitude da Rugosidade de Fundo.....	58
4.4	Maré.....	58
4.5	Ventos	60
4.6	Resultados	61
5	CONCLUSÃO.....	74
6	RECOMENDAÇÕES.....	75
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	ANEXO	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Foto de satélite da Lagoa de Araruama (Google Earth, 26/10/20013)	4
Figura 2:	Foto de Satélite do Canal de Itajuru, cuja largura varia entre 60 e 350 m (Google Earth, 26/10/20013).....	4
Figura 3:	Praia nas margens da Lagoa de Araruama.....	5
Figura 4:	Canal de maré projetado no oeste da Lagoa de Araruama.....	6

Figura 5: Canal de Ocean City, Maryland, EUA (U.S. ARMY, 2012).....	8
Figura 6: O Canal de Itaipu, situado entre as praias de Itaipu e Cambinhas, em Niterói – RJ, conecta a Lagoa de Itaipú ao Oceano Atlântico. Foto tirada em setembro de 2013.	8
Figura 7: Foto de satélite do Canal de Itaipu. Chama-se a atenção para as barras formadas na embocadura lagunar do canal. Observa-se também assoreamento significativo em sua embocadura marítima, fatores que evidenciam um canal instável..	9
Figura 8: Assoreamento na desembocadura do Canal de Itaipu na Lagoa de Itaipu. Foto tirada em setembro de 2013.....	9
Figura 9: Diagrama representativo de todo o processo de modelagem de um corpo d'água natural (ROSMAN, 2013, Referência Técnica do SisBaHiA®).....	11
Figura 10: Esquema de correntes de maré enchente e vazante em um canal de maré (adaptado de O'BRIEN, 1969 <i>apud</i> U.S. ARMY, 2012).....	14
Figura 11: Esquema típico de nível d'água numa situação de preamar para uma lagoa conectada ao oceano por um canal de maré. Essa situação origina um fluxo de enchente da lagoa (adaptado de O'BRIEN & DEAN, 1972).	14
Figura 12: Exemplo de diagrama de $V_{m\acute{a}x} \times A_c$ para uma determinada amplitude de maré em canal de maré genérico (ROSMAN, 2012). Os valores de $V_{m\acute{a}x}$ são assumidos para a maré vazante.	21
Figura 13: Exemplo de gráfico de $V_{m\acute{a}x} \times A_c$ levando em consideração o critério de Escoffier para amplitudes de maré variando entre 0,10m e 0,70m.	25
Figura 14: Diagrama $V_{m\acute{a}x} \times A_c$ completo para a análise de estabilidade de um canal de maré. . O cruzamento das curvas $[P \times A_c]_{m\acute{a}x}$, $[P \times A_c]_{m\acute{i}n}$ e $C_{r_{m\acute{a}x}}$ com as curvas de $V_{m\acute{a}x} \times A_c$ de cada amplitude de maré (a_0 variando de 0,10 a 0,70 m) indica o ponto de estabilidade ótima para cada diferente maré em relação a um destes critérios.	26
Figura 15: Gráfico de frequência acumulada de ocorrência de amplitudes de maré para o exemplo em questão.	27
Figura 16: Gráfico de frequência de ocorrência de velocidades que satisfazem aos três critério utilizados no exemplo.	28
Figura 17: Relação entre largura e profundidade da menor seção transversal para canais de maré, obtida através da observação de vários canais de maré estáveis e de resultados de modelos de laboratório.....	29
Figura 18: Console de entrada de dados do programa MIDAC8, utilizado para estudos sobre as condições de estabilidade de canais de maré.....	30

Figura 19: Esquema da seção trapezoidal para o modelo unidimensional (1D) utilizado. Adaptado de ROSMAN (1997) <i>apud</i> PINTO (1999).....	32
Figura 20: Sistema de coordenadas para os módulos 3D e 2DH do SisBaHiA®. Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência, U_i representa a velocidade promediada na vertical, utilizada no módulo 2DH. A profundidade instantânea, ou coluna d'água, é denotada por $H = z_{sup} - z_{fundo} = \zeta + h$. (ROSMAN, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2013).....	34
Figura 21: Diagrama de Shields (ROSMAN, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2013)	41
Figura 22: Mapa base com batimetria da Lagoa de Araruama (Modificado de GAVA, 2008). A batimetria é referiada ao Porto do Forno, em Arraial do Cabo e foi medida em 2005 e 2006.	44
Figura 23: Batimetria em detalhe do Canal Oeste.	45
Figura 24: Batimetria do Canal de Itajuru.	46
Figura 25: Malha unidimensional que representa os parâmetros geométricos das seções transversais de todo o domínio, fornecidos com dados de entrada ao MIDAC8.....	47
Figura 26: Vista em detalhe da discretização 1D do Canal Oeste. O cenário adotado considerou que as seções 6 a 22 tinham áreas idênticas, formando assim um canal prismático. O modelo calculou o escoamento para diferentes valores de área da seção deste canal, com amplitudes de mar para construir o gráfico de $V_{máx} \times A_c$	48
Figura 27: Gráfico de $V_{máx}$ em função de A_c e a_0 , no Canal Oeste. De acordo com o critério de Escoffier, o canal é instável para áreas de seção hidráulica menores que 280 m ² , e estável para áreas maiores que 320 m ² . Na faixa entre estes valores de área pode ocorrer estabilidade ou instabilidade, dependendo da fase da maré.....	51
Figura 28: Curvas de capacidade de resposta para o Canal Oeste com os pontos de $Cr_{máx}$ marcados em marrom.	51
Figura 29: Gráfico de Frequência acumulada de ocorrência de amplitudes de maré. Resultados obtidos de uma maré sintética gerada pelo SisBaHiA® para o intervalo de um ano, sintetizados na Tabela 2. Maré característica do Porto do Forno – Arraial do Cabo.....	53
Figura 30: Diagrama de percentagem 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.	53
Figura 31: Malha de elementos finitos utilizada pelo SisBaHiA®	55

Figura 32: Malha em detalhes para a região do Canal Oeste, sistema formado pela Lagoa Pernambuco e pelos dois canais situados a norte e a sul desta.	55
Figura 33: Distribuição granulométrica dos sedimentos de fundo do Canal de Itajuru (LESSA, 1990 <i>apud</i> BIDEGAIN & BIZERRIL, 2002 <i>apud</i> SIGAÚQUE, 2013).....	57
Figura 34: Amplitude da rugosidade de fundo (ϵ) no domínio de modelagem.	58
Figura 35: Maré sintética na fronteira aberta para o primeiro mês de simulação. O nível médio (0,0m) é o NMM no Porto do Forno, em Arraial do Cabo.....	59
Figura 36: Estatística de direção de ventos medidos na estação meteorológica da Base Aérea Naval de São Pedro da Aldeia. (ROSMAN, 2002).....	60
Figura 37: Série de ventos característica para um mês de Janeiro (SIGAÚQUE, 2013)	61
Figura 38: Localização das estações utilizadas para obtenção das séries temporais de elevação do nível d'água.	62
Figura 39: Maré sintética em diferentes pontos do domínio de modelagem. Período de dois dias de uma maré de quadratura.	62
Figura 40: Padrões de velocidade de correntes na Lagoa de Araruama para uma situação de preamar de sizígia. As correntes são bastante fracas na região central da Lagoa e em suas proximidades, aumentando de intensidade nas proximidades dos dois canais de maré, sendo máximas nos canais.	63
Figura 41: Correntes de enchente no Canal de Itajuru. O esquema de cores indica as isolinhas de velocidade e o vetores indicam a magnitude e direção da velocidade. Nota-se que as maiores velocidades são de aproximadamente 1,2m/s e ocorrem num trecho de significativo estrangulamento do escoamento.	64
Figura 42: As correntes máximas de enchente são de aproximadamente 1,0 m/s no Canal Oeste, para a maior preamar de sizígia.	64
Figura 43: Padrões de velocidade de correntes na Lagoa de Araruama para uma situação de baixa-mar de sizígia.	65
Figura 44: Correntes de vazante máximas de aproximadamente 1,2m/s no Canal de Itajuru. Novamente, se nota as maiores velocidades no trecho mais estreito.....	66
Figura 45: Correntes de vazante no Canal Oeste para a baixa-mar de sizígia mais baixa. Maiores velocidades em torno de 1,1m/s.	66
Figura 46: Mapa com isolinhas de variação de profundidade. Os pontos de erosão ou assoreamento dignos de atenção ocorreram apenas nas três regiões destacadas.....	67
Figura 47: Variação de profundidade ao longo do Canal de Itajuru após 3 meses.	68

Figura 48: Trecho onde houve as maiores as variações de profundidade observadas em todo o domínio modelado.	68
Figura 49: Região do Canal Oeste e proximidades. O trecho mostrado no canto superior direito da figura apresenta pontos de assoreamento máximo em torno de 0,17 m, e pontos de erosão máxima de aproximadamente 0,25 m	69
Figura 50: Variações de profundidade no Canal Oeste. Observa-se tendência de erosão no interior dos canais e assoreamento nas embocaduras.	70
Figura 51: Estações definidas para acompanhamento da variação da profundidade ao longo do tempo.	71
Figura 52: Variação da profundidade ao longo do tempo nos pontos de maior interesse.	72
Figura 53: Batimetria original (à esquerda), característica do instante inicial, e batimetria após 3 meses (à direita).	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Valores de a_1 e m_1 para a fórmula empírica desenvolvida por Jarret. Adaptado de JARRET (1976) <i>apud</i> PINTO (1999).	19
Tabela 2: Quadro resumo do critério de estabilidade de Per Bruun, baseado na razão entre o Prisma de Maré (P) e o Transporte Litorâneo Total (M_t) que cruza a embocadura.	20
Tabela 3: Quadro com resumo do significado de cada termo das equações 18 e 19.	36
Tabela 4: Frequência simples e acumulada de ocorrência de alturas de maré e percentagem de tempo durante o qual estas alturas de maré são excedidas no período de um ano. Resultados obtidos de uma maré sintética gerada pelo SisBaHiA [®] para o intervalo de um ano. Maré característica do Porto do Forno – Arraial do Cabo.	49
Tabela 5: Informações sobre a Malha de Elementos Finitos.	56
Tabela 6: Classes de sedimentos adotadas para o modelo de transporte de sedimentos.	56
Tabela 7: Constituintes harmônicas da maré no Porto Forno, Arraial do Cabo – RJ (FEMAR).	59

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho busca sugerir uma alternativa para o aumento da renovação das águas da Lagoa de Araruama, corpo d'água situado na costa do estado do Rio de Janeiro e margeado pelos municípios de Araruama, Iguaba Grande, São Pedro da Aldeia, Cabo Frio e Arraial do Cabo, componentes da chamada Região dos Lagos.

A Lagoa de Araruama é um sistema estuarino que sofre de forma crônica com problemas de qualidade de água, ocorridos em função de suas características naturais e agravados pelo aporte de nutrientes lançado na mesma. Embora a maior parte do esgoto lançado nas águas da Lagoa seja tratado a nível terciário, a remoção de nutrientes não é suficiente, devido as características que este corpo hídrico apresenta.

O corpo d'água é conectado ao oceano atlântico através de um canal de maré artificial, situado em seu extremo leste e relativamente estreito, se comparado com a extensão da Lagoa. O balanço hídrico é negativo, conferindo ao sistema lagunar características hipersalinas. A combinação de canal de maré estreito com clima semiárido regional faz com que a renovação das águas nessa lagoa seja bastante pequena. Ao longo deste trabalho é proposta a abertura de um novo canal de maré no oeste da Lagoa de Araruama, que seria uma forma de aumentar a renovação de suas águas e a circulação hidrodinâmica em seu interior, buscando assim a melhora de suas características ambientais.

Neste capítulo são abordados o objetivo deste trabalho e a justificativa da ideia proposta. Aspectos relevantes sobre lagoas costeiras, sobre a Lagoa de Araruama e sobre canais de maré são também tratados.

1.1 Objetivo e Justificativa

Este trabalho tem como objetivo projetar um canal de maré que possa ser construído no oeste da Lagoa de Araruama. O projeto foi feito de forma que o canal tenda a permanecer aberto sem o auxílio de dragagens ou outras intervenções deste tipo, sendo assim naturalmente estável. O conceito de estabilidade de canais de maré é devidamente esclarecido em outros capítulos mais adiante.

A construção de um novo canal de maré busca uma melhoria na circulação e na renovação das águas da Lagoa de Araruama. O projeto do canal contou com o auxílio de dois diferentes sistemas de modelagem computacional.

1.2 Aspectos sobre Lagoas Costeiras

Ao longo da costa brasileira, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, a presença de sistemas lagunares e lagoas costeiras é algo bastante comum. Neste trecho do litoral as marés são de amplitude relativamente pequena, pouco maior que meio metro em alguns casos, o que faz com que a zona de arrebentação de ondas varie numa faixa estreita e favoreça a formação de cordões arenosos que iniciam a formação das lagoas costeiras.

Embora sejam corpos d'água morfológicamente semelhantes e frequentemente confundidos na literatura, há diferenças notáveis entre ambos. ROSMAN (2012) define sistema lagunar como “um sistema estuarino, sendo, portanto um corpo d'água costeiro com uma ligação livre com o mar, dentro do qual ocorre uma mistura mensurável da água salgada do mar com a água doce proveniente da drenagem das terras.” Lagoas costeiras pertencentes a sistemas deste tipo podem ser denominadas lagunas. Em um sistema lagunar há franca troca de massas d'água e trocas biológicas entre o mar e a laguna, a cada ciclo de maré. Lagunas podem ser também definidas como uma lagoa costeira que funciona em regime de marés.

Lagoas costeiras em regime de cheias são corpos d'água que no passado já foram lagunas, mas que em função de variados eventos perderam sua ligação com o mar. Esta ligação pode ser eventualmente restabelecida como consequência de eventos climáticos extremos, tais como fortes chuvas ou grandes ressacas. No primeiro caso, o cordão litorâneo que separa a lagoa do mar é rompido devido à pressão exercida pelo acúmulo de água doce drenado para o interior da lagoa. No segundo caso, o rompimento se dá em virtude do esforço aplicado pelas grandes ondas. Após o extravasamento da água doce para o mar, ocorre no interior da lagoa de forma súbita e intensa, a mistura entre suas águas doces com a água salgada do mar, o que causa brusco impacto à ecologia adaptada a este local. No entanto, o que era um corpo d'água altamente eutrofizado passa a ter características típicas de um sistema estuarino, apresentando aspecto bem mais agradável e maior riqueza de biodiversidade. Após cessar o evento climatológico extremo, há geralmente a natural tendência para o fechamento do canal criado, fazendo com que a

lagoa deixe de funcionar em regime de marés e volte a funcionar em regime de cheias, tendendo a retornar ao estado que se encontrava.

Há também o caso de lagoas costeiras formadas pela acumulação de água doce, ou por afloramentos do lençol freático, usualmente situadas atrás de cordões de dunas litorâneas. Tais corpos de água não têm ligação livre com o mar.

Sistemas lagunares, como todo sistema estuarino, são corpos d'água efêmeros, vistos sob uma perspectiva geológica. A existência de um sistema lagunar se estende a poucos milênios, sendo pouco a pouco assoreado, tornando-se primeiramente uma lagoa costeira. Em seguida, a lagoa costeira torna-se um conjunto de meros alagados, que por fim dão lugar a uma planície costeira. Um sistema lagunar será tão mais eutrofizado, quanto mais próximo estiver de se tornar uma lagoa costeira, corpo d'água desconectado do mar e progressivamente assoreado. Muitas vezes o homem recorre a técnicas de Engenharia para promover o rejuvenescimento de tais corpos hídricos, através da desobstrução de canais de maré e dragagens para favorecimento da circulação hidrodinâmica. O resultado costuma ser a reconfiguração do corpo hídrico como um sistema estuarino e o consequente aumento do nível de biodiversidade, apesar da perda da ecologia que se estabeleceu naquele ambiente de características eutróficas.

1.3 Aspectos sobre a Lagoa de Araruama

A faixa costeira de aproximadamente 100 km que se estende da cidade do Rio de Janeiro até Cabo Frio apresenta uma série de lagoas costeiras (OLIVEIRA, 1974 *apud* GALVA, 2008), dentre as quais se destaca a Lagoa de Araruama, localizada entre as latitudes de 22°49' e 22°57'S e longitudes 042°00' e 042°30'W. Apesar do nome, esta lagoa é um grande sistema lagunar, com aproximadamente 220 km² 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 m³. A laguna apresenta profundidade máxima de 10 m e média de 3 m (KJERFVE *et al*, 1996). Sua geometria é bastante complexa, havendo um número significativo de enseadas e pontais de areia, que, em sua maioria, se estendem na direção noroeste – sudeste. A única conexão com o mar é feita através do Canal de Itajuru, situado no extremo leste da Lagoa, no município de Cabo Frio. Uma de suas principais características é a alta salinidade, em torno de 50 ppm na parte central. O clima semiárido característico da região faz com que a laguna tenha um balanço hídrico nega-

tivo e seja permanentemente hipersalina (André *et al.*, 1981 *apud* GAVA, 2008). A Lagoa de Araruama é algumas vezes citada na literatura como a maior laguna hipersalina do Brasil e do mundo. A Figura 1 e a Figura 2 mostram duas fotos de satélite da Lagoa de Araruama e do Canal de Itajuru, respectivamente.



Figura 1: Foto de satélite da Lagoa de Araruama (Google Earth, 26/10/20013)

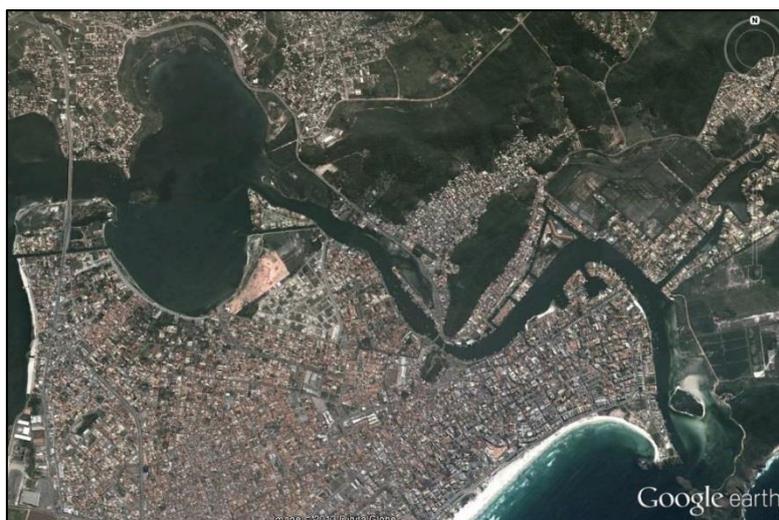


Figura 2: Foto de Satélite do Canal de Itajuru, cuja largura varia entre 60 e 350 m (Google Earth, 26/10/20013).

As belas praias deste trecho do litoral fluminense atraem para a região uma população significativa. Em 2007 os municípios do entorno da Lagoa de Araruama tinham uma população permanente em torno de 450 mil habitantes, segundo o IBGE. Juntando-se a este número um acréscimo populacional de mais de 100% que estes municípios recebem nos finais de semana e feriados, pode-se inferir que um volume bastante razoável de esgoto é lançado nas águas desta lagoa. Embora o esgoto lançado passe por tratamento terciário, que retira do efluente parte dos nutrientes, o percentual retirado é insuficiente

para manter a boa qualidade das águas deste corpo hídrico. Uma vez que o balanço hídrico é negativo, não há renovação de águas, em tese, e estes nutrientes tendem a se acumular no interior da Lagoa.



Figura 3: Praia nas margens da Lagoa de Araruama.

1.4 Abertura de um Novo Canal de Maré

A ideia de se criar uma nova conexão entre a Lagoa de Araruama e o Oceano Atlântico busca principalmente uma melhoria na qualidade ambiental desta laguna, através da intensificação da renovação de suas águas e do aumento da circulação hidrodinâmica no seu interior. O canal proposto se situaria no oeste da Lagoa, na Enseada da Praia Seca, onde há a possibilidade de se utilizar uma pequena lagoa costeira como conexão. Seriam então escavados dois canais, um na Enseada da Praia Seca, ligando a Lagoa de Araruama à pequena Lagoa Pernambuco, e outro conectando esta lagoa costeira ao mar, como mostrado na Figura 4.

Embora haja outros trechos da laguna nos quais se observa uma faixa relativamente estreita de cordão litorâneo, onde há inclusive a presença de outras pequenas lagoas costeiras, o trecho escolhido é aquele que propiciará um resultado mais efetivo de renovação de águas, uma vez que os ventos dominantes sopram de leste-nordeste, gerando uma deriva no sentido oeste. Outra justificativa para a escolha deste trecho, mostrado na Figura 4, é o fato de não haver ocupação urbana no local.

GAVA (2008) estudou as mudanças que ocorreriam na dinâmica da Lagoa de Araruama no cenário de abertura do referido canal de maré. Seus resultados indicaram que haveria, de maneira geral, uma elevação em torno de 0,02 m no nível médio da Lagoa,

além de uma alteração significativa no padrão de circulação hidrodinâmica. Haveria a intensificação da troca de massas d'água e da diluição de suas águas interiores.



Figura 4: Canal de maré projetado no oeste da Lagoa de Araruama

O sistema esquematizado na Figura 4, constituído pela Lagoa Pernambuco e pelos dois canais artificiais desenhados em amarelo será doravante denominado Canal Oeste.

1.5 Canais de Maré

Entende-se por canal de maré um canal que liga uma laguna costeira ou uma bacia interior ao mar, permitindo a franca troca de massas d'água e trocas biológicas entre ambos. Em canais deste tipo, a vazão de água doce é em geral bastante pequena se comparada à vazão de água salgada. O nível d'água na laguna é regulado pela maré na embocadura marítima do canal e, em geral, apresenta uma menor amplitude de variação em função da perda de carga que o escoamento sofre na entrada e ao longo do canal. Canais de maré permitem que as águas de uma laguna sejam renovadas em maior ou menor grau, dependendo das dimensões, tanto do canal quanto da laguna. Quanto maior for a capa-

cidade de descarga de um canal de maré, maior será a renovação de águas em uma lagoa.

Canais de maré podem ser originados pelo rompimento de parte do cordão litorâneo de uma lagoa costeira confinada, ocasionando o extravasamento das águas desta para o mar e uma súbita mistura entre águas doce e salgada em seu interior. O corpo hídrico deixa rapidamente de ser altamente eutrofizado para tornar-se um ambiente renovado, apresentando águas muito mais limpas e com um nível de salinidade mais elevado, no entanto. Após cessar o evento climatológico extremo, há geralmente a tendência natural para o fechamento do canal, em questão de dias, tornando a lagoa novamente um corpo d'água confinado, cuja qualidade de água tenderá a retornar ao estado eutrofizado que se encontrava.

Como forma de rejuvenescer uma lagoa costeira, frequentemente a engenharia projeta canais para conectá-las ao mar. Outro fato também comum é uma laguna costeira que tenha seu canal de maré assoreado, ao longo do tempo, e que esteja bastante eutrofizada. Nestes casos, costuma-se realizar a dragagem do canal e de suas embocaduras, aumentando a área hidráulica disponível e favorecendo o escoamento dos fluxos de enchente e vazante. Para a realização de projetos deste tipo é necessário um estudo prévio da estabilidade e da viabilidade hidro-sedimentológica. O conceito de estabilidade de um canal de maré refere-se à tendência que este tem, ou não, de permanecer livre do acúmulo de sedimentos que eventualmente ocasionará o seu fechamento. Diz-se que um canal de maré é naturalmente estável, se este é capaz de permanecer aberto sem o auxílio de dragagens, ou qualquer outra técnica de engenharia. O conceito de viabilidade diz respeito ao percentual de tempo em que as condições de estabilidade hidro-sedimentológica estabelecidas por cada critério são satisfeitas. Esta ideia é exemplificada e melhor esclarecida no capítulo a seguir, quando são apresentados os critérios de estabilidade. A Figura 5 mostra um exemplo de canal de maré, situado na cidade Ocean City, nos estados Unidos.



Figura 5: Canal de Ocean City, Maryland, EUA (U.S. ARMY, 2012)

Nas Figuras 6, 7 e 8, a seguir, encontra-se ilustrado um caso específico de canal de maré instável. O Canal de Itaipu, situado entre as praias de Itaipu e Camboinhas, no município de Niterói – RJ, conecta a Lagoa de Itaipu ao Oceano Atlântico e apresenta problemas crônicos de assoreamento, em função de sua tendência a ser naturalmente instável. DE SIQUEIRA & QUEIROZ (2012) recomendaram a dragagem do canal e prolongamento de seus guias-correntes, de forma a tornar este canal de maré estável, mantendo assim sua embocadura livre de assoreamentos e aumentando a renovação das águas do Sistema Lagunar de Itaipú-Piratininga.



Figura 6: O Canal de Itaipu, situado entre as praias de Itaipu e Camboinhas, em Niterói – RJ, conecta a Lagoa de Itaipú ao Oceano Atlântico. Foto tirada em setembro de 2013.



Figura 7: Foto de satélite do Canal de Itaipu. Chama-se a atenção para as barras formadas na embocadura lagunar do canal. Observa-se também assoreamento significativo em sua embocadura marítima, fatores que evidenciam um canal instável.



Figura 8: Assoreamento na desembocadura do Canal de Itaipu na Lagoa de Itaipu. Foto tirada em setembro de 2013.

2 METODOLOGIA

O estudo desenvolvido para o projeto do canal proposto se consistiu de duas etapas. Na primeira foram analisadas as condições de estabilidade do canal, com suporte do modelo computacional M1DAC8, que modela o escoamento em uma dimensão. Este modelo

foi desenvolvido por PINTO (1999) e é específico para este tipo de estudo. Após a análise da estabilidade, foi definida a área hidráulica ótima para os dois canais artificiais que compõem o Canal Oeste.

Tendo sido definida a área destes canais, utilizou-se o sistema de modelos SisBaHiA® para modelar em duas dimensões a hidrodinâmica e a dinâmica de sedimentos da Lagoa. O SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa da **COPPE/UFRJ**. As simulações realizadas utilizaram o modelo hidro-sedimentológico sujeito à geração de ondas locais, que na prática corresponde a três modelos diferentes, que rodam acoplados: o modelo hidrodinâmico, o modelo de transporte de sedimentos e o modelo de geração de ondas.

A próxima sessão deste capítulo tece comentários sobre modelagem computacional, seus objetivos, seus fundamentos e as etapas envolvidas no processo de modelagem. Na sessão seguinte faz-se considerações acerca da morfologia e da hidráulica de canais de maré. Após, são apresentados os critérios usualmente utilizados na análise da estabilidade de um canal de maré e, por fim, é feita a devida apresentação e fundamentação do M1DAC8 e do SisBaHiA®.

2.1 Considerações sobre Modelagem Computacional

A modelagem computacional tem sido a ferramenta básica de diferentes áreas da Engenharia há quase 30 anos, especialmente em estudos relativos a corpos d'água naturais com vistas a projetos de gerenciamento hídrico, portuário e ambiental. Até meados da década de 70 a modelagem de corpos d'água era feita com base principalmente em modelos físicos reduzidos, uma vez que a modelagem numérica era praticamente inviável com os computadores de então. Com o crescimento exponencial da capacidade dos computadores, a modelagem física veio progressivamente dando lugar à modelagem computacional, principalmente por envolver custos muito menores.

O processo de modelagem hidrodinâmica ambiental é bem descrito pelo diagrama da Figura 9.

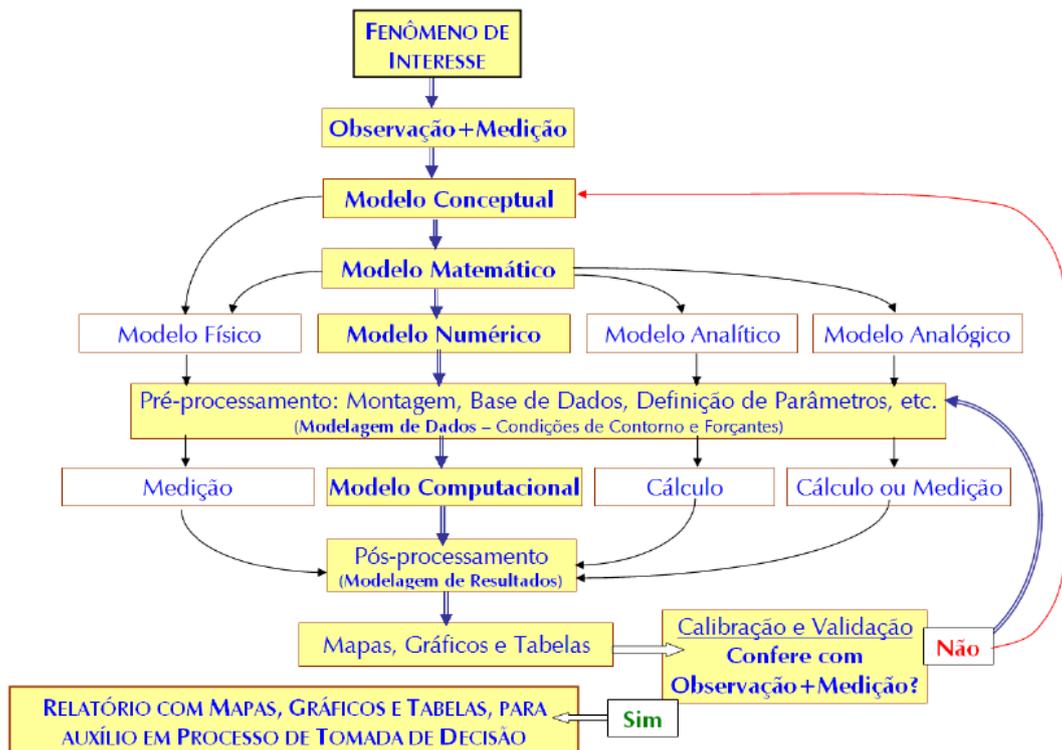


Figura 9: Diagrama representativo de todo o processo de modelagem de um corpo d'água natural (ROSMAN, 2013).

