IV-219 – ESTUDO DO MODELO HIDRODINÂMICO DA BAÍA DO GUAJARÁ, PARÁ, CALIBRADO PARA OS PERÍODOS DE CHUVA

Ricardo Fonseca de Lima[(1)]
Acadêmico de Engenharia Ambiental pelo Instituto de Estudos Superiores da Amazônia. Bolsista de Iniciação Científica – CNPq do Projeto de Pesquisa Aplicação de Modelagem Computacional para o Aumento da Competitividade da Indústria de Pesca Aplicação à Cultura de Moluscos Bivalves no Nordeste da Amazônia.
Raísa Nicole Campos Cardoso[(2)]
Acadêmico de Engenharia Ambiental pelo Instituto de Estudos Superiores da Amazônia. Bolsista de Iniciação Científica – CNPq do Projeto de Pesquisa Aplicação de Modelagem Computacional para o Aumento da Competitividade da Indústria de Pesca Aplicação à Cultura de Moluscos Bivalves no Nordeste da Amazônia.
Manoel José dos Santos Sena[(3)]
Engenheiro Mecânica pela Universidade Federal do Pará. Mestre em Concepção Mecânica pela Université Joseph Fourier. Doutor em Engenharia Mecânica pela Université Joseph Fourier. Atualmente é Diretor Acadêmico do Instituto de Estudos Superiores da Amazônia

Endereço[(1)]**:** Av. Presidente Vargas, 197 – Campina – Belém – PA – CEP: 66.010-902 – Brasil – Tel: (91)3223-3946 – e-mail: ricardo.fonseca@hotmail.com.br

RESUMO

Os Estuários são ecossistemas dinâmicos e produtivos de imenso valor ecológico e econômico, a compreensão do transporte e da distribuição de contaminantes neste ambiente é de grande importância. Entretanto, as políticas públicas voltadas para a gestão costeira (estuários) ainda são embrionárias, e pouco tem incorporado os conhecimentos necessários para um plano de gestão adequado.
O presente trabalho objetiva utilizar o modelo hidrodinâmico da Baía do Guajará desenvolvido nos programas Modeleur e Hydrosim, por BARROS (2005), com condições de maré referente ao mês de setembro de 2005, caracterizado como um mês de baixo índice pluviométrico e projetar os resultados obtidos em sua simulação para as condições de maré do mês de março de 2012, caracterizado como um mês de alto índice pluviométrico. Também serão analisadas as variações do regime de chuvas nas sub-bacias que compõe a Baía do Guajara, vez que a água no estuário apresenta-se elevada no mês de Março, evidenciando que o índice pluviométrico é um fator extremamente relevante se comparado com a amplitude de maré provocada pelo efeito gravitacional.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem hidrodinâmica, Ciclo de Maré, Regime de Chuvas, Estuário.

INTRODUÇÃO

Este trabalho trata da aplicação da modelagem computacional como ferramenta de suporte ao monitoramento das características físicas da Baía do Guajará às margens da cidade de Belém (Pará, Brasil). O estuário da Baía do Guajará sofre influência de 750 km² do Município de Belém (RAMOS, 2004) e 1,35 milhão de habitantes (IBGE, 2010), produzindo resíduos sólidos e líquidos que, direta ou indiretamente, total ou parcialmente, alcançam os canais de drenagem da cidade e, logo, o estuário Guajarino.

Segundo SANTOS *et al.*(2001) para estabelecer uma definição mais geral e aceitável sob o ponto de vista da Oceanografia Física, um estuário passou a ser conceitualmente definido como "[...] um corpo de água semifechado, com uma livre abertura para o oceano ou mar adjacente, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água dos rios provenientes da drenagem das águas continentais" (Pritchard, 1952; Cameron & Pritchard, 1963).

Para somar à compreensão do conceito de estuário o Geophysics of Estuaries Panel (1977), cita o termo "zona estuarina", para referir-se não somente ao estuário caracterizado pela definição de Cameron & Pritchard, mas também às áreas de transição (baías, lagoas, águas interiores, canais, áreas inundadas pela maré e áreas costeiras entre marés), afetadas direta ou indiretamente pelo estuário.

Assim como os rios influenciam boa parte do mar próximo a região costeira, fenômenos tipicamente marinhos influenciam, às vezes, até mesmo centenas de quilômetros rio acima, os cursos de água doce que nele desembocam como é o caso da baía do Guajará, localizada há 120 km do Oceano Atlântico.

