



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**WILTON PIRES DE ARAUJO JUNIOR**

**Análise multitemporal da morfologia de fundo da Baía de São Marcos  
– Setor adjacente ao Porto do Itaquí /MA**

**Belém - PA  
2009**

**WILTON PIRES DE ARAUJO JUNIOR**

**Análise multitemporal da morfologia de fundo da Baía de São Marcos  
– Setor adjacente ao Porto do Itaqui /MA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Oceanografia da Universidade  
Federal do Pará, em cumprimento às exigências  
para obtenção do grau de Bacharel em  
Oceanografia.**

**Orientador: Prof. Msc. Amílcar Carvalho  
Mendes;**

**Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Msc. Messiana Beatriz  
Malato Boulhosa.**

**Belém - PA  
2009**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)  
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

---

Araújo Junior, Wilton Pires de

A663a      Análise multitemporal da morfologia de fundo da Baía de São Marcos – setor adjacente ao Porto do Itaqui /MA. / Wilton Pires de Araújo Junior. – 2009

72 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Primeiro Semestre de 2009.

Orientador: Amílcar Carvalho Mendes; Co-Orientadora: Messiana Malato Boulhosa.

1. Evolução batimétrica. 2. Morfologia de fundo. 3. Estuário. 4. Baía de São Marcos (Ma). I. Universidade Federal do Pará. II. Mendes, Amilcar Carvalho, Orient. III. Boulhosa, Messiana Malato, Co-Orient. IV. Título.

CDD 20º ed.: 551.4608098121

---

**WILTON PIRES DE ARAUJO JUNIOR**

**Análise multitemporal da morfologia de fundo da Baía de São Marcos  
– Setor adjacente ao Porto do Itaqui /MA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a  
Faculdade de Oceanografia da Universidade  
Federal do Pará, em cumprimento às exigências  
para a obtenção do grau de Bacharel em  
Oceanografia.**

Data da defesa: 10 / 07 / 2009

Conceito: B

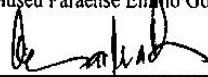
**Banca Examinadora:**

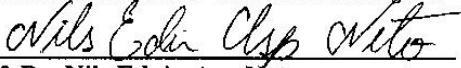
  
**Prof. Msc. Amílcar Carvalho Mendes –  
Orientador**

Mestre em Geologia e Geoquímica  
Museu Paraense Emílio Goeldi - MPEG  
Centro Universitário do Pará – CESUPA

  
**Prof. Msc. Messiana Beatriz Malato Boulhosa –  
Co-Orientadora**

Mestre em Geologia e Geoquímica  
Centro Universitário do Pará – CESUPA  
Museu Paraense Emílio Goeldi - MPEG

  
**Prof. Dr. Maâmar El-Robrini - Membro**  
Doutor em Fisiografia Oceânica e Litorânea  
Universidade Federal do Pará – Faculdade de Oceanografia

  
**Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto**  
Doutor em Geologia Costeira  
Universidade Federal do Pará – Instituto de Estudos Costeiros

**Belém - PA  
2009**

Dedico este trabalho ao meu Senhor Jesus Cristo e à minha família, especialmente à minha avó e minha mãe, que sempre mantiveram incondicionalmente a confiança em mim.

## AGRADECIMENTOS

Senhor Deus, obrigado por ter me abençoado grandemente e ter ficado ao meu lado em todos os momentos.

Obrigado pela vida das pessoas que me cercam e que de alguma forma me ajudaram no sucesso dessa jornada.

Obrigado pela vida de minha Vovó Neném, que sempre, sempre acreditou em mim, me dando suporte financeiro e, principalmente, emocional. Vovó, muito obrigado por tudo, continue orando, amo você.

Obrigado pela vida de minha mãe, que se manteve firme em oração para que esse sonho pudesse acontecer. Valeu mãe, te amo!

Obrigado pela vida do meu pai, que sempre ofereceu condições para que eu pudesse me dedicar integralmente aos estudos. Valeu pai, te amo!

Senhor abençoe a vida de meus irmãos gêmeos Tony e Débora, que de alguma forma também contribuíram para o sucesso.

Obrigado pela oportunidade de ter trabalhado no Museu Paraense Emílio Goeldi e ter evoluído grandemente como estudante, profissional e, até mesmo, como pessoa.

Obrigado pela benção de ter conseguido a bolsa de Iniciação Científica frente ao CNPq, em um momento em que tal fato parecia quase impossível. Obrigado Senhor, Deus do Impossível.

Obrigado pela vida do meu orientador Amílcar Mendes, que se mostrou um excelente profissional, confiou na minha capacidade e supriu todas as minhas necessidades como estagiário. Quero ser assim, que nem ele, quando eu crescer! Valeu Amílcar, por ter me puxado para o barco, não me deixando afundar, literalmente. Senhor continue abençoando ainda mais a vida do Amílcar.

Senhor Deus, obrigado por ter colocado a Messiana (co-orientadora) em minha vida, pois se mostrou uma excelente amiga e profissional. Continue abençoando a ela e à sua família.

Jesus, obrigado pela benção de ter estudado na UFPA e ter conhecido pessoas que levarei sempre em meu coração.

Obrigado pela vida dos professores, especialmente do Maamar, da Oziléia, do Nils, do Cohen, do Souto (isso mesmo, do Souto!), do César França e até da Erneida.

Abençoe a vida dos meus amigos Marcelo “Cabeça”, Paulo “Preto”, César “Torto”, Handerson “Bicho”, Robert “Macho”, Eurivaldo “Eurico”, Murilo “Jaca Body”, Edu e Aderson “Negão”. Valeu por tudo galera!

Abençoe as meninas da turma de Oceanografia 2005, especialmente a Ceta, a Theka e a Sarita, que sempre estiveram próximo de mim, de uma forma ou de outra.

Senhor Deus, perdoe a Theka e a Amanda autista, pois elas não sabem o que dizem!

Jesus, obrigado especialmente pela vida da Nádia que, como ninguém, esteve sempre próximo de mim, sendo acima de tudo, melhor amiga e companheira insubstituível. Amo você Nádia, obrigado por tudo.

Pai querido obrigado pela vida do meu amigo Renan “Mano Magrelo”, que me apresentou a oceanografia e que sempre esteve por perto me apoiando desde os tempos do Deodoro de Mendonça. Valeu mano, “bora pra Joanes”.

Senhor Deus, obrigado por toda essa galera que mencionei por nomes e por todos que não mencionei, mas que de alguma forma contribuíram para que esse sonho pudesse se realizar.

Sem a Tua mão nos apoiando, não seríamos nada.

Guia-me nos Teus caminhos para superar as barreiras que vêm pela frente.

É o que te peço e desde já te agradeço.

Em nome do filho Jesus Cristo. Amém!

“Se A é o sucesso, então A é igual a X mais Y mais Z. O trabalho é X; Y é o lazer; e Z é manter a boca fechada.”

*Albert Einstein*



## RESUMO

A Baía de São Marcos está localizada no Golfão Maranhense, constitui um sistema estuarino pleistocênico que recebe contribuição hidrosedimentológica dos estuários dos rios Mearim, Pindaré e Grajaú, sendo fortemente influenciada por macromarés semidiurnas. O objetivo principal deste estudo foi realizar a análise multitemporal (25 anos – 1977 a 2002) da batimetria e morfologia de fundo deste corpo hídrico, no setor adjacente ao Porto do Itaqui, através da quantificação e estimativa das taxas de crescimento/deslocamento, identificação de setores de deposição (assoreamento) e erosão e caracterização das formas de fundo. A metodologia consistiu na aquisição e georeferenciamento das cartas batimétricas nº 410 editadas pela Diretoria Hidrografia e Navegação (DHN), bem como a digitalização das isóbatas e cotas batimétricas. Posteriormente foram elaborados mapas de contorno batimétrico (escala de 1:135.000), com espaçamento de 5 metros entre as curvas de nível, que possibilitaram, juntamente com os perfis batimétricos transversais, a análise multitemporal quantitativa das dimensões das formas de fundo. Os resultados das análises multitemporais da dinâmica batimétrica, evidenciaram mudanças tanto de ordem morfológica quanto das profundidades na área estudada, denotando a alta dinâmica em função da ação das macromarés e de correntes reversas atuantes na área. Foram identificadas 10 feições morfológicas de fundo: o Canal Principal e os bancos Itacolomi, das Almas, do Meio, Complexo do Coral, Darlan, da Cerca, dos Cavalos, dos Lanzudos e Banco A. Os bancos arenosos identificados encontram-se inseridos na classificação de Perillo (1995) como barras alongadas de maré, com disposição longitudinal ao fluxo das correntes de maré reversa, sendo que os bancos do Meio e da Cerca, podem ainda ser classificados como barras lineares marginais aos canais. Os bancos mantiveram orientação longitudinal e deslocamento e/ou crescimento no sentido NE, em taxas de deslocamento que variam de 2,9 a 8,2 m/ano, evidenciando a ação mais pronunciada das correntes de vazante no processo de retrabalhamento das feições de fundo. Contudo, o Banco Darlan e a porção inferior do eixo longitudinal do Banco Coral do Sul, apresentaram movimentação para SW, fato que pode estar associados aos fenômenos de ressonância e amplificação de maré ocorrentes na região. O fato da Baía de São Marcos estar localizada no setor frontal ou superior do estuário do rio Mearim, faz com que este corpo hídrico apresente uma tendência natural de assoreamento, constatada no presente estudo.

Palavras-chave: Evolução batimétrica, Morfologia de fundo, Estuário, Baía de São Marcos (MA).

## ABSTRACT

São Marcos Bay is located in “Golfão Maranhense” and it is a pleistocene estuarine system, that receive hidrosedimentological contribution from Mearim, Pindaré and Grajaú rivers, being strongly influenced by semi-diurnal macrotides. The main objective of this study was to perform a multitemporal analysis (25 years - from 1977 to 2002) of the bathymetry and bottom morphology of this water body in the sector adjacent to Itaqui Port through quantification and estimation of rates of growth / displacement, identification of areas of deposition and erosion and characterization of bedforms. The methodology consisted in the acquisition and georeferencing of bathymetric maps No. 410, issued by the Management Hydrography and Navigation of Navy of Brazil and the digitization of bathymetric isobath and quotas. Bathymetric maps were developed from bathymetric contour (scale 1:135.000), with spacing of 5 meters from the level curves, which allowed, with the bathymetric cross sections, the analysis of multitemporal quantitative dimensions of the bedforms. The results of multitemporal analysis of the bathymetric dynamics showed morphological changes both of order as the depth in the study area, showing the high dynamics in terms of action of macrotides and reverse flows active in the area. Ten morphological features were identified: Main Channel and Itacolomi, Almas, Meio, Complexo do Coral, Darlan, Cerca, Cavalos, Lanzudos and A banks. The sandy banks identified are included in the Perillo's classification (1995) as elongated bars of tide, with provision for longitudinal flow of tidal currents in reverse, and Bank do Meio and da Cerca may still be classified as marginal linear bar the channels. The banks had orientation and longitudinal displacement and / or growth towards NE, in displacement rates ranging from 2.9 to 8.2 m / year, showing a more pronounced action of the ebb currents in the process of reworking the basic features. However, the Darlan Bank and the lower portion of the longitudinal axis of the Coral do Sul bank, presented movement to SW, which may be associated with the phenomena of resonance and amplification of tide occurring in the region. The fact of the São Marcos Bay is located in the frontal area of the estuary of the Mearim river, means that this bay has a natural tendency to sandy fill, attested in this study.

Keywords: Bathymetry evolution, Bedforms, Estuaries, São Marcos Bay (MA).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Localização da área de estudo.....	15
Figura 2 -	O estado do Maranhão e os principais mercados mundiais.....	16
Figura 3 -	Vista aérea do Porto de Itaqui.....	17
Figura 4 -	Vista aérea do Porto de Itaqui.....	18
Figura 5 -	Golfão Maranhense.....	19
Figura 6 -	Distribuição da granulometria média .....	20
Figura 7 -	Grau de seleção dos sedimentos da Baía de São Marcos.....	21
Figura 8 -	Bacias Hidrográficas do Maranhão.....	23
Figura 9 -	Zonas de maré alta em lados opostos da Terra.....	26
Figura 10 -	Ação da Força gravitacional da Lua.....	27
Figura 11 -	Defasagem de 50 minutos do dia lunar em relação ao dia solar....	27
Figura 12 -	Posicionamento da lua e estágios de maré.....	28
Figura 13 -	Subdivisão do sistema estuarino.....	29
Figura 14 -	Técnicas de aquisição de dados batimétricos.....	34
Figura 15 -	Cartografia e morfologia de fundo.....	35
Figura 16 -	Planos de referência.....	35
Figura 17 -	Mapa de disposição dos pontos digitalizados.....	37
Figura 18 -	Esquema seqüencial das etapas seguidas.....	39
Figura 19 -	Ilustração da metodologia as medições das dimensões das barras.	40
Figura 20 -	Análise comparativa das cartas batimétricas.....	42
Figura 21 -	Mapa de visualização geral das feições de fundo.....	44
Figura 22 -	Mapas dos Bancos Itacolomi e das Almas.....	45
Figura 23 -	Mapa dos Bancos do Meio, Darlan e Complexo do Coral.....	46
Figura 24 -	Mapas do Banco da Cerca.....	47
Figura 25 -	Mapa do Banco dos Cavalos, Lanzudos e Banco A.....	48
Figura 26 -	Análise comparativa tridimensional do setor norte.....	48
Figura 27 -	Análise comparativa tridimensional do setor sul.....	49
Figura 28 -	Mapa do dimensionamento das feições de fundo.....	49
Figura 29 -	Mapa de localização das seções transversais.....	54
Figura 30 -	Localização dos perfis batimétricos transversais.....	56
Figura 31 -	Perfil batimétrico multitemporal P1.....	56
Figura 32 -	Perfil Batimétrico multitemporal P2.....	57
Figura 33 -	Perfil batimétrico multitemporal P3.....	58
Figura 34 -	Perfil batimétrico multitemporal P4.....	58
Figura 35 -	Perfil batimétrico multitemporal P5.....	59
Figura 36 -	Perfil batimétrico multitemporal P6.....	60
Figura 37 -	Perfil batimétrico multitemporal P7.....	61
Figura 38 -	Perfil batimétrico multitemporal P8.....	62
Figura 39 -	Perfil batimétrico multitemporal P9.....	62
Figura 40 -	Comparação da oscilação de maré no estuário do Rio Mearim.....	64

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
2.1	GERAL.....	14
2.2	ESPECÍFICOS.....	14
3	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	15
3.1	LOCALIZAÇÃO.....	15
3.1.1	<b>Complexo Portuário de São Luís</b> .....	15
3.2	CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA.....	17
3.2.1	<b>Geologia</b> .....	17
3.2.2	<b>Geomorfologia</b> .....	21
3.2.3	<b>Rede Hidrográfica</b> .....	22
3.2.4	<b>Forçantes meteorológicas e oceanográficas</b> .....	23
4	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	26
4.1	MARÉS.....	26
4.2	SISTEMA ESTUARINO.....	28
4.3	DINÂMICA SEDIMENTAR E FORMAS DE FUNDO ESTUARINAS.....	30
4.3.1	<b>Barras alongadas de maré</b> .....	33
4.4	BATIMETRIA E CARTAS BATIMÉTRICAS.....	34
5	<b>METODOLOGIA</b> .....	36
5.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	36
5.2	LEVANTAMENTO CARTOGRÁFICO.....	36
5.3	GEOREFERENCIAMENTO DAS CARTAS NÁUTICAS.....	36
5.4	GERAÇÃO DE MAPAS DE CONTOURNO BATIMÉTRICO E SUPERFÍCIES 3D.....	37
5.5	PERFIS BATIMÉTRICOS.....	39
5.6	DIMENSIONAMENTO DAS FORMAS DE FUNDO.....	40
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	42
6.1	ANÁLISE BATIMÉTRICA MULTITEMPORAL.....	42
6.2	CARACTERIZAÇÃO DAS FEIÇÕES MORFOLÓGICAS DE FUNDO.....	43
6.2.1	<b>Bancos Itacolomi e Banco das Almas</b> .....	44
6.2.2	<b>Banco do Meio e Complexo do Coral e Banco Darlan</b> .....	45
6.2.3	<b>Banco da Cerca</b> .....	46
6.2.4	<b>Banco dos Cavalos, dos Lanzudos e Banco A</b> .....	47
6.3	ANÁLISE QUANTITATIVA MULTITEMPORAL DAS FORMAS DE FUNDO.....	49
6.4	ANÁLISE MULTITEMPORAL DOS PERFIS BATIMÉTRICOS TRANSVERSAIS.....	55
6.5	HIDRODINÂMICA E DINÂMICA DE FEIÇÕES DE FUNDO.....	62
7	<b>CONCLUSÕES</b> .....	65
8	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS / AÇÕES PROPOSTAS</b> .....	67
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	68

## 1 INTRODUÇÃO

Estudos de dinâmica de feições de fundo são extremamente importantes, principalmente quando se trata de uma área com intenso tráfego hidroviário, como é o caso de baías e estuários, conforme demonstrado nos trabalhos de Odreski et al. (2002) na Baía de Antonina (PR), Miranda (2007) na Baía de Guajará (PA) e Silva (2009) no Canal Norte do Rio Amazonas, entre outros.