Constituído de várias etapas, o processo de modelagem se inicia na observação e compreensão de um determinado fenômeno de interesse, de maneira a formar um modelo conceptual que descreva bem o comportamento do fenômeno observado. A próxima etapa, que nada mais é do que a formulação matemática do modelo conceptual, é talvez a etapa mais crítica do processo. Quanto maior o entendimento do fenômeno em questão, mais abrangente será o modelo conceptual desenvolvido e mais complexo será o modelo matemático, o que tornará mais complicada a resolução do problema matemático. No entanto, a solução é mais exata. A questão principal está em balancear o nível de exatidão que se quer obter e o esforço de cálculo que se pretende aplicar.

Os modelos matemáticos utilizados para representar a hidrodinâmica e a qualidade das águas em corpos de água são bastante abrangentes, e são baseados em “leis” e “princípios” expressos em termos de equações diferenciais e condições de contorno adequadas. Por outro lado, é comum que modelos matemáticos envolvendo detalhes do escoamento ao redor de estruturas hidráulicas, ou modelos matemáticos de transporte de sedimentos em corpos de água, sejam semi-empíricos. A partir do modelo matemático quatro rotas são possíveis, levando aos modelos: físico, numérico, analítico e analógico. Neste trabalho, o interesse está especificamente nos modelos numéricos.

Os modelos numéricos consistem em adaptações dos modelos matemáticos de forma a torná-los de mais simples solução, tornando-os mais práticos e viáveis de se resolver e gerando-se uma quantidade enorme de contas a se fazer, tarefa que nos dias de hoje é facilmente cumprida com o uso de computadores. Praticamente qualquer modelo matemático pode ser resolvido através de um modelo numérico, e em geral há relativamente pouca perda de informação na tradução de um para o outro. Segundo ROSMAN (2013), “os modelos numéricos permitem a solução de uma gama de problemas muitíssimo mais abrangente que qualquer outra modalidade de modelos.” Há muito mais casos que podem ser adequadamente modelados numericamente e que são inviáveis em modelos físicos, que o oposto.

A etapa seguinte, de pré-processamento, consiste na coleta e tratamento dos dados que alimentarão o modelo computacional, que são informações relativas às características do corpo d’água e das condições de contorno no domínio de modelagem. Esta costuma ser uma das etapas mais problemáticas do processo de modelagem, pois muito frequentemente não se dispõe de dados medidos em campo, ou então os dados disponíveis não são atuais.

O modelo computacional é a tradução do modelo numérico para a linguagem dos computadores, que fazem todo o trabalho pesado de resolução de contas matemáticas e processamento de dados. Os resultados gerados pelo modelo computacional do fenômeno em questão são então processados e dispostos em forma de mapas, gráficos e tabelas, para a análise e confronto destes com a realidade através da comparação com dados medidos, de forma a calibrar e validar o modelo. Estes resultados comporão relatórios técnicos e científicos que auxiliarão na tomada de decisões, relativas a projetos de gestão ambiental e de recursos hídricos.

2.2 Considerações sobre a Morfologia de Canais de Maré

Em resposta aos agentes hidro-sedimentológicos em geral os estuários, ou canais de maré naturais, apresentam variações em sua morfologia com cinco graus de liberdade, que são representados por cinco variáveis morfológicas:

- **profundidade da calha;**
- **declividade do canal;**
- **largura da calha;**

- **curvatura dos meandros;**
- **posição dos bancos sedimentares.**

Estas cinco variáveis morfológicas características, modificam-se em função de outras cinco variáveis formadoras da morfologia, a saber:

- **vazão de água doce de montante;**
- **vazão sólida (sedimentos) de montante;**
- **vazão de água salgada;**
- **vazão sólida (sedimentos) de origem marinha;**
- **erodibilidade dos bancos de sedimentos coesivos.**

Ao contrário dos processos morfológicos em canais fluviais, em estuários e canais de maré, não há uma relação unívoca de efeito/causa entre as variáveis que caracterizam a morfologia e aquelas formadoras da morfologia. Em rios, as variáveis morfológicas são dependentes, e guardam uma relação unívoca com as variáveis independentes formadoras da morfologia. Já em estuários e canais de maré, há uma relação biunívoca entre os dois grupos de variáveis. Isto é, modificações significativas em variáveis de um grupo causam mudanças nas variáveis do outro grupo e, através de um mecanismo de retroalimentação, são afetadas por tais modificações. O mecanismo fundamental causador de tal efeito complexo é o mecanismo de propagação da maré (MOTTA, 1978 *apud* ROSMAN, 2012). Por exemplo, a dragagem de um canal de maré modifica a propagação da maré, e conseqüentemente as vazões sólida e líquida de origem marinha. As novas vazões, por sua vez, poderão causar modificações na morfologia de trechos não afetados pela dragagem, ou serem tais que favoreçam a nova morfologia imposta pela dragagem.

2.3 Hidráulica de Canais de Maré

O escoamento em um canal de maré é predominantemente devido ao gradiente de pressão, em função da diferença do nível d'água, que ocorre entre o mar e o interior da lagoa, ao longo dos ciclos de maré. Na preamar, quando o nível d'água na embocadura marítima do canal é maior que o nível na lagoa, o escoamento é forçado no sentido do oceano para lagoa, ocorrendo as correntes de enchente no canal. Já na baixa-mar, quando o nível d'água no mar é inferior ao nível no interior da lagoa, o escoamento ocorre da

lagoa para o mar, configurando as correntes de vazante. O volume de água que escoou para a lagoa através do canal irá se acumulando no interior desta, enquanto o nível no mar for superior, ou seja, enquanto o gradiente de pressão permanecer. A partir do momento que o nível d'água no mar passa a ser menor que o nível na lagoa, o gradiente se inverte e o escoamento passa a ser da lagoa para o mar. Quando o nível no mar e na lagoa são iguais, as velocidades são próximas de zero. A Figura 10 e a Figura 11 ilustram estas situações.

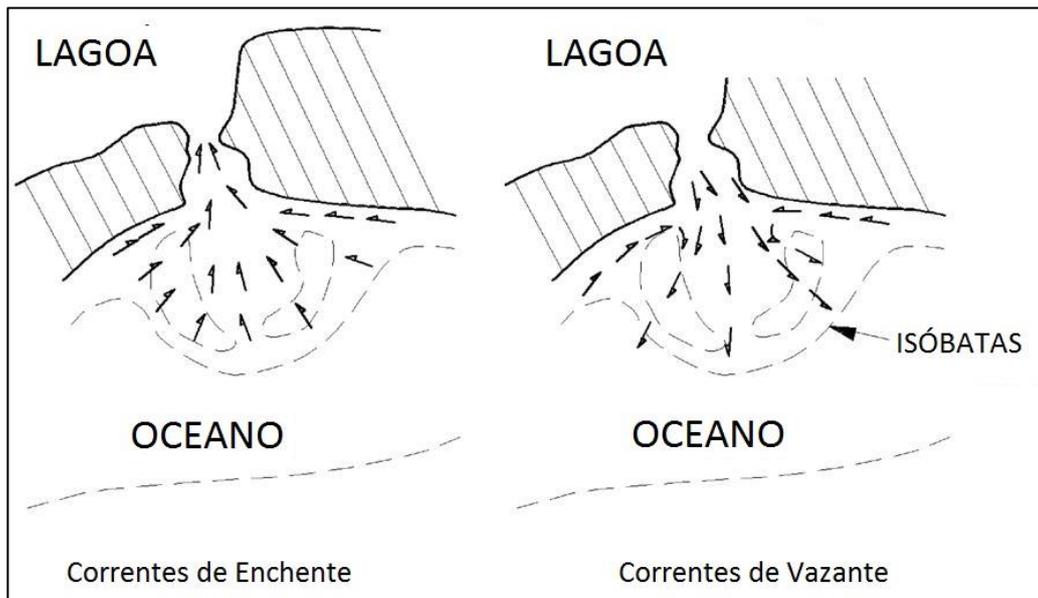


Figura 10: Esquema de correntes de maré enchente e vazante em um canal de maré (adaptado de O'BRIEN, 1969 *apud* U.S. ARMY, 2012).

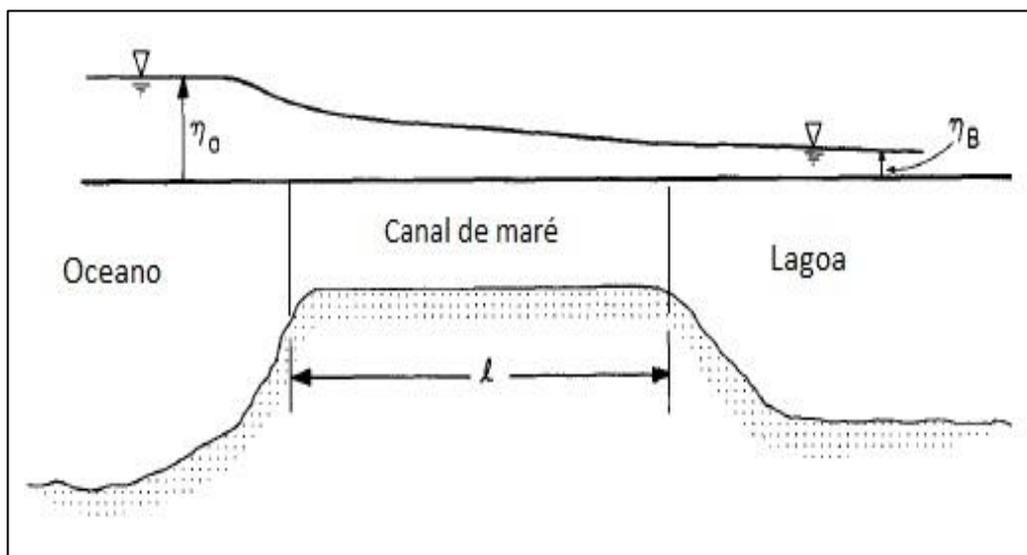


Figura 11: Esquema típico de nível d'água numa situação de preamar para uma lagoa conectada ao oceano por um canal de maré. Essa situação origina um fluxo de enchente da lagoa (adaptado de O'BRIEN & DEAN, 1972).

A maré no interior da lagoa tem em geral menor amplitude que a maré no mar. Este efeito de amortecimento é mais acentuado conforme a área do espelho d'água da lagoa for maior e conforme a área de seção hidráulica do canal de maré for menor. Uma lagoa com área superficial grande tem seu nível d'água lentamente elevado, devido ao seu grande volume, enquanto que uma lagoa com pequena área de superfície enche rapidamente. A diferença de fase entre a maré no mar e no interior da lagoa é também maior para lagoas com grande espelho d'água.

A área hidráulica e a geometria do canal determinam sua capacidade de descarga, sendo assim variáveis importantes na regulação de nível de uma lagoa. Áreas hidráulicas muito pequenas representam significativas perdas de carga.

Os escoamentos em canais de maré são descritos de forma satisfatória por modelos matemáticos unidimensionais, obtidos através da promediação ao longo da seção transversal das equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento, expressas originalmente em três dimensões. CALIXTO (1990) e PINTO (1999) fazem uma análise bastante detalhada sobre a dedução matemática da forma unidimensional destas duas equações.

2.3.1 Equação da Conservação da Quantidade de Movimento Promediada na Seção Transversal

De acordo com a Segunda Lei de Newton: “A taxa de variação da quantidade de movimento é proporcional às forças aplicadas e se dá na direção que a força resultante age “ (LE MÉHAUTÉ, 1976 *apud* CALIXTO, 1990). A equação 1, a seguir, derivada desta lei, se refere ao princípio da conservação da quantidade de movimento, que expressa a relação entre as forças aplicadas numa unidade de volume e as forças de inércia desta unidade de volume, em movimento. Esta equação está escrita na forma unidimensional:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{f_e}{8R_h} |\bar{u}| \bar{u} \quad (1)$$

onde η e \bar{u} são respectivamente a elevação do nível d'água e a velocidade média na seção, f_e é o fator de atrito efetivo, R_h o raio hidráulico e g a aceleração da gravidade.

2.3.2 Equação da Continuidade Promediada na Seção Transversal

A equação da continuidade, que expressa o princípio da conservação de volume, pode ser escrita da seguinte maneira em uma dimensão:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[A\bar{u}] = 0 \quad (2)$$

ou

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[Q] = 0 \quad (3)$$

na qual A é a área da seção transversal, \bar{u} é novamente a velocidade média na seção e Q é a vazão que atravessa a seção, igual ao produto $A\bar{u}$.

Ao utilizar as equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento escritas em uma dimensão, como nas expressões 1 e 2, supôs-se que as características do escoamento variam lenta e gradualmente no tempo e no espaço, podendo-se assim considerar que a distribuição de pressões nas seções transversais do escoamento é hidrostática e que as variações de forma ao longo do leito são graduais. Assume-se também que a coluna d'água é bem misturada, tendo pouca ou nenhuma estratificação, de modo que as equações unidimensionais são simplificações aceitáveis das tridimensionais. Assumiu-se a massa específica do fluido como constante, dado que está se falando de uma aplicação para águas rasas, e a aceleração de Coriolis foi vista como desprezível. O referencial adotado considera a direção x coincidente com o eixo do canal e a direção y seria transversal ao mesmo eixo. Assume-se também que as variações do nível d'água na direção y são desprezíveis, se comparadas com as variações na dimensão x .

2.4 Estabilidade Hidro-Sedimentológica de Canais de Maré

Um canal de maré 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 desobstruído naturalmente e com suas características morfológicas variando pouco, em torno de uma geometria média. O conceito de estabilidade de canais de maré foi inicialmente introduzido por ESCOFFIER (1940) e aprimorado por uma

série de outros trabalhos publicados em sequência, como O'BRIEN & DEAN (1972), BRUUN (1978) e SKOU (1990).

A estabilidade de um canal de maré 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, como explica ROSMAN (2012). Os agentes estabilizadores são: as velocidades das correntes de maré no canal e o volume de água a ser escoado no canal 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. O comportamento destes agentes depende, predominantemente, dos seguintes fatores: as marés, o clima de ondas, o transporte litorâneo ao longo da praia adjacente ao canal, a descarga fluvial e as características morfológicas da bacia interior. Pode-se dizer que as condições de estabilidade na embocadura de tais canais dependem de maneira geral destes cinco fatores (PINTO, 1999).

A análise da estabilidade de um canal de maré leva em consideração relações entre os agentes estabilizadores e desestabilizadores e pode ser basicamente resumido por quatro diferentes critérios:

- **Relação entre Prisma de Maré e Área da Menor Seção Transversal;**
- **Relação entre Prisma de Maré e Transporte Litorâneo Total;**
- **Relação entre Velocidade Média Máxima e Área da Menor Seção Transversal do Canal;**
- **Relação entre Capacidade de Resposta e Área da Menor Seção Transversal do Canal.**

Nestes critérios são usadas as seguintes definições (ROSMAN *et al*, 1992):

Prisma de Maré (P): volume de água do mar que entra na bacia interior pelo canal, durante a enchente da maré;

Área da Menor Seção Transversal do Canal (A_c): é a área hidráulica em relação ao nível médio do mar da menor seção transversal do canal de maré;

Velocidade Média Máxima ($V_{m\acute{a}x}$): é o máximo valor da velocidade média em A_c ;

Transporte Litorâneo Total (M_t): é a soma do módulo do transporte de sedimentos ao longo da praia que passa pela embocadura, i.e., independente do sentido;

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 desestabilizantes.

2.4.1 Relação entre o Prisma de Maré e a Área da Menor Seção Transversal: $P \times A_c$

Com base em observações e medições em canais de maré estáveis com embocaduras em costas arenosas, O'BRIEN (1931 e 1969) *apud* ROSMAN (2012) observou que a área da menor seção transversal de tais canais poderia ser relacionada ao prisma de maré de sizígia médio através das expressões seguintes, com A_c em (m^2) e P em (m^3):

$$A_c = 6,56 \times 10^{-5} P \text{ (canais sem guia-correntes)} \quad (4)$$

$$A_c = 9,02 \times 10^{-4} P^{0,85} \text{ (canais com dois guias-correntes)} \quad (5)$$

Baseado nos estudos de O'Brien, JARRET (1976) *apud* ROSMAN (2012) obteve relações semelhantes ao analisar a regressão de 108 canais de maré estáveis em praias de costa aberta, com granulometria variando de fina a média, e diferentes características de embocadura, isto é, com nenhum, com um ou com dois guia-correntes. Para o conjunto analisado, JARRET (1976) mostra que os canais com ou sem guia-correntes na embocadura, em 95% dos casos, apresentavam área da menor seção transversal satisfazendo aos seguintes limites:

$$5,20 \times 10^{-4} P^{0,97} \leq A_c \leq 4,03 \times 10^{-4} P^{0,95} \quad (6)$$

obtendo um valor mais frequente em torno de:

$$A_c = 1,57 \times 10^{-4} P^{0,95} \quad (7)$$

também com A_c em (m^2) e P em (m^3). Em costas sujeitas a forte ação de ondas, logo de maior energia, os valores de A_c tendem a ser menores que o mais frequente, ao passo que em locais mais abrigados das ondas as embocaduras tendem a apresentar valores de A_c maiores que os previstos pela equação 8. A Tabela 1 abaixo mostra algumas das relações observadas por JARRET (1976):

Fórmula Geral: $A_c = a_1 P^{m_1}$ com A_c em ft^2 e P em ft^3			
Costa	Nº de Guias Correntes	a_1	m_1
Atlântico	0, 1 ou 2	$7,75 \times 10^{-6}$	1,05
	0 ou 1	$5,37 \times 10^{-6}$	1,07
	2	$3,77 \times 10^{-5}$	0,95
Golfo do México	0, 1 ou 2	$5,02 \times 10^{-4}$	0,84
	0 ou 1	$3,51 \times 10^{-4}$	0,86
Pacífico	0, 1 ou 2	$1,19 \times 10^{-4}$	0,91
	0 ou 1	$1,91 \times 10^{-6}$	1,10
	2	$5,28 \times 10^{-4}$	0,85
Embocaduras nas 3 costas	0, 1 ou 2	$5,74 \times 10^{-5}$	0,95
	0 ou 1	$1,04 \times 10^{-5}$	1,03
	2	$3,76 \times 10^{-4}$	0,86

Tabela 1: Valores de a_1 e m_1 para a fórmula empírica desenvolvida por Jarret, mostrada em (6). Adaptado de JARRET (1976) apud PINTO (1999).

As expressões de O'BRIEN (1931 e 1969) e de JARRET (1976) aqui apresentadas são validadas para regiões com marés predominantemente semidiurnas, com ou sem desigualdades diurnas. Embocaduras situadas em regiões de marés diurnas apresentam relações diferentes.

2.4.2 Relação entre o Prisma de Maré e o Transporte Litorâneo Total: P / M_t

Como já dito anteriormente, a estabilidade de um canal de maré depende do balanço entre os agentes estabilizantes, que favorecem abertura do canal, e os agentes desestabilizantes, que favorecem o fechamento do canal. Uma das limitações do critério de O'Brien é que as relações $P \times A_c$ não explicitam o transporte de sedimentos longitudinal à costa, em decorrência dos processos litorâneo vizinhos à embocadura.

BRUUN & GERRITSEN (1962) e BRUUN (1978) *apud* ROSMAN (2012), baseados em medições na natureza, desenvolveram um critério que relaciona o transporte litorâneo total, M_t , causado pela ação das ondas, com o prisma de maré de sizígia médio, P , que representa a capacidade dos fluxos de enchente e vazante da maré em expelir os sedimentos depositados no canal. Tal critério está resumido na Tabela 2, a seguir:

$150 < P / M_t$	Canal estável com boas condições de navegabilidade, grande capacidade de expelir sedimentos, fraca formação de barra.
$100 < P / M_t < 150$	Canal estável com condições menos satisfatórias de navegabilidade, formação de barra pode acontecer.
$50 < P / M_t < 100$	Canal permanece desobstruído, mas usualmente apresenta formação de grande barra na entrada, navegação possível com dragagem de canal pelo meio da barra.
$20 < P / M_t < 50$	Embocadura tipo transpasse de barra, arrebentação de ondas na barra durante tempestade. Permanece aberta, mas a barra só é limpa por enxurradas na época das chuvas. Perigoso para navegação
$P / M_t < 20$	Embocaduras com grande formação de barra, funcionando mais como canais de extravasamento do que entradas permanentes de maré, podendo apresentar instabilidade. Navegação possível apenas para pequenas embarcações.

Tabela 2: Quadro resumo do critério de estabilidade de Per Bruun, baseado na razão entre o Prisma de Maré (P) e o Transporte Litorâneo Total (M_t) que cruza a embocadura.

2.4.3 Relação entre a Velocidade Média Máxima e a Área da Menor Seção Transversal: $V_{m\acute{a}x} \times A_c$

Outra metodologia para analisar as condições de estabilidade de um canal de maré foi desenvolvida por ESCOFFIER (1940), representando o efeito dos agentes desestabilizantes, através das variações da área da menor seção transversal e o efeito dos agentes estabilizantes, através da velocidade média máxima nesta seção. É imprescindível, para a estabilidade de um canal de maré, que os efeitos dos diversos agentes sejam compensatórios. No caso de eventos desestabilizadores causarem a deposição de sedimentos no canal, diminuindo assim a área de sua seção transversal, haveria uma tendência para incremento na velocidade média máxima, aumentando assim a capacidade de remover o sedimento depositado. A Figura 12 exemplifica um típico diagrama de $V_{m\acute{a}x} \times A_c$, no qual o pico de $V_{m\acute{a}x}$ ocorre em uma área correspondente denominada área limite A^* .

Uma vez que $V_{m\acute{a}x}$ é um indicativo da capacidade de transporte de sedimentos, a ocorrência de um evento que promova uma mudança em A_c , causará uma modificação em $V_{m\acute{a}x}$ e, conseqüentemente, na capacidade de transporte de sedimentos.

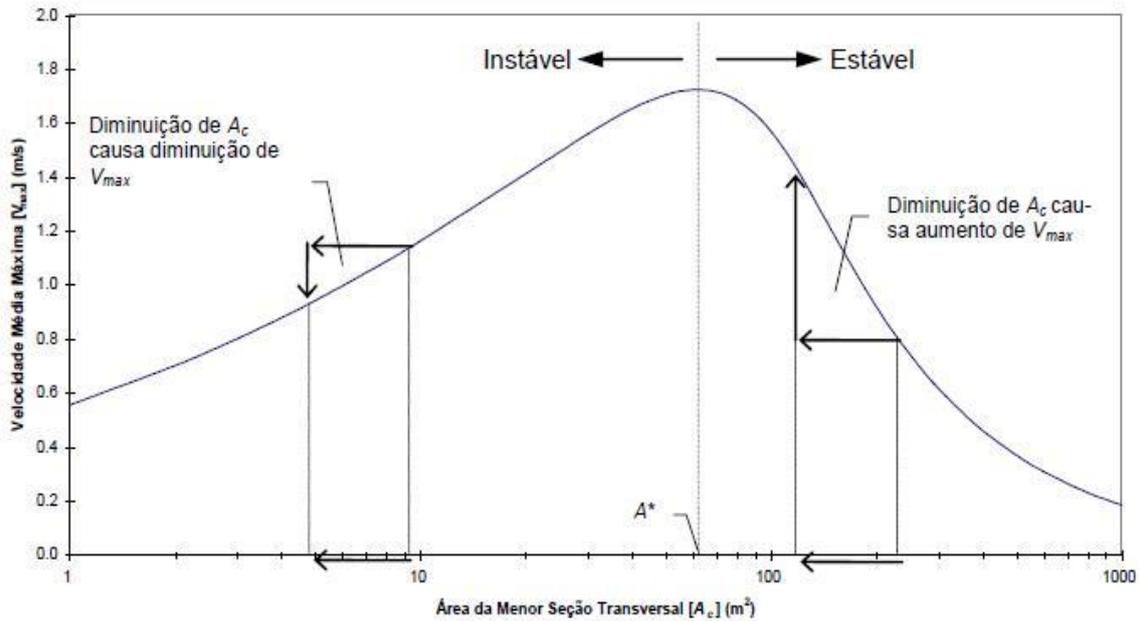


Figura 12: Exemplo de diagrama de $V_{m\acute{a}x} \times A_c$ para uma determinada amplitude de maré em canal de maré genérico (ROSMAN, 2012). Os valores de $V_{m\acute{a}x}$ são assumidos para a maré vazante.

Como indicado no diagrama da Figura 12 acima, quando $A_c < A^*$ o canal é instável e quando $A_c > A^*$ o canal é estável.

Canais Instáveis [$A_c < A^*$]: nesta situação a ocorrência de um evento desestabilizante não é compensada por uma força estabilizadora. Em ocasiões de ressaca, por exemplo, nas quais tende a haver uma diminuição do valor de A_c , em função da deposição da areia carregada para o canal, há a tendência para uma diminuição de $V_{m\acute{a}x}$. Diminuindo $V_{m\acute{a}x}$, conseqüentemente, diminuirá também a vazão sólida no canal e a capacidade do escoamento de expelir os sedimentos depositados. Para valores de A_c menores que A^* diz-se que o canal é instável, pois uma redução no valor de A_c faz com que $V_{m\acute{a}x}$ tenda também a diminuir, o que propicia ainda mais o acúmulo de sedimentos, que por sua vez reduz novamente A_c e faz com que $V_{m\acute{a}x}$ mais uma vez diminua, e assim, sucessivamente. O problema é cada vez mais agravado, até o provável fechamento do canal. Este fato poderia ser compensado pela ocorrência de eventos meteorológicos extremos, como fortes chuvas, que perdurassem por um longo período de tempo na região da lagoa ou bacia interior. O acúmulo de água na lagoa ocasionaria um aumento em $V_{m\acute{a}x}$ que pode-

ria ir erodindo o canal, de forma a tornar $A_c > A^*$. No entanto, é sabido que eventos meteorológicos são normalmente inconstantes e raramente de duração muito prolongada.

Canais Estáveis [$A_c > A^*$]: nesta situação a ocorrência de um evento desestabilizante é compensada por uma força estabilizadora que tende a restaurar a situação original, mantendo o equilíbrio da morfologia do canal em torno de uma situação média. Novamente, a ocorrência de uma ressaca, evento desestabilizante que promove rotineiramente acúmulo de areia no canal e conseqüentemente a diminuição do valor A_c , ocasiona desta vez não uma redução, mas sim um aumento no valor de $V_{máx}$. O aumento da velocidade média no canal acarreta uma maior capacidade de transporte de sólidos, retirando assim o excesso de sedimentos e proporcionando um aumento da área da seção transversal, tendendo a restaurar o valor original de A_c , ou estabelecendo outro valor de equilíbrio próximo. Um aumento de A_c , por outro lado, ocasiona uma diminuição de $V_{máx}$, facilitando a deposição de sedimentos, o que tenderá a diminuir a área da seção transversal, restaurando o valor de equilíbrio original. Assim, todo canal com $A_c > A^*$ pode ser classificado como estável, porque há efeitos compensatórios entre agentes hidro-sedimentológicos. Nesta situação há forte tendência para os efeitos de um agente serem compensados por efeitos contrários de outro agente, tornando difícil a ocorrência de modificações significativas em uma dada situação de equilíbrio.

Resumindo, segundo ESCOFFIER (1940), no lado esquerdo do gráfico ($A_c < A^*$) o canal de maré se encontra em situação de instabilidade, a ação das forças desestabilizadoras não só não é compensada por uma força estabilizadora, como também faz com que a tendência ao fechamento do canal seja cada vez mais forte. No lado direito do gráfico ($A_c > A^*$) se observa a situação de estabilidade, pois a ação de um agente desestabilizador é assim compensada pela ação de um agente estabilizador, fazendo com que o canal oscile em torno de uma geometria média.

Embora o método de Escoffier permita determinar se o canal de uma dada lagoa ou baía interior tem ou não condições de estabilidade, não permite definir diretamente qual seria o valor da área de menor seção transversal, A_c , para uma estabilidade ótima e também não leva em consideração a ocorrência de eventos extremos, como por exemplo

uma forte ressaca, que poderia levar a área A_c de um canal estável para uma situação de instabilidade, caso A_c seja pouco maior que A^* . A fim de contornar esta limitação O'BRIEN & DEAN (1972) formularam uma metodologia que utiliza as relações de P x A_c como condição de equilíbrio sedimentar em combinação com o método de Escoffier, que será exemplificada adiante. A seguir, é mostrada outra maneira de estimar a condição de estabilidade ótima, que consiste na função Capacidade de Resposta, C_r .

2.4.4 Relação entre Capacidade de Resposta e Área da Menor Seção Transversal: C_r x A_c

SKOU (1990) *apud* ROSMAN (2012) definiu C_r como a Função Capacidade de Resposta:

$$C_r = -\frac{\partial V_{m\acute{a}x}}{\partial A_c} \quad (8)$$

Segundo SKOU (1990), a área A_c ótima seria aquela na qual o valor de C_r é máximo, isto é, seria o valor de área no qual a ação dos agentes desestabilizadores (mudanças em A_c) causaria a máxima resposta dos agentes estabilizadores (mudanças em $V_{m\acute{a}x}$). Em outras palavras, esta é a área que tenderia mais rápida e fortemente ao equilíbrio. Canais instáveis ($A_c < A^*$) apresentam capacidade resposta negativa e canais estáveis ($A_c > A^*$) apresentam capacidade de resposta positiva.