Irani *et al* (2001) ressalta que alguns fenômenos de especial relevância nos estuários devem ser considerados face a qualquer estudo hidrológico em rios que sofrem a influência da dinâmica estuarina. Assim, a penetração da maré a montante da desembocadura, às vezes atingindo centenas de quilômetros, modifica regularmente os níveis do rio, sem que isto implique necessariamente em mudanças de vazão. A penetração da maré em rios de zona costeira é um destes fenômenos, e provoca também a chamada intrusão salina no leito dos rios.

Em estudo realizado por Gregório & Mendes (2009), hidrograficamente, a baía do Guajará corresponde à principal conexão entre a sub-bacia do rio Guamá-Moju (Pará) e a baía do Marajó (Pará). Com área total aproximadamente de 87.000 km², essa sub-bacia tem como principais drenagens os rios Guamá, Moju, Acará e Capim. No rio Guamá a influência da maré é observada até a cidade de São Miguel do Guamá (Pará), há aproximadamente 120 km da baía do Guajará, esta influência alcança também as cidades de Moju e Acará (Pará), localizadas as margens dos rios homônimos, há 24 km de distância.

Exemplo da realidade observada em muitos estuários, a Baía de Guajará, vem apresentando alterações em sua hidrodinâmica e morfologia de fundo. Estudos como os de Mendes *et al.* (2004), Miranda e Mendes (2007) e Gregório (2008) acompanharam as dinâmicas batimétrica e morfológica do fundo da Baía de Guajará. Seus resultados constataram que a baía vem sofrendo um intenso processo de assoreamento ao longo do tempo, causado principalmente pela grande quantidade de sedimento em suspensão nos rios que nela deságuam, associado a uma perda histórica da capacidade de transporte desses sedimentos.

Segundo Sena e Mesquita (2004), o modelo hidrodinâmico da Baía do Guajará é de grande importância para o conhecimento dos processos de transporte de poluentes e de sedimentos que ocorrem na orla de Belém. Através de seu uso, decisões baseadas em parâmetros quantitativos e qualitativos relativas a processos de despejo de esgoto e de dragagem serão mais facilmente tomadas.

Zhen-Gang (2008), afirma que os processos hidrodinâmicos são componentes integrais nos complexos sistemas de águas superficiais. O movimento da água em diferentes escalas e diferentes tipos afeta significativamente não só a distribuição de temperatura, nutrientes e oxigênio dissolvido, mas, também, as agregações e/ou a distribuição dos sedimentos, contaminantes e algas. A circulação, os fenômenos de maré e a mistura turbulenta são as principais influencias na distribuição da biota e a produtividade natural dos corpos d'água.

Estudos realizados por Margalef (1994) apontam que vários processos que controlam a qualidade da água de um rio, fazem parte de um complexo equilíbrio, motivo pelo qual qualquer alteração na bacia hidrográfica podem acarretar alterações significativas, sendo as características físicas e químicas de um corpo d'água indicadores da "saúde" do ecossistema terrestres que podem ser utilizadas para o controle e o monitoramento das atividades envolvidas em uma bacia hidrográfica.

O presente trabalho objetiva utilizar o modelo hidrodinâmico da Baía do Guajará desenvolvido nos programas Modeleur e Hydrosim, por Barros (2005), com condições de maré referente ao mês de setembro de 2005, caracterizado como um mês de baixo índice pluviométrico e projetar os resultados obtidos em sua simulação para as condições de maré do mês de março de 2012, caracterizado como um mês de alto índice pluviométrico.

MATERIAIS E MÉTODOS

A baía do Guajará, situada a leste do arquipélago do Marajó, Estado do Pará, com aproximadamente 120 km do Oceano Atlântico, à margem direita da baía do Marajó, é o objeto de estudo deste trabalho. Na margem leste da baía do Guajará, localiza-se a cidade de Belém, capital do Estado do Pará e a margem oeste é formada por um conjunto insular cuja maioria das ilhas integra a área legal do município de Belém (Figura 1).

Figura 1 - Imagem de satélite ilustrando a região do estuário Baía do Guajará (Fonte: Embrapa – Brasil Visto do Espaço). O Polígono em vermelho representa os limites da região de interesse deste trabalho.

As ferramentas computacionais utilizadas neste projeto são principalmente os programas Modeleur e Hydrosim, além de outros programas de SIG, como o ArcGIS e Google Earth, planilhas eletrônicas para geração de gráficos e programas CAD. Os programas Modeleur e Hydrosim foram desenvolvidos pelo Institut National de la Recherche Scientifique – Eau (INRS-Eau), ligado à Universidade de Quebec (Padilla *et al*., 1997; Morin *et al*., 1998; Henich *et al*., 1997).