Esses estudos tornam-se uma importante ferramenta no que se refere à segurança na navegação, evitando acidentes, inclusive envolvendo naufrágios e derrames de derivados de petróleo. Além disso, estudos de caráter morfológico de fundo são fundamentais para a melhor compreensão da história evolutiva de zonas costeiras, sobre tudo de sistemas estuarinos, principalmente em se tratando da costa norte do Brasil, onde a maioria dos estuários e baías não possui levantamentos batimétricos.

A Zona Costeira Amazônica (ZCA) foi objeto de estudo do Projeto “Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de Petróleo e Derivados na Zona Costeira Amazônica (PIATAM mar)”, financiado pela PETROBRAS e que englobou os litorais dos estados do Amapá, Pará e Maranhão. Nesse contexto, o litoral maranhense possui grande importância econômica, devido à existência do Porto do Itaqui, instalado na Baía de São Marcos e responsável pelo escoamento da produção, principalmente de soja, e vários outros produtos do Maranhão, Tocantins, Piauí, Goiás, Mato Grosso e sul do Pará.

A Baía de São Marcos, objeto do presente estudo, constitui-se em um sistema estuarino pleistocênico, que recebe contribuição hidrosedimentológica dos estuários dos rios Mearim, Pindaré e Grajaú, sendo fortemente influenciada por macromarés semidiurnas, que podem atingir 7,2 m (PORTOBRAS, 1988) e velocidades de correntes de 3,9 m/s (BRASIL, 1972).

Nesse complexo sistema estuarino coexistem ambientes diversos como estreitos, igarapés, enseadas, ilhas, planícies de maré lamosas colonizadas ou não por manguezais, falésias, pontais rochosos, praias de areias quartzosas, dunas e paleodunas, dentre outros (MOCHEL, 2004).

A interação entre os processos continentais, oceanográficos e meteorológicos faz com que a área em questão apresente uma intensa dinâmica, com modificações de formas de fundo e processos de sedimentação instáveis, podendo variar em escala, no espaço e no tempo.

O presente trabalho objetivou realizar um estudo da dinâmica batimétrica e da morfologia de fundo da Baía de São Marcos, com base na análise multitemporal comparativa

das cartas batimétricas editadas em 1977 e 2002 pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN).

Na costa amazônica, com exceção dos trabalhos de Miranda (2007) e Silva (2009), poucos estudos sobre formas de fundo estão voltados para a caracterização batimétrica e morfológica. Diante desse quadro, o presente trabalho apresenta uma análise multitemporal inédita para a área de estudo, visando oferecer uma contribuição ao conhecimento da dinâmica morfológica de fundo da Baía de São Marcos, especialmente no que diz respeito ao melhor entendimento do atual posicionamento fisiográfico dos bancos, canais de navegação e suas tendências evolutivas no espaço e no tempo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

- Realizar a análise multitemporal da batimetria e morfologia de fundo da Baía de São Marcos, no setor adjacente ao Porto do Itaqui, no estado do Maranhão.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Gerar mapas digitais e modelo numérico de terreno (3D) a partir das cartas náuticas editadas em 1977 e 2002 para realizar a análise da dinâmica das feições morfológicas de fundo.
- Realizar a análise quantitativa das feições de fundo.
- Elaborar perfis batimétricos transversais e comparar as variações dimensionais das formas de fundo no espaço e no tempo.
- Correlacionar a disposição das feições morfológicas de fundo com a hidrodinâmica e os processos de sedimentação.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO

A área do presente estudo (figura 1) compreende a Baía de São Marcos, no estado do Maranhão, incluindo as margens leste, composta pela Ilha de São Luís, e oeste, onde se localiza a cidade de Alcântara.

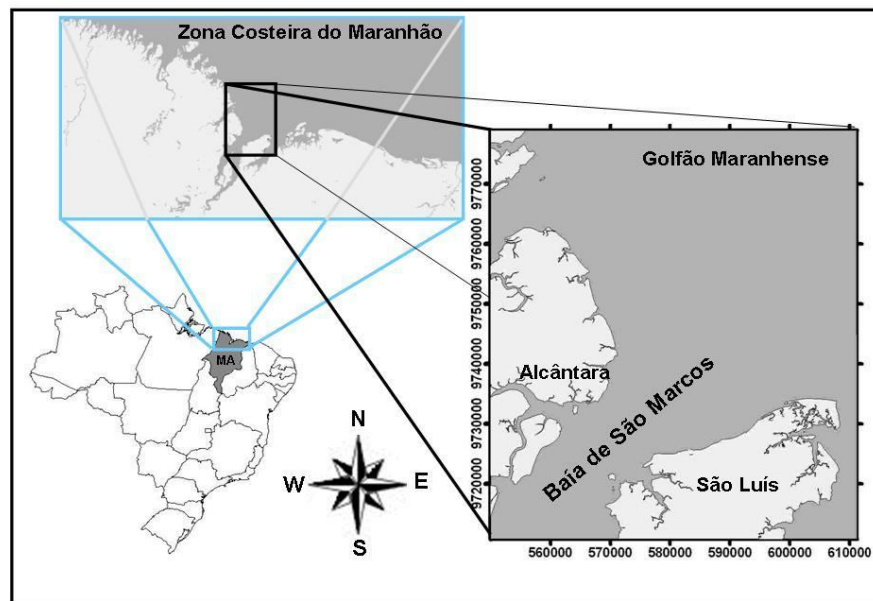


Figura 1: Mapa de localização da área de Estudo.

##### 3.1.1 Complexo Portuário de São Luís

A infraestrutura portuária do estado do Maranhão tem localização geográfica privilegiada (figura 2 e tabela 1), dada sua proximidade aos mercados internacionais, notadamente dos Estados Unidos e Europa, além da proximidade com o Canal do Panamá (VAZ; TSUJI, 2008).





Figura 2: Localização do estado do Maranhão em relação aos principais mercados do mundo  
 Fonte: (VAZ; TSUJI, 2008).

Tabela 1: Distância comparativa (em milhas náuticas) entre os portos brasileiros e os principais portos do mundo

	Itaqui (MA)	Salvador (BA)	Tubarão (ES)	Rio (RJ)	Santos (SP)	Rio Grande (RS)
Rotterdam (Hol)	4.143	4.913	5.393	5.673	5.893	6.499
Hamburg (Ale)	4.419	5.189	5.669	5.949	6.169	6.775
N.Orleans (USA)	3.355	4.735	5.215	5.495	5.715	6.321
S.Francisco (USA)	5.767	7.147	7.626	7.906	8.126	8.732
Canal do Panamá	2.483	3.862	4.342	4.622	4.842	5.448
Tóquio (Jap)	12.524	11.820	11.831	11.862	11.982	12.034

Fonte: (VAZ; TSUJI op.cit.).

O Terminal do Itaqui representa o porto marítimo de carga geral de São Luís, que atualmente é administrado pela Empresa Maranhense de Administração Portuária – EMAP, empresa estatal que também administra o cais de São José do Ribamar e os terminais de Ferry-Boat da Ponta da Espera e do Cajupe. O Porto Organizado do Itaqui compreende as áreas das instalações de atracação e acostagem, armazenagem, as áreas e instalações portuárias diversas com contratos de arrendamento à várias empresas, e as de serviços. Além dessas instalações, o complexo portuário de São Luís, possui dois terminais de uso privativo: o Terminal da Ponta da Madeira, pertencente à empresa Vale, e o Terminal Alumar, que pertence à Alcoa Alumínio S. A – Billitan Metais e Acan.

Localizado a 11 km do centro de São Luís, o Porto do Itaqui (figura 3) exerce influência em uma vasta região, abrangendo os estados do Maranhão e Tocantins, além das regiões sudoeste do Pará, norte de Goiás e nordeste de Mato Grosso.



Figura 3: Vista aérea do Porto de Itaqui.  
Fonte: Ministério dos Transportes (2009).

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA

### 3.2.1 Geologia

O litoral maranhense está inserido no arcabouço morfoestrutural da plataforma continental norte do Brasil ou Margem Equatorial, que se estende desde o Oiapoque (AP) até o Delta do Parnaíba (PI), onde é observada uma depressão estrutural e topográfica que possibilita condições para que esta seja a região com a maior largura e maior suavidade topográfica da margem continental brasileira (GORINI, 1981 apud PONTES, 2007).

Segundo Brandão e Feijó (1994) o Golfão Maranhense divide a costa maranhense em duas bacias sedimentares (figura 4):

- a) Bacia de São Luís, que engloba parte da costa ocidental do Estado, limitando-se ao norte pela Plataforma Ilha de Santana, ao sul com os Altos Estruturais Arco Ferrer–Urbano Santos, a leste com o horst de Rosário e a oeste com o Arco de Tocantins .
- b) Bacia de Barreirinhas, localizada no litoral NE do Maranhão, no setor compreendido entre a Baía de São José e o Delta do rio Parnaíba.

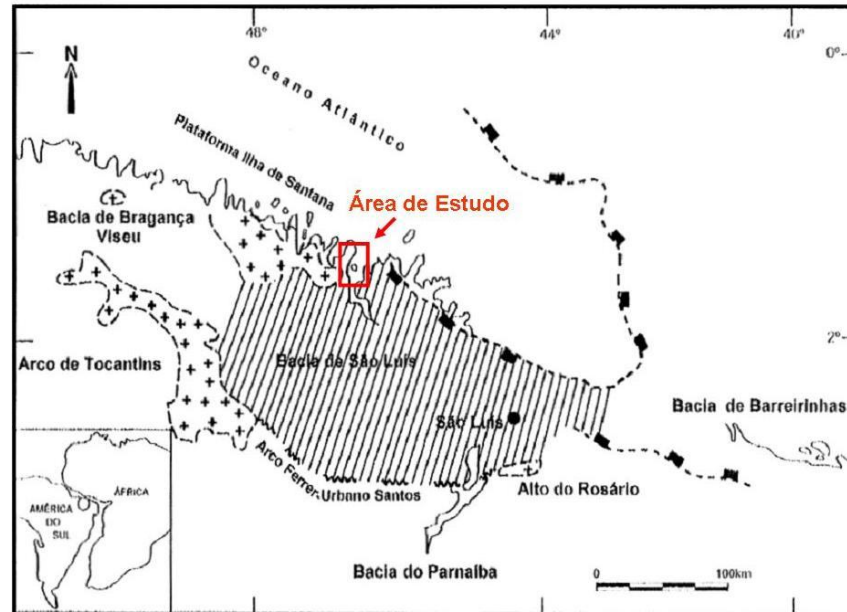


Figura 4: Localização da Bacia de São Luís.  
Fonte: Adaptado de Carvalho e Pedrão (1998).

De acordo com Carvalho (2000) a Bacia de São Luís caracteriza-se como sendo do tipo *rift*, originada a partir dos esforços tectônicos que resultaram na formação do Atlântico Equatorial. Seu histórico deposicional Pré-Cretáceo tem relação direta com os depósitos da Bacia do Parnaíba, área com a qual possuía continuidade física durante o Paleozóico. Porém, com o soergimento do embasamento Pré-Cambriano no interior do continente, ocorreu a divisão de regiões sedimentares, antes contínuas, resultando em pequenas bacias, tal como a Bacia de São Luís.

Nesse contexto está inserida a linha de costa maranhense que recorta tanto as formações geológicas do Mesozóico representadas pela Sequência Itapecuru Superior, quanto os sedimentos Pós-Barreiras e recentes (EL-ROBRINI, 2006).

El-Robrini e Souza Filho (2000) destacam a variedade de ambientes e subambientes presentes no litoral maranhense, onde o setor noroeste é representado pelas Reentrâncias Maranhenses e no setor leste observa-se o caráter retilíneo da costa ocupada por campos de dunas.

No setor noroeste do Golfão Maranhense, encontra-se a Baía de São Marcos (figura 5), que consiste em um sistema estuarino voltado para a plataforma continental, com orientação NE-SW, largura da foz de abertura de 50 km, sendo 15 km no setor central, compreendido entre Alcântara e São Luís, 25 km junto à Ilha dos Caranguejos e 4 km na foz do rio Mearim. A linha de costa da baía apresenta duas tipologias contrastantes representadas pela costa subretilínea com presença de praias arenosas e paleodunas do setor NE e a costa

recortada por inúmeros embaiamentos estuarinos e colonizada por manguezais do setor NW (EL-ROBRINI, 1990).

Palma (1979) ressalta a presença de sucessões de bancos arenosos submarinos transversais à linha de costa, associados à ação das correntes de maré a durante transgressão marinha holocênica na Baía de São Marcos.

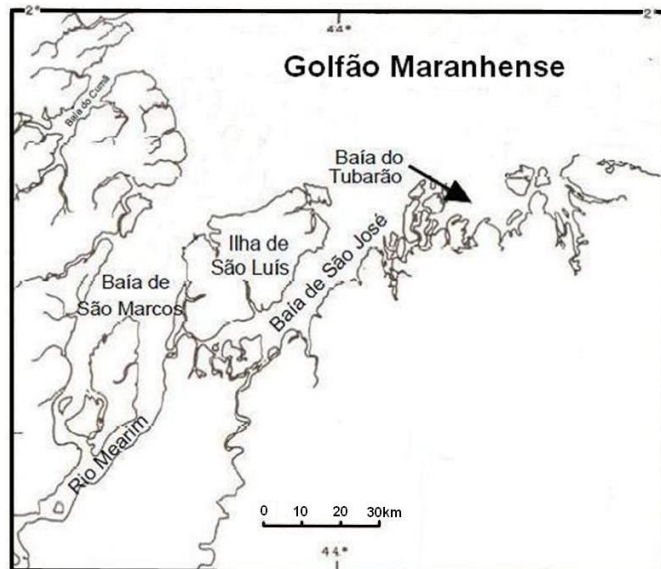


Figura 5: Golfão Maranhense e suas respectivas baías.  
Fonte: Adaptado de El-Robrini (1990).

Palma (op. cit.) destaca ainda que a leste do Golfão Maranhense a plataforma continental é dominada por construções carbonáticas e torna-se estreita com larguras máximas de 80 km e profundidades de quebra que variam de 60 a 80 m.

A respeito da composição dos bancos submarinos da Baía de São Marcos, El-Robrini (1990), em concordância com Palma (op. cit.), afirma que esses são compostos por areias e os compara com os bancos costeiros da Guiana Francesa e Suriname, estudados por Prost (1986), que são compostos por lama. As velocidades de migração dos bancos arenosos da Baía de São Marcos (1979-1984) são menores que as observadas por Froidefond (1985) e Prost (op. cit.) na Guiana Francesa e por Rine & Ginsburg (1985) no Suriname.

Quanto à natureza do sedimento de fundo da Baía de São Marcos, Castro (2008) afirma que a distribuição sedimentar é heterogênea, podendo ser encontrados desde grânulos a silte fino (figura 6).

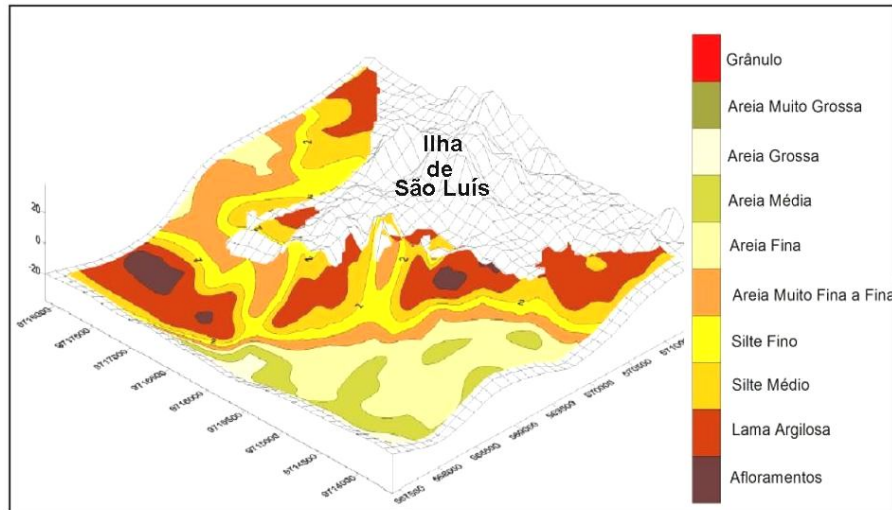


Figura 6: Modelo numérico de distribuição da granulometria média dos sedimentos da Baía de São Marcos.

Fonte: Modificado de Castro (2008).