O método da capacidade de resposta, ou método de Skou, 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 do canal seja maior que a área limite A^* , mas também que a resposta a um evento desestabilizador seja máxima.

2.5 Metodologia para Análise de Estabilidade de um Canal de Maré

Na prática de Engenharia, para projetos de concepção de novos canais de maré ou dragagem de canais existentes, não se utiliza apenas um dos critérios de estabilidade acima descritos, mas sim uma combinação destes, que são métodos complementares. Uma análise baseada em apenas um critério poderia vir a se mostrar ou incompleta, ou exi-

gente demais. Vale lembrar que, muitas vezes, a largura de um canal de maré é limitada pelas restrições urbanas de cada local.

O passo inicial para uma análise de estabilidade consiste em traçar curvas do tipo $V_{máx} \times A_c$ para diferentes amplitudes de maré (a_0), sendo cada curva correspondente a resposta hidrodinâmica do canal para uma diferente amplitude. A amplitude de maré é definida como a variação do nível d'água em relação ao nível médio. Alternativamente, a_0 pode ser aproximada pela metade da altura de maré. Define-se altura de maré como o valor absoluto da diferença entre o nível de preamar (PM) registrado em um determinado momento e o nível da próxima (ou da anterior) baixa-mar (BM).

A Figura 13, abaixo, exemplifica essa situação para um canal hipotético, com curvas $V_{máx} \times A_c$ para amplitudes de maré variando desde 0,10 a 0,70 m. O critério de Escoffier indica que o canal deste exemplo será estável para áreas maiores que 80m², que é a área na qual a curva da maior maré apresenta maior velocidade média máxima. O canal será instável para áreas menores que 50 m², que é a área na qual a curva da menor maré apresenta maior velocidade média máxima. Para áreas situadas na faixa entre 50 e 80 m², o canal pode ser estável ou instável, dependendo da fase da maré.

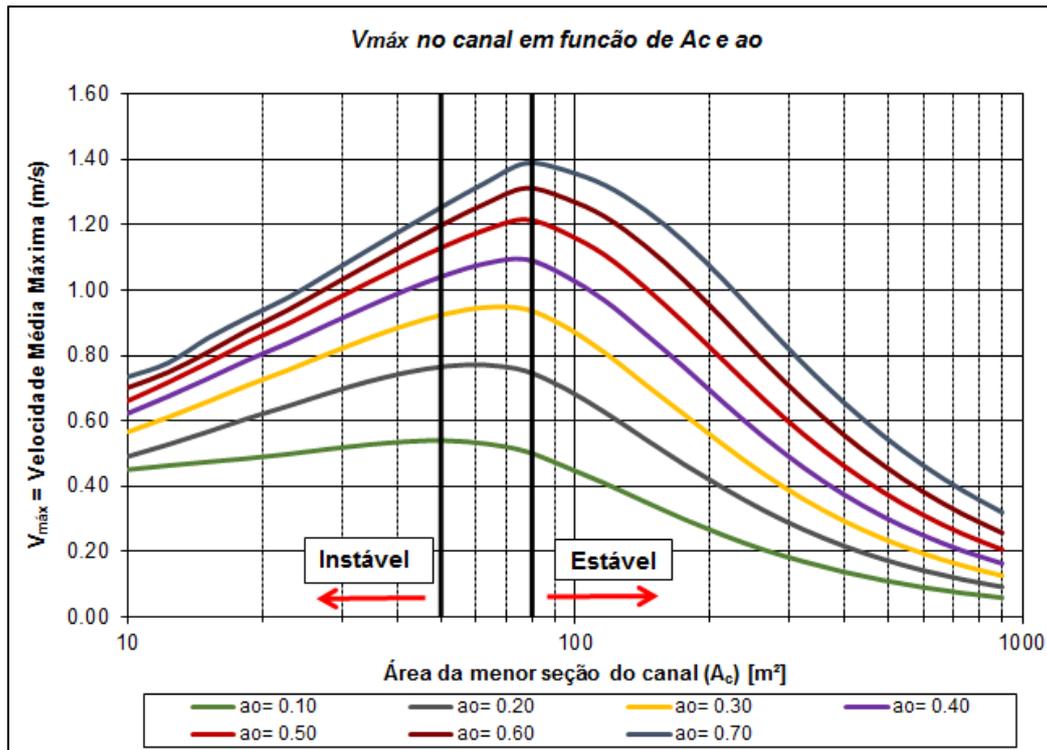


Figura 13: Exemplo de gráfico de $V_{máx}$ x A_c levando em consideração o critério de Escoffier para amplitudes de maré variando entre 0,10m e 0,70m.

Através da metodologia analítica desenvolvida por METHA & ÖSZÖY (1978) *apud* PINTO (1999) é possível obter o valor de $V_{máx}$ a partir dos valores de P e A_c . Desta maneira, o próximo passo consiste em traçar curvas relacionando $V_{máx}$ e A_c em função das relações do tipo P x A_c obtidas, mostradas na Tabela 1. Como há uma gama de relações que variam quanto ao nível de exigência, plota-se no gráfico a curva mais exigente e a menos exigente. Por fim, calcula-se o máximo valor de capacidade de resposta para a curva de cada maré e, unindo estes pontos, obtém-se a curva de máxima capacidade de resposta.

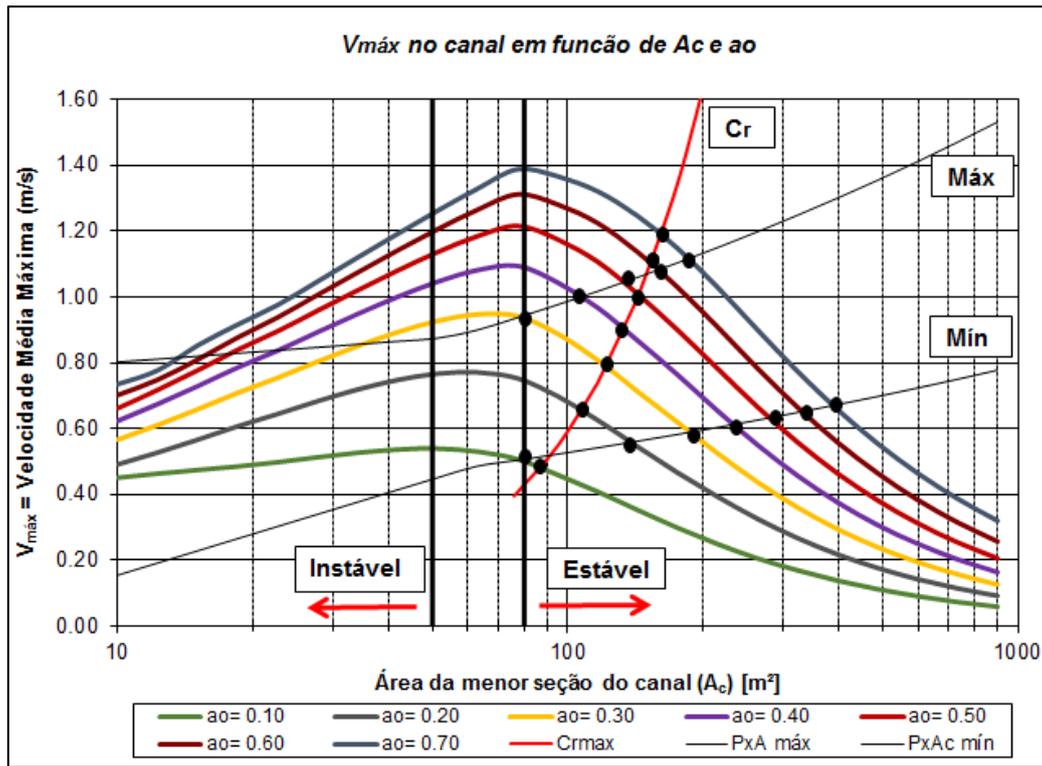


Figura 14: Diagrama $V_{máx} \times A_c$ completo para a análise de estabilidade de um canal de maré hipotético. O cruzamento das curvas $[P \times A_c]_{máx}$, $[P \times A_c]_{mín}$ e $C_{r máx}$ com as curvas de $V_{máx} \times A_c$ de cada amplitude de maré (a_0 variando de 0,10 a 0,70 m) indica o ponto de estabilidade ótima para cada diferente maré em relação a um destes critérios.

A Figura 14 abaixo mostra o diagrama $V_{máx} \times A_c$ já com as curvas de exigência máxima e mínima para o critério de O'Brien ($P \times A_c$) e com a curva de máxima capacidade de resposta. O cruzamento das curvas $[P \times A_c]_{máx}$, $[P \times A_c]_{mín}$ e $C_{r máx}$ com as curvas de $V_{máx} \times A_c$ de cada amplitude de maré (a_0 variando de 0,10 a 0,70 m) indica o ponto de estabilidade ótima para cada diferente maré em relação a um destes critérios. Estes pontos estão destacados na figura. Por exemplo, o cruzamento da curva C_r com a curva $a_0 = 0,70$ m indica que, para uma maré com esta amplitude, a área ótima, de acordo com critério de Skou, é de aproximadamente 170 m². Já de acordo com o critério de O'Brien ($P \times A_c$), a área ótima para uma maré de amplitude 0,70m é de aproximadamente 190m² para o critério mais exigente e 400m² para o critério menos exigente. Cada um destes pontos indica, também, os mínimos valores de $V_{máx}$ requeridos no canal para a estabilidade. Não seria muito válido, no entanto, construir um canal de 400m² se, as marés capazes de proporcionar o mínimo valor de $V_{máx}$, requerido para a estabilidade, ocorrem apenas numa percentagem pequena do tempo.

A viabilidade de um dado canal ser estável depende, portanto, de ocorrerem com grande frequência marés que forcem escoamentos no canal, que produzam $V_{\text{máx}}$ maior ou igual ao mínimo necessário, condizente com o valor de A_c estabelecido (ROSMAN, 2012).

Na Figura 15 se pode observar a porcentagem de tempo durante a qual cada amplitude de maré é excedida. A Figura 16 apresenta a frequência de ocorrência de amplitudes de maré que geram velocidades que satisfazem às condições de estabilidade estabelecidas pelos critérios de $[P \times A_c]_{\text{máx}}$, $[P \times A_c]_{\text{mín}}$ e $Cr_{\text{máx}}$.

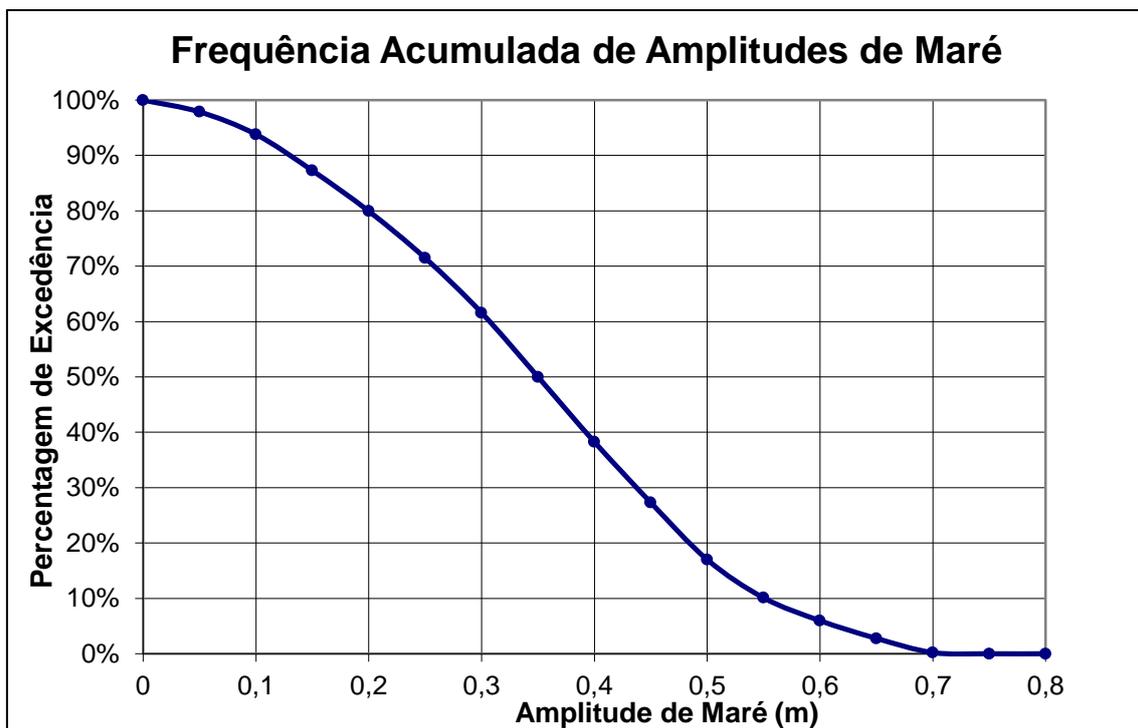


Figura 15: Gráfico de frequência acumulada de ocorrência de amplitudes de maré para o exemplo em questão.

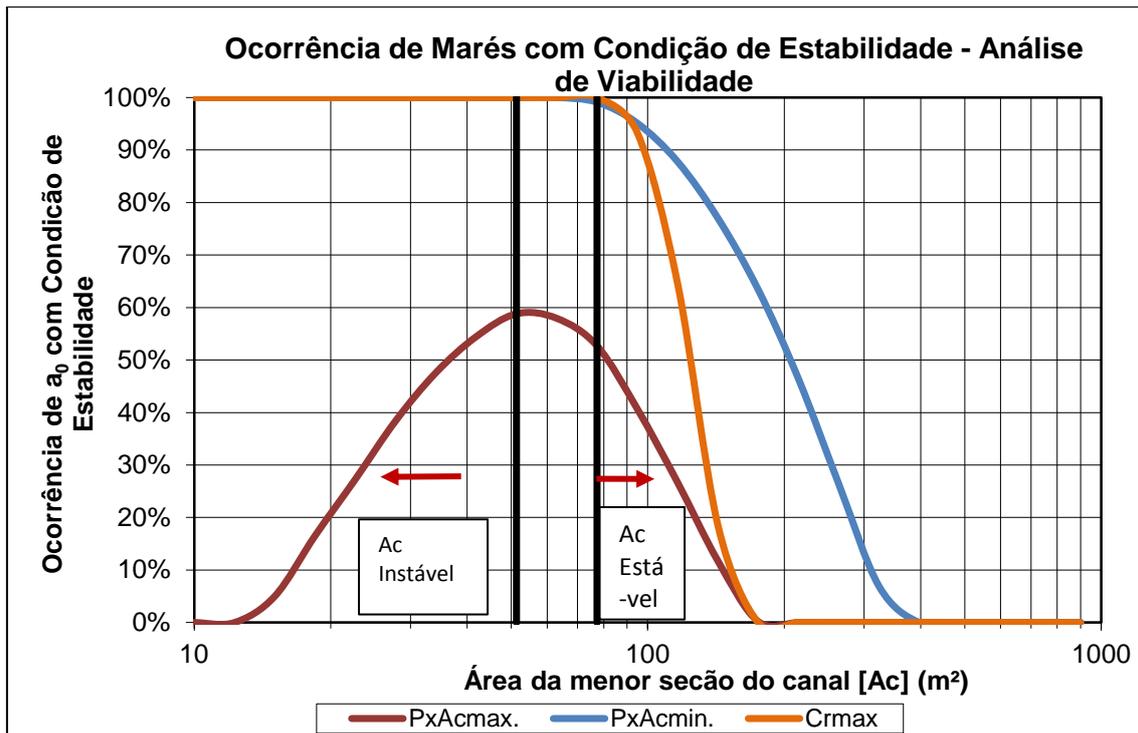


Figura 16: Gráfico de frequência de ocorrência de velocidades que satisfazem aos três critérios utilizados no exemplo.

Para construir a Figura 16 deve-se obter no gráfico da Figura 14 os valores de A_c dos pontos de cruzamento das curvas $[P \times A_c]_{max.}$, $[P \times A_c]_{min.}$ e $[C_r]_{max.}$ com as curvas das diferentes amplitudes de maré, que estão destacados com pontos pretos. Com o valor de A_c determinado para cada ponto de cruzamento, tira-se da Figura 15 a porcentagem de ocorrência da amplitude de maré correspondente e marca-se então um ponto na Figura 16. Ao realizar o mesmo procedimento para todos os pontos de cruzamento, a Figura 16 toma forma e se configura como um importante instrumento para avaliar as condições de estabilidade do canal de maré.

Para este caso exemplificado pode-se dizer que um valor de A_c de aproximadamente 130 m^2 garantiria, muito provavelmente, a estabilidade do canal, pois os critérios de $P \times A_c$ mais exigente e menos exigente seriam satisfeitos em 25% e 90% do tempo respectivamente, e o critério de $C_{r_{max}}$ seria atendido em 90% do tempo.

Após levar a análise a este ponto já é possível concluir pela viabilidade ou não do projeto de um canal hidro-sedimentologicamente estável. A partir deste ponto deve ser utilizado o critério de Per Bruun, que envolve a razão entre prisma de maré e transporte lito-

râneo total defronte à embocadura (P/M_t) e busca avaliar a necessidade da construção de guia-correntes e da utilização de mecanismos de transpasse de areia. Para o caso de P/M_t pequeno, é extremamente recomendado a utilização de ambos. Projetos como este demandariam detalhados estudos da dinâmica de sedimentos do local e da dinâmica ambiental.

Uma vez que já se sabe o valor da área hidráulica de projeto, falta apenas definir a configuração geométrica do canal. Assumindo sua seção transversal como próxima de um retângulo, a largura e a profundidade do canal devem respeitar a relação mostrada na Figura 17. Esta relação foi obtida por METHA (1976) *apud* PINTO (1999), por meio de observações de campo para uma variedade de canais de maré estáveis com um ou dois guia-correntes. Resultados de modelos de laboratório também confirmam esta relação.

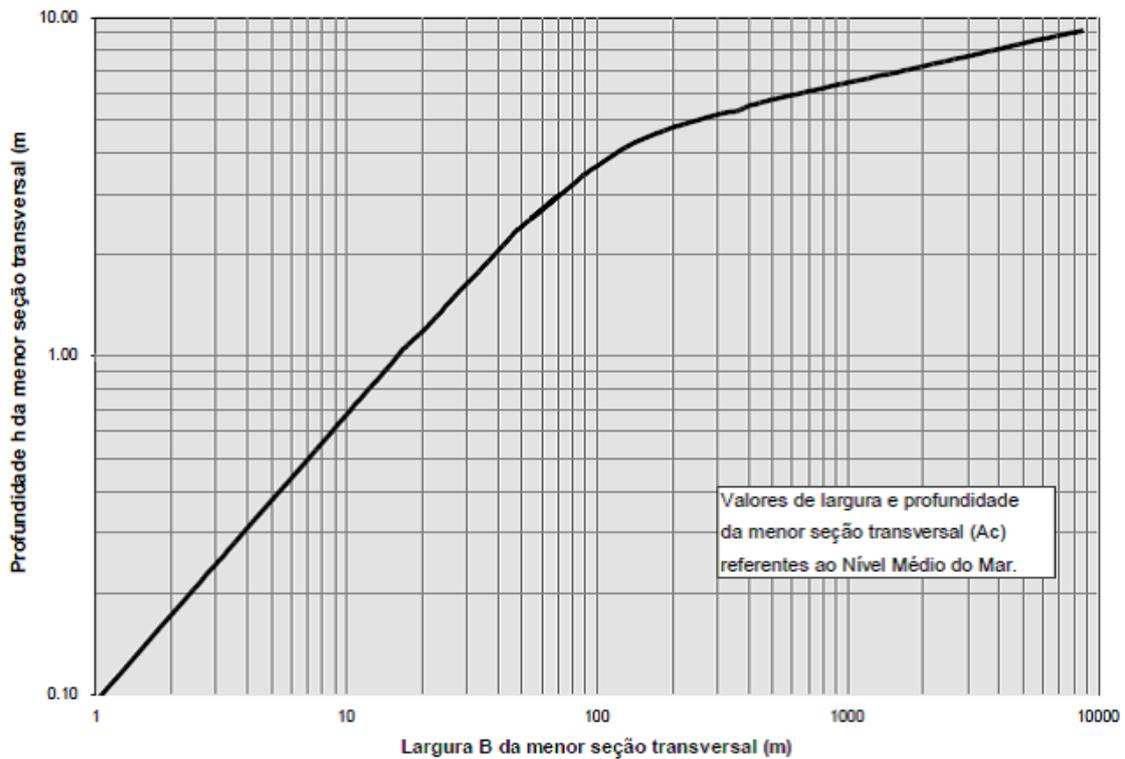


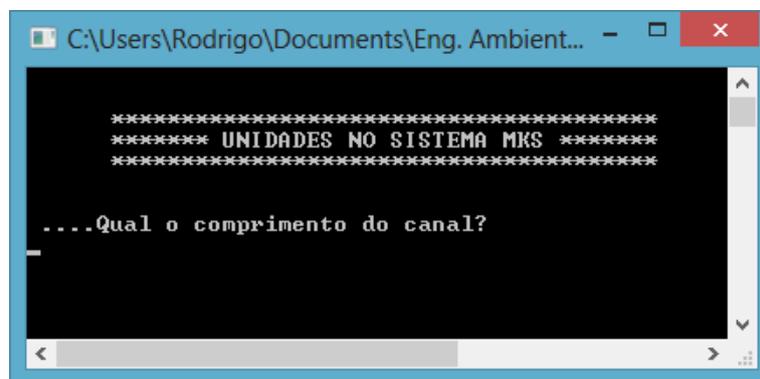
Figura 17: Relação entre largura e profundidade da menor seção transversal para canais de maré, obtida através da observação de vários canais de maré estáveis e de resultados de modelos de laboratório.

A metodologia acima descrita, que é a mesma utilizada por ROSMAN (1992) e PINTO (1999), foi empregada durante o estudo das condições de estabilidade do Canal Oeste. Análises deste tipo são em geral feitas com o auxílio de modelos analíticos e modelos numéricos unidimensionais, que modelam de forma adequada a hidrodinâmica de canais de maré.

2.6 Modelo M1DAC8

Esta sessão apresenta o modelo computacional M1DAC8, que foi utilizado para o dimensionamento do Canal Oeste. Este programa computacional foi desenvolvido no trabalho de PINTO (1999) e é específico para o estudo das condições de estabilidade de canais de maré.

O programa M1DAC8, escrito em linguagem Fortran, tem seus dados de entrada inseridos através do console Prompt de Comando, do sistema operacional Windows. Em diversas simulações no tempo, o programa calcula valores de velocidade, elevação, e vazão para diversas seções transversais igualmente espaçadas, em um sistema constituído de corpo d'água interior com uma ou duas ligações livres com o mar, sujeitas às variações da altura de maré. Como procedimento geral, o programa simula diversas situações para a área da seção transversal de um canal de maré uniforme, variando o valor da área dentro de uma faixa de valores definida pelo usuário, variando também a amplitude de maré dentro de um intervalo definido. A Figura 18 exemplifica o console de entrada de dados para o modelo M1DAC8.



```
C:\Users\Rodrigo\Documents\Eng. Ambient...
*****
***** UNIDADES NO SISTEMA MKS *****
*****
....Qual o comprimento do canal?
_
```

Figura 18: Console de entrada de dados do programa M1DAC8, utilizado para estudos sobre as condições de estabilidade de canais de maré.

O modelo resolve o escoamento ao longo de um domínio discretizado unidimensionalmente, composto por n seções transversais igualmente espaçadas ao longo do eixo da lagoa modelada, ou apenas do canal de maré, em alguns casos. As fronteiras do domínio de modelagem são a primeira e a última seção transversais.

2.6.1 Equações Governantes

O modelo matemático utilizado é composto pelas equações governantes do escoamento num canal de maré, obtidas através da promediação ao longo da seção transversal das equações gerais, tridimensionais, que exprimem os princípios de conservação de volume (ou de massa, sob condições específicas) e da conservação da quantidade de movimento. A consideração do escoamento unidimensional implica que as velocidades transversais e verticais são pequenas, se comparadas com as longitudinais, e o valor de velocidade calculado é o valor médio na seção transversal. As equações 1 e 2 são mostradas novamente abaixo, tomando por conveniência o nível médio do mar como nível de referência:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{f_e}{8R_h} |\bar{u}| \bar{u} \quad (1)$$

1 2 3 4

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [A\bar{u}] = 0 \quad (2)$$

onde, no instante t , uma seção transversal de área A , tal como definida adiante na equação 9, e situada na posição x , tem largura B e profundidade média h . Novamente, η e \bar{u} são respectivamente: a elevação do nível d'água e a velocidade média na seção; f_e é o fator de atrito efetivo, R_h o raio hidráulico e g , a aceleração da gravidade. As equações acima são semelhantes às chamadas equações de Saint Venant (CALIXTO, 1990).

A equação da quantidade de movimento (1) descreve o movimento da água ao longo do eixo da lagoa, onde o termo 1 é a aceleração temporal causada pela variação da velocidade com o tempo, o termo 2 é a aceleração advectiva causada pela variação da velocidade ao longo do eixo da lagoa, o termo 3 é o gradiente horizontal de pressão devido à inclinação da superfície da água e o termo 4 é a resistência friccional do leito (PINTO, 1999).

A equação da continuidade escrita em uma dimensão, tal como em (2), expressa que a taxa de variação no tempo da área A , de uma dada seção transversal, é igual ao negativo

da taxa de variação espacial da vazão $q = A\bar{u}$ ao longo das seções que caracterizam o domínio.

Para sistemas estuarinos nos quais a modelagem 1D se aplica, em geral é adequado aproximar a área hidráulica por um trapézio, como indicado na Figura 19.

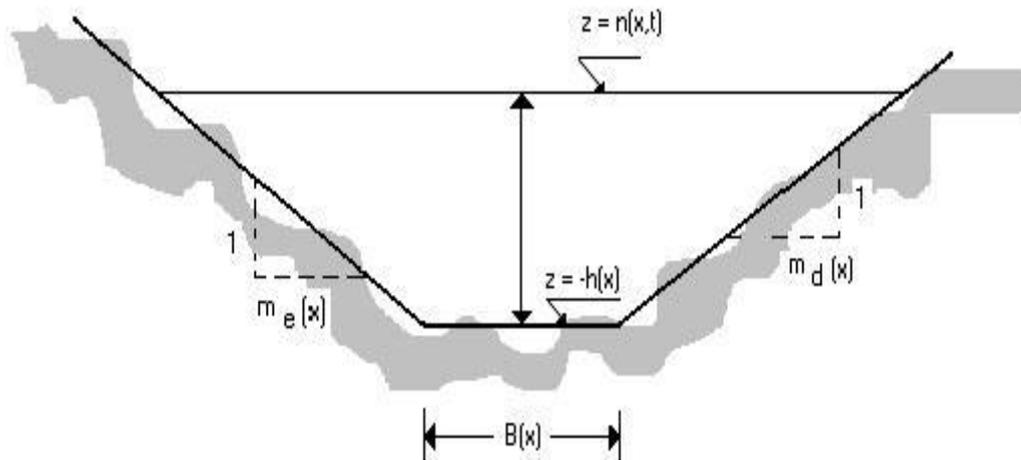


Figura 19: Esquema da seção trapezoidal para o modelo unidimensional (1D) utilizado. Adaptado de ROSMAN (1997) apud PINTO (1999)

Assim sendo, pode se escrever para a área hidráulica do canal:

$$A(x,t) = (\eta + h) \left[B + \frac{m_d + m_e}{2} (\eta + h) \right] \quad (9)$$

2.6.2 Condições de Contorno

As condições de contorno para o caso em questão são a prescrição da variação de níveis d'água, η_0 e η_n , na primeira e na última seção transversais respectivamente. Em outras palavras, as condições de contorno são dadas pela maré no oceano. No instante t , tem-se nestas seções:

$$\eta|_{(0,t)} \equiv \eta_0 \equiv \sum_{i=1}^{NCH} a_i \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi t}{T_i} + \varphi_i \right) \quad (10)$$

$$\eta|_{(n,t)} \equiv \eta_n \equiv \sum_{i=1}^{NCH} a_i \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi t}{T_i} + \varphi_i \right) \quad (11)$$

onde NCH é o número de componentes harmônicas consideradas; a_i , T_i e ϕ_i , são respectivamente: a amplitude, o período e a fase da i -ésima componente harmônica.

Alternativamente, para casos diferentes do que estamos interessados, pode se prescrever valores de vazão para a primeira e para a última seção, como condições de contorno.

2.6.3 Condições Iniciais

Como condições iniciais adota-se tradicionalmente nível d'água e velocidade iguais a zero, em todas as seções, tendo assim :

$$\bar{u}(x,0) = 0 \text{ e } \eta(x,0) = 0 \quad ; \quad (12), (13)$$

A condição inicial descrita acima pelas equações 12 e 13 é uma situação artificial e é conhecida como “partida a frio”. Tal condição gera, nos passos iniciais da solução numérica, uma irrealidade devido ao artificialismo imposto. Ao longo do período total da simulação, esta contaminação inicial é eliminada pelo próprio modelo, tendo efeitos desprezíveis nos resultados finais, como constatou PINTO (1999).