A partir do modelo validado e calibrado por BARROS (2005), através dos programas Modeleur e Hydrosim, onde foram utilizados condições de maré referentes ao mês de setembro de 2005, será utilizado as condições de maré referentes ao mês de março de 2012, a fim de verificar a relação do regime de chuvas presente na região que envolve a dinâmica da baía do Guajará.

- **Programas Modeleur e Hydrosim**

O programa Modeleur é uma ferramenta de SIG que permite a construção de um modelo numérico do terreno. Este modelo numérico inclui dados de topografia, substrato ou rugosidade dos leitos dos rios, macrófitas ou plantas aquáticas, vento e cobertura de gelo em aplicações específicas (Sena e Mesquita, 2004).

O programa Modeleur permite a divisão da região de estudo em partições. Estão associados a cada partição grupos de dados do modelo numérico do terreno. Um procedimento automático de tratamento dos dados nas interfaces das partições permite a geração de uma malha de elementos finitos pronta para ser usada no programa de simulação de escoamento Hydrosim (Sena e Mesquita, 2004).

O programa Hydrosim usa um modelo de elementos finitos que discretiza a Equação de Saint-Venant. Assim sendo, como variáveis nodais temos o nível da superfície e as componentes do vetor velocidade. Como condições de contorno podemos especificar velocidade dos ventos, da água e elevações correspondentes aos efeitos de maré (Sena e Mesquita, 2004).

- **Calibração Do Modelo**

Os dados batimétricos existente no trabalho de Barros (2005) foram complementados através da interpolação das variáveis de interesse ao longo do domínio para que uma visão global do comportamento hidrodinâmico possa ser obtida, pois ocorrem "distorções" que não representam a realidade da dinâmica do estuário quando observadas muito próximo às fronteiras do modelo.

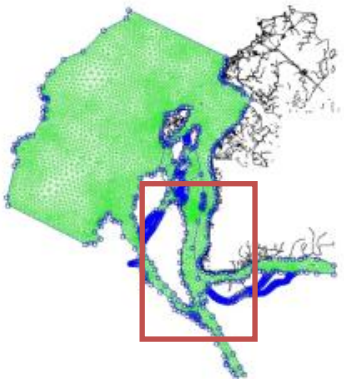

Figura 2 - Malha de Elementos Finitos.

Na primeira etapa foram coletados os dados preliminares para a execução do modelo hidrodinâmico, tais como: contorno do domínio, discretização da malha de elementos finitos, levantamento batimétrico, sedimentologia, condições de contorno e condições iniciais.

Na segunda etapa são apresentadas as simulações do modelo realizado por Barros (2005), com condições de contorno referente às amplitudes de maré do mês de setembro, caracterizado como período de estiagem, e o modelo hidrodinâmico realizado no presente trabalho, representando o escoamento da Baía do Guajará no mês de

março (chuvoso) de 2012, bem como as comparações de amplitude de maré do mês de setembro de 2005 e março de 2012. Com base no conhecimento dos processos hidrodinâmicos decorrentes nos dois períodos (chuvoso e estiagem), é realizado um comparativo da influencia do ciclo de maré provocado pelas fases da lua, sizígia e quadratura, em relação a variação do nível médio da água no sistema durante o período de alto e baixo índice pluviométrico. Neste modelo não foram incorporados os dados pluviométricos da bacia hidrográfica que forma o estuário Guajarino, considerando apenas os dados do nível da maré.

Um dos dados necessários para a execução da modelagem hidrodinâmica, requer as condições de contorno da área em estudo. Os contornos da Baía do Guajará foram definidos através da utilização de dados da prefeitura municipal de Belém e da Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental - AHIMOR, e que foram utilizados no trabalho de Barros (2005). Além das condições de contorno, são apresentados os modelos de profundidade da Baía do Guajará, no perfil gerado por Barros (2005) e no perfil estendido.

A Malha de Elementos Finitos corresponde a uma técnica de interpolação que permite não somente representar os valores médios em um campo variável, mais também resolver as equações da mecânica aplicável ao comportamento físico da malha ou todos os outros processos descritos por uma forma algébrica qualquer (Secretan *et al*. 2001). A malha de elementos finitos é responsável pelos cálculos de interpolação dos elementos que constituem a geometria da Baía do Guajará. A geometria de cada elemento é definida como sendo de triangular ou quadrilátera. No modeleur utiliza-se a forma triangular, no qual a geometria é definida como por seis nós, mostrado na figura 2.