O referido autor atribuiu o caráter heterogêneo da distribuição sedimentar à alta dinâmica dos canais e bancos, existência de setores abrigados com baixos níveis energéticos (instalações portuárias e regiões de manguezal) e presença de afloramentos e sedimentos relíctos no continente que estariam se comportando como áreas fonte para a baía.

Castro (op. cit.) observou uma variação de areias finas a médias, bem a muito bem selecionadas, localizadas no interior dos canais. Variação de sedimentos finos, representados por silte médio a argila, ocorre nas regiões protegidas e manguezais, sendo classificados como pobremente a muito pobremente selecionados devido à proximidade de promontórios e instalações portuárias, que nesse caso, podem estar atuando como agentes interferentes na distribuição dos sedimentos (figura 7).

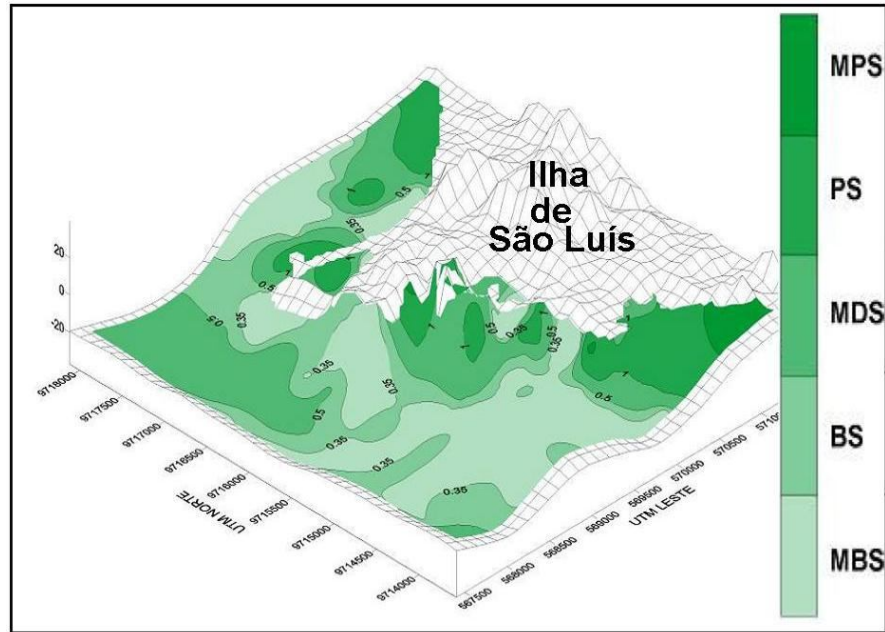


Figura 7: Modelo numérico mostrando o grau de seleção dos sedimentos da Baía de São Marcos. MPS - Muito Pobremente selecionada; PS - Pobremente Selecionada; MDS – Moderadamente Selecionada; BS – Bem Selecionada; MBS – Muito Bem Selecionada.  
Fonte: Modificado de Castro (2008).

### 3.2.2 Geomorfologia

Muehe e Nicolodi (2008) afirmam que o Golfão Maranhense representa um litoral de progradação lamosa, digiforme, ressaltando a linha de costa irregular. Tem aspecto de litoral afogado pela transgressão marinha, caracterizado por estuários sucessivos e acréscimos sedimentares, dando um aspecto de rias (Reentrâncias Maranhenses), que em sua maioria resultaram da progradação lamosa, formando feições alongadas de orientação quase perpendicular à costa.

A evolução do Golfão Maranhense está intimamente ligada à configuração da zona costeira do Maranhão. Segundo Ab’Saber apud Santos (1996):

Ocorreu no Plioceno, com o soerguimento da faixa litorânea, que ocasionou a superposição da rede de drenagens e erosão da Formação Barreiras, que foi sucedido de outra elevação da superfície dando continuidade ao processo de erosão e aprofundamento dos vales; mais tarde ocorreu, no Pleistoceno a regressão marinha dando origem às configurações das Baías de São Marcos e de São José, insulamento da ilha do Maranhão; e, finalmente uma transgressão moderada redefinindo o Golfão.

Costa et. al. (1997) apud El-robrini et al. (2006) afirma que o Golfão Maranhense é sustentado por três unidades geomorfológicas distintas:

- a) Maciço residual, que desenvolvido sobre os metassedimentos do Grupo Gurupi, representa as maiores elevações com aproximadamente 200 m, caracterizando inselbergs.
- b) Zona dos platôs, que constituem uma série de platôs de bordas escarpadas e ravinadas, esculpidas em sedimentos do Grupo Barreiras.
- c) Planalto Rebaixado da Amazônia da zona bragantina (BARBOSA; PINTO, 1973) e a unidade geomorfológica do Baixo Planalto Costeiro, que representa um planalto sustentado por conglomerados da Formação do Grupo Barreiras, caracterizado por um relevo colinoso de baixa amplitude. Os sedimentos quaternários representam a unidade de planície aluvionar (COSTA et al., 1977), correlacionável tanto à unidade morfoestrutural do litoral de “rias” (BARBOSA; PINTO, op cit.), quanto às unidades geomorfológicas planície costeira baixa e planície arenosa, caracterizada por manguezais e ambientes de praias, dunas e cordões dunários respectivamente.

### 3.2.3 Rede Hidrográfica

A Baía de São Marcos está situada em uma região estuarina, portanto sofre influência de forçantes fluviais e oceânicas. Com relação às forçantes fluviais atuantes na baía, estas se mostram extremamente importantes no que se refere à configuração geográfica e dinâmica dos parâmetros físicoquímicos, pois contribuem com aporte de água doce e de material pelítico em suspensão. A Baía de São Marcos recebe contribuições da bacia hidrográfica do Mearim e Pindaré (figura 8).

A bacia do Mearim possui uma área de aproximadamente 94.710 km<sup>2</sup>. É composta pelos rios Pindaré, Grajaú, das Flores, Corda e, principalmente, o rio Mearim, que nasce nas encostas setentrionais da Serra da Menina, a aproximadamente 500 m de altitude, e possui em torno de 930 km de curso. O rio Grajaú é afluente do rio Mearim pela margem esquerda, e possui uma bacia hidrográfica de 21.830 km<sup>2</sup> aproximadamente (VAZ; TSUJI, 2008).

A bacia do Pindaré, assim como a do Mearim, está inteiramente no Maranhão, e abrange uma área de aproximadamente 36.680 km<sup>2</sup>, sendo composta principalmente pelos rios Pindaré, Caru, Santa Rita, Maracu, Buriticupu e Zutiua. O rio Pindaré é o principal afluente do rio Mearim, tem sua nascente situada na fronteira entre as bacias dos rios Mearim e Tocantins, a 300 m de altitude e possui 686 km de curso.

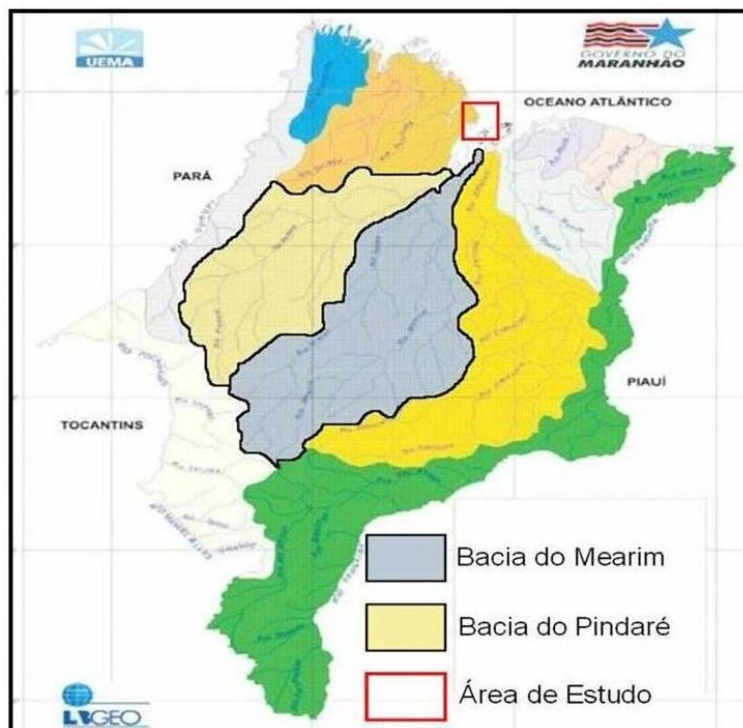


Figura 8: Bacias Hidrográficas do Maranhão.  
Modificado de Vaz e Tsuji, 2008.

### 3.2.4 Forçantes meteorológicas e oceanográficas

Na região da Plataforma Continental Maranhense (PCM) há predominância dos ventos alíseos, gerados pelo gradiente de pressão entre as baixas e médias latitudes. Estes possuem fluxo de direção E-W, porém, em virtude do efeito Coriolis, esses ventos são provenientes de NE no hemisfério norte e de SE no hemisfério sul (HASTENRATH; LAMB, 1977 apud PONTES, 2007). Segundo Feitosa (1996) no litoral norte da Ilha de São Luís as medições indicam ventos com velocidades entre 6.0 e 31 km/h. Dados do Porto de Itaqui (2009) demonstram que a velocidade dos ventos é constante ao longo do ano variando entre 6.0 e 7.8 nós com média anual de 6.98 nós, sendo que os valores mais elevados são registrados nos meses de outubro e novembro. Ventos de nordeste e leste são dominantes com 46% e 10% de frequência respectivamente.

A costa maranhense apresenta, segundo a classificação de Köppen, o clima predominante do tipo Am, mais precisamente o subtipo Amw', que se caracteriza por ser quente e úmido, com período seco entre os meses de junho e novembro, sendo que nos demais meses apresenta-se intensamente chuvoso, com precipitação média de 2500 mm/ano. Isso pode ser justificado pela dominância dos ventos alíseos, que proporcionam uma baixa pressão



atmosférica, formação intensa de nuvens de precipitação e altos índices de umidade atmosférica (HASTENRATH; LAMB, 1977 apud PONTES, 2007).

A média anual da temperatura oscila entre 26° e 32°C, onde os maiores valores são observados entre setembro e outubro, com valores em torno de 35°C. Essa variação da temperatura é causada pelo regime pluviométrico da região e à umidade relativa do ar, que varia entre 85 e 95% (BRASIL, 1977 apud PONTES, op. cit.). Rocha et. al. (no prelo) apud Pontes (op.cit.) afirmam que de maneira geral são as estações do ano que atuam sobre as variações das temperaturas médias do litoral maranhense, de modo que os valores de umidade relativa do ar, insolação e grau de nebulosidade influenciam diretamente na taxa de evapotranspiração do litoral, sendo menor no período chuvoso e maior no período seco.

Segundo Fonseca et al. (2000), a Corrente Norte Brasileira (CNB) é a maior corrente de contorno Oeste nas latitudes tropicais do Oceano Atlântico. A plataforma continental do Maranhão é parcialmente influenciada pela CNB (DIETRICH; KALLE, 1957 apud LUEDEMANN, 1967). Em geral, o limite mais interno da CNB encontra-se entre 20 a 40 km de distancia da linha da costa, apresentando campo de velocidade que aumenta em direção offshore, variando de 25 a 200  $\text{cm.s}^{-1}$ , sendo que as velocidades máximas desenvolvem-se numa faixa, que dista entre 150 a 200 km da costa (FLAGG et al 1986, apud PONTES, op. cit.).

Southard e Stanley (1976) afirmam que o baixo gradiente topográfico da PCM favorece a propagação das correntes de maré perpendicular à costa, que têm sua velocidade aumentada da costa em direção à plataforma externa. Brasil (1972), completa afirmando que entre o Vale Submarino do Pará e o Golfão Maranhense há, de fato, o predomínio das correntes de maré, na região entre a plataforma continental e o litoral.

As principais constituintes de maré na PCM são a M2 (componente lunar principal, período de 12,42 horas), S2 (componente solar principal, período de 12 horas) e N2 (componente lunar elíptica maior, período de 12,66 horas), sendo que a M2 é a constituinte mais significativa e importante da circulação hidrodinâmica da PCM (BEARDSLEY et al., 1995). Dados de estações maregráficas apresentados por FEMAR (1997) para o Golfão Maranhense indicam valores de médias de preamares de sizígia e de quadratura respectivamente de 5,63m e 4,49 m; em Alcântara; na Ilha do Cajual esses valores atingem 6,48 m e 4,98 m e, em São Luis, 6,02 m e 4,87 m.

Feitosa (1989) registrou que no Golfão Maranhense a amplitude de maré oscila entre 4,9 m e 7,2 m, com média de 6,6m, sendo que durante a fase lunar de sizígia a maré alcança 7,2m de amplitude, porém, na maioria do tempo (75%) as amplitudes de marés são inferiores

a 5,5 m (PORTOBRAS, 1988). Sendo assim, de acordo com Davies (1964) a região do Golfão Maranhense se enquadra como uma zona sob influência de macromarés, onde, especificamente na Baía de São Marcos, atingem amplitudes superiores a 4 m.

Brasil (1972) afirma que na PCM, em condições extremas, as correntes de maré atingem valores entre 1 e 1,3 m/s, com correntes de enchente mais intensas que as de vazante. Entretanto, na região da Baía de São Marcos, onde há o predomínio das correntes de maré reversas orientadas perpendicularmente à costa, a velocidade média é de 0,8 m/s, sendo que na região da foz as velocidades podem alcançar 3,9 m/s com correntes de vazantes mais intensas que as de enchente. A ação das correntes de maré reversas faz com que os depósitos sedimentares sejam armazenados em forma de bancos móveis (EL-ROBRINI, 1990).

Além das correntes de maré, Feitosa (1989) destaca a ocorrência de correntes induzidas por ondas no litoral norte da ilha de São Luís com velocidades entre 0,4 e 1,6 m/s. Essas correntes deslocam-se para oeste em uma linha de costa de direção E-W, em concordância com a direção dos ventos de NE.

Melo (2002) fez medições de velocidades de correntes nos manguezais da Ilha de São Luís obtendo valores de 0 a 0,8 m/s na quadratura e de 0 a 1,4 m/s na sizígia.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 MARÉS

A maré é um fenômeno astronômico-oceanográfico que consiste na livre migração periódica de massas d'água nos oceanos, como resultado da interação entre a força gravitacional e a força centrífuga rotacional do sistema Sol-Terra-Lua. Mesmo a Lua tendo uma massa muito menor que a do Sol, seu efeito na atração gravitacional com a Terra é dominante, pois está mais próxima do planeta. Sendo assim, as águas do oceano avançam sobre a região da Terra que se encontra mais próxima e diametralmente oposta à Lua (figura 9).

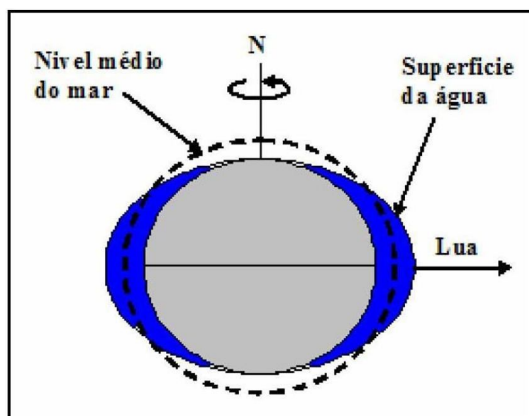


Figura 9: Deformação da superfície oceânica e ocorrência de duas zonas de maré alta em lados opostos da Terra.

Fonte: Adaptado de Baptista Neto et al. (2004) apud SOUZA (2004).

Ao longo da superfície terrestre a força centrífuga permanece constante, porém a força gravitacional é diretamente proporcional à proximidade em relação à Lua. Portanto, na face da Terra voltada para a Lua, a força de atração gravitacional é maior que a força centrífuga, enquanto que no lado oposto ocorre o contrário (figura 10).

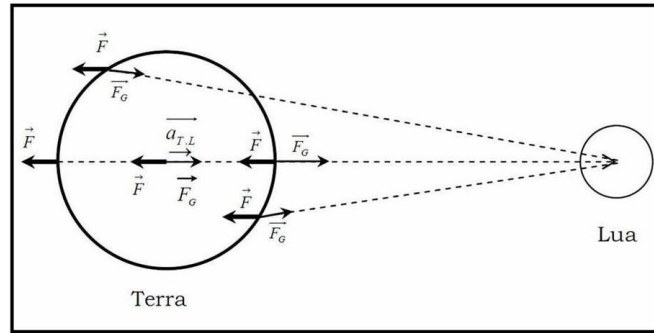


Figura 10: Ação da Força gravitacional da Lua (FG) e da Força Centrífuga (F) constante em todos os pontos da superfície.

Fonte: Adaptado de Souza (2007).