2.6.4 Características do Modelo Numérico

O sistema composto pelas equações 1 e 2 é resolvido numericamente no tempo e no espaço através do método de diferenças finitas, com as condições de contorno expressas pelas equações 10 e 11 e as condições iniciais expressas pelas equações 12 e 13. Foram empregados na discretização espacial e temporal esquemas de segunda ordem em Δx e Δt . Na discretização espacial, utilizou-se diferenças centrais nos pontos interiores ao domínio, e nas fronteiras empregou-se diferenças progressivas para a primeira seção e diferenças regressivas para a última seção. As equações 1 e 2 são então resolvidas progressivamente no tempo ao longo de todo o domínio modelado (PINTO, 1999).

A seguir serão apresentados os modelos do SisBaHiA[®] que foram utilizados para simular o cenário definido para a Lagoa de Araruama com o Canal Oeste.

2.7 Modelo Hidrodinâmico - SisBaHiA[®]

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA[®] é o chamado FIST3D (*filtered in space and time 3D*), um eficiente modelo numérico hidrodinâmico, tridimensional, que utiliza o

método de elementos finitos para calcular escoamentos homogêneos e de grande escala. Embora o modelo disponha também de um módulo 3D, estamos interessados apenas no módulo 2DH, promediado na vertical, ou bidimensional na horizontal, através do qual a elevação da superfície livre e velocidades de corrente 2DH promediadas na vertical são calculadas. O conteúdo desta e das próximas sessões é uma adaptação de trechos retirados da Referência Técnica do SisBaHiA®, que pode ser acessada em www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

2.7.1 Equações Governantes

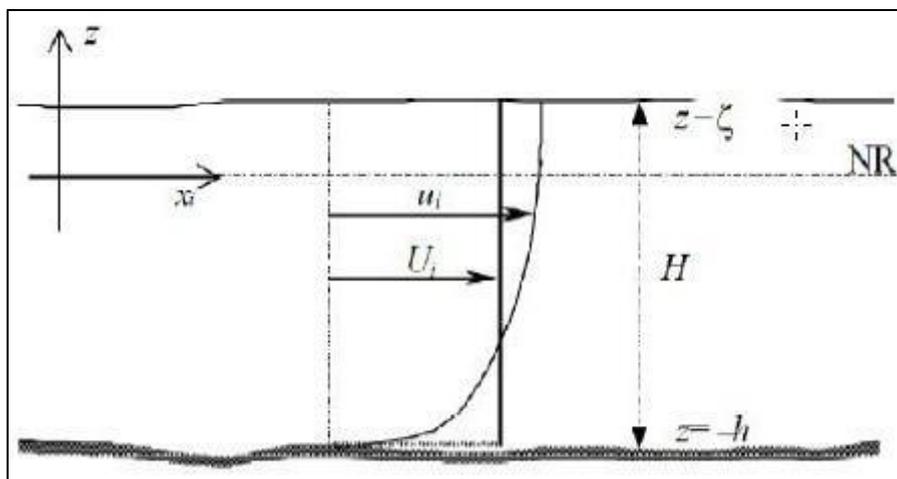


Figura 20: Sistema de coordenadas para os módulos 3D e 2DH do SisBahia®. Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência, U_i representa a velocidade promediada na vertical, utilizada no módulo 2DH. A profundidade instantânea, ou coluna d'água, é denotada por $H = z_{\text{sup}} - z_{\text{fundo}} = \zeta + h$. (ROSMAN, 2013).

A cada passo de tempo, o módulo 2DH do FIST3D determina as componentes das velocidades médias na vertical, $U(x,y,t)$ na direção x , e $V(x,y,t)$ na direção y , e as elevações da superfície livre, $z = \zeta(x,y,t)$. No entanto, para se determinar estas três incógnitas é necessário que haja pelo menos três equações, que são as equações da quantidade de movimento integradas na vertical, nas direções x e y , e a equação da continuidade do volume, também integrada na vertical.

Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gH}{2\rho_0} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\hat{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\hat{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^s - \tau_x^b) - \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + 2\Phi \text{sen}\theta V - \frac{U}{H} \Sigma q \end{aligned} \quad (14)$$

Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gH}{2\rho_0} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\hat{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\hat{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^s - \tau_y^b) - \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \right) - 2\Phi \text{sen}\theta U - \frac{V}{H} \Sigma q \end{aligned} \quad (15)$$

Equação da continuidade de volume integrada na vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \Sigma q \quad (16)$$

Utilizando a equação de quantidade de movimento na direção x como exemplo, a Tabela 3 explica o significado de cada termo nas equações 14 e 15. Os termos semelhantes na equação de quantidade de movimento na direção y tem, evidentemente, o mesmo significado. Na equação 16 o termo Σq representa os fluxos de precipitação (qP), evaporação (qE) e infiltração (qI) por unidade de área.

$\frac{\partial U}{\partial t}$	Representa a aceleração local do escoamento 2DH, isto é, em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento média na vertical por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$	Representa a aceleração advectiva do escoamento 2DH, isto é, em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos advectivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x , por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção x . Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo.

$-\frac{gH}{2\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x}$	<p>Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido às diferenças de densidade da água na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força o escoamento de lugares com maior densidade para onde a densidade é menor.</p>
$\frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right)$	<p>Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento, isto é, em um determinado instante, representa o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Esses termos são responsáveis, por exemplo, pela geração de vórtices horizontais em zonas de recirculação.</p>
$\frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(S_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(S_{xy})}{\partial x} \right)$	<p>Representa o efeito das tensões de radiação devido a ondas de curto período capazes de gerar correntes litorâneas. Tais termos só tem efeito relevante quando as ondas estão em águas relativamente rasas, i.e., quando a profundidade local é inferior a 10% do comprimento da onda.</p>
$2\phi \cdot \text{sen}\theta \cdot V$	<p>Representa a aceleração de Coriolis decorrente de o referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, isto é, em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos como a Baía de Guanabara.</p>
$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S)$	<p>Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento; se estiver oposto, irá retardar o escoamento.</p>
$-\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^B)$	<p>Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.</p>
$\frac{U}{H} \sum q = \frac{U}{H} (q_P - q_E + q_I)$	<p>Representa efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação q_P, evaporação q_E, e infiltração q_I.</p>

Tabela 3: Quadro com resumo do significado de cada termo das equações 18 e 19.

A seguir se encontram as equações que determinam as tensões de atrito no fundo e as tensões de atrito devido ao vento na superfície livre, respectivamente:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} \cdot C_D \cdot W_{10}^2 \cdot \cos \phi_i; [i = 1, 2] \quad (17)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar, C_D é o coeficiente de arraste do vento, determinado em função da velocidade do vento W_{10} , medida a dez metros da superfície livre, e φ_i é o ângulo entre o vetor velocidade e a direção x_i .

Equação da tensão de atrito no fundo:

$$\tau_i^B = \rho_0 \cdot \beta \cdot U_i \quad (18)$$

onde ρ_0 é a massa específica da água, U_i é a velocidade média na coluna d'água e β , no caso do modelo 2DH, será:

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \quad (19)$$

Na equação acima, C_h é o coeficiente de Chézy, dado pela seguinte expressão:

$$C_h = 18 \cdot \log_{10} \frac{6H}{\varepsilon} \quad (20)$$

onde ε é o parâmetro de rugosidade no fundo.

A resolução das equações acima descritas está condicionada ao conhecimento das condições iniciais e de contorno, que são descritas a seguir.

2.7.2 Condições de Contorno

As condições de contorno a serem prescritas são de dois tipos: horizontais e verticais. As condições de contorno verticais são: velocidade zero no fundo e a tensão de atrito do vento na superfície livre, calculada a partir das velocidades de vento dadas. Quanto aos contornos horizontais, existem dois tipos: contornos de terra e contornos abertos.

Contornos de terra, em geral, representam as margens do corpo de água e possíveis pontos com afluxos ou efluxos como, por exemplo, rios, estuários, vertedores, etc. Contornos abertos geralmente representam os limites do domínio de água modelado, e não uma fronteira física. A prescrição de fluxos ou velocidades normais é usualmente associada a contornos terrestres e as elevações da superfície livre são geralmente associadas a contornos abertos. Frequentemente, os contornos de terra não possuem contribuição externa e um valor de fluxo ou de velocidade normal nulo é imposto.

2.7.3 Condições Iniciais

Para o instante inicial de simulação o modelador deve fornecer ao programa os valores da elevação da superfície livre, ζ , e as componentes da velocidade 2DH, U e V , para todos os nós do domínio. Caso não se disponha de resultados de simulações anteriores o mais adequado é prescrever uma condição inicial começando do “zero”, conhecida como “partida a frio”, já descrita de forma breve anteriormente. Cria-se assim uma situação artificial que busque reproduzir, de forma minimamente plausível, um estado do corpo d’água. Um exemplo é a prescrição de nível d’água e velocidades de escoamento iguais a zero em todo o domínio. Alguns cuidados devem ser tomados ao adotar uma condição de partida à frio. Além de satisfazer às equações governantes, os valores adotados para a condição inicial devem ser os mais semelhantes possíveis àqueles adotados para a condição de contorno no primeiro passo de tempo. Deve se evitar também as situações ditas “não naturais”, que implicam no aumento do tempo de aquecimento do modelo.

Qualquer resultado prévio de simulação que seja adequado pode ser usado como condição inicial para o mesmo domínio de modelagem. Em tais casos, pode se dizer que a simulação está sendo realizada com uma “partida a quente”, uma vez que a condição inicial corresponde a um padrão de circulação realista.

2.8 Modelo Morfodinâmico Sujeito à Geração de Ondas Locais

Na natureza os processos hidrodinâmicos e os sedimentológicos em um corpo d’água são retroalimentativos, ou seja, os agentes hidrodinâmicos provocam alterações na batimetria via processos sedimentológicos, que por sua vez causam variações nas correntes e padrões de circulação (DUARTE & PEIXOTO, 2012). De forma a representar adequadamente todos estes processos, optou-se por utilizar o modelo hidrodinâmico acoplado aos modelos de transporte de sedimentos e de geração de ondas. O acoplamento dos dois primeiros forma o chamado modelo morfodinâmico, ou modelo hidrodinâmico com fundo móvel.

No SisBaHiA[®] o modelo morfodinâmico faz o balanço de massa de sedimentos no fundo, calculando ao longo do tempo o transporte de sedimentos devido à ação dos agentes hidrodinâmicos. A superfície do fundo vai se alterando a cada interação do modelo de

transporte de sedimentos com o modelo hidrodinâmico, o que torna a profundidade variável no tempo. Deste modo, é possível fazer uma avaliação da evolução morfológica no domínio de modelagem e quantificar taxas de erosão e assoreamento.

Ao acoplar-se também o modelo de geração ondas busca-se incorporar na simulação o efeito de ondas locais, geradas no próprio domínio de modelagem pela ação dos ventos. O modelo de geração de ondas do SisBaHiA[®] calcula a distribuição de alturas de onda e respectivas tensões no fundo variáveis no tempo, alimentando com estes dados os modelos hidrodinâmico e de transporte de sedimentos. Ao rodarem acoplados, os três modelos interagem entre si de acordo com o passo de tempo definido para cada um deles.

O mecanismo que governa a geração das ondas pelos ventos consiste na transferência de quantidade de movimento dos ventos para a superfície dos corpos de água. Para o desenvolvimento deste complexo mecanismo, três características dos ventos podem ser apontadas como principais fatores: a velocidade, a duração e a área sobre a qual o vento sopra, que é conhecida como pista (ROSMAN, 2013).

ROSENHAGEN (2013) descreve de forma adequada a interferência das ondas no transporte de sedimentos. Já a metodologia utilizada pelo SisBaHiA[®] para cálculo da distribuição de alturas de onda e tensões no fundo está descrita em sua Referência Técnica.

2.8.1 Critério de Mobilidade dos Sedimentos

Para uma determinada granulometria de sedimentos no leito, o processo de erosão e transporte, bem como de assoreamento, depende da tensão crítica de mobilidade, τ_c .

Valores da tensão de arrasto no leito, τ_0 , acima deste valor crítico podem promover a erosão e transporte de grãos, enquanto que, para valores inferiores a esta tensão, os grãos permanecem imóveis, ou, se em movimento, tenderão a depositar.

No caso de sedimentos predominantemente arenosos, o critério de mobilidade usualmente empregado baseia-se no parâmetro de Shields, ψ , que tem a seguinte expressão:

$$\Psi = \frac{u_*^2}{g(S_s - 1)d} = \frac{\tau_0}{\gamma_a(S_s - 1)d}; S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} \quad (21)$$

onde:

τ_0 = tensão de arrasto no leito;

γ_s = peso específico do grão;

γ_a = peso específico da água;

g = aceleração da gravidade;

d = diâmetro do grão;

u_* = velocidade de atrito no leito;

R_* = número de Reynolds do grão, $R_* = \frac{du_*}{\nu}$.

A aplicação do critério de transporte de sedimentos baseado no parâmetro de Shields consiste na comparação entre a tensão de arrasto no fundo, τ_0 , causada pelos agentes hidrodinâmicos, como ondas e correntes, em um dado local e a tensão crítica para os sedimentos no mesmo local, τ_c . Teoricamente, se τ_0 for maior que τ_c admite-se que os sedimentos no local são mobilizados e transportados pelas correntes; caso contrário, os sedimentos permanecem em repouso ou tendem a depositar, se estiverem sendo transportados.

O critério de transporte adotado nos modelos do SisBaHiA[®] considera um efeito probabilístico na decisão de haver ou não transporte quando a tensão no fundo τ_0 tem valor próximo do valor crítico τ_c . Dada à variabilidade de forma e tamanho dos grãos de sedimentos naturais, o valor da tensão crítica de mobilidade para um dado grão de referência deve ser interpretado como o valor para o qual a probabilidade de mobilidade ou deposição é 50%. A formulação deste efeito probabilístico pode ser encontrada na Referência Técnica do SisBaHiA[®]. A Figura 21 abaixo exemplifica o Diagrama de Shields:

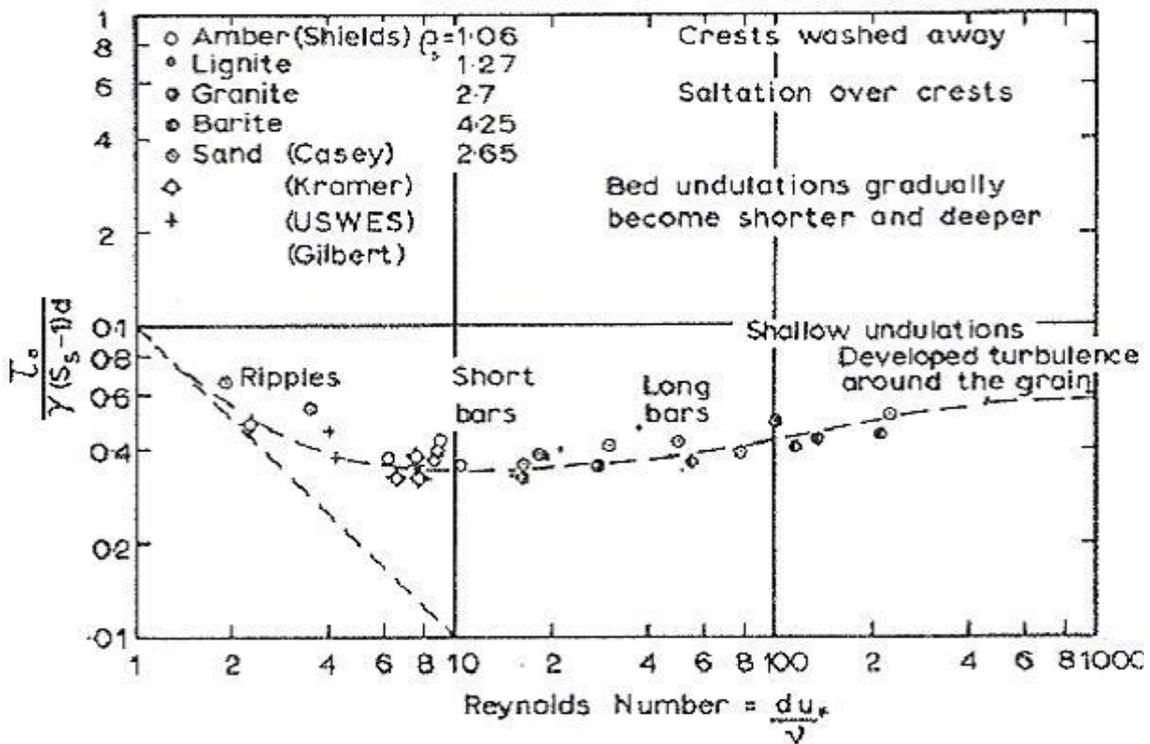


Figura 21: Diagrama de Shields (ROSMAN, 2013)

2.8.2 Fórmula de Transporte de Sedimentos

O modelo de transporte de sedimentos do SisBaHiA[®] oferece ao usuário diferentes fórmulas para se calcular a vazão sólida potencial, isto é, a vazão sólida máxima de um dado sedimento que o escoamento fluido teria capacidade de transportar, supondo disponibilidade ilimitada do sedimento.

O transporte de sedimentos pode ocorrer em suspensão e por arrasto junto ao leito. A natureza do transporte depende do tamanho, formato e peso específico das partículas, e das condições hidrodinâmicas locais como velocidade e turbulência. O transporte em suspensão pode incluir também o transporte lavado, definido como a porção transportada proveniente de trechos a montante, e não obtida no trecho em questão (VAN RIJN, 1987 *apud* ROSMAN, 2013). Neste trabalho será utilizada a fórmula de Van Rijn (2007), conforme fez SIGAÚQUE (2013) ao modelar a dinâmica de sedimentos da Lagoa de Araruama.

Van Rijn (2007): A formulação de van Rijn usada para o cálculo de transporte total resulta da soma do transporte de fundo por arraste, *bed load*, q_{sb} , com o transporte em suspensão, q_{ss} e é escrita no SisBaHiA[®] da seguinte forma:

$$q_s^* = \underbrace{\frac{0.015}{c_f^{1.25}} \left(\frac{d_{50}}{H} \right)^{0.2} \sqrt{\tau^*} \left(\sqrt{\tau_c^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*} \right)^{1.5}}_{q_{s1}^*} + \underbrace{\frac{0.012}{c_f^{1.7}} \sqrt{\tau^*} \left(\sqrt{\tau_c^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*} \right)^{2.4}}_{q_{s2}^*} \quad (22)$$

2.8.3 Atualização da Batimetria pelo Modelo Morfodinâmico

Em um dado local, a altura da camada erodível de sedimentos no fundo por metro quadrado é dada por $S_E(x,y,t)$. Em cada instante, a altura da camada erodível corresponde à diferença entre a cota do fundo e a cota da camada não erodível, mais abaixo. Um valor inicial S_{E0} tem que ser prescrito para todos os pontos do modelo.

Em geral, valores de S_{E0} são desconhecidos. Em locais de fundo não erodível, por exemplo, leito rochoso ou de concreto, como em rampas a jusante de barragens, prescrever valor nulo é usual. Em locais com fundos de sedimentos, se não houver dados, o usuário terá que prescrever valores de S_{E0} inferidos ou convenientes, como condição inicial. Valores de S_{E0} podem ser estimados considerando valores de velocidades de correntes obtidas de modelagens prévias feitas com fundo fixo. Em locais com velocidades mais intensas é provável que S_{E0} seja menor, pois a capacidade erosiva seria maior.

Na entrada de dados para o modelo de transporte de sedimentos, deve-se informar a curva granulométrica, ou a fração de diferentes classes granulométricas definidas pelo usuário, de cada região do domínio. O estoque de sedimentos inicial de cada classe granulométrica, S_{Em} , é então calculado de forma que a altura erodível total prescrita seja igual à altura erodível de cada classe granulométrica, levando em consideração as porcentagens prescritas para cada classe em cada região. A equação de balanço de massa para cada classe de sedimento permite calcular a variação temporal de S_{Em} , e pode ser escrita como:

$$(1 - p_m) \frac{\partial S_{Em}}{\partial t} + \left(\frac{\partial q_{smx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{smy}}{\partial y} \right) = 0 \therefore \frac{\partial S_{Em}}{\partial t} = - \frac{1}{1 - p_m} \left(\frac{\partial q_{smx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{smy}}{\partial y} \right) \quad (23)$$

Simplificando e discretizando a equação acima, pode-se escrever a variação do estoque de sedimentos em termos de $\Delta h(x,y,t) = -\Delta z_{\text{fundo}}$, para cada passo de tempo do modelo.

2.8.4 Condições Iniciais e de Contorno

Além dos valores da elevação e das velocidades em x e y , o modelo hidro-sedimentológico utiliza também como condições iniciais a curva granulométrica e a altura erodível em todos os nós da malha de elementos finitos, no instante inicial.

As condições de contorno podem ser de quatro tipos diferentes:

Tipo 0: a vazão sólida afluyente para cada uma das classes de sedimentos é calculada levando em conta a hidrodinâmica vigente no local e a proporção de cada classe. As variáveis necessárias são obtidas do módulo hidrodinâmico e o cálculo da vazão sólida normal à fronteira é realizado com a fórmula previamente selecionada no modelo de transporte de sedimentos;

Tipo 1: a vazão sólida normal à fronteira é prescrita para cada uma das classes de sedimentos do domínio. Esta opção é útil quando se tem a disposição dados obtidos em campo ou dados provenientes de outro modelo, podendo a vazão sólida imposta ser permanente ou variável no tempo, na forma de uma série temporal;

Tipo2: similar ao Tipo 0, porém com batimetria permanente, i.e. $\delta h = 0$;

Tipo3: similar ao Tipo 1, porém com batimetria permanente, i.e. $\delta h = 0$.

3 SIMULAÇÃO COM O M1DAC8

Neste capítulo são abordados inicialmente os dados de entrada fornecidos ao modelo M1DAC8, que modelou a hidrodinâmica da Lagoa de Araruama com o Canal Oeste, para diferentes configurações da área hidráulica deste, ao longo de vários ciclos de uma maré senoidal. O interesse principal está em saber como se comporta a velocidade média máxima no canal, para um determinado valor de sua área hidráulica e para várias amplitudes de maré. Quanto maior a amplitude da maré, maior será o valor da velocidade média máxima nas seções transversais. Ao variar também a área do canal, desde valores pequenos até valores grandes, observando a variação da velocidade com a variação da amplitude de maré, traça-se então o gráfico de $V_{m\acute{a}x} \times A_c$, exemplificado na Figura 13. As simulações foram feitas para um período de três dias, tempo suficiente para o aque-

cimento do modelo. O pequeno período de simulação se deve ao fato de ter sido utilizada uma maré senoidal e semidiurna.

Após detalhar os dados de entrada do modelo, é feita no final do capítulo a análise dos resultados e a definição da área de projeto do Canal Oeste.

3.1 Modelo Digital do Terreno

O modelo digital do terreno é a representação em meio digital da região de interesse, ou do domínio de modelagem, representado por um mapa base. Como mostrado na Figura 22, o mapa base do domínio de modelagem é delimitado pelos contornos de terra da Lagoa de Araruama, pela fronteira aberta no oceano e pelos contornos batimétricos do fundo.

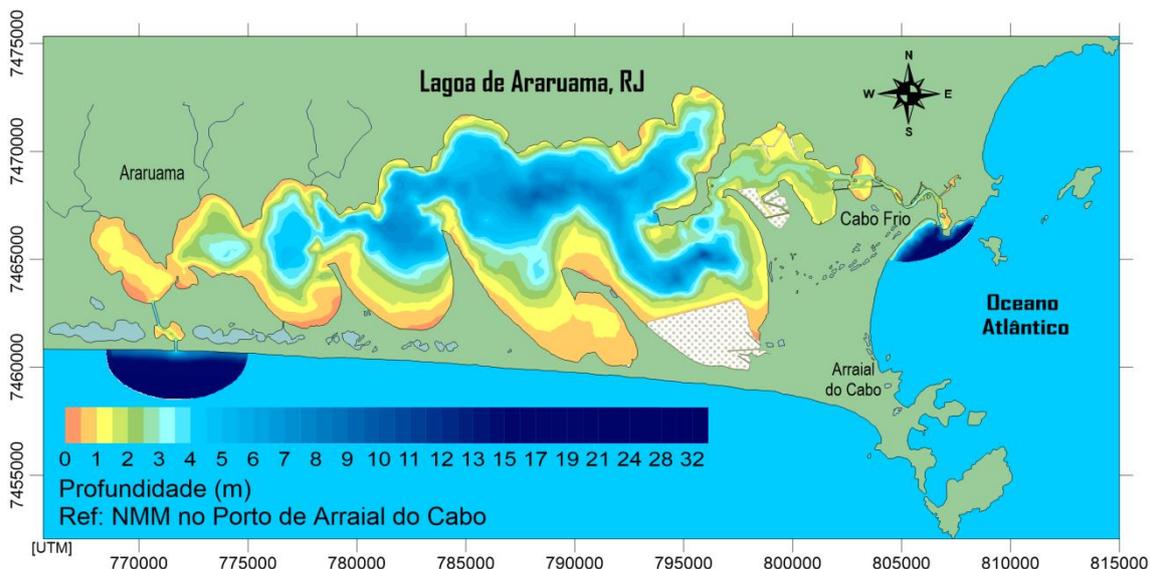


Figura 22: Mapa base com batimetria da Lagoa de Araruama (Modificado de GAVA, 2008). A batimetria é referida ao Porto do Forno, em Arraial do Cabo e foi medida em 2005 e 2006.

A batimetria utilizada é referida ao Nível Médio do Mar (NMM) no Porto do Forno, em Arraial do Cabo, e foi medida em campanhas da Universidade Federal Fluminense – UFF, em 2005, e da Superintendência Estadual de Rios e Lagoas – SERLA, em 2006. As cotas batimétricas da região marítima próxima ao Canal Oeste foram as mesmas utilizadas por GAVA (2008), que obteve estas de carta náutica da DHN. A batimetria utilizada para a Lagoa Pernambuco foi também a mesma que Gava usou em seu trabalho, construída via interpolação do SisBaHiA[®], devido à falta de dados medidos. As áreas hachuradas representam regiões cercadas e estagnadas, situadas fora da zona di-

nâmica da Lagoa, como salinas e marnéis. O NMM nas embocaduras do Canal Itajurú e do Canal Oeste é assumido como idêntico ao NMM no Porto do Forno. A Figura 23 e a Figura 24 mostram em detalhe a batimetria dos Canais de Itajuru e Oeste. No ano de 2009 foi realizada dragagem em trecho da lagoa próximo ao Canal de Itajuru. Para este trecho, utilizou-se na modelagem a batimetria definida para o projeto de dragagem.

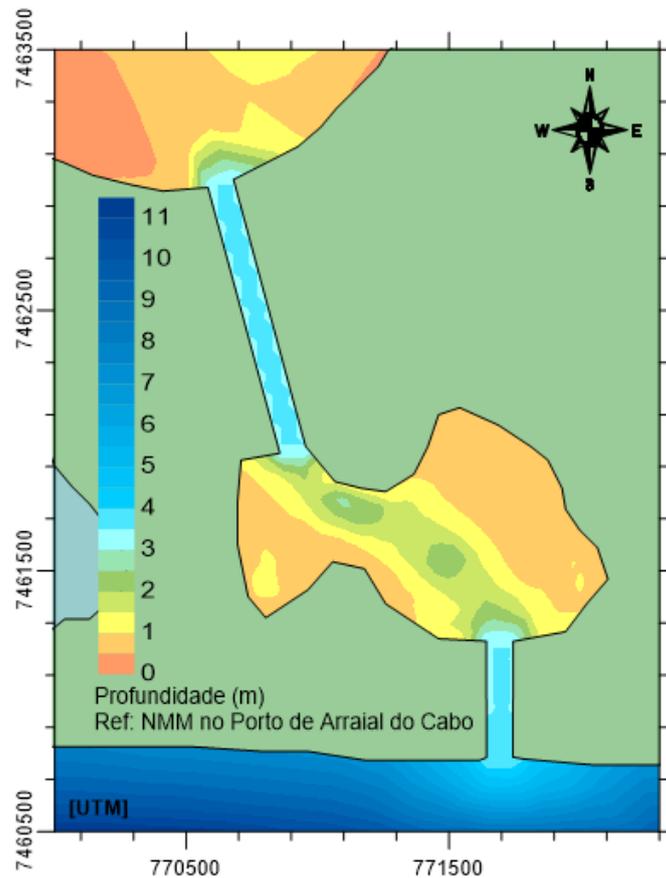


Figura 23: Batimetria em detalhe do Canal Oeste.