As velocidades são interpoladas quadraticamente, enquanto que a altura do nível da água e batimetria são interpolados linearmente. O substrato é propriedade constante por elemento. A variabilidade espacial destes fatores é determinada na construção da malha do modelo. A discretização do domínio de escoamento consiste em subdividir em células elementares sob as quais as equações que descrevem fisicamente o problema são aplicadas e resolvidas. Os elementos possuem dimensões ajustáveis, determinadas localmente em função da geometria do domínio e das necessidades de precisão (Cantin, 1992).

No Hydrosim, são usados os elementos triangulares a seis nós T6L os quais são compostos de super-elementos constituídos de quatro elementos triangulares em três nós. Nota-se que as variáveis geométricas (altura d'água h, profundidade H, topografia do fundo z) e o coeficiente de rugosidade são levados aos nós T6L os quais são interpolados linearmente. Já as velocidades e as vazões especificas são interpoladas linearmente sob cada elemento T3 formador do T6L. Nas fronteiras do domínio de escoamento, os lados do elemento T6L são os quais permitem aproximar os dados conectados particularmente as condições limites (Secretan *et al.* 2001).

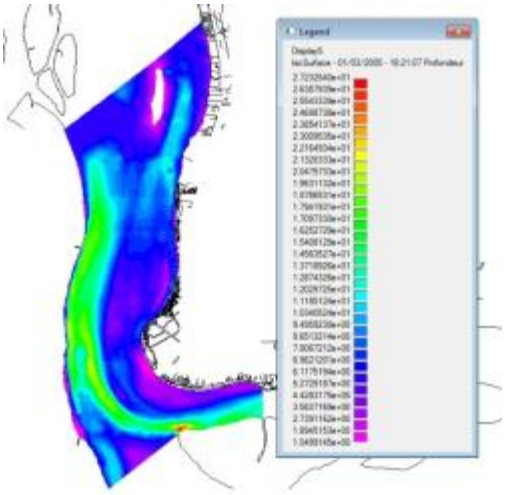

Figura 3 - Modelo de Profundidade da Baía do Guajará

Um dos requisitos básicos para que se possa obter um bom funcionamento de modelos hidrodinâmicos consiste na qualidade dos dados batimétricos. Eles devem ser capazes de reproduzir um bom detalhamento do relevo submarino da área estudada. As informações da batimetria usadas neste estudo foram obtidas através da junção dos dados da carta náutica da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil – DHN: carta de Belém a Mosqueiro no 316, na escala 1:49.990, do ano 2002 e os dados cedidos pela a AHIMOR. Estes últimos foram obtidos em uma campanha efetuada no final do ano de 2002. A batimetria da figura 3 foi utilizada no trabalho realizado por Barros (2005).

- **Tábuas de Maré**

Inicialmente observaram-se os dados existentes nas Tábuas de Maré para identificar a amplitude de maré nos dois meses que são objetos de estudo deste trabalho, setembro de 2005 e março de 2012, período de baixo e alto índice pluviométrico respectivamente. As análises estatísticas sobre as previsões realizadas pela Marinha do Brasil, identificaram mínimas de 0,40m nas previsões de setembro de 2005 e 0,20m para março de 2012. Máximas de 3,20m nas previsões de setembro de 2005 e 3,50m para março de 2012. Obtendo-se uma média de 1,81m e 1,82m respectivamente, além do desvio padrão apresentar uma diferença de apenas 0,11m.

RESULTADOS

Os programas Modeleur e Hydrosim geraram imagens a partir das condições de contorno pré-estabelecidas, calibradas e validadas por Barros (2005) para os níveis de maré de setembro (2005). Os resultados de Barros (2005) foram comparados com os resultados calibrados e validados para os níveis de maré do mês de março (2012). Os resultados representam aproximadamente as variações previstas nas operações matemáticas de máximos, mínimos, média e desvio padrão realizadas diretamente a partir dos dados das Tábuas de Maré. As figuras de 4 e 5 ilustram o módulo velocidade dos resultados dos modelos com as respectivas calibrações supracitadas em um momento de vazante.