Um dia Lunar, que representa o movimento de translação da Lua em torno da Terra, tem duração de 24:50hs e corresponde ao tempo necessário para que haja duas aparências sucessivas da Lua em um meridiano exatamente acima de observador estacionário. Enquanto a Terra leva 24h para completar seu movimento de rotação (dia solar), a Lua gira para leste  $12,2^\circ$ , fazendo com que a Terra tenha que girar por mais 50 minutos para que o observador continue alinhado com a Lua. Diante disso, ao se observar os horários de picos de maré alta e de maré baixa em um determinado local, os mesmos ocorrerão com uma defasagem de 50 minutos a cada dia sucessivo (figura 11).

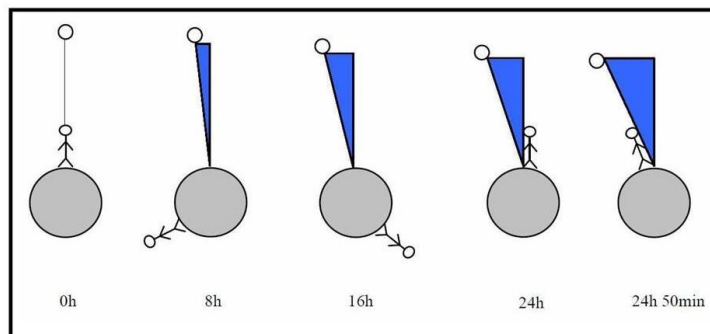


Figura 11: Defasagem de 50 minutos do dia lunar em relação ao dia solar.

Fonte: Adaptado de Souza (2007).

Quando há a oposição ou conjunção da Terra, Lua e Sol (lua cheia e lua nova), as forças gravitacionais desses astros somam-se e as marés atingem seu extremo, tanto na preamar quanto na baixamar, originando as marés de sizígia ou de “águas-vivas” (figura 12) que são marés de grande amplitude onde as águas fluem com grande velocidade (BAPTÍSTA NETO et al. 2004).

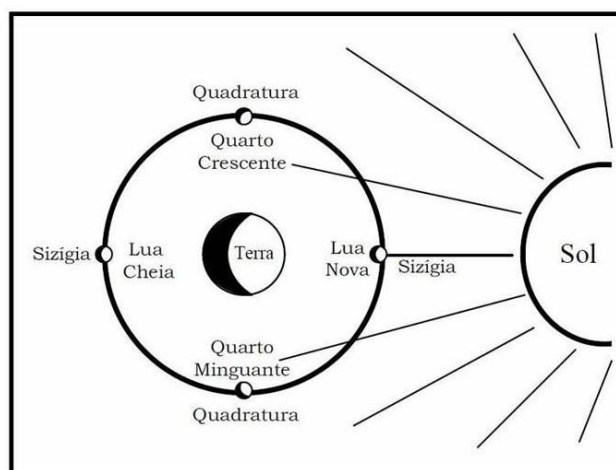


Figura 12: Posicionamento da lua e seus correspondentes estágios de maré.  
 Fonte: Modificado de Baptista Neto et al. (2004).

Ao adentrarem na plataforma continental as marés oceânicas sofrem empilhamento e amplificação, penetrando nos estuários e baías. Surgem, então, movimentos horizontais da massa d'água, denominados de correntes de maré, que resultam na inundação de planícies de maré e manguezais, tornando-se um fator limitante na diversidade biológica desses ambientes.

#### 4.2 SISTEMA ESTUARINO

Há várias maneiras para definir um estuário, que variam de acordo com o ponto de vista adotado. Considerando os aspectos relacionados à sedimentação, Dalrymple et al. (1992) afirmam que:

Estuário é a parte voltada para o mar de um sistema de vales inundados, os quais recebem sedimentos de fontes fluviais e marinhas, contendo fácies influenciadas por maré, onda e processos fluviais. Considera-se que o estuário se estenda desde o limite interno das fácies de maré, até o limite oceânico das fácies costeiras na entrada.

Esses ambientes são de épocas geológicas muito recente, com menos de 5 mil anos de idade, cuja origem está ligada a alterações seculares do nível do mar de natureza eustática ou isostática, bem como a de origem tectônica. Sua ocorrência e dimensões estão intimamente ligadas às oscilações no nível do mar e à topografia litorânea e fluvial, sendo que estão constantemente sofrendo alterações através de processos erosionais e deposicionais, que no início eram naturais, porém, mais recentemente, têm sido fortemente influenciados pela exploração e exploração das bacias de drenagem (MIRANDA et al., 2002).

Uma outra definição foi proposta por Kjerfve (1987), que considera principalmente os processos regionais (fatores climáticos, sedimentação recente e forçantes dinâmicas) que contribuem para gênese estuarina, bem como para suas diversidades geomorfológicas e fisiográficas encontradas na natureza. Para este autor estuário é um ambiente costeiro com ligação aberta, pelo menos intermitentemente, com o oceano adjacente.

O ambiente estuarino pode ser subdividido em três zonas diferentes: (i) Zona de Maré do Rio (ZR) - parte fluvial com salinidade igual a zero, porém ainda sujeita à maré; (ii) Zona de Mistura (ZM) - região onde ocorre a mistura da água doce da drenagem continental com água do mar; e (iii) Zona Costeira (ZC) - região costeira adjacente que se estende até a frente da pluma estuarina que delimita a Camada Limite Costeira (CLC).

O referido autor advoga que essas zonas (ZR, ZM e ZC) são dinâmicas espaço-temporalmente e podem não ocorrer em situações climáticas extremas. Para um ambiente simples, como o vale de um rio inundado pela maré, essas zonas estão esquematicamente representadas na figura 13.

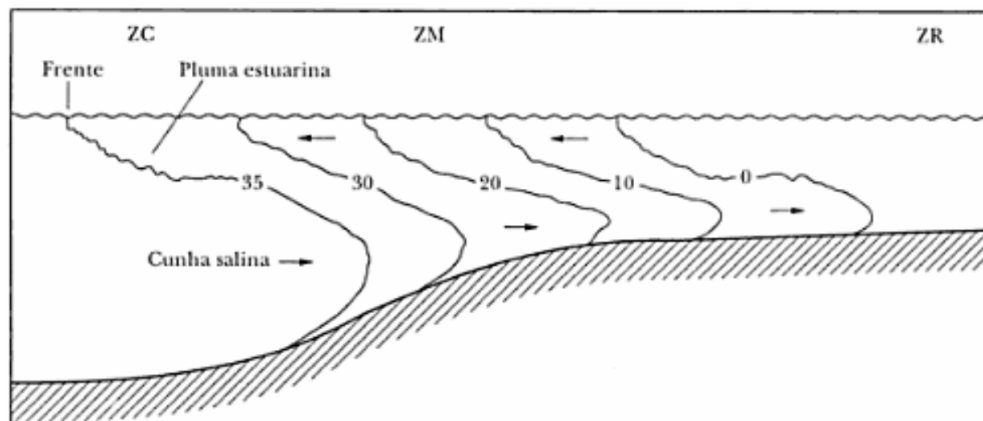


Figura 13: Representação da Zona de Maré do Rio (ZR), de Mistura (ZM) e Costeira (ZC) em uma seção longitudinal de um sistema estuarino. São também representadas as isolinhas de salinidade com valores decrescentes em direção ao interior do estuário.

Fonte: Adaptado de Simpson (1997) apud Miranda et. al. (2002).

Depois da transgressão marinha holocênica e estabelecimento dos níveis do mar atual, os estuários vêm apresentando variações em diversas escalas temporais (segundo, horas, dias, meses, anual e interanual) que passaram e exercer influência com diferentes intensidades sobre o seu comportamento hidrodinâmico (MIRANDA *et al.* 2002).

Vários processos que ocorrem no interior do estuário como flutuações turbulentas, correntes e misturas são dominados pela forçante produzida pela maré astronômica. Contudo, há uma diferença entre maré propriamente dita e co-oscilação da maré. A primeira já foi

conceituada no tópico 4.1 e se propaga pela plataforma continental na forma de ondas de diversos tipos (ondas de Kelvin, Poincaré, ondas longas de gravidade), gerando movimentos e processos de mistura estuário acima e abaixo na forma de ondas longas de gravidade, enquanto que a segunda representa a ação da maré no interior do estuário com o mesmo período da maré oceânica (DEFANT, 1960 apud MIRANDA, 2002).

A propagação da onda de maré no estuário sofre uma série de modificações exercidas pela topografia local, descarga fluvial, geometria das margens e morfologia de fundo. Dyer (1997) fez uma relação entre a onda de maré estuário acima, convergência das margens e atrito com o fundo estuarino, ocasionando variações na altura da maré por conservação de energia. A convergência das margens e ausência de atrito causa elevação da altura da maré, porém a existência do atrito com o fundo estuarino diminui a altura da onda de maré.

Com base nessas duas variáveis (margens e morfologia de fundo), Nichols e Biggs (1985 apud MIRANDA op. cit.) desenvolveram as seguintes classificações para estuários: *hipersíncrono, síncrono e hiposíncrono*.

Os estuários hipersíncronos, de forma geral, possuem forma afunilada e a convergência é maior que o atrito, fazendo com que haja um aumento da maré e das correntes em direção à cabeceira; nos estuários síncronos, as duas variáveis são equivalentes e a altura da maré permanece constante até a ZR, ao passo que nos estuários hiposíncronos o efeito do atrito excede o da convergência das margens e, por essa razão, a altura da maré diminui ao longo do estuário.

De maneira geral, os estuários são ambientes com grande importância socioeconômica e biológica, pois são ecossistemas largamente utilizados para atividades de navegação, recreação e representam importantes fontes de recursos naturais, não somente para a zona costeira, mas para a plataforma continental adjacente. A interação entre as diversas forças físicas atuantes no sistema estuarino tornam os estudos dos processos hidrodinâmicos, processos de transporte de contaminantes e sedimentos altamente complexos.

#### 4.3 DINÂMICA SEDIMENTAR E FORMAS DE FUNDO ESTUARINAS

As formas de fundo estão presentes na natureza em diversos ambientes com características peculiares, tais como: (i) os rios que apresentam fluxo unidirecional e canalizado, possuindo uma grande variedade de tamanhos de grãos e características hidrológicas; (ii) embaiamentos costeiros arenosos que além de também apresentarem-se canalizados, estão sujeitos à oscilação da maré e ação de fluxos reversos correspondentes às

correntes de maré enchente e vazante e (iii) ambientes relativamente profundos, correspondentes às plataformas continentais não canalizadas dominadas por fluxos geostróficos, tempestades ocasionais, correntes de maré e correntes geradas por ondas (ASHLEY, 1990).

Dentre os vários ambientes citados acima, o presente estudo está inserido no contexto dos embaixamentos costeiros arenosos. Baías ou embaixamentos são corpos hídricos costeiros, parcialmente fechados pela topografia litorânea, mantendo, porém, livre ligação com o mar e são influenciados pela maré quando, geralmente, apresentam variação maior que 1 m ou a descarga de água doce é baixa, quando comparada com o volume hídrico trazido pela maré. Em regra geral, a força máxima do fluxo da maré é diretamente proporcional a sua amplitude dentro do ambiente. Os valores de velocidade de correntes (velocidade média < 2.0 m/s) variam em função dos ciclos de maré diários e em função do ciclo lunar (PERILLO, 1995).

A variabilidade espaço-temporal do fluxo e transporte de sedimentos, associados às flutuações nos níveis da água, fazem com que haja uma variedade de morfologias de formas de fundo nesses ambientes.

Em virtude dessa grande variedade de ambientes com características físicas e hidrodinâmicas peculiares, e a falta de um consenso na literatura científica, são adotados diversos esquemas de classificação das formas de fundo, baseando-se, principalmente, nas diferenças de sua morfologia, que refletem a variação dos efeitos causados pela canalização, variação do nível d'água, oscilação da maré e reversão de correntes de maré (ASHLEY, op. cit.)

Através do movimento dos sedimentos arenosos nos canais de maré e sobre as bordas das planícies de maré, desenvolvem-se feições na forma de ondulações de variados tamanhos em diversas escalas espaciais: escalas em centímetros (*current ripples* - microformas), em decímetros e metros (dunas – mesoformas), de metros a dezenas de metros (barras – macroformas) (PERILLO, 1995).

As correntes de maré aceleram e desaceleram, na forma de fluxos reversos de enchente e vazante, não necessariamente nessa ordem. Apesar da direção regular dos fluxos reversos, a velocidade padrão de enchente e vazante geralmente não coincide. Isso faz com que dentro de um mesmo estuário, existam locais dominados por maré enchente e locais dominados por maré vazante.

Dunas de meso-escala e barras de macro-escala são elementos morfológicos conspícuos dentro de muitos estuários. Seus tamanhos estão relacionados às profundidades e



oscilações do fluxo e podem ter uma influência importante na dinâmica de um estuário e em suas formas de uso e ocupação.

As dunas são formadas a partir de uma perturbação inicial no fundo (degraus negativos) que ocasiona uma modificação no fluxo à sua jusante. O efeito disso é refletido inteiramente na espessura da camada limite e, devido à modificação na profundidade média, a tensão de cisalhamento concentra-se em um local específico, distante a jusante do local da perturbação inicial. A diminuição das taxas de transporte sedimentar a jusante do local de concentração da tensão de cisalhamento sofrerá deposição sedimentar e irá gerar um segundo ponto de perturbação, cujo qual irá passar pelo mesmo processo e formando, assim, os campos de dunas (PERILLO, 1995).

Com relação às barras, assim como aquelas presentes em sistemas fluviais, as estuarinas também têm uma grande variedade de formas. Uma mesma barra pode assumir varias orientações ou apresentar uma única predominante, podendo ser transversal ao fluxo, oblíqua e longitudinal. Em barras estuarinas a largura pode ou não manter valores médios constantes, paralelos ou não ao fluxo. As barras são geralmente maiores que as dunas e normalmente possuem dunas sobrepostas, porém, às vezes pode ser difícil a identificação dessas feições.

Perillo (op. cit.) atenta para a existência de poucos guias para a distinção entre barras e dunas estuarinas, e completa afirmando que se determinada feição apresentar dimensões fora do padrão estabelecido por Yalin (1987), será considerada barra. Yalin (op. cit.) usou uma combinação de conhecimentos empíricos e observacionais e sugeriu que uma duna, com comprimento de onda ( $L_D$ ), deve ser aproximadamente seis vezes menor que a altura ( $h$ ) da camada d'água a qual esta inserida (equação 1) e o valor da altura ( $H_D$ ) de uma duna deve corresponder a 17% da altura da coluna d'água (equação 2).

$$L_D = 6h \quad (\text{Eq. 1})$$

$$H_D = 0.167h \quad (\text{Eq. 2})$$

Segundo Dalrymple et al. (1990) na Baía de Fundy (Canadá) ocorrem barras arenosas alongadas que são similares à dunas grandes e muito grandes, possuindo larguras quase regulares, uma consistente assimetria e direção de migração e dunas sobrepostas que variam de pequenas a grandes. Entretanto, essas feições, em profundidades variando de 3 a 12 m, possuíam larguras (200 a 300 m) e alturas (1 a 5 m) significativamente maiores do que o

esperado para dunas (larguras de 18 a 72 m e altura de 0.5 a 2 m), sendo assim, consideradas como barras.

A classificação das barras ainda não chegou a um consenso devido ao reduzido conhecimento a respeito da gênese dessas feições. Por essa razão, Perillo (1995) dividiu as barras em três grandes categorias, as quais parecem ser geneticamente significantes e, ao mesmo tempo, reconhecíveis sobre bases observacionais. São elas:

- a) Barras repetitivas, incluindo barras alternadas, pontuais, múltiplas e entrelaçadas;
- b) Barras alongadas de maré;
- c) Barras isoladas, no formato de deltas incluindo lobos de espalhamento.

As feições de fundo identificadas no presente estudo enquadram-se dentro do grupo das barras alongadas de maré, da classificação proposta por Perillo (op. cit.), adotada como referência.

#### 4.3.1 Barras alongadas de maré

Esse tipo de barra é extensamente desenvolvido em locais de alta energia (velocidades médias  $>0.75\text{m/s}$ ), retilíneos, e com fluxos de maré. São feições características do setor externo de estuários influenciados por macromarés, apesar de ocorrerem também na desembocadura de estuários com pequenas amplitudes de maré. Essas feições também são chamadas de bancos arenosos lineares ou cristas de correntes de maré. Estão inseridas nessa categoria as barras lineares de margem de canal e *spits* de vazantes aos quais estão associados os deltas de maré nas barreiras estuarinas (PERILLO, op. cit.).

Barras alongadas têm geralmente de 1 a 15 quilômetros de comprimento, enquanto que as cristas de barras podem atingir 40 quilômetros. Barras variam de 0.2 a 4 km de largura, com formas estreitas tipicamente ocorrendo em águas profundas.

Essas barras variam em organização e tamanhos de estuário para estuário. Em sistemas onde as correntes de maré enchente e vazante são levemente forçadas pela convergência das margens e pela profundidade do fundo, as barras normalmente se estabelecem, formando um pequeno número de cadeia de barras que podem identificar locais com ocorrência de canais de enchente e vazante.