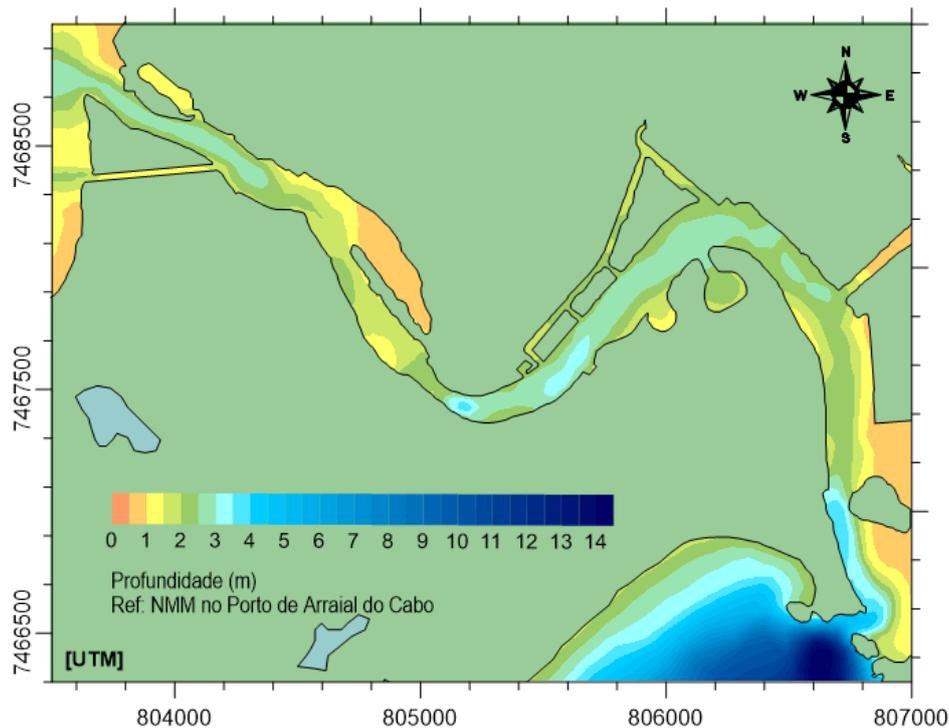


Figura 24: Batimetria do Canal de Itajuru.

3.2 Discretização Unidimensional

Para as simulações com o modelo M1DAC8, toda a área da Lagoa de Araruama foi discretizada unidimensional, com 258 seções transversais espaçadas igualmente de 200m e distribuídas ao longo de um eixo de 51 Km de comprimento, não retilíneo. Este eixo se estende por toda a Lagoa de Araruama, pelos canais de maré e pelas regiões das embocaduras marítimas do Canal de Itajuru e do Canal Oeste. Como se pode perceber na Figura 25, nem sempre as seções transversais traçadas são retilíneas, perpendiculares ao eixo da Lagoa, ou paralelas entre si. Esta configuração das seções se fez necessária para representar bem o volume do corpo d'água modelado. A área hidráulica de cada seção transversal foi aproximada pela área de um trapézio, como descrito pela equação 9. É interessante observar que o modelo 1D não enxerga as curvas do eixo. Tudo se passa como se estivéssemos tratando de um eixo retilíneo de 51 km de comprimento com seções transversais também retilíneas, dispostas de maneira perpendicular ao eixo, e igualmente espaçadas. Ao final do texto, em anexo, encontra-se uma tabela com os parâmetros geométricos de todas as seções transversais, que são dados de entrada do M1DAC8.

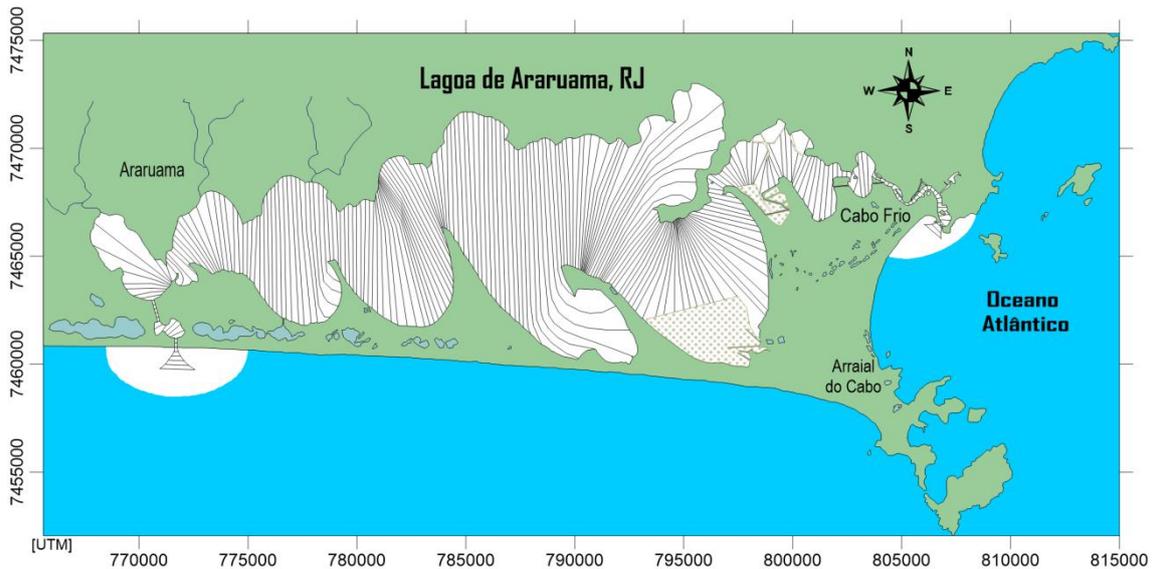


Figura 25: Malha unidimensional que representa os parâmetros geométricos das seções transversais de todo o domínio, fornecidos com dados de entrada ao M1DAC8.

Apesar do formato proposto para o Canal Oeste, que seria composto por uma pequena lagoa conectada ao mar e à Lagoa de Araruama por dois canais artificiais, as simulações foram feitas em cima de um cenário forçado, em virtude das características do domínio de modelagem, do modelo e do escoamento. O cenário adotado considerou que o Canal Oeste estava compreendido entre as seções transversais 6 e 22, mostradas na Figura 26, e tinha uma área hidráulica uniforme ao longo de toda a sua extensão, formando assim um canal prismático. O modelo simulou várias vezes o escoamento neste canal prismático, para valores de área hidráulica que variaram de 40 a 2000 m² e amplitudes de maré que iam de 0,10 a 0,70 m. Decidiu-se por proceder desta maneira porque as seções 12, 13, 20 e 21 possuem áreas hidráulicas em torno de 1000 m², o que tornaria sem sentido realizar uma simulação que variasse apenas a área da calha dos dois canais dentro do intervalo estabelecido, que vai até 2000 m². A Lagoa Pernambuco e a embocadura lagunar do Canal Oeste funcionariam como gargalos, quando as áreas dos canais artificiais tivessem estivessem entre 1000 e 2000 m². A tabela disponível no Anexo mostra os valores das áreas destas seções.

Desta maneira, optou-se por simular um cenário que, embora irreal, é mais plausível do ponto de vista da Engenharia. Vale lembrar que esta simulação foi utilizada apenas para a análise das condições de estabilidade do Canal Oeste. Uma simulação da situação mais realista foi feita com o SisBaHiA[®], um modelo 2DH que representa melhor o escoamento e incorpora mais dados à simulação.

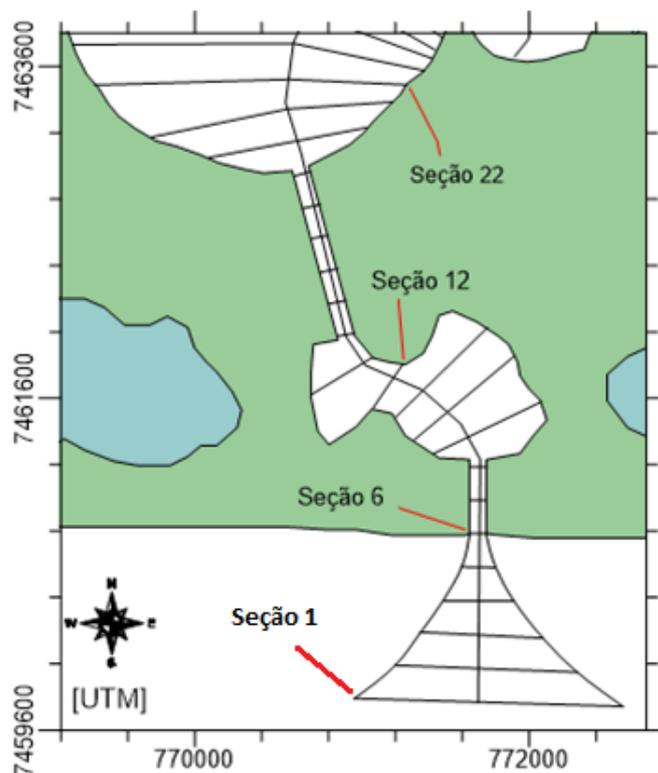


Figura 26: Vista em detalhe da discretização 1D do Canal Oeste. O cenário adotado considerou que as seções 6 a 22 tinham áreas idênticas, formando assim um canal prismático. O modelo calculou o escoamento para diferentes valores de área da seção deste canal, com amplitudes de mar para construir o gráfico de $V_{m\acute{a}x} \times A_c$.

3.3 Rugosidade de Fundo

Assim como PINTO (1999), adotou-se o valor de rugosidade de fundo $\varepsilon = 0,03$ m para todas as seções, dado que para este tipo de simulação o valor recomendado para leito de fundo de areia varia entre 0,01 e 0,05 m.

3.4 Maré

Para a análise da estabilidade foi utilizada uma maré senoidal, que variava entre 0,10 e 0,70 m e tinha uma diferença de fase de 3,5 minutos entre as embocaduras dos dois canais. Ao analisar a variação de uma maré sintética gerada pelo SisBaHiA[®] para o período de um ano, não se observou a ocorrência de marés com amplitude superior a 0,70 m. Estes dados sintéticos de maré foram gerados através da análise harmônica das constituintes características da maré no Porto do Forno, que serão mostradas mais adiante na Tabela 7. A Tabela 4 mostra a seguir a frequência simples e acumulada de ocorrências de alturas de maré no local, bem como a percentagem de tempo durante o qual cada altura de maré é excedida. Lembrando que a altura de maré é definida como a diferença

entre o nível de uma preamar e a baixa-mar seguinte, ou entre uma baixa-mar e a preamar seguinte em valor absoluto, e pode ser também aproximada pelo dobro da amplitude.

Alturas de maré (PM - BM)	Número de ocorrências	Frequência	Alturas de maré (PM - BM)	Frequência acumulada	Porcentagem de excedência
0.0 - 0.1	0	0.0%	0	0.0%	100.0%
0.1 - 0.2	0	0.0%	0.1	0.0%	100.0%
0.2 - 0.3	36	2.6%	0.2	2.6%	97.4%
0.3 - 0.4	113	8.0%	0.3	10.6%	89.4%
0.4 - 0.5	152	10.8%	0.4	21.3%	78.7%
0.5 - 0.6	148	10.5%	0.5	31.8%	68.2%
0.6 - 0.7	156	11.1%	0.6	42.9%	57.1%
0.7 - 0.8	165	11.7%	0.7	54.6%	45.4%
0.8 - 0.9	212	15.0%	0.8	69.6%	30.4%
0.9 - 1.0	211	15.0%	0.9	84.6%	15.4%
1.0 - 1.1	169	12.0%	1	96.6%	3.4%
1.1 - 1.2	46	3.3%	1.1	99.9%	0.1%
1.2 - 1.3	2	0.1%	1.2	100.0%	0.0%
Mais	0	0.0%	1.3	100.0%	0.0%
Total:	1410		1.4	100.0%	0.0%

Tabela 4: Frequência simples e acumulada de ocorrência de alturas de maré e porcentagem de tempo durante o qual estas alturas de maré são excedidas no período de um ano. Resultados obtidos de uma maré sintética gerada pelo SisBaHiA[®] para o intervalo de um ano. Maré característica do Porto do Forno – Arraial do Cabo.

3.5 Resultados , Análise de Estabilidade e Definição da Área de Projeto

Os resultados da simulação com o M1DAC8 permitiram a construção do gráfico da Figura 27, que mostra as curvas de $V_{m\acute{a}x}$ x A_c para várias marés. Não foi possível gerar resultados para o escoamento no canal com áreas hidráulicas menores que 40 m², pois o modelo apresentava erros numéricos e não realizava a simulação. Observando o gráfico, percebe-se que para marés com amplitude 0,50, 0,60 e 0,70 m, o comportamento de $V_{m\acute{a}x}$ foi ligeiramente diferente do esperado. Ao diminuir a área, para valores menores que 50 m², a velocidade aumentou, em vez de diminuir. A trajetória da curva mostrou-se também oscilante, para o caso da maré de $a_0 = 0,70$ m. No entanto, este comportamento foi pouco significativo, dado que os desvios foram de pequena magnitude. É provável que este comportamento se justifique pelo fato de o sistema lagunar estudado possuir

dois canais de maré, e não apenas um, como é o usual para estudos deste tipo. Percebe-se também a ocorrência de valores de velocidade relativamente altos para o escoamento gerado pelas maiores marés, em torno de 1,5 a 2,2 m/s.

Durante as simulações, percebeu-se que o critério de O'Brien não é aplicável a este caso, pois leva em consideração relações empíricas do tipo $P \times A_c$ para o caso mais comum: lagoas com apenas um canal de maré. Assim sendo, este critério não será utilizado. Também não se fará uso do critério de Per Bruun, que usa a razão P/M_t para avaliar a estabilidade do canal, com foco principal na sua navegabilidade. Além de não se dispor de dados de transporte litorâneo medidos na região do Canal Oeste, uma tentativa de medir ou estimar a magnitude de M_t seria um atividade um tanto laboriosa. Assim sendo, serão usados apenas os critérios de Escoffier e Skou (Máxima Capacidade de Resposta).

De acordo com o critério de Escoffier, pode-se perceber, na Figura 27, que o canal é instável para áreas de seção hidráulica menores que 280 m² e estável para áreas maiores que 320 m². Na faixa entre estes valores de área pode ocorrer instabilidade ou estabilidade, dependendo da fase da maré.

A linha pontilhada no gráfico liga os pontos de máxima capacidade de resposta de cada curva. A máxima capacidade de resposta ocorre na área 473 m² para as curvas das quatro maré mais baixas e na área 581 m² para as curvas das três marés mais altas. Trabalhando melhor os resultados, é possível criar uma curva de máxima capacidade resposta ajustada, mais estética do ponto de vista visual e mais próxima do que se observa normalmente. O gráfico da Figura 28 mostra as funções de capacidade de resposta para as diferentes amplitudes de maré.

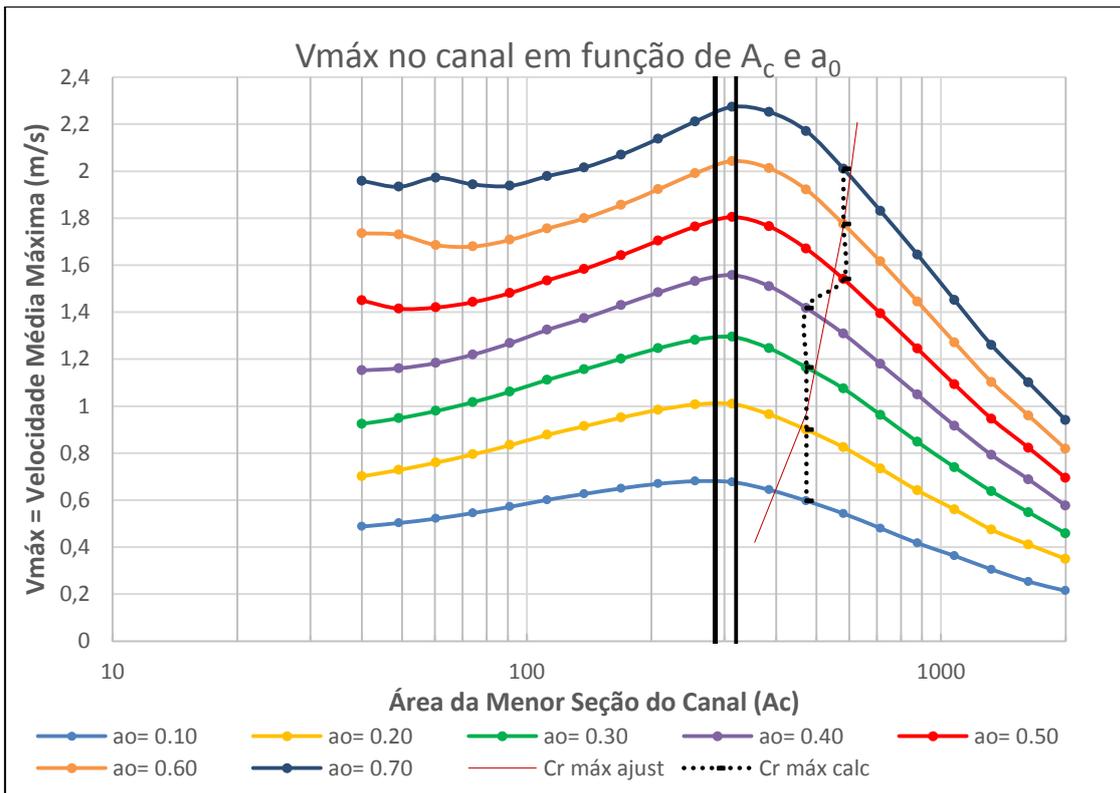


Figura 27: Gráfico de $V_{máx}$ em função de A_c e a_0 , no Canal Oeste. De acordo com o critério de Escoffier, o canal é instável para áreas de seção hidráulica menores que 280 m^2 , e estável para áreas maiores que 320 m^2 . Na faixa entre estes valores de área pode ocorrer estabilidade ou instabilidade, dependendo da fase da maré.

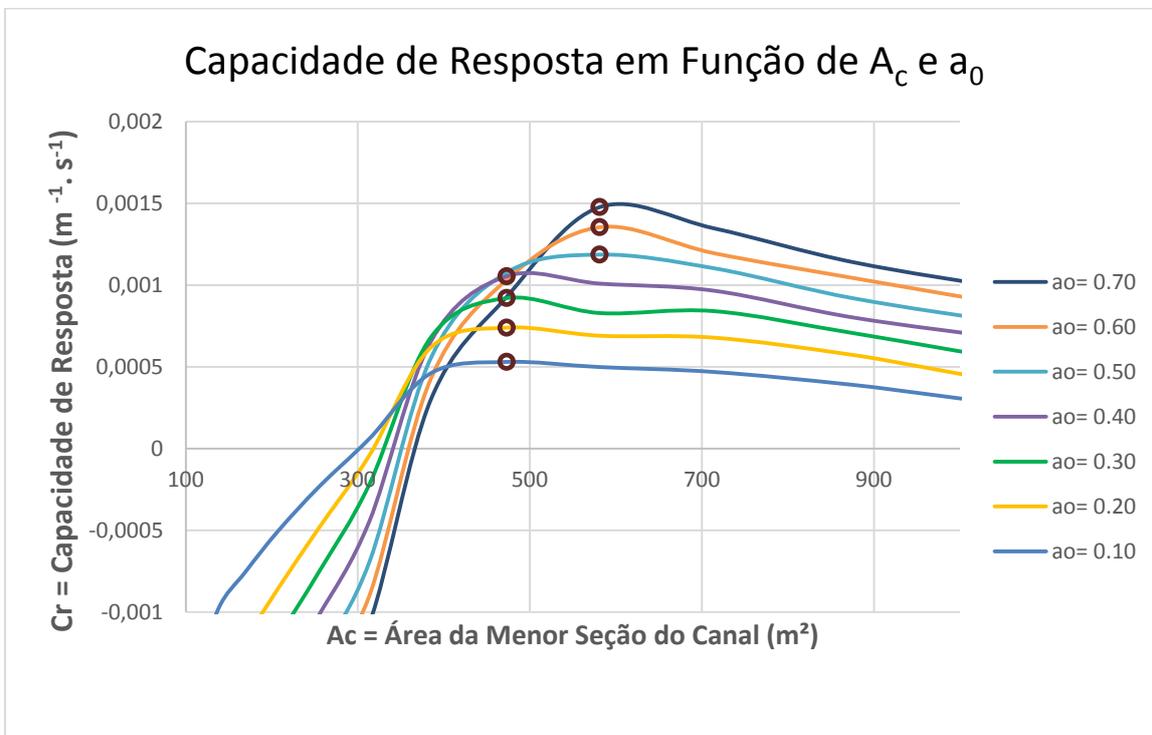


Figura 28: Curvas de capacidade de resposta para o Canal Oeste com os pontos de $Cr_{máx}$ marcados em marrom.

O gráfico da Figura 29 mostra a frequência acumulada das amplitudes de maré que ocorrem no Porto do Forno. Observando este gráfico e procedendo como já explicado no capítulo anterior, na sessão 2.5, pode-se construir o gráfico da Figura 30, utilizado para definir a área viável de projeto do Canal Oeste.

Neste trabalho decidiu-se por escolher um valor de área hidráulica do canal que satisfaça em 100% do tempo o critério da Máxima Capacidade de Resposta. Desta maneira, 350 m² é um valor que atende a esta condição, além de satisfazer também o critério de Escoffier. Este foi definido então como o valor da área hidráulica de projeto.

Caso se houvesse optado por utilizar o critério da Máxima Capacidade de Resposta sem uma análise de viabilidade, a área adotada seria a de 600m², que é o cruzamento da curva $C_r máx$ com a curva da maré de 0,70 m, observando a Figura 27. No entanto, estaria sendo ignorado o fato de que o critério de $C_r máx$ não seria satisfeito em momento algum, como explicita a Figura 30. O canal seria muito bom em termos de estabilidade, mas péssimo em termos de viabilidade. Em outras palavras, um canal com 600 m² não funcionaria nunca da maneira para o qual foi projetado. Sua tendência natural seria sofrer assoreamento, até que sua área atingisse um valor mais próximo da área de 350 m². Um canal com uma área hidráulica de 500 m², por exemplo, funcionaria em apenas 50% do tempo satisfazendo o critério de $C_r máx$, percentual que foi considerado também baixo. Áreas menores que 450 m² já seriam mais aceitáveis, pois atenderiam a condição de viabilidade em pelo menos 80% do tempo.

proposta, entretanto, consiste em construir dois canais: um que ligaria a Lagoa de Araruama à Lagoa Pernambuco e outro que conectaria esta ao mar, formando assim o sistema aqui denominado como Canal Oeste. O objetivo deste trabalho é dimensionar áreas hidráulicas estáveis para estes dois canais, que poderiam assumir uma infinidade de diferentes configurações. Para este caso, será adotado, por conveniência, um mesmo valor de área hidráulica para ambos os canais.

A análise anterior concluiu que um valor para a área hidráulica de 350 m² asseguraria com bastante certeza a estabilidade hidro-sedimentológica de um canal maré prismático, situado no local de interesse. Partindo desta conclusão, é bastante intuitivo propor que os dois canais artificiais sejam dimensionados tendo uma seção transversal com área hidráulica de 350 m².

O capítulo a seguir trata das simulações realizadas com o SisBaHiA[®], que contemplaram um cenário de modelagem mais realista, no qual a dinâmica hidro-sedimentológica da Lagoa de Araruama foi simulada em duas dimensões, já com o Canal Oeste.

4 SIMULAÇÃO COM O SISBAHIA[®]

Este capítulo segue a mesma estrutura do anterior. Inicialmente são abordados os dados de entrada utilizados na simulação com o SisBaHiA[®], partindo-se em seguida para a análise dos resultados. O modelo simulou a hidrodinâmica e a dinâmica sedimentológica da Lagoa de Araruama ao longo de três meses. O foco agora é observar a evolução morfológica da região do Canal Oeste. Alguns resultados hidrodinâmicos são também mostrados. No cenário de modelagem escolhido ambos os canais terão uma seção hidráulica retangular de 350 m², com 3,5 m de profundidade por 100 m de largura, respeitando assim a relação mostrada na Figura 17. O canal maior, situado mais a norte, tem em torno de 1100 m de comprimento, enquanto o menor, situado mais a sul, tem um comprimento em torno de 450 m.

O modelo digital do terreno é o mesmo utilizado para o M1DAC8.

4.1 Malha de Elementos Finitos Quadrangulares

A malha de elementos finitos utilizada, mostrada na Figura 31, foi modificada de GAVA (2008) e cobre toda a área da Lagoa de Araruama e dos Canais Oeste e de Itajuru,

bem como as regiões marítimas limitadas pelas fronteiras abertas. A Tabela 5 sintetiza as informações mais importantes referentes à malha.

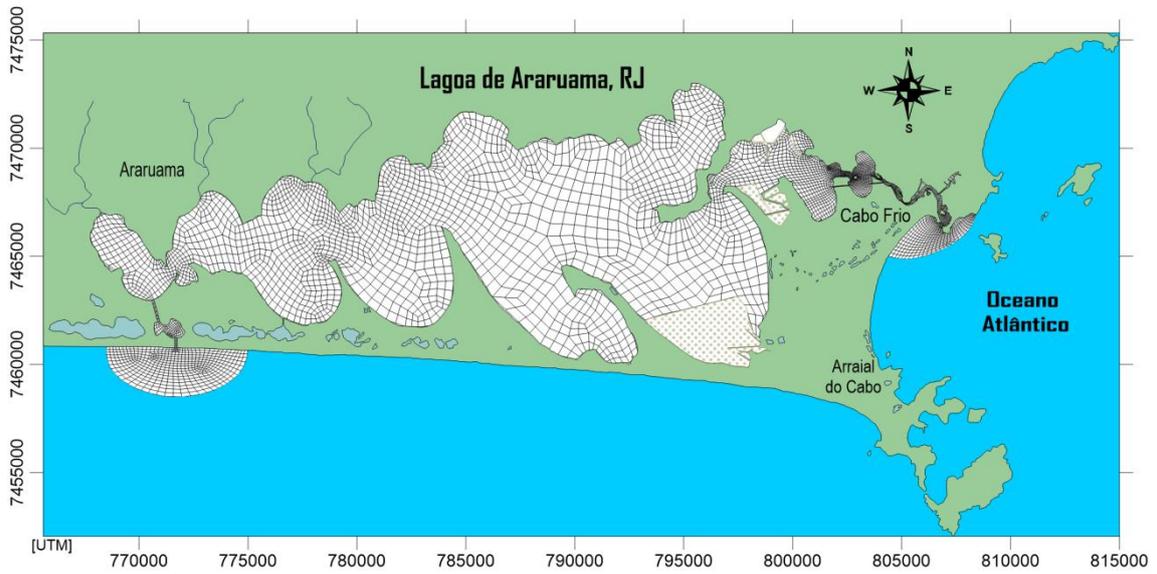


Figura 31: Malha de elementos finitos utilizada pelo SisBaHiA®.

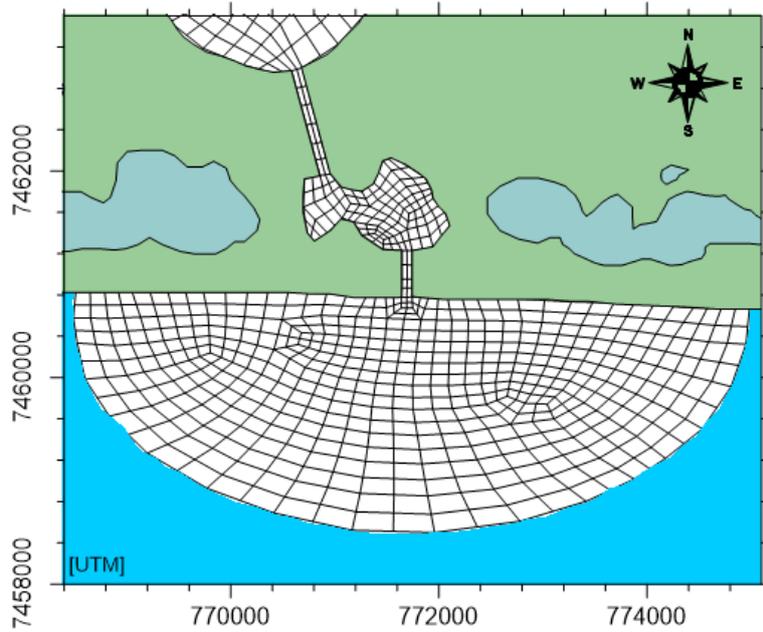


Figura 32: Malha em detalhes para a região do Canal Oeste, sistema formado pela Lagoa Pernambuco e pelos dois canais situados a norte e a sul desta.

Informações - Malha de Elementos Finitos	
Elementos Totais:	1274
Quadrangulares:	1274
Triangulares:	0
Nós Totais:	5833
Internos:	4353
Contorno Terra:	1420
Contorno Aberto:	64
Terra/Aberto:	4
Área da Malha:	225873915,8 m ²
Área no NA Médio:	225873915,8 m ²
Volume de Água:	879341449,2 m ³
Prof, Média:	3,9 m

Tabela 5: Informações sobre a Malha de Elementos Finitos.

4.2 Distribuição Espacial do Sedimento de Fundo

A distribuição do sedimento de fundo foi feita da mesma maneira adotada por SIGA-ÚQUE (2013), que só dispunha da caracterização e distribuição de sedimentos no Canal de Itajuru. Assim sendo, marcou-se ao longo do canal regiões com predominância das diferentes classes de sedimento mostradas na Tabela 6.

Tipo de Sedimento	Diâmetro Mediano (mm)	Massa Específica (kg/m ³)	Porosidade	Tensão Crítica (N/m ²)	% de Tolerância
Areia Muito Fina	0.062	2500	0.4	0.1536	2.3
Areia Fina	0.125	2500	0.4	0.1595	6.3
Areia Média	0.25	2400	0.4	0.1764	6.7
Areia Grossa	0.5	2200	0.4	0.1961	6.0

Tabela 6: Classes de sedimentos adotadas para o modelo de transporte de sedimentos.