Segundo Gregório, (2008) a baía do Guajará possui 03 (três) canais em sua extensão, correspondendo aos canais da ilha das onças (margem esquerda); canal do meio, e canal oriental (margem direita da cidade de Belém). Em todos esses canais observam-se correntes de enchente e vazante, entretanto, no canal da ilha das onças predominam as correntes de vazante, devido sua geometria peculiar e as maiores profundidades. No canal do Meio e Oriental são mais comuns as correntes de enchente, conforme pode ser observado nas figuras 4 e 5.

As simulações realizadas apresentaram certa concordância com os resultados obtidos por Gregório (2008) em relação à direção do escoamento na baía. Para a calibração do modelo não foram realizadas medições de velocidade, entretanto, utilizou-se bases bibliográficas para comparar com os dados obtidos nos modelos, como as de BOCK *et al* (2010), que mediu valores de velocidade em períodos de estiagem de maré enchente, com 1,74 m/s na maré de sizígia e 1,62 m/s em maré de quadratura. Na vazante, valor de 1,59 m/s na maré de sizígia e 1,55 m/s na quadratura. No período chuvoso foram observados valores de 1,89 m/s nas correntes de enchente nas marés de sizígia e 1,70 m/s na quadratura. Nas correntes de vazante obtiveram 1,78 m/s em sizígia e cerca de 1,63 m/s na quadratura.. Os dados de BOCK *et al*, (2010) levou em consideração os dados de precipitação.

No modelo apresentado por Barros (2005), foram evidenciados valores de velocidade com máximo de 1,12 m/s na maré enchente no período de estiagem e no modelo de março de 2012 encontraram valores iguais de 1,12 m/s no período chuvoso. Nas marés de vazante observou-se nos dois períodos marés máximas de 0,92 m/s. Esses dados só levam em consideração os efeitos gravitacionais.

Nota-se que nos resultados entre os modelos de março e setembro são semelhantes, quando levado em consideração somente os efeitos gravitacionais. A incorporação dos dados pluviométrico influencia consideravelmente o campo de velocidade no estuário, conforme pode ser observar nas diferenças de valores entre os dados dos modelos apresentados neste trabalho e os valores de velocidade encontrados por BOCK *et al*, (2010) Dessa forma, verifica-se a necessidade de inserir a variável climatológica de precipitação, pois esta é uma componente determinante para uma maior aproximação deste modelo hidrodinâmico a realidade de um estuário amazônico.

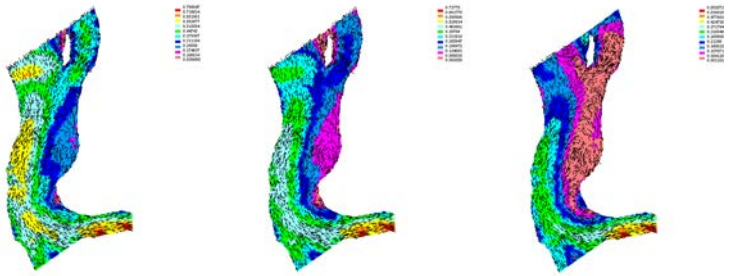

Figura 4 - Módulo Velocidade em momento de vazante: BARROS, 2005.

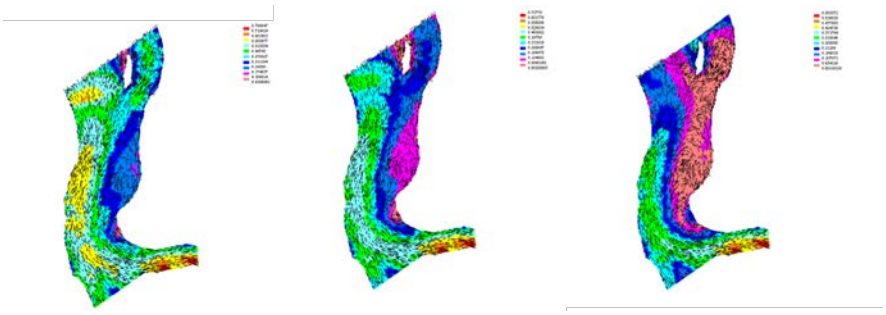

Figura 5 - Módulo Velocidade em momento de vazante: Março de 2012.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pôde-se verificar que a influência gravitacional que gera os ciclos de maré não são absolutos nos fenômenos ambientais no que se diz respeito à modelagem computacional, pois as simulações realizadas através do método dos elementos finitos integrada aos softwares Modeleur e Hydrosim retratam variáveis que podem ser calculadas com um grau de previsão elevado, como por exemplo a atração gravitacional lunar e solar, responsáveis pelos fenômenos de maré.