#### 4.4 BATIMETRIA E CARTAS BATIMÉTRICAS

A batimetria é a obtenção de dados referentes à topografia de fundo de um ambiente hídrico baseados no registro acústico, onde, a partir da emissão de ondas sonoras ou ultrassônicas (com velocidades conhecidas) ao longo da coluna líquida, tem-se o tempo entre emissão e a recepção do impulso, tornando possível a determinação do espaço percorrido (profundidade).

Os primeiros mapeamentos batimétricos eram realizados através do fio de prumo, porém era um trabalho árduo, demorado e, principalmente, pouco preciso. Atualmente, através de métodos acústicos desenvolvidos principalmente a partir da 1ª Guerra Mundial, as técnicas hidrográficas aperfeiçoaram-se cada vez mais.

A hidrografia tem a tecnologia como uma grande aliada para obtenção de dados cada vez mais confiáveis, em um espaço de tempo menor. Com o uso dos equipamentos adequados, tais como ecobatímetros (feixe simples ou multifeixe), ecossonda, Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS), computadores de bordo, entre outros, é possível construir uma base de dados com os valores das cotas batimétricas e suas respectivas localizações geográficas, permitindo a confecção de mapas de morfologia de fundo e/ou cartas batimétricas (figura 14).

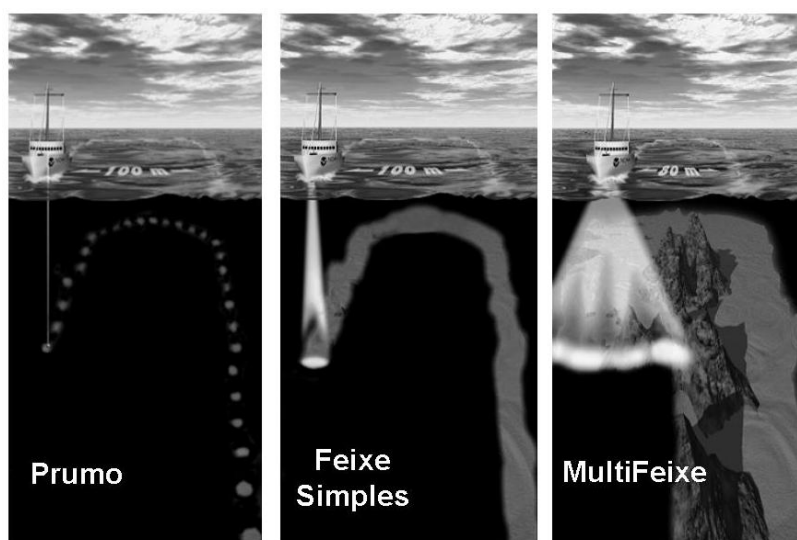


Figura 14: Representação das técnicas de aquisição de dados batimétricos.  
Fonte: Adaptado de Hidrografia (2009).

As cartas batimétricas correspondem à representação cartográfica da compilação dos dados obtidos através dos levantamentos batimétricos, que expressam a localização e configuração espacial das profundidades e natureza dos fundos, curvas batimétricas, bancos

arenosos e/ou lamosos, formações recifais, pontos de naufrágios, ferramentas de navegação (faróis, bóias, etc), e informações a respeito de marés e correntes da área amostrada (figura 15).

Os valores de profundidade representados em uma carta náutica, quando em regiões sujeitas ao regime de maré, são corrigidos ao nível de redução da maré (NR), localizado abaixo da média da baixamar de sizígia (MLWS), com o objetivo de evitar as variações desta e garantir maior segurança na navegação (figuras 16).



Figura 15: Representação esquemática da cartografia e morfologia de fundo como ferramentas para navegação e prevenção de acidentes marítimos.

Fonte: Modificado de Hidrografia (2009).

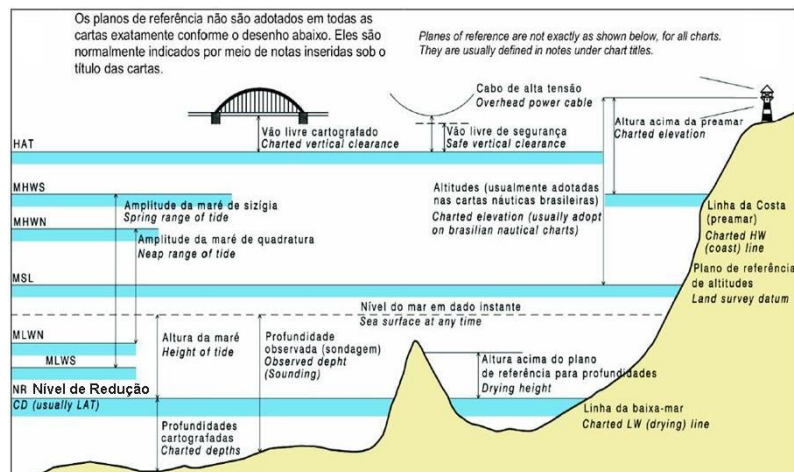


Figura 16: Planos de referência.  
Fonte: Adaptado de Marinha do Brasil (2009).

## 5 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o alcance dos objetivos específicos deste trabalho foi dividida em etapas descritas em detalhes a seguir:

### 5.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Etapa inicial que consistiu no estabelecimento da base teórica para o desenvolvimento das demais etapas do trabalho. Os dados secundários acerca das diferentes temáticas abordadas, equivalente aos aspectos fisiográficos da área de estudo e as metodologias empregadas no desenvolvimento do trabalho foram obtidos através de pesquisa nas bibliotecas do Museu Paraense Emílio Goeldi, Centro de Geociências e Biblioteca Central da Universidade Federal do Pará, além do acervo particular do orientador e no Portal de Periódico da Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), mediante acesso pela rede mundial de computadores (internet).

### 5.2 LEVANTAMENTO CARTOGRÁFICO

O levantamento cartográfico foi obtido através da aquisição de duas edições das cartas náuticas de nº 410 - Proximidades da Baía de São Marcos, junto à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), sendo uma do ano de 1977, digitalizada no formato .jpeg e a outra georreferenciada, do ano de 2002, mediante download no site da Marinha do Brasil. As cartas possuem o Datum WGS 1984 (World Geographic System), e foram elaboradas na escala de 1:135.000.

### 5.3 GEOREFERENCIAMENTO DAS CARTAS NÁUTICAS

Somente a carta náutica editada em 1977 passou por processo de georreferenciamento, que foi realizado mediante utilização do software Global Mapper 8.0, através da técnica de registro imagem/imagem, que consiste na utilização de mapa já anteriormente georreferenciado, assim obtendo suas coordenadas geográficas de canto, pontos estratégicos e idênticos de coordenadas da carta analógica georreferenciada.

Nas cartas náuticas em formato digital foram plotados pontos com suas respectivas cotas batimétricas, mediante utilização do software GPS Trackmaker Professional 4.5,

utilizando como referência o sistema de projeção Universal Transversa Mercator (UTM) e o Datum WGS 1984. Todas as isóbatas contidas nas cartas foram digitalizadas, na forma de pontos e seus respectivos valores de profundidades representados. Posteriormente, estes pontos foram organizados em planilhas no formato \*.xls, com suas respectivas coordenadas geográficas e cotas batimétricas. No total foram geradas duas planilhas com 10.958 e 10.346 pontos de cotas batimétricas dos anos de 1977 e 2002, respectivamente. Na figura 17 pode ser observado um mapa de localização dos pontos digitalizados em ambas as cartas.

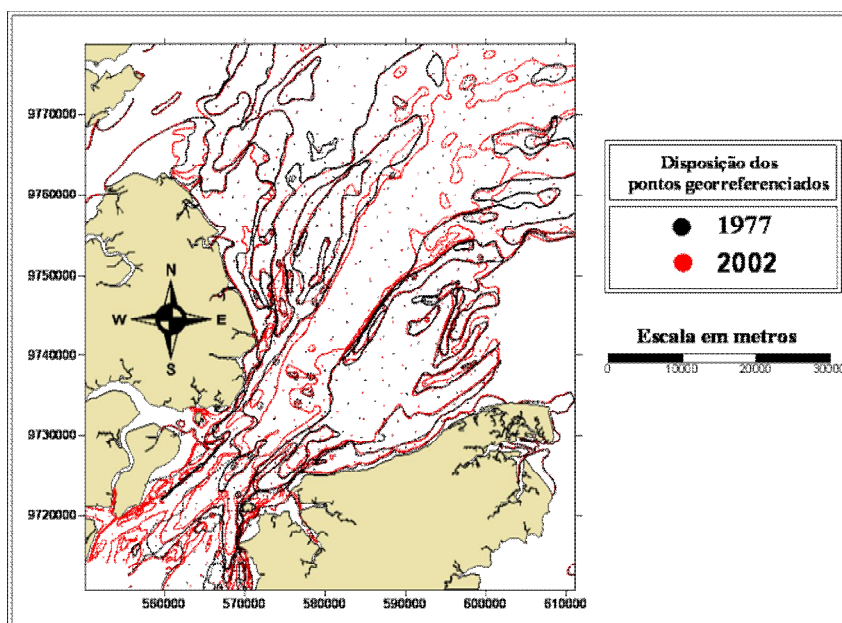


Figura 17: Mapa de disposição dos pontos digitalizados a partir das cartas náuticas editadas em 1977 e 2002 pela DHN - Marinha do Brasil.

#### 5.4 GERAÇÃO DE MAPAS DE CONTORNO BATIMÉTRICO E SUPERFÍCIES 3D

O banco de dados gerado com georreferenciamento das cotas batimétricas é bastante homogêneo no que se refere à escala de aquisição, o Datum utilizado e o sistema de projeção UTM. Além disso, os níveis de densidade de aquisição foram os mesmos, seguindo o espaçamento das cotas visualizadas nas cartas editadas pela DHN. Tal procedimento ajudou a aumentar a fidelidade dos modelos criados (mapas de contorno e superfície 3D) em relação à real situação em que se encontra a morfologia de fundo da área em apreço.

As malhas ou grades foram geradas através de procedimentos matemáticos que ajustam uma função para áreas não amostradas, baseando-se em valores de pontos amostrados e sua vizinhança. Esse processo teve como resultado uma estrutura de grade em que os nós do reticulado, especialmente referenciados numa superfície dimensional, compreendem os

valores codificados com atributos numéricos de elevação (GOMES; VITAL; MACEDO, 2007).

A malha foi gerada de maneira que produzisse uma superfície suavizada, capaz de evitar falsas representações geométricas dos elementos morfológicos alvos do estudo (FELGUEIRAS, 2004 apud GOMES; VITAL; MACEDO, op cit.).

Para escolher o melhor interpolador para processar os dados das planilhas, foi utilizado o software Surfer 8.0, experimentando, a partir do método de geração de malhas definido como Grades Regulares Retangulares (GRID) os seguintes interpoladores geoestatísticos: inverso da distância, kriging, vizinho mais próximo, método de Shepard, regressão polinomial, função de base radial, triangulação com interpolação linear. Dentre os interpoladores, o kriging foi o que obteve resultados mais satisfatórios. Este método geoestatístico é usado quando estiverem presentes tanto tendências regionais quanto locais, existirem muitas medidas e estiverem irregularmente amostradas.

As planilhas de dados batimétricos foram exportadas do software Trackmaker Professional para o software Surfer 8.0, onde foram processadas gerando um arquivo em extensão \*.dat, para interpolação de todos os pontos contendo valores das coordenadas (latitudes-x e longitudes-y) e das cotas batimétricas (z) para, então, gerar as malhas. Ambos os grids gerados apresentaram 100 linhas e 90 colunas, totalizando 9000 nós a serem interpolados.

Posteriormente, foi gerado o mapa de contorno batimétrico em escala de 1:135.000 e com espaçamento de 5 m entre as curvas de nível, bem como as superfícies 3-D com paleta de cores similares àquelas adotadas pela DHN para representar as profundidades, contrastar e delinear as diferentes formas de fundo no espaço e no tempo, conforme demonstrado na figura 18.

A identificação das feições de fundo foi baseada nos produtos gerados no presente trabalho, e suas respectivas toponímias basearam-se em informações contidas nas cartas náuticas utilizadas e em outros trabalhos realizados na área em apreço.

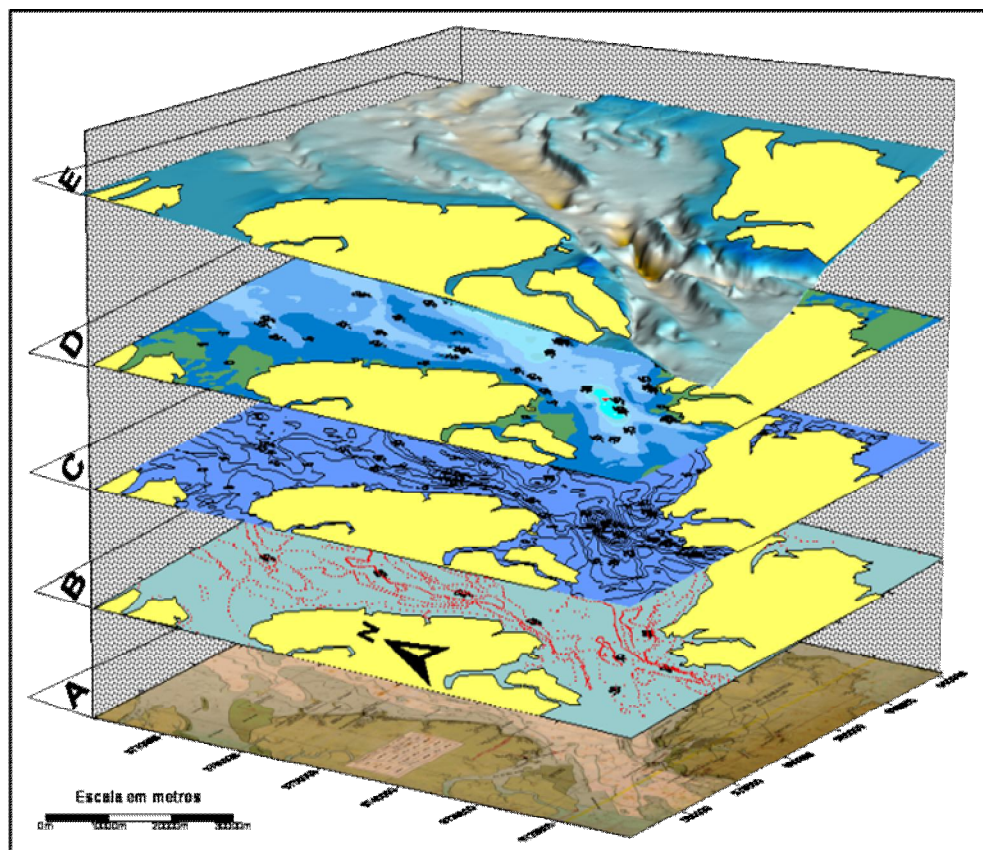


Figura 18: Esquema sequencial das etapas seguidas. A – Base cartográfica representada pelo recorte da Carta Batimétrica da Baía de São Marcos de 1977; B – Mapa de localização dos pontos digitalizados; C – Contornos batimétricos gerados com a interpolação dos pontos; D – Mapa de Contorno Batimétricos e; E – Superfície 3-D resultante da interpolação dos pontos digitalizados.

## 5.5 PERFIS BATIMÉTRICOS

A geração dos perfis batimétricos é muito importante para a análise multitemporal da morfologia de fundo, pois ilustra de maneira mais objetiva o comportamento espaço temporal das formas de fundo. Foram traçados nove (09) perfis batimétricos transversais às margens da Ilha de São Luís (leste) e cidade à Alcântara (oeste), dispostos sequencialmente de montante para jusante. A localização dos perfis teve como critério de escolha os locais onde se encontravam feições de fundo (canais, barras) e que apresentavam uma modificação espaço-temporal bem definida.

Os perfis batimétricos foram gerados através da utilização dos softwares Global Mapper 8.0 e Grapher 2.01. Através da utilização da função *3D Path Profile/Line of Sight tool* do software Global Mapper, os valores de profundidades verificados em pontos localizados sobre as linhas demarcatórias dos perfis, bem como a distância entre estes pontos (intervalo de 15 em 15 metros) foram registrados e organizados em planilhas no formato \*.xls que, posteriormente, foram inseridas no software Grapher 2.01, para geração dos gráficos.



No software Grapher 2.01, para que os gráficos apresentassem melhores condições para a análise multitemporal, foi necessário alterar seus exageros verticais e horizontais em uma proporção de 8:1 e aplicar o suavizador *spline smooth* no máximo fator de tensão (50).