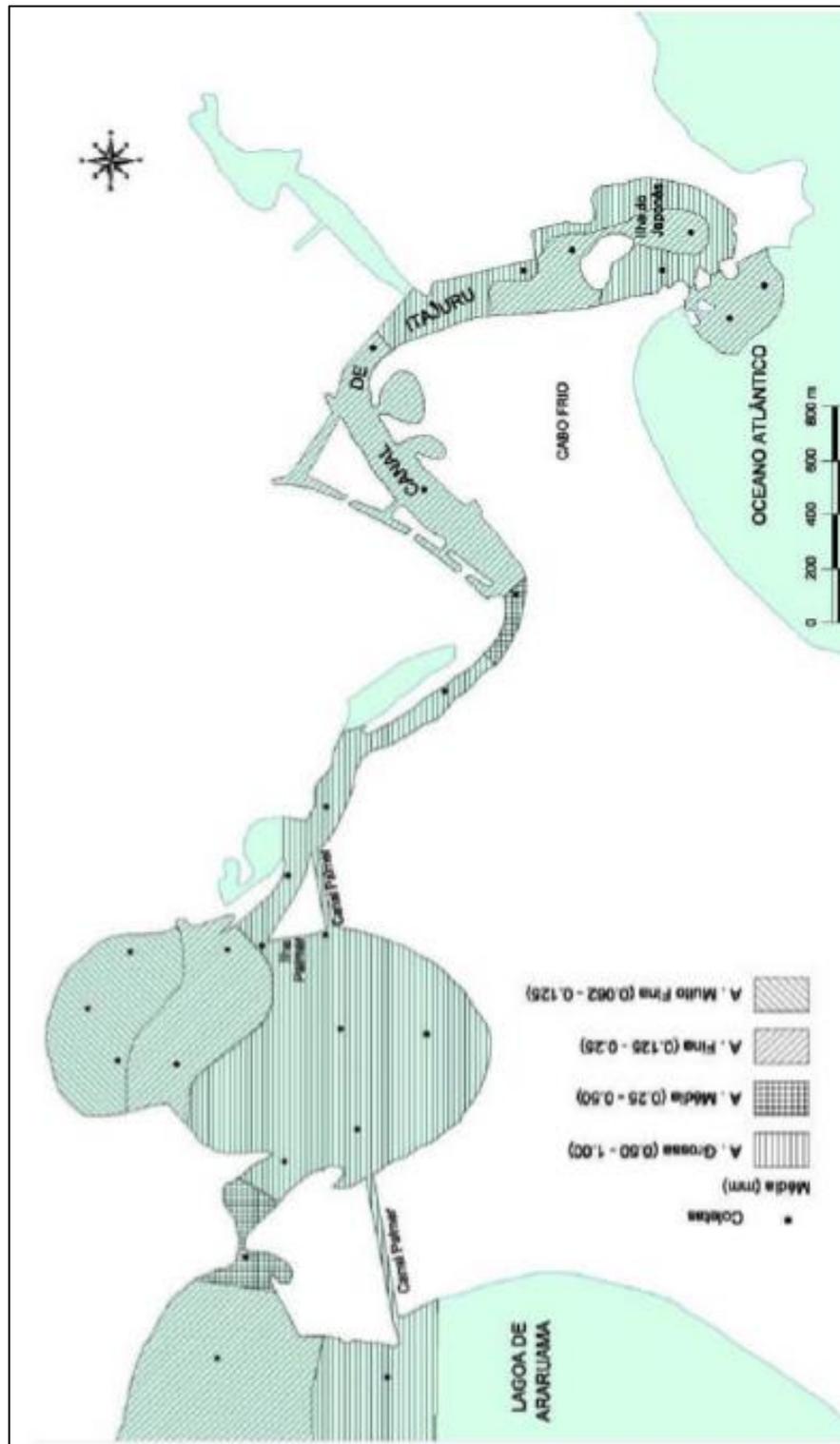


Figura 33: Distribuição granulométrica dos sedimentos de fundo do Canal de Itajuru (LESSA, 1990 *apud* BIDEGAIN & BIZERRIL, 2002 *apud* SIGAÛQUE, 2013)

4.3 Amplitude da Rugosidade de Fundo

A configuração da rugosidade do fundo também seguiu o mesmo padrão adotado por SIGAÚQUE (2013) e pode ser vista na Figura 34, abaixo. Foi adotado para quase todo o domínio de modelagem valores de ϵ entre 0,01 e 0,03 m, exceto no trecho do canal de Itajuru mais próximo à sua embocadura, onde há valores de ϵ variando entre 0,05 e 0,13 m, o que pode ser justificado pelo fundo mais rochoso.

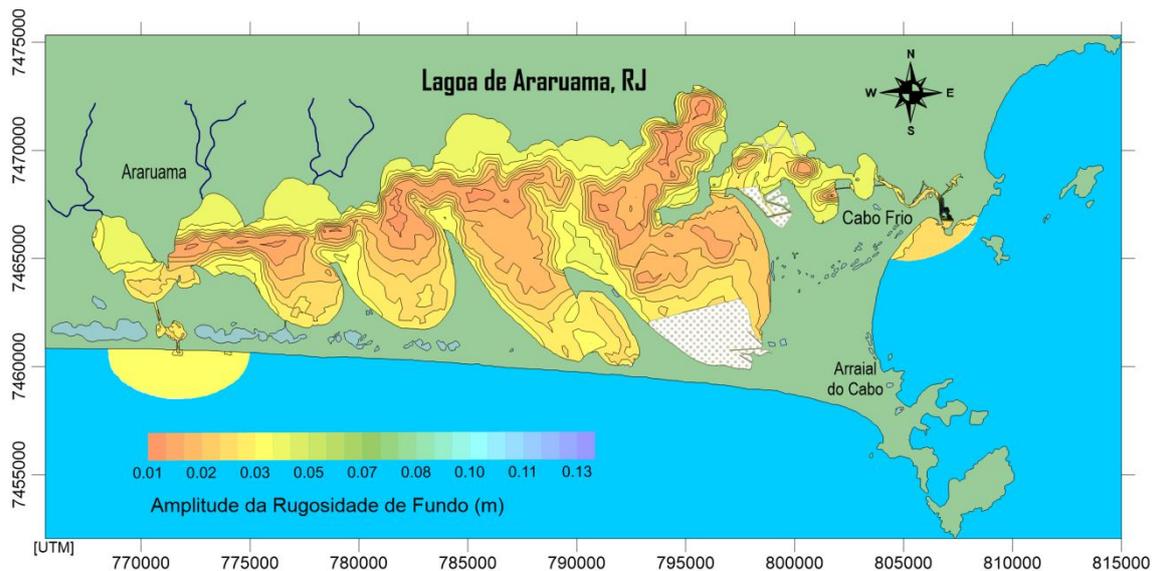


Figura 34: Amplitude da rugosidade de fundo (ϵ) no domínio de modelagem.

4.4 Maré

Os níveis de maré utilizados como condição de contorno na fronteira aberta do domínio foram gerados de forma sintética, através da análise das componentes harmônicas que regem o comportamento da maré na região. As componentes harmônicas utilizadas foram obtidas da Fundação de Estudos do Mar – FEMAR e são referentes à Estação Maregráfica Arraial do Cabo, situada no Porto do Forno. A Tabela 7 mostra a seguir as constituintes harmônicas utilizadas. A Figura 35 mostra um período de um mês da maré utilizada.

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (grau)
M ₄	22357,08217	0,019	25
M ₁	89399,69357	0,014	46
OO ₁	80301,86721	0,008	46
Q ₁	96726,08376	0,027	75
M ₂	44714,16431	0,326	78
O ₁	92949,6301	0,01	87
S ₂	43200,00002	0,172	88
T ₂	43259,21709	0,01	88
K ₂	43082,04529	0,047	89
NU ₂	45453,61584	0,008	90
N ₂	45570,05357	0,042	92
L ₂	43889,83274	0,022	92
2N ₂	46459,34794	0,006	106
MS ₄	21972,02139	0,01	115
J ₁	83154,51628	0,01	123
MNS ₂	47258,16272	0,011	128
P ₁	86637,20483	0,017	143
K ₁	86164,09058	0,054	147
MU ₂	46338,32735	0,007	241
Mm	2380713,365	0,057	308
Msf	1275721,423	0,009	355

Tabela 7: Constituintes harmônicas da maré no Porto Forno, Arraial do Cabo – RJ (FEMAR).

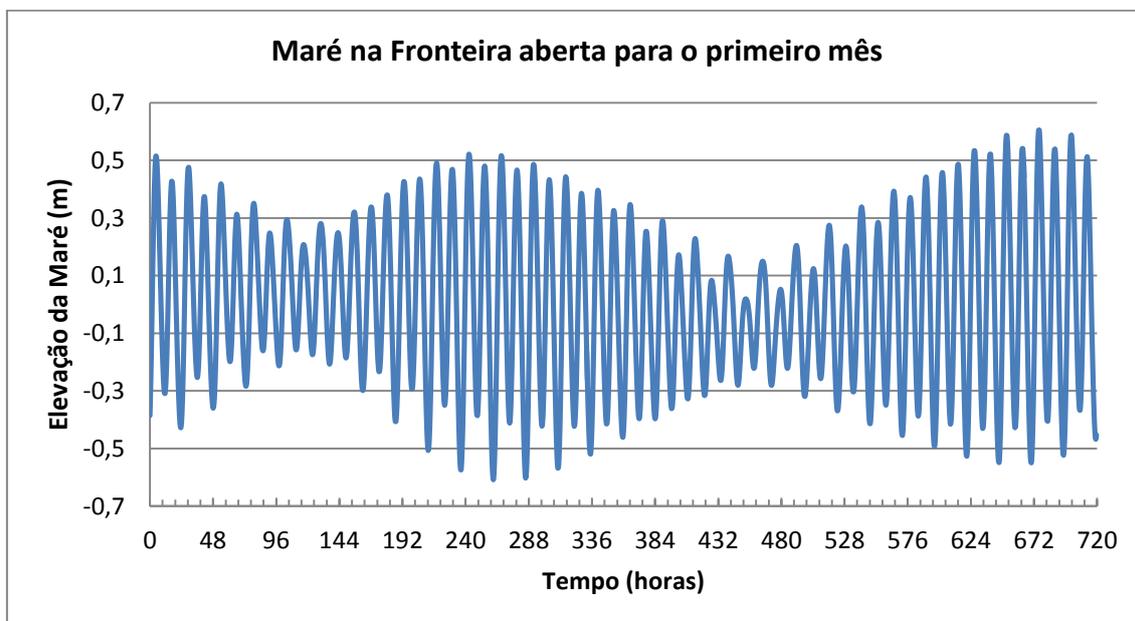


Figura 35: Maré sintética na fronteira aberta para o primeiro mês de simulação. O nível médio (0,0m) é o NMM no Porto do Forno, em Arraial do Cabo.

4.5 Ventos

A série temporal de direção e intensidade de ventos utilizada neste estudo é baseada em medições feitas durante um período de 20 anos (de 12/07/76 a 22/07/97) na estação meteorológica 83759, situada em São Pedro D'Aldeia, localizada na latitude 22°49'S e longitude 42°06'W. A série utilizada, com dados espaçados de uma hora, contempla ventos característicos dos meses de janeiro, fevereiro e março, que sopram predominantemente de nordeste. Ao longo do ano, os ventos dominantes sopram também de nordeste. A Figura 36 sintetiza esta estatística e a Figura 37 ilustra uma série de ventos típica do mês de janeiro.

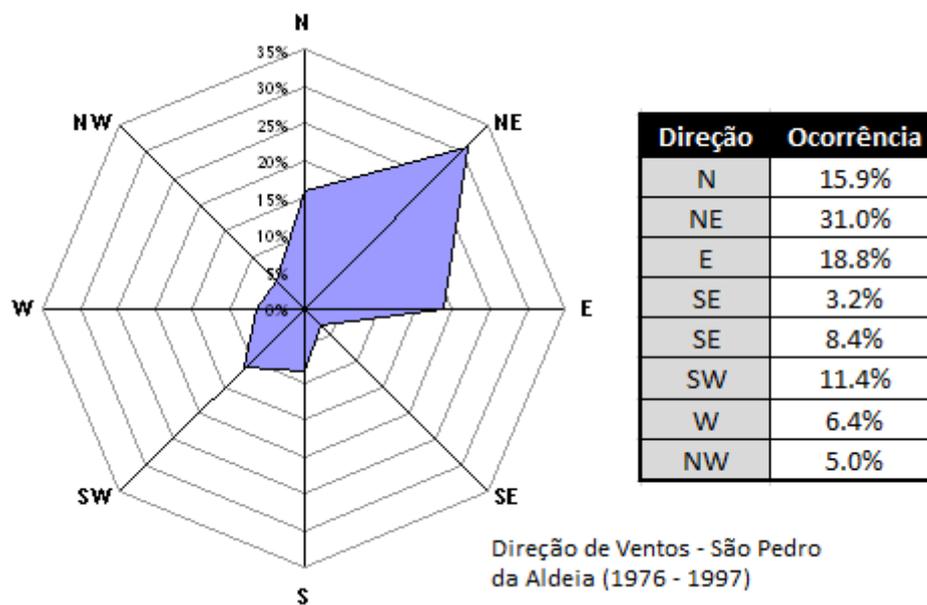


Figura 36: Estatística de direção de ventos medidos na estação meteorológica da Base Aérea Naval de São Pedro da Aldeia. (ROSMAN, 2002)

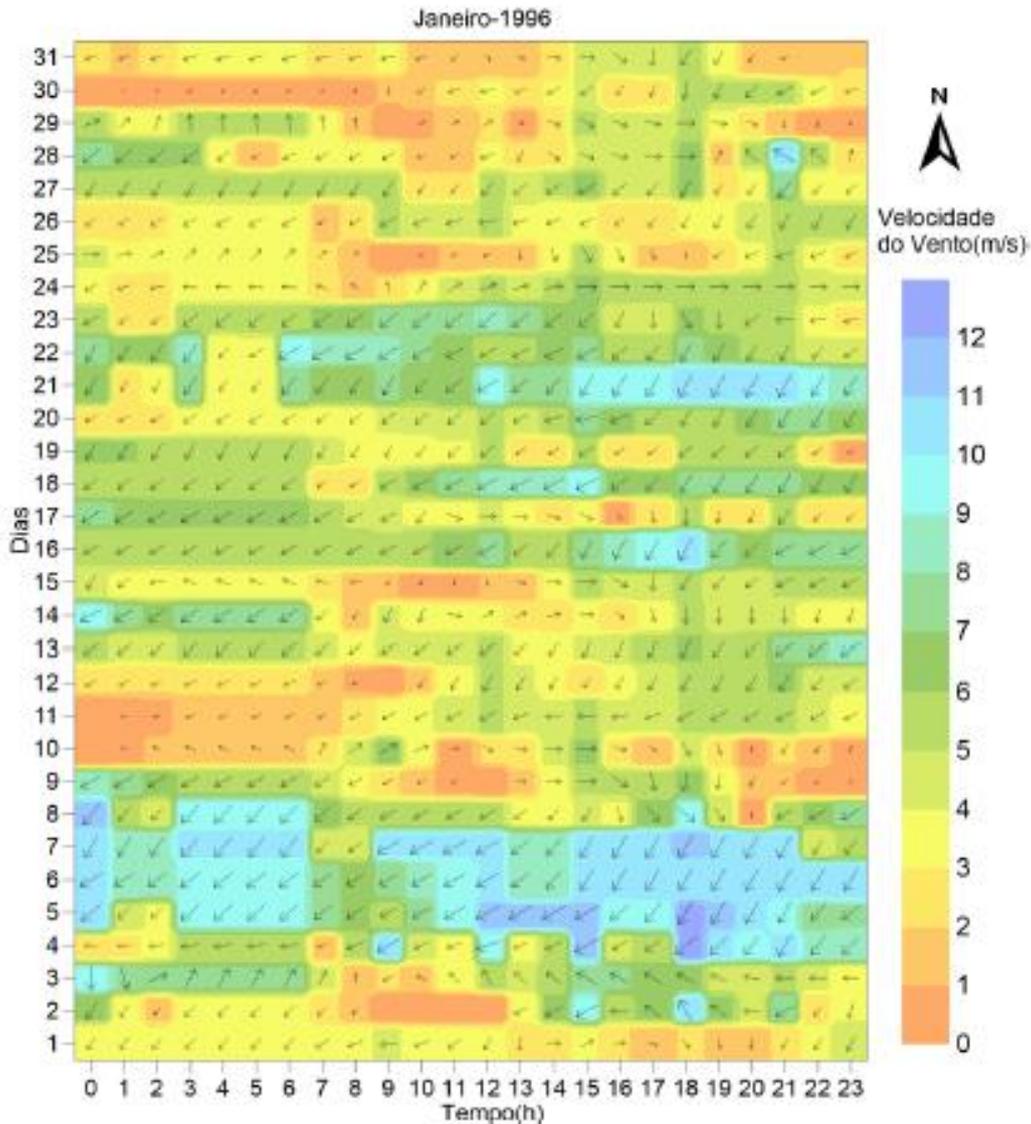


Figura 37: Série de ventos característica para um mês de Janeiro (SIGAÚQUE, 2013)

4.6 Resultados

Os resultados obtidos com as simulações feitas pelo SisBaHiA[®] permitiram chegar a uma série de conclusões sobre a dinâmica hidro-sedimentológica da Lagoa de Araruama no cenário de abertura do Canal Oeste. Como já esperado, a maré dentro da Lagoa é bastante amortecida em relação à maré na fronteira aberta. A Figura 39 mostra uma série temporal de aproximadamente dois dias de maré de quadratura para cinco diferentes pontos do domínio de modelagem, cujas localizações estão mostradas na Figura 38. Observa-se na Figura 39 que as marés nas Estações A e E, situadas nas fronteiras abertas do domínio, encontram-se praticamente em fase, com suas linhas sobrepostas no

gráfico. Nas estações B e D, situadas respectivamente na Lagoa Pernambuco e no Canal de Itajuru, percebe-se marés já com menores amplitudes e levemente defasadas em relação à maré no oceano. As regiões mais próximas da parte central da Lagoa, onde está localizada a estação C, são locais onde ocorrem as menores variações de nível a cada ciclo de maré. Ao longo de todo o período de simulação a amplitude da maré nesta estação nunca excedeu o valor de 0,05 m.

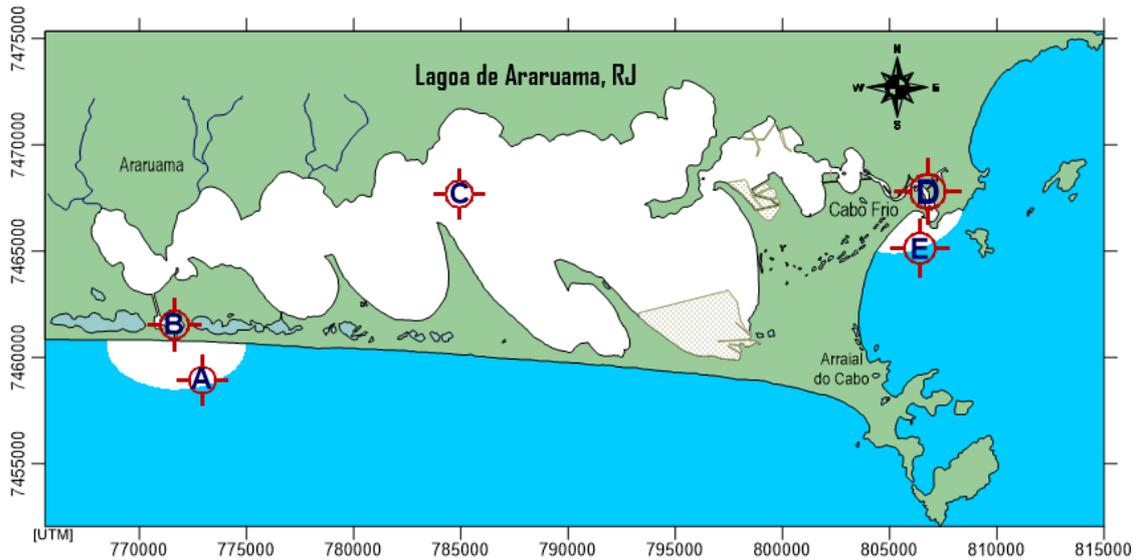


Figura 38: Localização das estações utilizadas para obtenção das séries temporais de elevação do nível d'água.

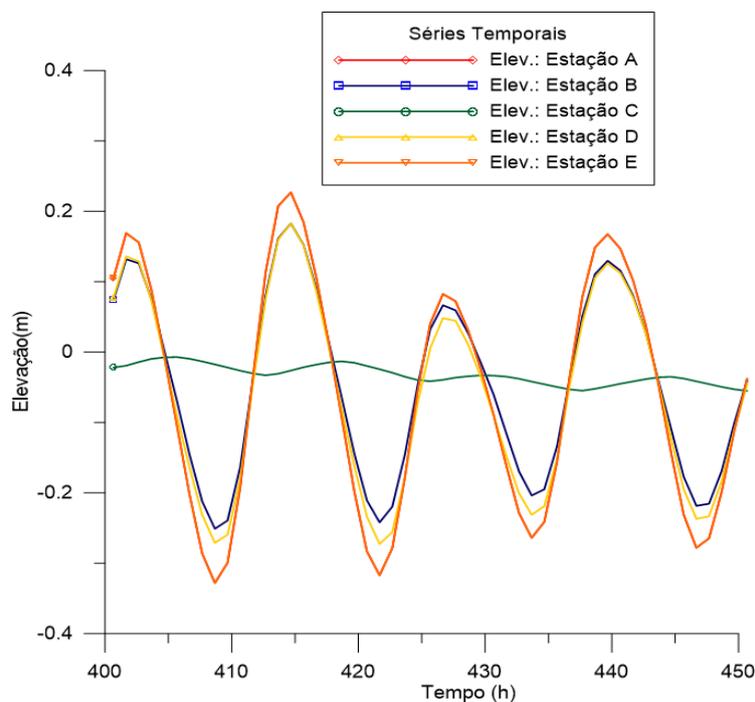


Figura 39: Maré sintética em diferentes pontos do domínio de modelagem. Período de dois dias de uma maré de quadratura.

O mapa da Figura 40 mostra os padrões de velocidade de correntes na Lagoa e nos canais de maré para a maior preamar de sizígia registrada, na qual o nível nas fronteiras abertas é de aproximadamente 0,60 m e as correntes de enchente nos canais são as maiores possíveis. As correntes são bastante fracas na região central da Lagoa, aumentando de intensidade nas proximidades dos dois canais de maré e sendo máximas nos canais.

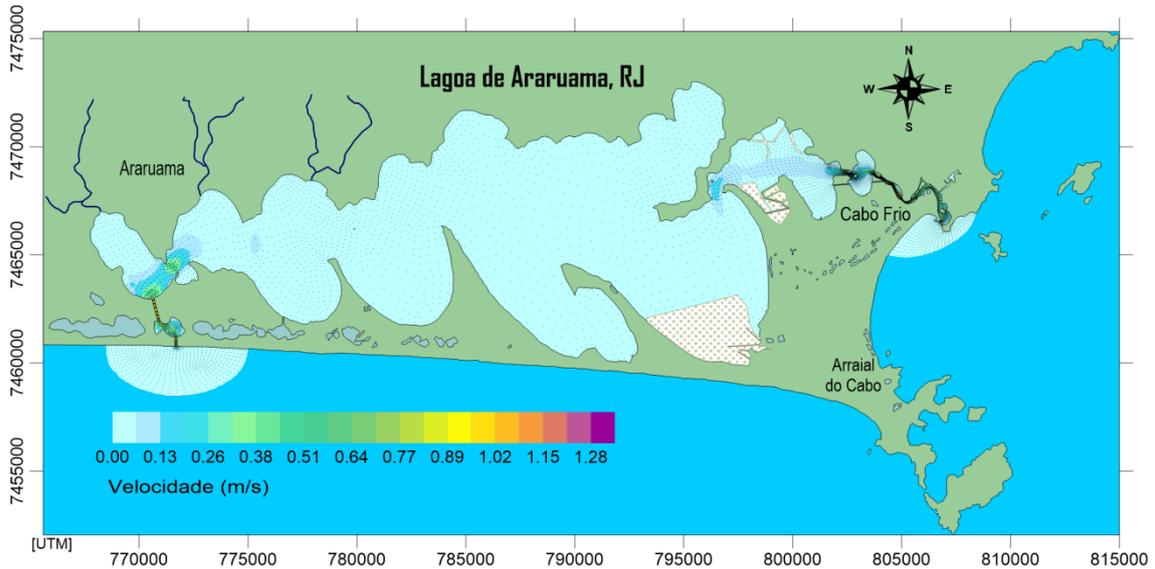


Figura 40: Padrões de velocidade de correntes na Lagoa de Araruama para uma situação de preamar de sizígia. As correntes são bastante fracas na região central da Lagoa e em suas proximidades, aumentando de intensidade nas proximidades dos dois canais de maré, sendo máximas nos canais.

As maiores velocidades são de aproximadamente 1,2 m/s e ocorrem no trecho mais estreito do Canal de Itajuru, como mostra a Figura 41. No Canal Oeste, as maiores velocidades são de aproximadamente 1,0 m/s e ocorrem no canal mais a sul, como mostra a Figura 42.

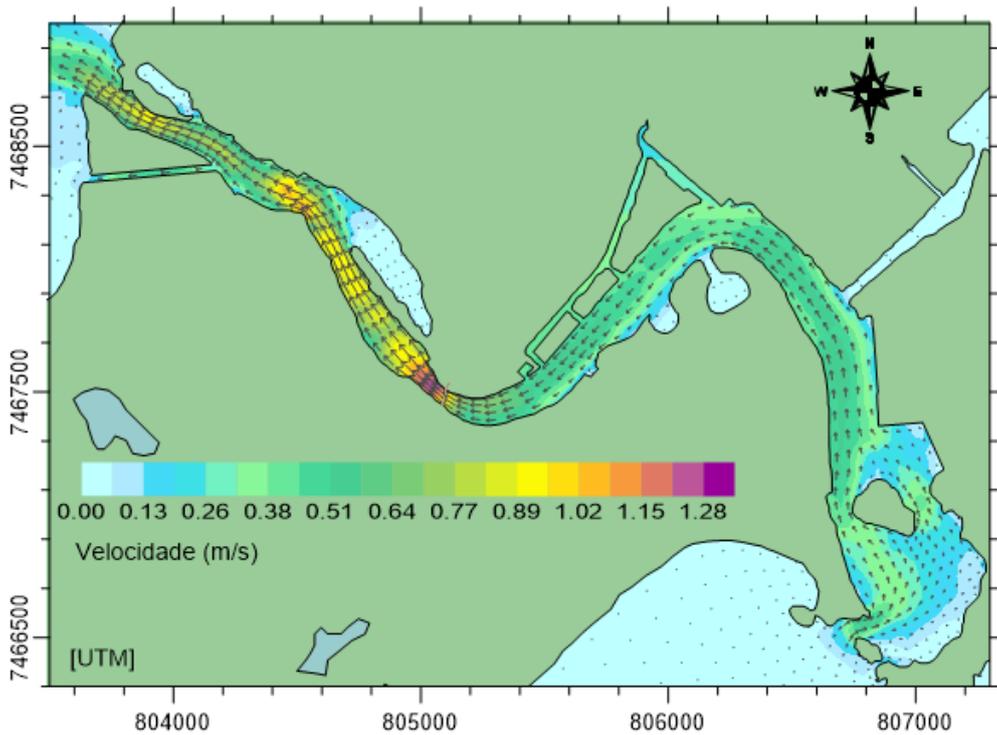


Figura 41: Correntes de enchente no Canal de Itajuru. O esquema de cores indica as isolinhas de velocidade e o vetores indicam a magnitude e direção da velocidade. Nota-se que as maiores velocidades são de aproximadamente 1,2m/s e ocorrem num trecho de significativo estrangulamento do escoamento.

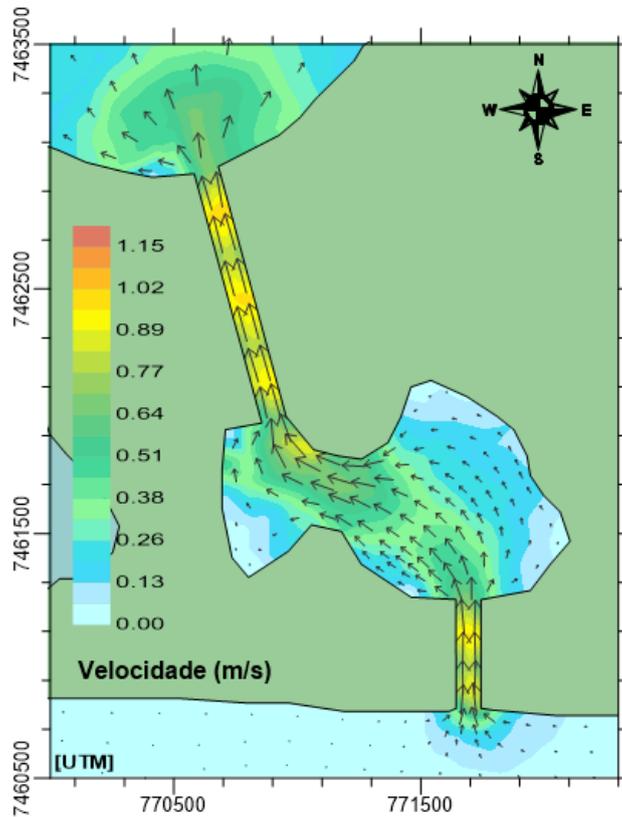


Figura 42: As correntes máximas de enchente são de aproximadamente 1,0 m/s no Canal Oeste, para a maior preamar de sizígia.