O estuário Guajarino pertence a um complexo sistema hidrodinâmico, suas condições de contorno para o nível da água são extremamente variáveis devido à extensa bacia hidrográfica que influencia diretamente as variações do nível da água e os módulos de velocidade no sistema. Dessa forma, para que os modelos computacionais hidrodinâmicos possam refletir de forma mais fidedigna a realidade da baía do Guajará, deve ser acrescentado como variável a modelagem hidrológica da sub-bacia do Guamá-Moju.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARROS, Maria de Lourdes Cavalcanti. CALIBRAÇÃO DE UM MODELO HIDRODINÂMICO DA BAÍA DO GUAJARÁ (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFPA - Universidade Federal do Pará – Belém, Pará. 2005
2. BOCK, Carina S.; ASSAD, Luis Paulo de F.; LANDAU, Luiz . VARIABILIDADE HIDRODINÂMICA EM UM ESTUÁRIO RELACIONADA COM MUDANÇAS BATIMÉTRICAS. In: Mecánica Computacional Vol XXIX. p. 8047-8071 – Buenos Aries. 2010
3. CAMERON, W. M; PRITCHARD, D. W. Estuaries. In: HILL, M. N. (Ed.) The Sea. New York: J. Wiley, 1963. V. 6, p. 306-324.
4. CANTIN, J. F. Modelisation de Processus Physiques Affectant les Petroles deverses em milieu Fluvial. 1992. 166p. Dissertação (Maîtrise ès Sciences de l'eau) – INRS-Eau – Université du Quebec – Canadá, 1992.
5. GREGÓRIO, A.M.S., Contribuição à gestão ambiental da Baía de Guajará (Belém-Pará-Amazônia) através de estudo batimétrico e sedimentológico, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
6. GREGÓRIO, Aderson Manoel da Silva; MENDES, Amilcar Carvalho. BATIMETRIA E SEDIMENTOLOGIA DA BAÍA DE GUAJARÁ, BELÉM, ESTADO DO PARÁ, BRASIL. Amazônia: Ci. & Desenv., Belém, v. 5, n. 9, jul./dez. 2009.
7. IBGE. Brasília, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2000. Disponível em : <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 de março 2011
8. MARGALEF, R. The place of epicontinetal waters in global ecology. In: MARGALEF, R. Limnology now: a paradigm of planetary problems. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p.1-8.
9. MARINHA DO BRASIL – Tábuas de maré da Marinha do Brasil- Consulta On-Line, Disponível em: https://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/index.htm, 2012. Acesso: 10/05/2012
10. Mendes, A.C., Silva, C.A. e Frazão, E.P., Levantamento batimétrico da Baía de Guajará, Belém/PA, Anais do III Workshop Técnico-Científico do Projeto Petrorisco, Belém, Pará, p.1-3, 2004.
11. MIRANDA,A.G;MENDES, A.C;SANTOS, C.A. Estimativa da taxa de crescimento das formas de fundo(bancos e canais) da baía do Guajará (PA) em um intervalo temporal de quatro décadas.In: congresso latino americano de ciências do mar,12, Florianópolis, 2007. Anais. CD ROM.
12. PRITCHARD, D. W. Estuarine hydrography. Advan. Geophy. 1, 1952. P. 243-280.
13. RAMOS, J. F. F.. Poluicao e Contaminacao na Orla de Belem – PA. A questao da agua na grande Belem, 2004.

14. SANTOS, Irani [*et al*]. Hidrometria aplicadaCuritiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. 372p.
15. SECRETAN, Y. *et al.*, Une Méthodologie de Modélisation Numérique de Terrain pour la simulation Hydrodinâmique Bidimnsionalle, Rev. Sci. Eau, p. 187-212, fév.2001.
16. SENA, M. J., MESQUITA, A. L. Descrição da Técnica de Modelagem Numérica do Escoamento na Baía do Guajará. Belém. In: Souza, E. P., Uhly, S. A questão das Águas na Grande Belém: Casa de Estudos Germânicos, p. 207-230, 2004.
17. ZHEN-GANG. Hydroninamics and water quality: Modeling Rivers, lakes and estuaries / Zhen-Gang Ji, p.cm. Include index.ISBN 978-0-470-13543-3 (cloth).1. streamflow – Mathematical Models. 2. Sediment transport – Mathematical models. 3. Hydrodynamics. 4. Water quality – Measurement – Mathematics. 1 title. TC175.152 2008, p.627 dc. 22.