## 5.6 DIMENSIONAMENTO DAS FORMAS DE FUNDO

A etapa correspondente ao dimensionamento das feições de fundo foi realizada no software Global Mapper 8.0, por meio da utilização da função “*digitizer tool*”, onde foram medidos os eixos longitudinais e laterais das barras e mensuradas as larguras das seções transversais aos canais. As medições foram feitas tomando como referência as isóbatas de 10 m e as seções transversais, a partir das isóbatas de 20 m.

Foram medidos separadamente os eixos longitudinais e laterais da cada contorno, os quais posteriormente foram sobrepostos para que fossem quantificadas as diferenças entre as dimensões, incluindo os valores de diferença de cada extremidade (figura 19).

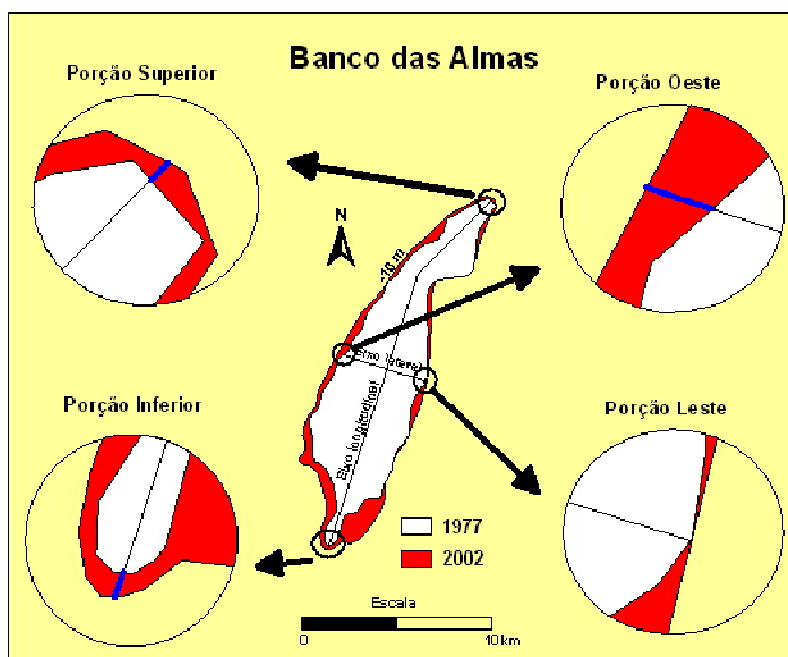


Figura 19: Ilustração da metodologia utilizada para as medições das dimensões das barras. As linhas azuis indicam a diferença entre cada extremidade dos eixos medidos.

Os valores de todas as medições foram reunidos em duas tabelas, sendo uma contendo somente os valores de cada dimensão nos anos de 1977 e 2002, e outra contendo os valores das diferenças entre as extremidades dos eixos. Optou-se por efetuar as medições das extremidades das feições, para se ter uma idéia geral das variações quantitativas

multitemporais sofridas pelas feições, bem como identificar zonas de erosão e deposição, que por ventura estivessem ocorrendo em uma mesma feição.

O dimensionamento das feições possibilitou o cálculo de outras variáveis julgadas importantes para a análise multitemporal, tais como tendência de comportamento de cada extremidade e seus valores (crescimento, erosão, deslocamento), percentuais (p. ex: percentual de crescimento), taxas anuais de variação espacial tanto da estrutura em geral (taxa total) quanto de cada extremidade (taxa parcial). Para as seções transversais foi adotada a mesma metodologia.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 ANÁLISE BATIMÉTRICA MULTITEMPORAL

Para fins de descrição das características batimétricas, a área de estudo foi subdividida em dois setores, norte e sul, adotando como critérios de diferenciação o setor estuarino mais estreito, abrigado e onde se localiza a área de influência do Porto do Itaqui (setor sul) e o setor de conexão com a plataforma continental adjacente (setor norte).

A análise batimétrica da área em estudo permite evidenciar diversas modificações, evidenciando o caráter altamente dinâmico da região. Na figura 20 podem ser visualizados os mapas batimétricos correspondentes aos anos de 1977 e 2002, onde podem ser acompanhadas as modificações batimétricas ao longo de duas décadas e meia.

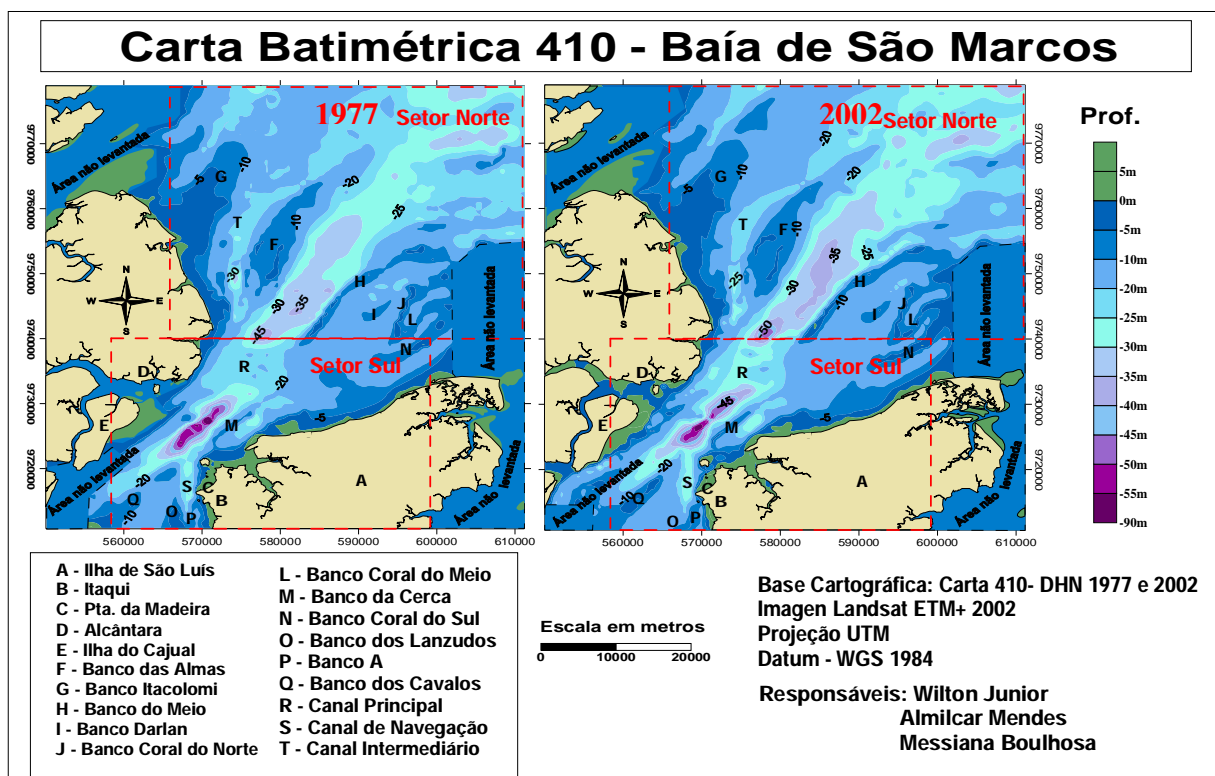


Figura 20: Análise comparativa das cartas batimétricas editadas pela DHN em 1977 (esquerda) e 2002 (direita).

A área de estudo apresenta um canal principal orientado no sentido NE-SW, a um ângulo de aproximadamente  $37^\circ$ , com um comprimento em torno de 75 km. Considerando a isóbata de 20 m, sua largura de 6600 m não varia significativamente, exceto na região próxima ao Banco da Cerca, onde sofre um estreitamento para 2.740 m.

Em 1977, na porção norte do canal principal, a maior profundidade era de 30 m e, em 2002, foram registradas profundidades máximas de 35 m, ou seja, um aumento de 16,6%. Na região inferior do setor norte a profundidade máxima registrada foi de 45 m em 1977, enquanto que em 2002 esse valor aumentou para 50 m, isto é, um incremento de 11%. No canal intermediário, situado entre os bancos Itacolomi e das Almas, no ano de 1977 foi registrado um valor máximo de 30 m próximo à base do Banco das Almas, porém, em 2002 a maior cota batimétrica registrada foi de 25 m, o que denota uma redução de 16,6% na profundidade.

No setor sul está localizada a região em que foram registrados os maiores valores de profundidade da área em estudo, notadamente na parte central do canal, entre as cidades de Alcântara e São Luís. Foram registrados valores de até 85 m de profundidade em 1977 e, em 2002, os maiores valores foram de 60 m, denotando uma redução em torno de 30%.

No Canal de Navegação situado em frente ao Porto do Itaqui a maior profundidade registrada em 1977 foi de 28 m, porém, em 2002, foram registrados valores máximos de 30 m. Cabe ressaltar que a Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) possui um Plano Anual de Dragagem do Porto do Itaqui, para manter a estabilidade da profundidade do canal em torno de 30 m.

## 6.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FEIÇÕES MORFOLÓGICAS DE FUNDO

Foram identificadas dez (10) principais feições, sendo oito (8) correspondentes a forma de acumulação sedimentar, ou seja, bancos arenosos. Dois (2) canais foram identificados e, para fins de nomenclatura no presente estudo foram denominados como Canal Principal e Canal Intermediário.

O Canal Principal corta os setores norte e sul da área de estudo. É um canal retilíneo e apresenta formato em U no setor norte e em V no setor sul, enquanto que o Canal Intermediário, localizado no setor norte, entre os bancos Itacolomi e das Almas, é arqueado com configuração geométrica em forma de U. O Canal Principal apresenta profundidades máximas superiores a 60 m, ao passo que no Canal Intermediário as profundidades máximas não ultrapassam 30 m.

Os bancos arenosos identificados foram: Itacolomi, das Almas, do Meio, Complexo de Bancos Coral (composto por Coral do Norte, do Meio e do Sul), da Cerca, dos Cavalos, Lanzudos e Banco "A", este último como identificado por El-Robrini (1990).

As feições de fundo encontradas na área de estudo são, segundo a classificação de Perillo (1995), caracterizadas como barras alongadas de maré, que apresentam comprimento variando de 4,15 km a 20,4 km, larguras de 0,7 a 5,6 km, em profundidades médias que variam de 17 e 20 m. As barras estão fortemente associadas ao regime de macromarés da região que, segundo Feitosa (1989), atingem 7,2 m de altura e velocidades de correntes de 3,9 m/s (DHN, 1972) na região da foz da Baía de São Marcos, com corrente de vazante mais intensa que a de enchente. De maneira geral, a configuração morfológica de fundo da Baía de São Marcos é altamente dinâmica, com depósitos sedimentares em forma de bancos móveis, controlados pelos fluxos de macromarés atuantes.

Na Figura 21 pode ser observado a disposição multitemporal (1977-2002) das formas de fundo na Baía de São Marcos, as quais serão descritas em detalhes a seguir.

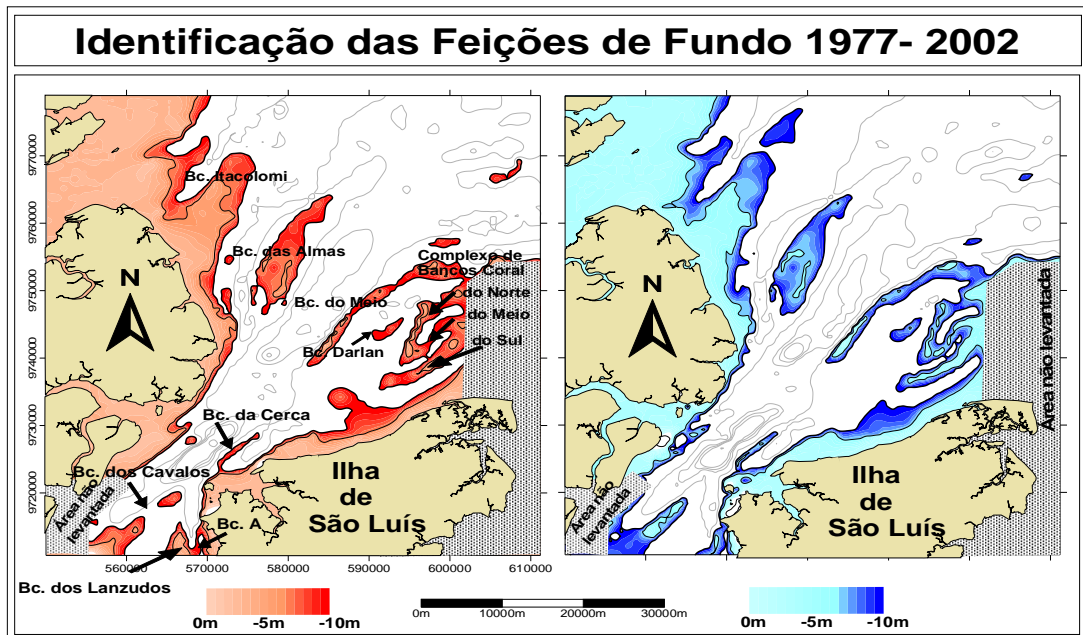


Figura 21: Mapa de visualização geral das feições de fundo de 1977 (à esquerda) e 2002 (à direita).

### 6.2.1 Bancos Itacolomi e Banco das Almas

Os bancos Itacolomi e das Almas (figura 22) são estruturas sedimentares longitudinais, orientadas na direção NE e que, de acordo com informações contidas nas cartas batimétricas consultadas, são compostos por areia média, provavelmente refletindo o fato dessas macroformas estarem submetidas a fluxos reversos sob condições de energia intensa, o que inviabiliza a deposição de material mais fino. Além disso, a orientação desses bancos na direção NE está em concordância com a direção padrão dos fluxos reversos de correntes de

maré enchente e vazante, e com a direção preferencial do sistema de ventos ocorrentes na região, que segundo dados do Porto de Itaquí (2008), apresentam uma frequência de ocorrência de 46%.

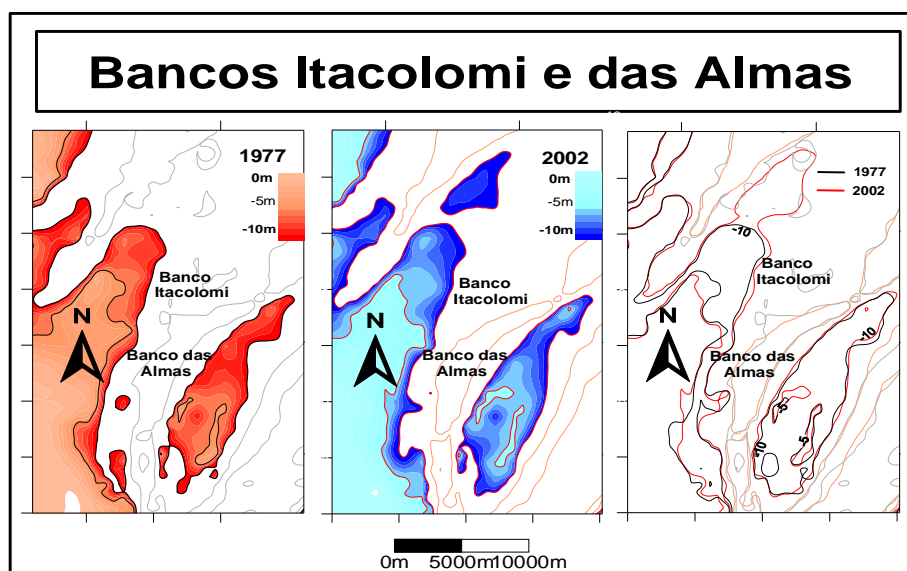


Figura 22: Mapas dos Bancos Itacolomi e das Almas delineados pela isóбата de referência (10 m).

### 6.2.2 Banco do Meio e Complexo do Coral e Banco Darlan

O Banco do Meio corresponde a uma barra arenosa alongada, que também pode ser definido como uma barra linear marginal ao canal, orientada na direção NE em seus setores inferior e médio e com uma leve inflexão para SE em seu setor superior. Segundo informações contidas nas cartas náuticas, esse banco é composto por areias finas e sua parte inferior emerge durante a baixamar.

De acordo os dados do estudo multitemporal das formas de fundo, esta feição está sofrendo um deslocamento longitudinal para NE. As isóbatas que compõem a borda leste do Banco do Meio são mais espaçadas entre si do que as presentes no setor oeste, o que permite inferir que a borda leste apresenta uma topografia suave e a borda oeste apresenta-se mais inclinada, o que é natural, visto que esta é justamente a que está em contado direto com o canal principal, estando, portanto, sujeita a maior energia de fluxo e capacidade de mobilização sedimentar (figura 23).

O Complexo do Coral é uma assembléia de barras alongadas e semiparalelas, dispostas em formato zig-zag, provavelmente formadas a partir da interação entre o fluxo

reverso, a margem litorânea e o fundo. Este complexo apresenta zonas de deposição, erosão e, ao mesmo tempo, deslocamentos para NE (Coral do Norte e do Meio) e para SW (Coral do Sul). Segundo Ashley (1990) essas zonas de erosão e deposição existem em virtude do caráter plano-paralelo das feições em relação ao fluxo, que apresenta repetitivos padrões de convergência e divergência de linhas de fluxo interagindo com o fundo pouco coeso. Portanto, a partir da configuração morfológica, é possível identificar canais de vazante separados pelas barras em zig-zag. Perillo (1995) se refere a esses canais como “*swatchways*”, que indicam a tendência das modificações espaço-temporais das barras (figura 31).