A circulação baixa-mar de sizígia mais baixa é ilustrada na Figura 43, na qual se observa novamente correntes fracas na região central da Lagoa e mais fortes nos canais, assim como em suas proximidades. O nível nas fronteiras abertas é de aproximadamente -0,60 m.

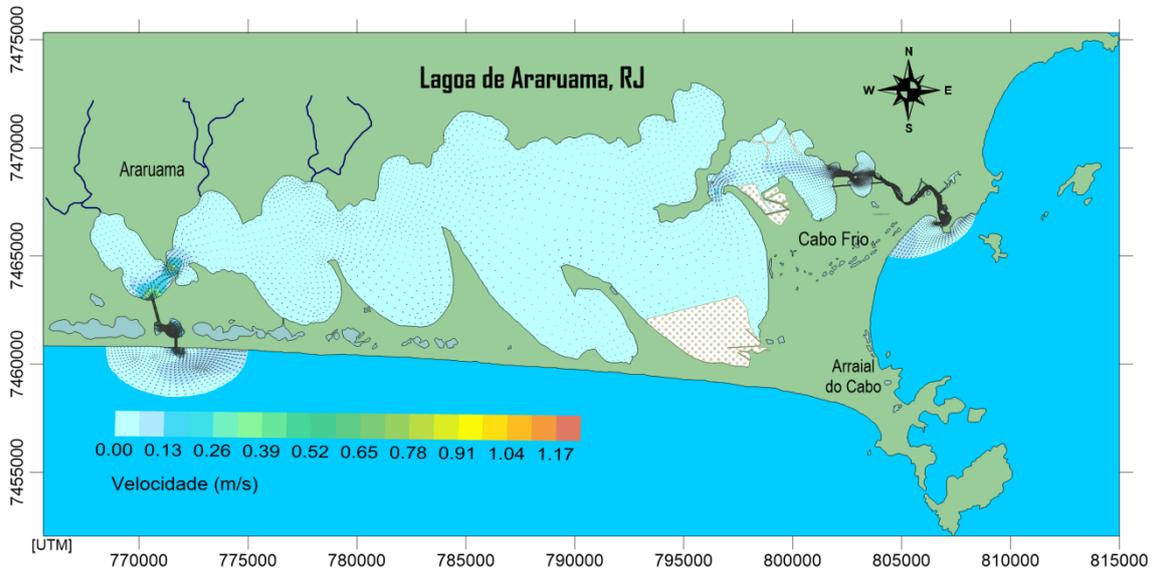


Figura 43: Padrões de velocidade de correntes na Lagoa de Araruama para uma situação de baixa-mar de sizígia.

As correntes de vazante são mais fortes no Canal de Itajuru, novamente no ponto onde o escoamento é mais estrangulado. Como mostrado na Figura 44, neste trecho as velocidades são de aproximadamente 1,2 m/s. Já no Canal Oeste, se observa velocidades menores que 1,0 m/s em quase toda a sua extensão. Nas proximidades da embocadura marítima do canal mais a sul, a velocidade é próxima de 1,1m/s, como mostra a Figura 45.

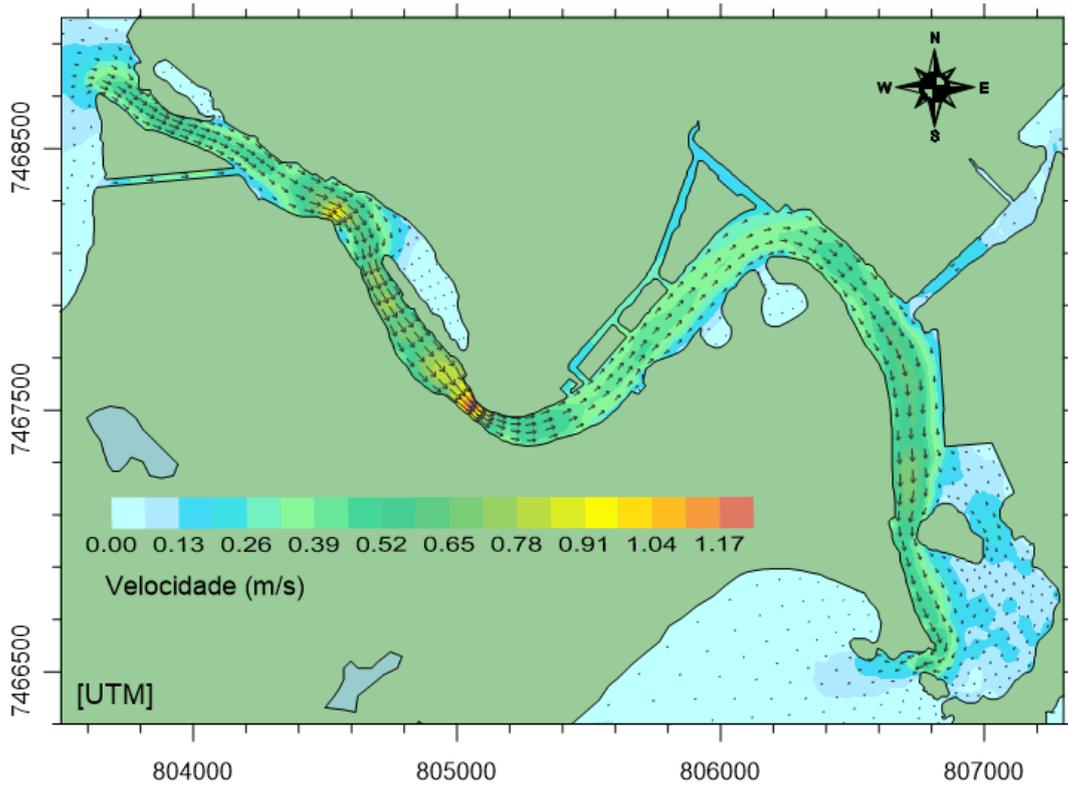


Figura 44: Correntes de vazante máximas de aproximadamente 1,2m/s no Canal de Itajuru. Novamente, se nota as maiores velocidades no trecho mais estreito.

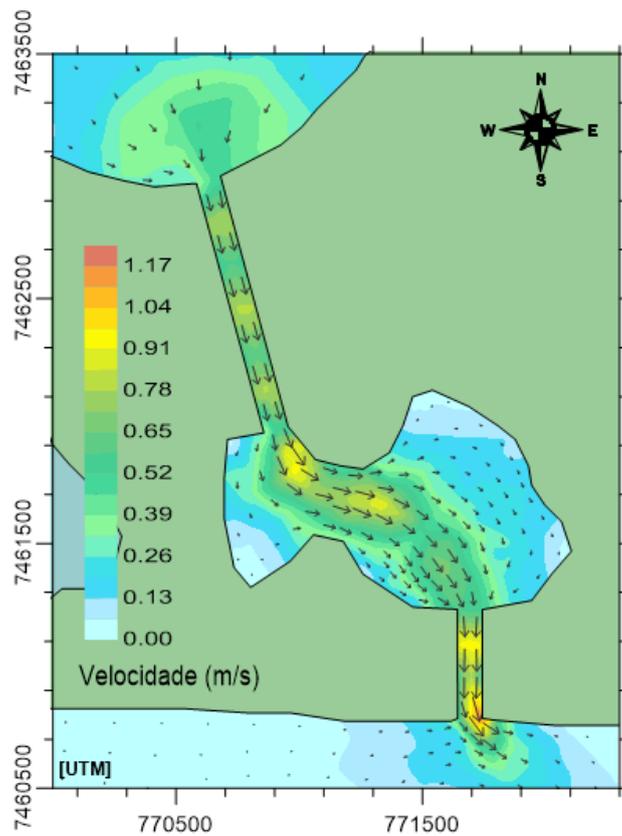


Figura 45: Correntes de vazante no Canal Oeste para a baixa-mar de sizígia mais baixa. Maiores velocidades em torno de 1,1m/s.

Quanto à dinâmica de sedimentos, após simular um período de três meses, não se observou pontos de assoreamento ou erosão significativos nas regiões mais centrais da Lagoa de Araruama. A dinâmica foi mais intensa em um trecho próximo à região oeste da Lagoa, no Canal Oeste e no Canal de Itajuru, onde houve os pontos de maior erosão e assoreamento. Nos canais já se esperava que houvesse uma maior dinâmica sedimentológica, em função das bruscas variações da área hidráulica do escoamento. O mapa da Figura 46 mostra as isolinhas de variação de profundidade em todo o domínio de modelagem, com os pontos de maior interesse destacados pelas elipses em vermelho.

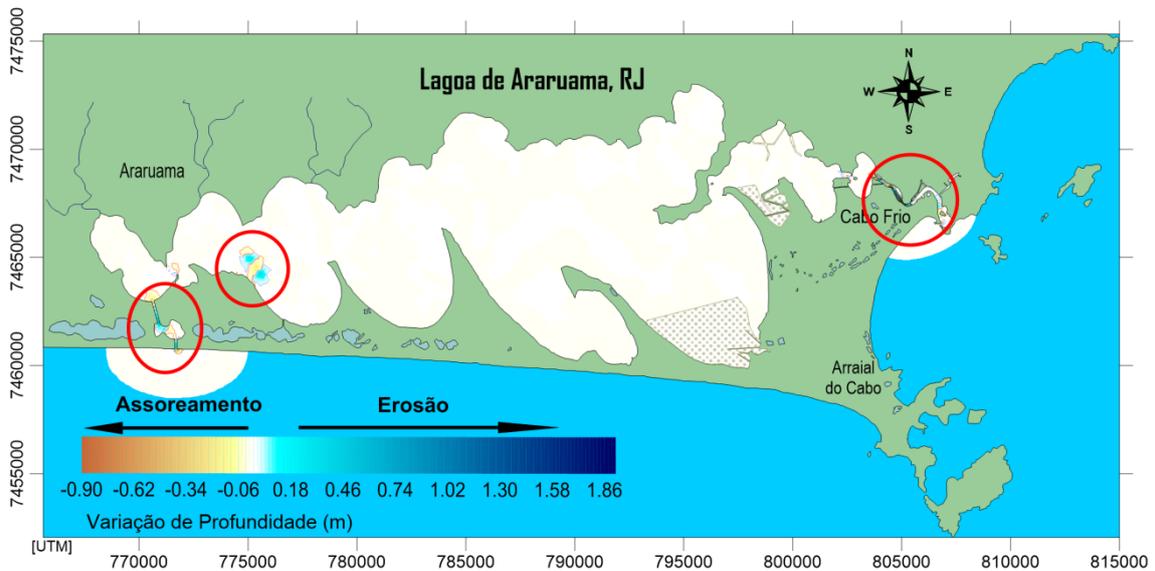


Figura 46: Mapa com isolinhas de variação de profundidade. Os pontos de erosão ou assoreamento dignos de atenção ocorreram apenas nas três regiões destacadas.

A Figura 47 mostra a seguir as variações de profundidade ao longo do Canal de Itajuru. As elipses em vermelho destacam os trechos de maior erosão e assoreamento. No trecho de curva marcado a erosão foi de aproximadamente 1,80 m, a maior erosão observada em todo o domínio. Na região mais estreita do canal, houve erosão de aproximadamente 0,70 m em um ponto e assoreamento de aproximadamente 0,80 m em outro. A Figura 48 mostra em maiores detalhes estes trechos. A dinâmica de sedimentos mais significativa no Canal de Itajuru pode ser atribuída ao fato de ter sido utilizado para este trecho valores de batimetria anteriores ao projeto de dragagem. SIGAÚQUE (2013) obteve resultados semelhantes para a dinâmica de sedimentos no Canal de Itajuru, ao realizar simulações para a Lagoa de Araruama sem o Canal Oeste. Assim sendo, pode-se concluir que a abertura do Canal Oeste não afetaria, de maneira perceptível, a dinâmica de sedimentos da porção leste da Lagoa e do Canal de Itajuru.

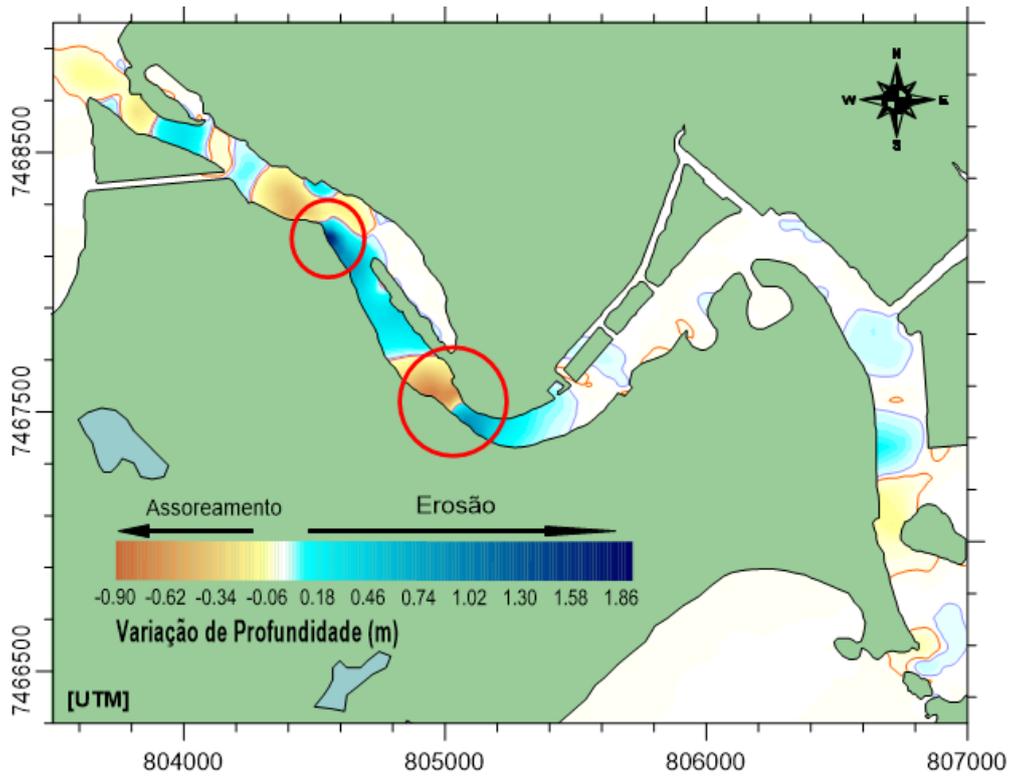


Figura 47: Variação de profundidade ao longo do Canal de Itajuru após 3 meses.

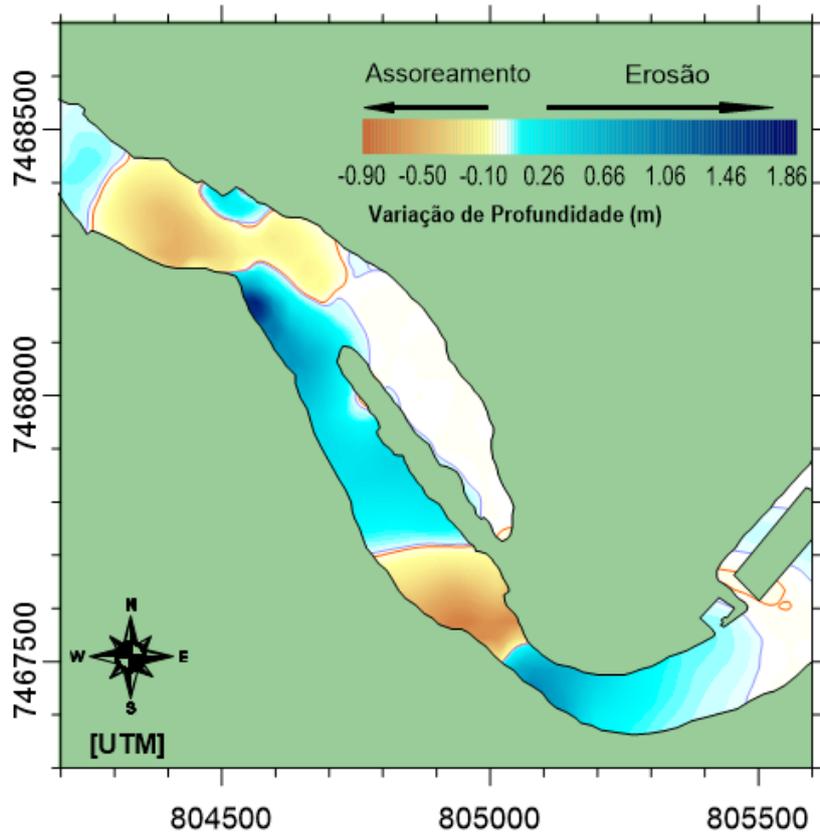


Figura 48: Trecho onde houve as maiores as variações de profundidade observadas em todo o domínio modelado.

Na Figura 49 se observa as variações de profundidade na região oeste da Lagoa de Arauama e no Canal Oeste. No interior da Lagoa, no trecho situado no canto superior direito da figura, se percebe pontos de assoreamento máximo de 0,15 m e pontos de erosão de aproximadamente 0,25 m. Pode-se dizer que estes valores são relativamente pequenos, o que indica uma dinâmica de sedimentos pequena neste trecho.

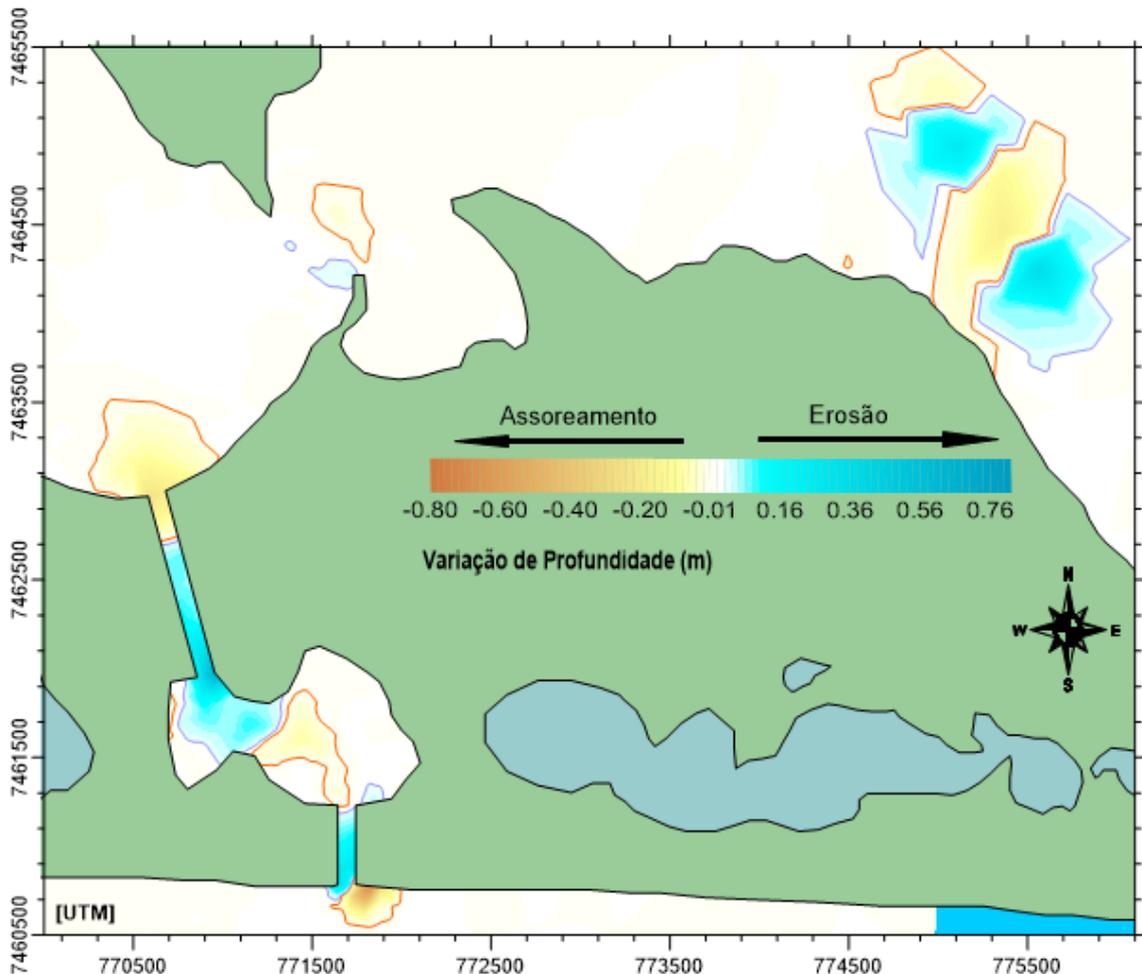


Figura 49: Região do Canal Oeste e proximidades. O trecho mostrado no canto superior direito da figura apresenta pontos de assoreamento máximo em torno de 0,17 m, e pontos de erosão máxima de aproximadamente 0,25 m .

A Figura 50 mostra em maiores detalhes a variação da profundidade ao longo do Canal Oeste, que é ponto de maior interesse deste trabalho. Percebe-se uma tendência de leve erosão no interior dos dois canais, a norte e a sul da pequena lagoa. Há também alguns pontos, tanto de erosão quanto de assoreamento, no interior da Lagoa Pernambuco. A Figura 51 mostra cinco pontos de interesse para acompanhamento da evolução da profundidade ao longo do tempo. Na embocadura lagunar do Canal Oeste, Estação 5, observou-se um assoreamento de aproximadamente 0,20 m. Na Estação 4 houve erosão de

aproximadamente 0,70 m. No interior do canal maior (a norte) também se observa tendência erosiva, porém com valores que variam entre 0,05 e 0,20 m. Na Estação 3, situada no meio da Lagoa Pernambuco, houve um assoreamento de aproximadamente 0,05 m, valor praticamente desprezível. Na Estação 2, localizada no canal menor (a sul), houve aproximadamente 0,17 m de erosão. Na embocadura marítima do Canal Oeste houve tendência tanto de erosão quanto de assoreamento. Na região a oeste do eixo central do menor canal houve erosão de aproximadamente 0,30 m e na Estação 1, situada a aproximadamente 50 m da embocadura, se observa um assoreamento de 0,70 m. Na Figura 45 é possível observar que as correntes de vazante na embocadura marítima do Canal Oeste se alinham entre as direções leste e sudeste. Como a vazão sólida tende a se alinhar com os vetores de velocidade, não é de se estranhar que o assoreamento ocorra a leste da embocadura do canal.

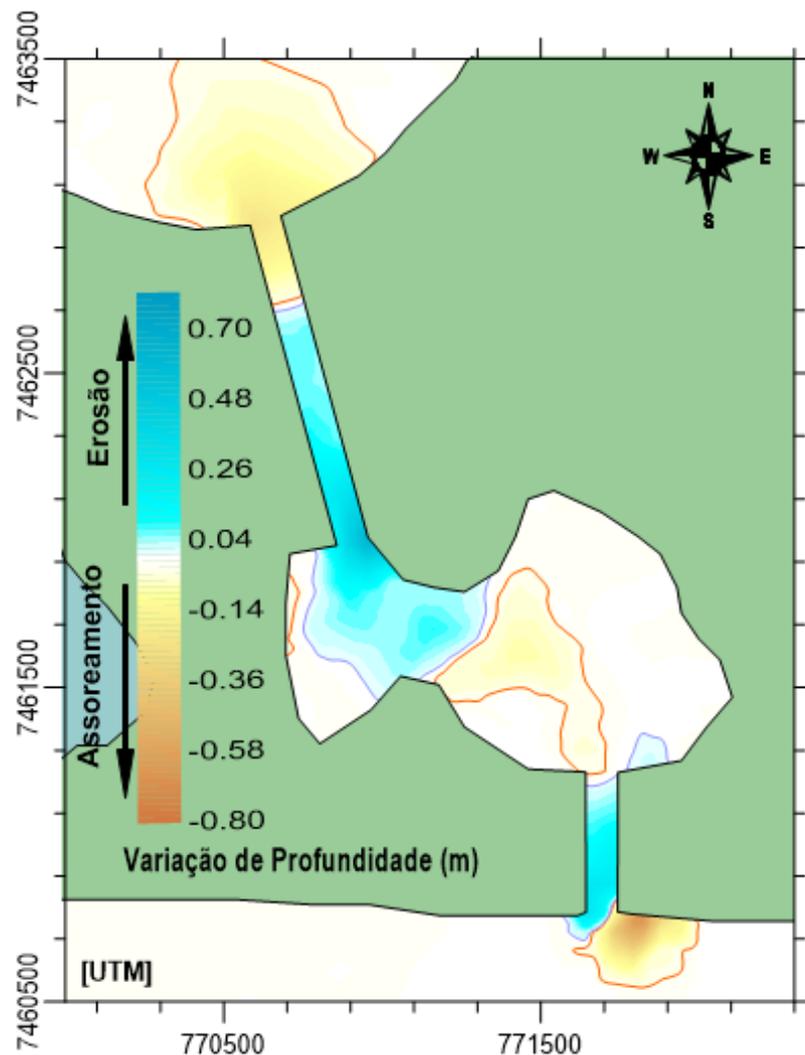


Figura 50: Variações de profundidade no Canal Oeste. Observa-se tendência de erosão no interior dos canais e assoreamento nas embocaduras.

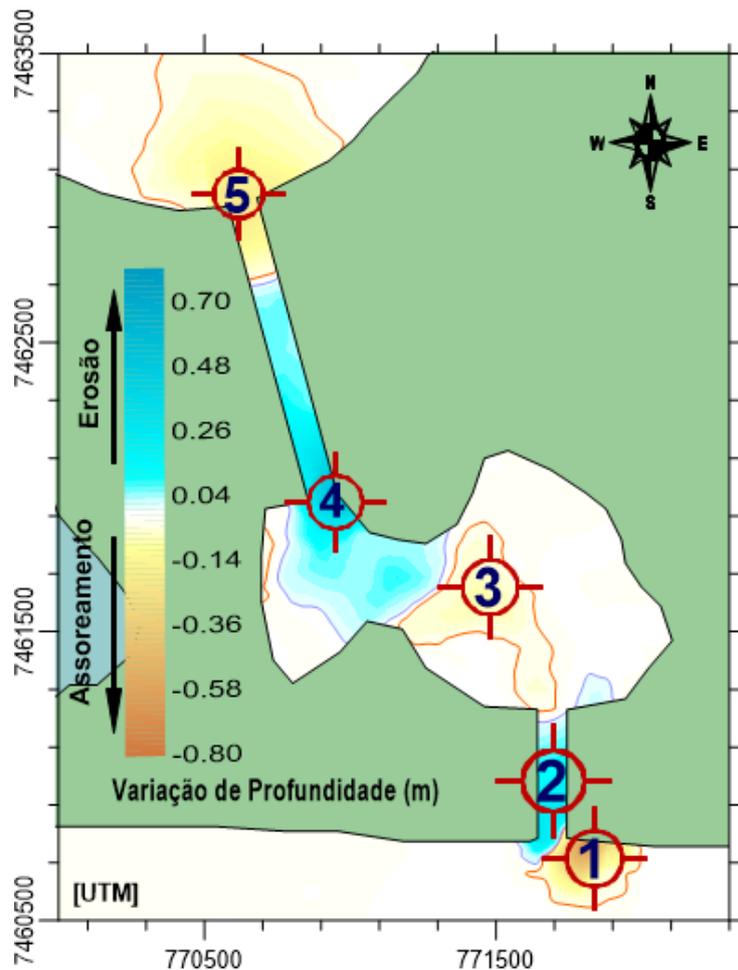


Figura 51: Estações definidas para acompanhamento da variação da profundidade ao longo do tempo.

No gráfico da Figura 52 está detalhada a variação temporal da profundidade nestas cinco estações. Percebe-se que no último mês a profundidade nas Estações 1 e 4 variou bem menos que nos dois primeiros meses. O caráter assintótico destas duas curvas evidencia uma provável tendência ao equilíbrio hidro-sedimentológico nestes pontos. O assoreamento observado na Estação 1 não é de causar grande preocupação, pois as cotas batimétricas neste local ainda se situarão a pouco mais de 4,0 m abaixo do NMM. Além disso, é muito provável que, numa situação real, as correntes litorâneas carregassem o sedimento expelido pelo canal para outras localidades, impedindo o assoreamento neste ponto. Vale lembrar que esta modelagem não considerou os efeitos de correntes litorâneas.

A Estação 3 manteve-se bastante equilibrada, não tendo demonstrado variações significativas de profundidade ao longo do tempo. As estações 2 e 5 apresentaram tendências de erosão e assoreamento, respectivamente, mas que se mostraram pequenas, não constituindo assim qualquer tipo de problema.

Outro fato interessante também de se observar é que, tanto os assoreamentos quanto as erosões, não ocorreram de maneira constante, mas sim sazonal, dando às curvas da Figura 52 um traçado que lembra uma escada. Durante as marés de sizígia a velocidade de escoamento nos canais é maior, fazendo com que ocorra maior erosão em um ponto, e consequente assoreamento em outro, onde houver menor velocidade. Em períodos de maré de quadratura a dinâmica de sedimentos é pequena, em função das menores velocidades, não ocorrendo assim erosão ou assoreamento aparentes. Isto explica os degraus observados em quase todas as curvas.

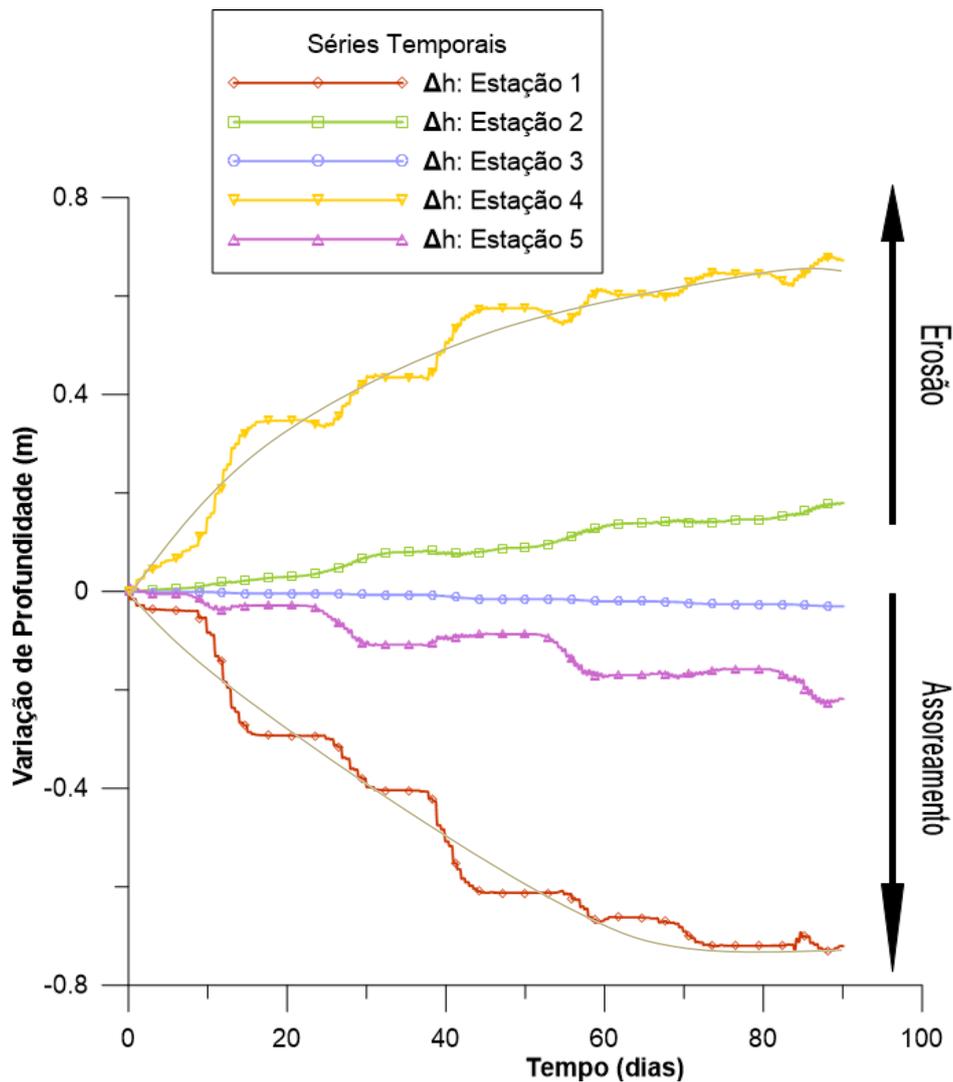


Figura 52: Variação da profundidade ao longo do tempo nos pontos de maior interesse.

A Figura 53 facilita a visualização das mudanças ocorridas na batimetria da região do Canal Oeste após 3 meses. Nota-se que não houve grandes modificações.

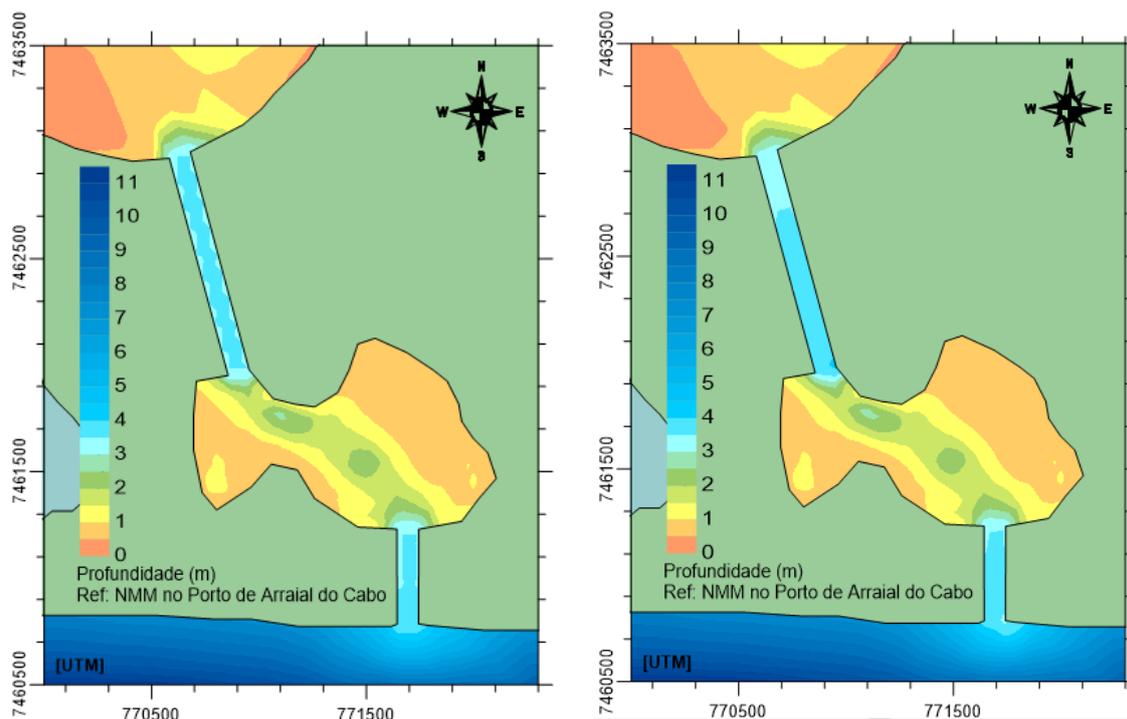


Figura 53: Batimetria original (à esquerda), característica do instante inicial, e batimetria após 3 meses (à direita).

Desta maneira, após simular três meses da hidrodinâmica e da dinâmica de sedimentos da Lagoa de Araruama, notou-se que o Canal Oeste apresentou alguma tendência de erosão em seus dois canais e tendência de assoreamento nas embocaduras marítima e lagunar. Este comportamento é bastante plausível; a tendência erosiva se justifica pelas maiores velocidades que ocorrem nos canais, regiões com área hidráulica reduzida. Nas embocaduras, ao deixar o canal, o escoamento encontra áreas hidráulicas bem maiores, o que reduz bruscamente sua velocidade e favorece a deposição de sedimentos. No entanto, a magnitude dos assoreamentos foi pequena, o que os torna não é preocupantes. O mesmo se pode dizer quanto à erosão observada. O comportamento na Estação 1, ponto de maior assoreamento, provavelmente seria diferente, caso fosse considerado o efeito do transporte litorâneo de sedimentos. O sedimento não se acumularia neste local.

A análise da evolução da profundidade no tempo mostrou que os pontos de maior erosão ou assoreamento se encontram em uma situação próxima do equilíbrio. Os demais pontos não apresentaram tendência erosiva, ou de deposição de sedimentos, de maiores magnitudes. Assim sendo, pode-se concluir que o Canal Oeste teria grandes chances de ser estável, do ponto de vista hidro-sedimentológico, para a configuração geométrica adotada.

No entanto, para o caso real de implementação deste projeto, ou de outros similares, seria imprescindível que se realizasse estudos levando em consideração os efeitos do transporte litorâneo, avaliando assim a real necessidade da instalação de guia correntes, ou da utilização de mecanismos de transpasse de areia.

5 CONCLUSÃO

A análise feita sobre as condições de estabilidade do Canal Oeste mostrou que este teria sua estabilidade mínima para uma área hidráulica em torno de 330 m², e teria sua estabilidade ótima para uma seção de aproximadamente 350 m². Em função das características do modelo e da geometria da região, adotou-se um cenário de simulação no qual o canal tinha uma calha uniforme, ao longo de toda a sua extensão, e cuja área variava também uniformemente, dentro de uma faixa de valores definida. Para a análise das condições de estabilidade foram usados apenas o critério de Escoffier e o critério de Skou (Máxima Capacidade de Resposta), uma vez que o critério de O'Brien ($P \times A_c$) não se aplica a sistemas lagunares com mais de um canal de maré. Não foi possível utilizar o critério de Per Bruun (P/Mt), pois não se dispunha de dados sobre o transporte litorâneo de sedimentos na região do canal. Em função do caso em questão se tratar de uma laguna costeira conectada ao mar por dois canais maré, e não apenas por um, vale a pena refletir também sobre a aplicabilidade deste critério ao caso.

A área de 350 m² foi então utilizada como a área hidráulica de projeto para os dois trechos canalizados do Canal Oeste. A simulação de um período de três meses, com o modelo hidro-sedimentológico do SisBaHiA[®], mostrou uma dinâmica de sedimentos pouco significativa no interior da Lagoa de Araruama, e mais intensa nos canais de Itajuru e Oeste, como já era esperado. O comportamento no Canal de Itajuru, que possui sua embocadura já estabilizada, foi similar ao observado por SIGAÚQUE (2013). No Canal Oeste houve assoreamento próximo às embocaduras marítima e lagunar, e erosão nos canais situados a norte e a sul da Lagoa Pernambuco, comportamento que também era de se esperar. No entanto, os pontos de assoreamento e erosão mais críticos se encontram próximos de uma situação de equilíbrio. O valor da variação da profundidade nestes e em outros pontos não causou maiores preocupações. É muito provável que o assoreamento observado na embocadura do canal não ocorresse, caso se houvesse levado em consideração o efeito das correntes litorâneas. Desta maneira, concluiu-se que esta con-

figuração adotada para o Canal Oeste seria muito provavelmente estável do ponto de vista hidro-sedimentológico.

É bastante importante frisar que este trabalho não caracteriza, de maneira alguma, um projeto pronto para implementação. Um eventual projeto de construção do Canal Oeste requereria uma série de outros estudos, inclusive sobre os impactos ambientais relacionados à obra. Para o bom funcionamento de um canal como este, seria muito importante que se levasse em consideração os efeitos do transporte litorâneo na praia adjacente ao canal, que não foram considerados neste trabalho. De igual importância, seria a obtenção de dados batimétricos mais atuais de toda a Lagoa, assim como a definição da real batimetria da Lagoa Pernambuco.

6 RECOMENDAÇÕES

Como recomendações para trabalhos futuros e para uma possível complementação deste, pode-se pensar em incorporar nas modelagens aqui feitas com o SisBaHiA[®] uma vazão sólida, paralela ao litoral e de frente ao Canal Oeste, de forma a simular os efeitos do transporte litorâneo. Seria necessário medir a granulometria do sedimento costeiro da região, assim como determinar o clima de ondas do local, para então determinar o transporte litorâneo utilizando fórmulas empíricas disponíveis na literatura.

Da mesma maneira, valeria a pena avaliar a necessidade da instalação de guia-correntes na embocadura do Canal Oeste. Dispondo dos dados de transporte litorâneo, seria bastante fácil utilizar o critério de Per Bruun, apesar de estar se tratando aqui de um caso atípico de laguna com dois canais de maré. A incorporação dos guia-correntes na malha de elementos finitos seria bastante simples e a simulação seria similar à que foi realizada.

Também de relevante interesse seria a elaboração de trabalhos que buscassem avaliar outras alternativas para a melhoria da qualidade ambiental da Lagoa de Araruama. As medidas mais efetivas, que certamente impactariam positivamente na qualidade das águas da Lagoa, dizem respeito à melhoria do gerenciamento do esgoto gerado nos municípios da região. Embora o tratamento terciário já seja realizado, a remoção de nutrientes é ainda insuficiente para esta lagoa, por se tratar de um ambiente acumulador. Talvez fosse mais interessante pensar em alternativas para o lançamento do esgoto tratado diretamente no mar, onde há maior circulação hidrodinâmica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRUUN, P., GERRITSEN, F., 1960, “*Stability of Coastal Inlets*”. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands.
- BRUUN, P., 1978, *Stability of tidal inlets - Theory and Engineering*. Elsevier Publishing Co., Amsterdam.
- CALIXTO, R. J., 1990, *Estabilidade Hidráulico-Sedimentológica de Canais de Maré, O Caso da Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DE SIQUEIRA, L. F. G. & QUEIROZ, R. S., 2012, *Estudo para Revitalização do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu com Auxílio da Modelagem Computacional*. Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DUARTE, F. T. & PEIXOTO, R. S., 2012, *Estudo da Influência dos Processos Sedimentológicos do Canal do Mangue no Porto do Rio de Janeiro com Auxílio da Modelagem Computacional*. Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ESCOFFIER, F. F., 1940 "The Stability of Tidal Inlets". **Shore and Beach**, Vol. 8, No. 4, pp. 114-115, 1940.
- GAVA, G.L., 2008, *Avaliação de Renovação de Águas na Lagoa de Araruama – RJ, via Abertura de Canal com o Mar no Extremo Oeste*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- KJERFVE, B., SCHETTINI, C.A.F., KNOPPERS, B., LESSA, G., FERREIRA, H. O., 1996, “*Hydrology and Salt Balance in a Large, Hypersaline Coastal Lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil*”, **Estuarine, Coastal and Shelf Science** v. 42, pp 701–725
- O'Brien, M. P., 1931, “*Estuary Tidal Prism Related to Entrance Areas*”, **Civil Engineering**, Vol. 1, No. 8, pp 738-739.
- O'Brien, M. P., 1969, “*Equilibrium Areas of Inlets on Sandy Coasts*”, **Journal of the Waterways and Harbors Division**, ASCE, Vol.95, No.WW1, February, pp 43-52.
- O'BRIEN, M. P., DEAN, R. G., 1972, “*Hdraulics and Sedimentary Stability of Coastal Inlets*”, In: *Proceedings of the Thirteenth Coastal Engineering Conference*, v. II, pp. 761-780, Vancouver, B.C., Canada.
- PINTO, A.C.B., 1999, *Um Modelo Numérico para análise da Estabilidade Hidráulico-Sedimentológica de Canais de Maré*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ROSENHAGEN, A. G. J., 2013, *Aplicação de uma fórmula de transporte de sedimentos considerando ondas e correntes em um modelo hidro-sedimentológico*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROSMAN, P. C. C., et alli., 1992, *Solução Conjunta dos Problemas de Erosão na Praia de Ipanema-Leblon e Qualidade da Água na Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ*: Relatório COPPETEC-ET-170173, COPPE/UFRJ.

ROSMAN, P. C. C., et alli., 2002, *Modelagem da Lagoa de Araruama, RJ – Relatório Final*: Relatório COPPETEC, Projeto PEC – 1984, COPPE/UFRJ.

ROSMAN, P.C.C., 2012, “*Aspectos Morfológicos de Rios e Estabilidade de Canais de Maré.*” Apostila de Aulas – Curso de Engenharia Fluvial e Costeira , AECO - Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROSMAN, P. C. C., 2013, *Referência Técnica do SisBaHiA®*. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC.

SIGAÚQUE, P. J., 2013, “*Avaliação Hidro-Sedimentológica no Canal de Itajuru-Lagoa de Araruama-RJ, devido a Sobrelevação do Nível Médio do Mar por Mudança Climática.*” Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SKOU, A., 1990, “*On the Geometry of Cross-section Areas in Tidal Inlets*”. Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS., 2012. “*Coastal Engineering Manual.*” Engineer Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes), USA.

ANEXO

Tabela com os parâmetros geométricos de cada seção transversal da discretização 1D, fornecidos ao MIDAC8 como dados de entrada.

Número da Seção	Largura da Base (m)	Profundidade(m)	Talude Direito	Talude Esquerdo	Rugosidade do fundo (m)	Área em relação ao NMM
1	1700	18,8	0	0	0,03	31960
2	1100	17	0	0	0,03	18700
3	740	14,9	0	0	0,03	11026
4	450	11,04	0	0	0,03	4968
5	400	7	0	0	0,03	2800
6	130	3,8	0	0	0,03	494
7	130	3,8	0	0	0,03	494
8	130	3,8	0	0	0,03	494
9	700	1,8	120	80	0,03	1584
10	800	2	130,43	304,35	0,03	2469,56
11	800	1,9	160	240	0,03	2242
12	400	2,1	80	66,67	0,03	1163,407
13	150	1,7	76,92	346,15	0,03	866,3362
14	130	3,8	0	0	0,03	494
15	130	3,8	0	0	0,03	494
16	130	3,8	0	0	0,03	494
17	130	3,8	0	0	0,03	494
18	130	3,8	0	0	0,03	494
19	130	3,8	0	0	0,03	494
20	700	1,1	400	400	0,03	1254
21	200	1	1000	1000	0,03	1200
22	700	1,1	1714,29	714,29	0,03	2239,291
23	700	1,3	1714,29	714,29	0,03	2962,15
24	1000	1,3	1111,11	444,44	0,03	2614,44
25	600	1,4	777,78	3375	0,03	4909,724
26	1000	1,1	714,29	5714,29	0,03	4989,291
27	700	1,2	333,33	2166,67	0,03	2640
28	200	1,2	666,67	333,33	0,03	960
29	200	0,75	1333,33	1000	0,03	806,2491
30	800	0,9	2500	1250	0,03	2238,75
31	100	0,9	2500	1000	0,03	1507,5
32	1600	1,1	0	0	0,03	1760
33	100	1,8	423,08	423,08	0,03	1550,779
34	100	2,2	441,18	441,18	0,03	2355,311
35	50	2,2	571,43	571,43	0,03	2875,721
36	50	2,3	857,14	857,14	0,03	4649,271
37	500	2,3	861,11	861,11	0,03	5705,272
38	700	2,4	631,58	631,58	0,03	5317,901
39	700	2,6	500	545,45	0,03	5353,621
40	300	3,1	444,44	481,48	0,03	5379,046

41	600	3,1	275,86	948,28	0,03	7741,993
42	600	3	320	1100	0,03	8190
43	600	3,1	320	1100	0,03	8683,1
44	600	3,3	320	1100	0,03	9711,9
45	350	3,4	448,28	689,66	0,03	7767,293
46	100	3,4	482,76	482,76	0,03	5920,706
47	100	3,3	363,64	363,64	0,03	4290,04
48	150	3	650	650	0,03	6300
49	500	2	1000	666,67	0,03	4333,34
50	1000	2,1	714,29	1000	0,03	5880,009
51	500	2	500	1300	0,03	4600
52	1000	2,3	1173,91	739,13	0,03	7359,991
53	1000	3	500	1000	0,03	9750
54	1700	3,2	800	843,75	0,03	13856
55	2000	4	500	500	0,03	16000
56	2000	4	500	500	0,03	16000
57	3000	4,2	540,54	595,24	0,03	22617,58
58	2500	4,3	465,12	581,4	0,03	20425,08
59	3700	4	425	625	0,03	23200
60	3200	4,2	404,76	547,62	0,03	21839,99
61	3000	4	375	875	0,03	22000
62	2000	4	375	875	0,03	18000
63	1000	3,5	571,43	1000	0,03	13125,01
64	2000	2,7	259,26	1111,11	0,03	10395
65	1500	3,5	285,71	1000	0,03	13124,97
66	300	4,3	232,56	488,37	0,03	7954,998
67	1000	4,4	340,91	227,27	0,03	9899,982
68	1000	4,3	348,84	232,56	0,03	9675,043
69	700	4	425	125	0,03	7200
70	500	4,1	109,76	341,46	0,03	5842,504
71	500	3,8	131,58	394,74	0,03	5700,03
72	300	4,9	102,04	306,12	0,03	6369,961
73	200	4,9	102,04	306,12	0,03	5879,961
74	200	3,7	135,14	405,41	0,03	4440,065
75	700	3,8	184,21	833,33	0,03	10006,64
76	850	4,2	166,67	595,24	0,03	10290,05
77	700	4,8	145,83	520,83	0,03	11039,92
78	700	5,1	196,08	686,27	0,03	15044,96
79	700	6	458,33	83,33	0,03	13949,88
80	700	6	458,33	83,33	0,03	13949,88
81	1000	6	83,33	416,67	0,03	15000
82	1000	6	200	500	0,03	18600
83	1500	6,8	298,25	441,18	0,03	27295,62
84	1500	6,8	298,25	441,18	0,03	27295,62
85	1700	6,8	298,25	441,18	0,03	28655,62
86	1700	6,8	298,25	441,18	0,03	28655,62
87	2000	7	298,25	428,57	0,03	31807,09
88	2000	6,8	315,79	367,65	0,03	29401,13

89	3000	6	250	416,67	0,03	30000,06
90	3000	6,1	245,9	409,84	0,03	30500,04
91	3000	6,1	245,9	409,84	0,03	30500,04
92	3500	6	250	333,33	0,03	31499,94
93	4000	5,8	172,41	258,62	0,03	30449,92
94	4000	5,5	181,82	218,18	0,03	28050
95	4100	6	166,67	166,67	0,03	30600,12
96	4400	5	160	120	0,03	25500
97	4500	4,5	0	0	0,03	20250
98	3600	4	0	0	0,03	14400
99	2000	4,8	145,83	104,17	0,03	12480
100	2700	3	0	0	0,03	8100
101	1000	4,4	340,91	136,36	0,03	9019,974
102	1000	4,8	312,5	187,5	0,03	10560
103	1000	4,6	434,78	217,39	0,03	11499,96
104	900	5,3	188,68	377,36	0,03	12720,03
105	1000	5	500	400	0,03	16250
106	600	5,8	517,24	431,03	0,03	19429,9
107	3000	5,3	283,02	377,36	0,03	25175,04
108	4000	5,3	283,02	377,36	0,03	30475,04
109	4500	5,3	320,75	377,36	0,03	33654,95
110	4000	5,3	377,36	377,36	0,03	31800,04
111	3000	5,3	377,36	377,36	0,03	26500,04
112	3000	5,3	283,02	566,04	0,03	27825,05
113	3000	5,3	283,02	754,72	0,03	30475,06
114	3000	5,5	363,64	727,27	0,03	33000,01
115	3000	5,7	263,16	701,75	0,03	32774,96
116	2000	5,8	344,83	689,66	0,03	29000,12
117	2000	6,2	322,58	645,16	0,03	30999,96
118	800	6,8	294,12	588,24	0,03	25840,16
119	800	7,2	277,78	625	0,03	29160,06
120	800	7,3	273,97	616,44	0,03	29564,97
121	1200	7,1	140,85	535,21	0,03	25560,09
122	1000	7,1	281,69	563,38	0,03	28399,99
123	900	7,4	270,27	1148,65	0,03	45510,03
124	1000	7,7	259,74	909,09	0,03	42349,97
125	1000	7,2	277,78	972,22	0,03	39600
126	1000	7,1	281,69	985,92	0,03	39050,11
127	1000	7,2	277,78	972,22	0,03	39600
128	1000	7,3	273,97	205,48	0,03	20074,95
129	500	7,5	266,67	266,67	0,03	18750,19
130	300	8	250	437,5	0,03	24400
131	1500	8	162,5	150	0,03	22000
132	800	6,5	261,54	307,69	0,03	17224,98
133	300	6,5	276,92	384,62	0,03	15925,03
134	300	6,4	281,25	390,63	0,03	15680,1
135	300	6,5	307,69	461,54	0,03	18199,98
136	300	6,5	307,69	461,54	0,03	18199,98

137	300	6,4	312,5	468,75	0,03	17920
138	300	6,3	317,46	476,19	0,03	17639,98
139	1000	6,1	295,08	377,05	0,03	18604,98
140	300	6,1	327,87	409,84	0,03	15555,09
141	300	6,3	317,46	396,83	0,03	16065,09
142	300	6,5	307,69	692,31	0,03	23075
143	1700	6	500	333,33	0,03	25199,94
144	2000	6	416,67	416,67	0,03	27000,12
145	3500	5,5	427,27	909,09	0,03	39462,45
146	4000	5,5	272,73	818,18	0,03	38500,01
147	5000	5,3	471,7	471,7	0,03	39750,05
148	5000	5	400	400	0,03	35000
149	4700	5	360	360	0,03	32500
150	4000	4,5	444,44	222,22	0,03	24749,93
151	6500	3,2	0	0	0,03	20800
152	1800	4,5	333,33	333,33	0,03	14849,93
153	3500	4	0	0	0,03	14000
154	700	6,5	230,77	230,77	0,03	14300,03
155	500	6,1	278,69	278,69	0,03	13420,05
156	500	5,6	303,57	303,57	0,03	12319,96
157	750	5,5	236,36	272,73	0,03	11824,99
158	800	5	280	400	0,03	12500
159	800	5	340	340	0,03	12500
160	800	5	300	300	0,03	11500
161	1000	5	300	300	0,03	12500
162	1000	5	300	360	0,03	13250
163	600	6	333,33	333,33	0,03	15599,88
164	800	6	250	333,33	0,03	15299,94
165	1000	6,5	230,77	230,77	0,03	16250,03
166	250	7,5	200	160	0,03	12000
167	500	7	214,29	214,29	0,03	14000,21
168	1000	6	250	200	0,03	14100
169	400	6,2	322,58	193,55	0,03	12400,02
170	600	7	242,86	192,86	0,03	14875,14
171	400	7	242,86	142,86	0,03	12250,14
172	400	7	214,29	214,29	0,03	13300,21
173	200	7,5	200	200	0,03	12750
174	300	7,2	250	138,89	0,03	12240,03
175	500	7,2	347,22	138,89	0,03	16199,97
176	900	6	416,67	250	0,03	17400,06
177	900	6	416,67	250	0,03	17400,06
178	1500	4,5	444,44	2000	0,03	31499,96
179	2000	3,5	485,71	142,86	0,03	10849,99
180	2000	3,5	485,71	142,86	0,03	10849,99
181	2000	3,5	485,71	142,86	0,03	10849,99
182	2000	3,5	285,71	142,86	0,03	9624,991
183	2000	2,7	370,37	148,15	0,03	7290,005
184	2000	2,7	185,19	185,19	0,03	6750,035

185	600	3	133,33	366,67	0,03	4050
186	1800	2,2	0	0	0,03	3960
187	1600	2,1	0	0	0,03	3360
188	1400	1,9	0	0	0,03	2660
189	700	2	0	0	0,03	1400
190	600	2,7	111,11	111,11	0,03	2429,992
191	600	2,5	80	80	0,03	2000
192	1000	2,2	0	0	0,03	2200
193	1150	2,3	0	0	0,03	2645
194	1300	2,4	0	0	0,03	3120
195	1300	2,5	0	0	0,03	3250
196	1600	2,4	0	0	0,03	3840
197	2000	2,5	0	0	0,03	5000
198	2000	2,5	0	0	0,03	5000
199	2000	2,5	0	0	0,03	5000
200	2000	2,3	0	0	0,03	4600
201	1500	2,1	0	0	0,03	3150
202	700	2,2	181,82	272,73	0,03	2640,011
203	800	2,3	173,91	173,91	0,03	2759,984
204	1400	2,2	0	0	0,03	3080
205	1200	2,2	0	0	0,03	2640
206	1500	2	0	0	0,03	3000
207	500	2,3	217,39	434,78	0,03	2874,99
208	1000	2,2	318,18	454,55	0,03	4070,007
209	500	2,3	260,87	260,87	0,03	2530,002
210	500	2,5	200	100	0,03	2187,5
211	2400	2	0	0	0,03	4800
212	600	2,4	250	1666,67	0,03	6960,01
213	750	2,1	380,95	190,48	0,03	2835,003
214	1000	2,3	304,35	217,39	0,03	3680,002
215	1600	2	500	250	0,03	4700
216	2600	1,8	0	0	0,03	4680
217	2000	2	250	150	0,03	4800
218	2500	1,8	0	0	0,03	4500
219	2500	1,6	0	0	0,03	4000
220	200	2,5	16	60	0,03	737,5
221	280	2,5	0	0	0,03	700
222	100	2,5	32	32	0,03	450
223	175	2,5	0	0	0,03	437,5
224	500	2,1	61,9	142,86	0,03	1501,496
225	650	1,75	342,86	171,43	0,03	1925,007
226	600	2	250	300	0,03	2300
227	700	2	300	250	0,03	2500
228	40	2,5	12	68	0,03	350
229	110	2,6	0	0	0,03	286
230	110	2,5	0	0	0,03	275
231	50	2,5	28	20	0,03	275
232	50	2,6	23,08	15,38	0,03	259,9948

233	160	1,6	0	0	0,03	256
234	85	1,8	5,56	100	0,03	324,0072
235	120	1,8	0	0	0,03	216
236	160	1,7	0	0	0,03	272
237	140	2,25	0	0	0,03	315
238	80	2,75	0	0	0,03	220
239	130	2,5	0	0	0,03	325
240	160	2,75	0	0	0,03	440
241	40	3	20	23,33	0,03	314,985
242	80	2,2	36,36	27,27	0,03	329,9846
243	80	2,5	72	20	0,03	487,5
244	200	2,3	0	0	0,03	460
245	250	2,3	0	0	0,03	575
246	20	2,3	32,61	34,78	0,03	224,2466
247	50	2,4	20,83	33,33	0,03	275,9808
248	70	2,4	45,83	20,83	0,03	359,9808
249	15	2,4	41,67	58,33	0,03	324
250	60	2,9	17,24	34,48	0,03	391,4826
251	85	3,1	48,39	16,13	0,03	573,5186
252	60	3,5	2,86	17,14	0,03	332,5
253	30	3,5	57,14	2,86	0,03	472,5
254	40	3,5	57,14	2,86	0,03	507,5
255	50	3,5	42,86	14,29	0,03	525,0438
256	175	11	9,09	13,64	0,03	3300,165
257	600	13	0	0	0,03	7800
258	900	12	0	0	0,03	10800