O Banco Darlan, situado entre o Banco do Meio e o Complexo Coral, assim como as demais feições, corresponde a uma barra arenosa alongada que está sujeita ao fluxo reverso de maré e que se desloca para SW (figura 31).

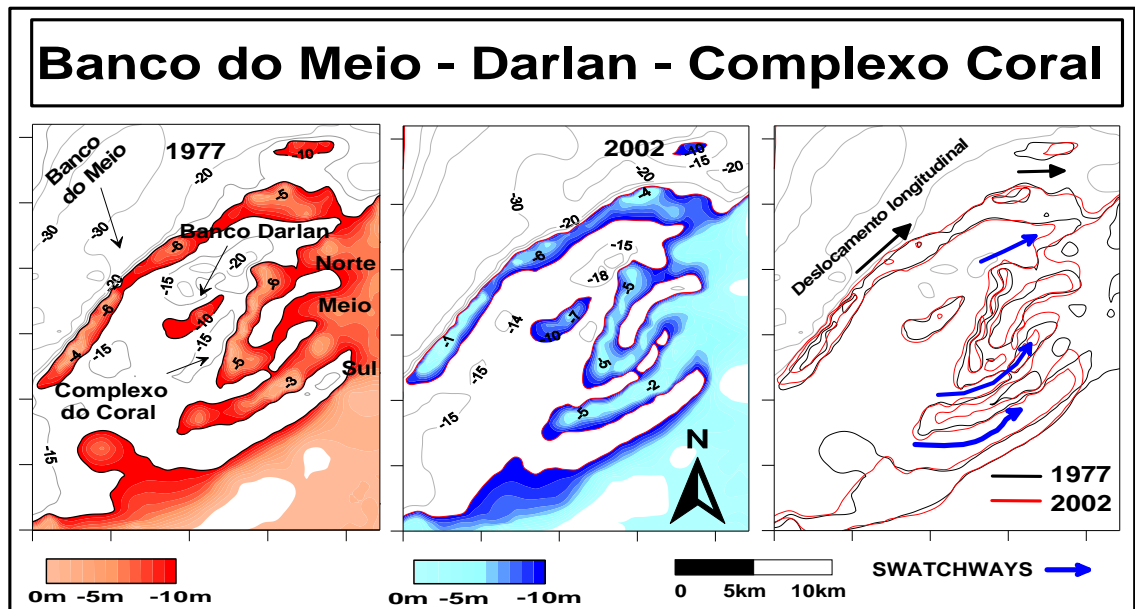


Figura 23: Mapa dos Bancos do Meio, Darlan e Complexo de Bancos Coral do Norte, Coral do Meio e Coral do Sul. O terceiro mapa está mostrando a direção preferencial de deslocamento das formas de fundo para NE e leste (setas pretas) na porção superior do Banco do Meio. As setas azuis correspondem aos *swatchways*, pequenos canais existentes entre as cadeias de barras, conforme descrito por Perillo (1995).

### 6.2.3 Banco da Cerca

O Banco da Cerca é uma barra arenosa alongada marginal ao Canal Principal. Assim como os demais, o Banco da Cerca apresenta-se como uma estrutura sedimentar disposta

longitudinalmente à direção dos fluxos reversos de maré. Segundo informações contidas nas cartas náuticas, esse banco é exposto durante a maré baixa (figura 24).

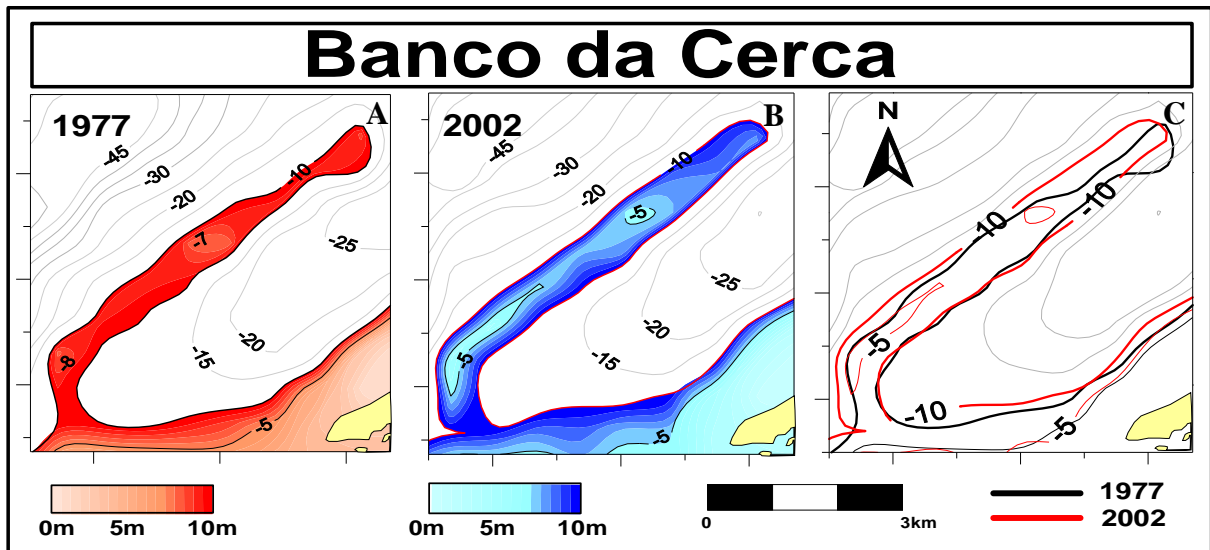


Figura 24: Mapas do Banco da Cerca delineado pela isóбата de 10 m nos anos de 1977(A) e 2002 (B) e (C) mapa de análise multitemporal (1977-2002).

#### 6.2.4 Banco dos Cavalos, dos Lanzudos e Banco A

O Banco dos Cavalos (figura 25) está localizado na zona de junção dos canais que formam o Canal Principal. Corresponde a uma barra alongada de maré, com extensão kilométrica e orientada para NE.

Em 1977 o Banco dos Lanzudos correspondia a uma barra alongada de maré bem desenvolvida. No intervalo de tempo estudado (1977-2002), este banco teve a porção superior de seu eixo longitudinal erodida em 81,2% de seu comprimento (3.900 m).

O Banco A experimentou uma expansão tanto longitudinal quanto lateral, além de se deslocar 430 m no sentido leste. Considerando o comportamento erosional no Banco dos Lanzudos é possível inferir que o Banco A tenha recebido os sedimentos provenientes do primeiro, crescendo e deslocando-se para leste, com tendência para integrar a região de planície de maré na margem esquerda do canal.



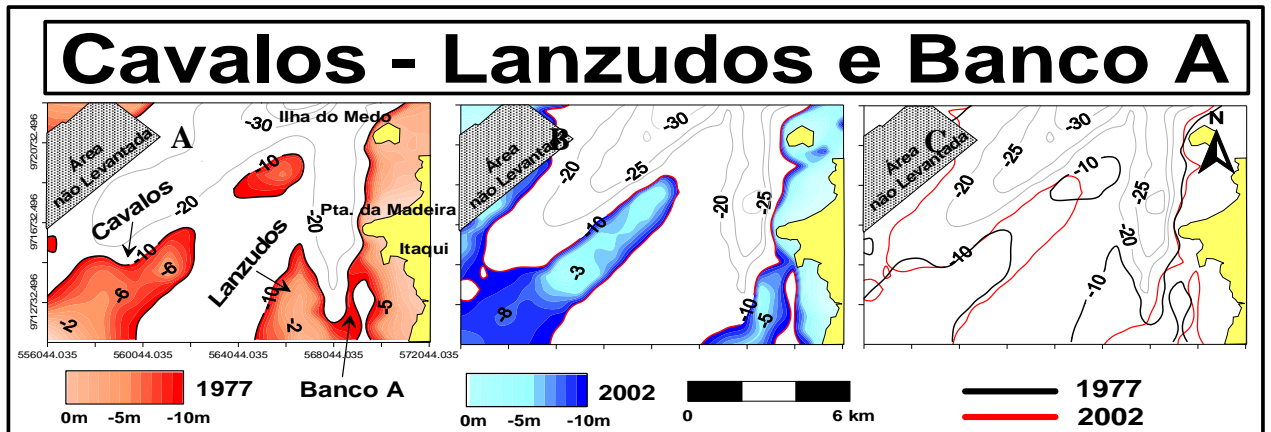


Figura 25: Mapa do Banco dos Cavalos, Lanzudos e Banco A, delineados pela isóbata de 10 m nos anos de 1977(A) e 2002(B) e (C) mapa de análise multitemporal (1977-2002).

Com o intuito de visualizar as modificações sofridas pelas formas de fundo no período de 1977-2002, bem como a configuração espacial dos canais e barras arenosas, foram gerados modelos numéricos tridimensionais que podem ser observados nas figuras 26 e 27.

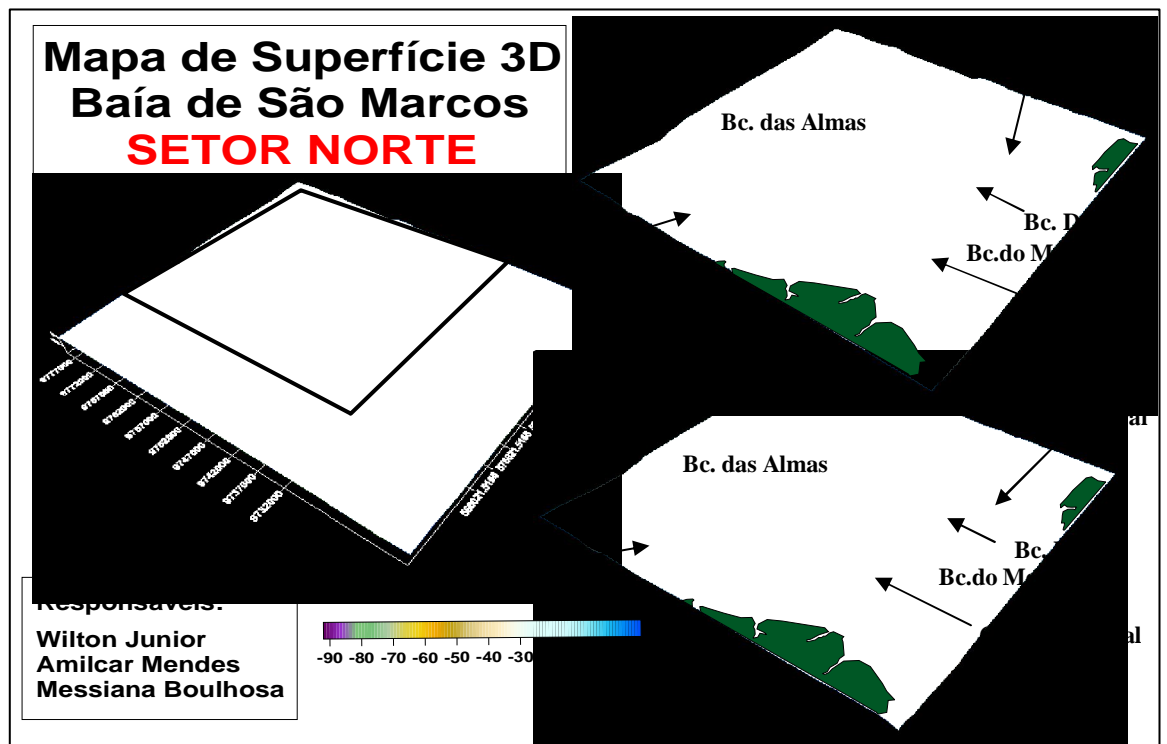


Figura 26: Análise comparativa tridimensional do setor norte.

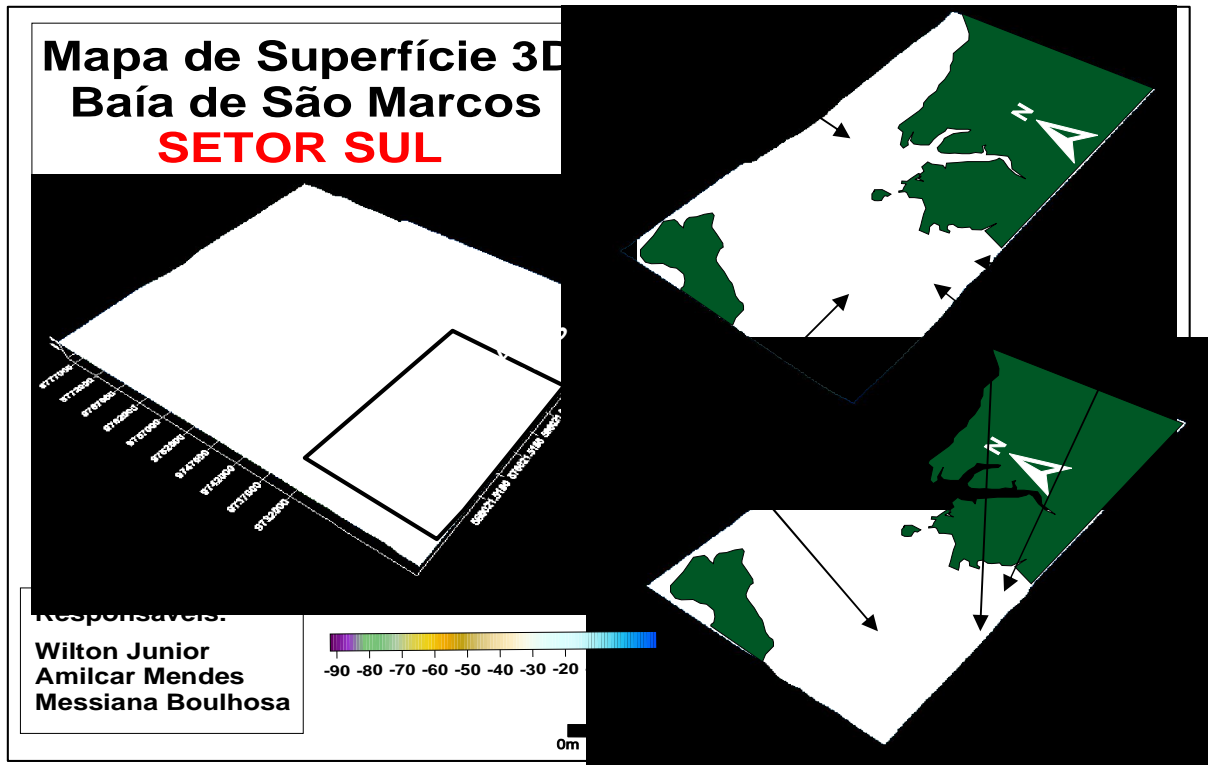


Figura 27: Análise comparativa tridimensional do setor sul.

### 6.3 ANÁLISE QUANTITATIVA MULTITEMPORAL DAS FORMAS DE FUNDO

A figura 28 mostra um mapa esquemático para melhor visualização do dimensionamento e comportamento espaço-temporal das formas de fundo.

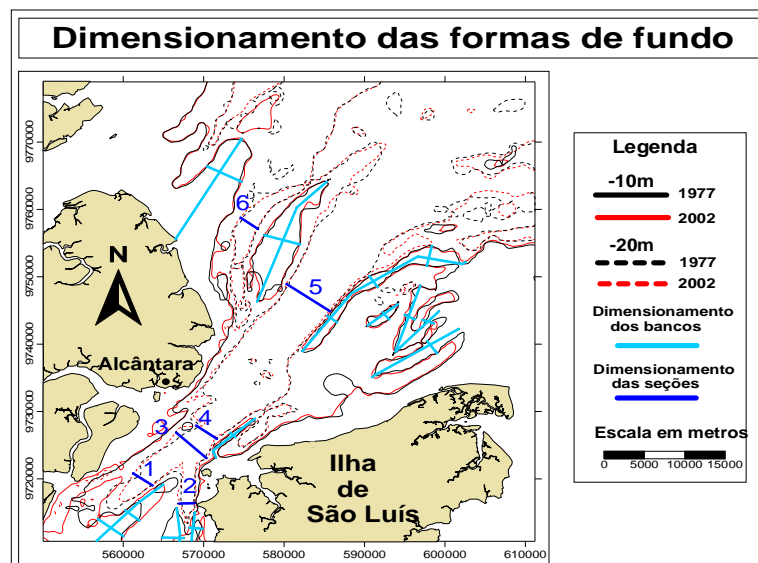


Figura 28: Mapa esquemático multitemporal do dimensionamento das feições de fundo.

A tabela 2 mostra o resultado do dimensionamento dos bancos arenosos e, na tabela 3, estão contidas as variações dimensionais multitemporais, as taxas de crescimento e/ou deslocamento e direção dessas variações ocorridas nas extremidades dos eixos longitudinais e laterais.

Tabela 2: Resultados do dimensionamento dos bancos arenosos em 1977 e 2002.

BANCOS	DIMENSÕES			
	COMPRIMENTO (m)		LARGURA (m)	
	1977	2002	1977	2002
ITACOLOMI	17000	17070	5620	5790
ALMAS	20400	20800	4510	4670
MEIO	26100	26815	1290	1419
			1740	1970
			2860	2620
DARLAN	5140	5213	1410	1750
CORAL DO NORTE	10700	10619	1030	994
CORAL DO MEIO	8620	8206	1040	1327
CORAL DO SUL	12500	12966	1740	1980
CERCA	8180	8180	752	899
CAVALOS	7370	11200	3820	3970
			2010	2250
LANZUDOS	4801	1005	2660	901
BANCO A	4150	4230	819	1650

Tabela 3: Valores das variações sofridas pelas extremidades nos eixos longitudinais (LONG.) e laterais (LAT.) dos bancos arenosos.

BANCO	EIXOS	Extremidades	Intervalo	Tendência	Distancia (m)	%	Azimute		Taxa (m/ano)	
							Graus	Rumo	total	parcial
ITACOLOMI	LONG.	SUPERIOR	72m - NE	CRESCIMENTO	72	0,42	29°	NE	2,89	2,89
		INFERIOR	0						0	0
	LAT.	OESTE	243m - NW	CRESCIMENTO	170	3	304°	NW	6,8	9,7
		LESTE	73m - NW	DESLOCAMENTO	170	3			6,8	2,9
ALMAS	LONG.	SUPERIOR	288m - NE	CRESCIMENTO	393	1,92	64°	NE	15,7	11,5
		INFERIOR	105m - SW	DESLOCAMENTO	183	0,89			7,32	7,3
	LAT.	OESTE	160m - NW	CRESCIMENTO	160	3,54	287°	NW	6,4	6,4
		LESTE	0						0	0
MEIO	LONG.	SUPERIOR	460m - NE	CRESCIMENTO	715	2,7	56°/101°	NE/SE	28,6	18,4
		INFERIOR	255m - NE	DESLOCAMENTO	205	0,78			8,2	10,2
	LAT. SUP.	OESTE	40m - NE	CRESCIMENTO	240	0,91	12°	NE	9,6	1,6
		LESTE	200m - NE	DESLOCAMENTO	160	5,5			6,4	8
	LAT. CENT.	OESTE	95m - NW	CRESCIMENTO	230	13,2	327°	NW	9,2	3,8
		LESTE	135m - SE	DESLOCAMENTO	40	2,29			1,6	5,4
	LAT. INF.	OESTE	195m - NW	CRESCIMENTO	270	20,9	307°	NW	10,8	7,8
		LESTE	75m - SE	DESLOCAMENTO	120	9,3			4,8	3
DARLAN	LONG.	SUPERIOR	135m - NE	CRESCIMENTO	343	6,6	228°	SW	13,72	5,4
		INFERIOR	208m - SW	DESLOCAMENTO	73	1,4			2,92	8,3
	LAT.	OESTE	173m - NW	CRESCIMENTO	340	24,1	321°	NW	13,6	6,9
		LESTE	167m - SE	DESLOCAMENTO	6	0,42			0,24	6,6
CORAL DO NORTE	LONG.	SUPERIOR	194m - NE	EROSÃO	81	4,6	20°	NE	19,8	7,76
		INFERIOR	275m - NE	DESLOCAMENTO	81	0,75			3,2	11
	LAT.	OESTE	221m - NW	CRESCIMENTO	408	39,6	298°	NW	16,3	8,84
		LESTE	187m - NW	DESLOCAMENTO	34	3,3			1,3	7,48
CORAL DO MEIO	LONG.	SUPERIOR	0	EROSÃO	414	4,8	40°	NE	16,56	16,56
		INFERIOR	414m - NE						0	0
	LAT.	OESTE	164m - NW	CRESCIMENTO	287	27,5	290°	NW	11,48	6,56
		LESTE	123m - SE	DESLOCAMENTO	41	3,9			1,64	4,92
CORAL DO SUL	LONG.	SUPERIOR	0	CRESCIMENTO	240	13,7	237°	SW	18,64	18,64
		INFERIOR	466m - SW						0	0
	LAT.	OESTE	150m - NW	CRESCIMENTO	240	13,7	320	NW	9,6	6
		LESTE	90m - SE	DESLOCAMENTO	60	3,4			2,4	3,6
CERCA	LONG.	SUPERIOR	0	ESTABILIDADE	0	0	40°	-	0	0
		INFERIOR	0						0	0
	LAT.	OESTE	65m - NW	CRESCIMENTO	147	19,5	135°	SE	5,8	2,6
		LESTE	82m - SE	DESLOCAMENTO	17	2,2			0,68	3,2
CAVALOS	LONG.	SUPERIOR	3260m - NE	CRESCIMENTO	3260	41	50°	NE	130,4	130,4
		INFERIOR	0						0	0
	LAT. SUP.	OESTE	45m - NW	CRESCIMENTO	240	11,9	130°	SE	9,6	1,8
		LESTE	195m - SE	DESLOCAMENTO	150	7,4			6	7,8
	LAT. INF.	OESTE	133m - NW	CRESCIMENTO	100	2,58	130°	SE	4	5,3
		LESTE	233m - SE	DESLOCAMENTO	100	2,58			4	9,3
LANZUDOS	LONG.	SUPERIOR	3900m - SE	EROSÃO	3900	81,23	174°	SE	156	156
		INFERIOR	0						0	0
	LAT.	OESTE	1759m - NE	EROSÃO	1759	66,1	94°	SE	70,3	70,3
		LESTE	0						0	0
BANCO A	COMPR.	SUPERIOR	80m - NE	CRESCIMENTO	80	1,92	5°	NE	3,2	3,2
		INFERIOR	0						0	0
	LAT..	OESTE	197m - NW	CRESCIMENTO	831	101,1	95°	SE	33,24	7,8
		LESTE	634m - SE	DESLOCAMENTO	437	53,3			17,4	25,3

O Banco Itacolomi cresceu apenas 0,42% em comprimento em 25 anos, o que equivale a 72m, que permite estabelecer uma taxa de crescimento longitudinal de 2,89 m/ano. Quanto a sua largura, esta aumentou apenas 3% (170 m) e sofreu um pequeno deslocamento de 170 m para NW, o que representa 3% da largura inicial. A taxa de crescimento e deslocamento lateral foi igual, correspondendo a 6,8 m/ano.

A exemplo do Banco Itacolomi, o Banco das Almas não apresentou grandes variações em suas dimensões, apresentando um crescimento longitudinal de 393 m para NE e lateral de 160 m para NW, o que, em termos percentuais, corresponde a 1,9% e 3,5%, respectivamente.

Em termos de extensão, o Banco do Meio é a maior forma de fundo mapeada na área de estudo. Em 25 anos seu eixo longitudinal variou de 26,1 km para 26,8 km. Apresenta formato levemente encurvado, onde sua extremidade inferior é direcionada para SE e a superior desloca-se para NE. O crescimento longitudinal foi de 2,7% para NE, enquanto que as larguras das porções central e sul apresentaram crescimento médio de 250m (10,8% das larguras iniciais) e deslocamento de 80 m para NW. A largura do setor superior cresceu 0,91% e se deslocou 5,5% na direção NE.

O Banco Darlan é o menor banco em extensão do setor norte, variando de 5,14 km, em 1977, para 5,21 km em 2002. Ao longo da faixa temporal estabelecida para o presente estudo seu crescimento longitudinal foi de 6,6 %, deslocando-se para SW, ao passo que suas larguras cresceram 24,1%, com leve deslocamento para NW.

O Banco Coral do Norte apresentava em 1997 comprimento de 10.700 m, que diminuiu para 10.619 m em 2002, sofrendo, portanto, erosão de 275 m no setor inferior de eixo longitudinal, mas equilibrado pelo crescimento da extremidade norte em 194 m. sendo que no setor superior ocorreu um crescimento de 194 m. O balanço entre erosão e crescimento em seu eixo longitudinal resultou em um leve deslocamento de 81 m para 20°NE, o que corresponde a uma taxa de deslocamento longitudinal de 3,2m/ano. A largura aumentou 408 m, o que corresponde a um incremento de 39,6%, perfazendo uma taxa de crescimento lateral de 16,3 m/ano para NW.

O Banco Coral do Meio sofreu uma pequena erosão de 414 m na extremidade inferior do seu eixo longitudinal, o que corresponde a 4,8% do valor do comprimento inicial, remetendo a uma taxa de recuo de 16,5 m/ano na direção NE.

O Banco Coral do Sul foi o único do Complexo do Coral que apresentou crescimento longitudinal na direção SW. Seu comprimento variou de 12,5 km para 12,9 km e esse crescimento longitudinal se deu na porção inferior do eixo, que cresceu cerca de 466m, ou seja, o correspondente a 13,7%, o que remete a uma taxa de crescimento longitudinal de 18,6m/ano. Sua largura aumentou de 12,5 km, em 1977, para 12,9 km em 2002, caracterizando um crescimento lateral de 240 m e um leve deslocamento de 60 m na direção NW. A taxa anual de crescimento lateral foi de 9,6 m e, de deslocamento, de 2,4 m.

O Banco da Cerca apresentava em 1977 um comprimento de 8.180 m e, em 2002, esse valor diminuiu para 7.975 m, caracterizando uma erosão de 205 m ocorrida na porção inferior

de seu eixo longitudinal. Em termos percentuais essa erosão representa 2,5% do comprimento inicial, caracterizando uma taxa de recuo de 8,2 m/ano para a direção NW. Suas larguras são as menores registradas na área de estudo, correspondentes a 752 m, em 1977, e 899 m em 2002. Houve um crescimento lateral de 408 m, correspondente a 39,6% do valor lateral inicial, caracterizando uma taxa de crescimento de 16,3 m/ano e um leve deslocamento (1,3 m/ano) para 62°NW.

O Banco dos Cavalos foi o que apresentou o maior crescimento longitudinal na área de estudo, totalizando 3.260 m, na direção 50°NE, o equivalente a 41% do seu comprimento inicial, correspondendo a uma taxa de crescimento longitudinal de 130,3 m/ano. Seu eixo lateral superior é menor que o inferior e ambos experimentaram deslocamento de 150 m e 100 m, correspondentes a uma taxa de deslocamento de 7,4 e 2,8 m/ano, respectivamente.

O Banco A cresceu apenas 80 m em seu eixo longitudinal (1,9 % do comprimento inicial), mediante um taxa de crescimento longitudinal de 3,2 m/ano. Contudo, experimentou considerável crescimento lateral, deslocando-se para leste. Seu crescimento lateral foi de 197 m na borda oeste e 634 m na borda leste. Portanto, o Banco A se deslocou 437 m em direção a linha de costa e tende a estabelecer-se na forma de uma planície de maré. A taxa de deslocamento lateral para leste foi de 17,4 m/ano.

Além do dimensionamento dos bancos arenosos, foram traçadas seis (6) seções transversais ao eixo principal da Baía de São Marcos, objetivando a análise multitemporal das mudanças ocorridas nas formas de fundo. A tabela 4 mostra os valores das larguras em 1977 e 2002 e a figura 29 mostra suas respectivas localizações. Na tabela 5 estão contidas as variações ocorridas em da cada margem em termos quantitativos, incluindo crescimento, erosão, deslocamentos e direções.

Tabela 4: Valores das larguras das seções transversais aos canais em 1977 e 2002.

SEÇÃO	LARGURA (m)	
	1977	2002
1	1660	2150
2	1970	2970
3	4320	5450
4	2740	2780
5	6650	6690
6	2480	2620

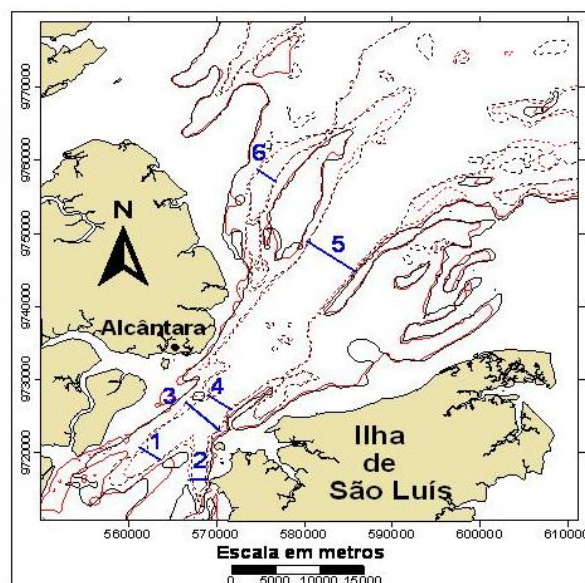


Figura 29: Mapa de localização das seções.

Tabela 5: Valores das modificações sofridas em cada margem das seções.

SEÇÃO	EXTREIMIDADES	DESLOCAMENTO (m)	TENDÊNCIA	DISTÂNCIA (m)	%	Direção		Taxa (m/ano)	
						Azimute	total	parcial	
1	marg. Leste	0	CRESCIMENTO	490	29	180°	19,6	0	
	marg. Oeste	490m - W						19,6	
2	marg. Leste	116m - SE	CRESCIMENTO	1000	50,7	307°	30,7	4,6	
	marg. Oeste	884m - NW	DESLOCAMENTO	768	38,9			35,3	
3	marg. Leste	208m - SE	CRESCIMENTO	1130	26,1	315°	45,2	8,3	
	marg. Oeste	922m - NW	DESLOCAMENTO	714	16,5			36,8	
4	marg. Leste	190m - NW	CRESCIMENTO	40	1,4	305°	1,6	7,6	
	marg. Oeste	230m - NW	DESLOCAMENTO	40	1,4			9,2	
5	marg. Leste	130m - NW	CRESCIMENTO	40	0,6	304°	1,6	5,2	
	marg. Oeste	170m - NW	DESLOCAMENTO	40	0,6			6,8	
6	marg. Leste	130m - NW	CRESCIMENTO	140	5,6	308°	5,6	5,2	
	marg. Oeste	270m -NW	DESLOCAMENTO	140	5,6			10,8	

A seção 1 está localizada no canal de navegação em frente ao Terminal da Ponta da Madeira. Em 1977 apresentava 1.660 m e, em 2002, aumentou para 2.150 m. O alargamento de 490 m foi observado somente na margem oeste e corresponde a 29% da largura inicial. A taxa de crescimento do canal foi de 19,6 m/ano, na direção oeste.

A seção 2 está localizada no canal oeste, originado da bifurcação do Canal Principal. Em 1977 a largura registrada era de aproximadamente 1.970 m de largura e, em 2002, esse valor aumentou para 2.970 m, caracterizando o maior alargamento dentre as seções

analisadas, correspondendo, em termos percentuais, a 50,7% do valor inicial. Na seção analisada, o canal sofreu um deslocamento de 768 m para 307Az, o que corresponde a uma taxa de deslocamento anual de 30,7 m.

A seção 3 está localizada ao sul do Canal Principal e variou de 4.340 m para 5.710 m nos anos de 1977 e 2002, respectivamente. Essa variação corresponde a um crescimento de 26,1% e um deslocamento de 714 m para 315Az. A seção 3 apresentou a maior taxa de crescimento entre as seções analisadas, correspondendo ao valor de 45,2% e a taxa anual de deslocamento foi de 28,5 m.

A seção 4 está localizada próximo ao Banco da Cerca, na região mais estreita do Canal Principal. Essa seção apresentou um valor de 2.740 m, em 1977 e de 2.780 m, em 2002. Esse leve crescimento de 1,4% foi distribuído entre 190 m na margem leste e 230 m na margem oeste, caracterizando um leve deslocamento de 40 m para 305Az.

A seção 5 está localizada no setor norte da área de estudo, entre os bancos do Meio e das Almas. A referida seção mostra que essa área do canal permaneceu relativamente estável durante os anos de 1977 e 2002. Sua margem leste cresceu 130 m na direção NW e sua margem oeste erodiu 170 m na mesma direção, caracterizando um pequeno deslocamento de 40 m no sentido NW, que, em termos percentuais, corresponde a 0,6% do valor da largura inicial (6.650 m), o que remete a uma taxa de deslocamento de 1,6 m/ano.

No Canal Intermediário foi traçada a seção 6, que revelou valores de largura em torno de 2.480 m, em 1977 e 2.620 m em 2002. A margem leste cresceu 130 m na direção NW e a margem oeste sofreu erosão de 270 m, caracterizando um deslocamento de 140 m para 308Az, a uma taxa de 5,6 m/ano.

#### 6.4 ANÁLISE MULTITEMPORAL DOS PERFIS BATIMÉTRICOS TRANSVERSAIS

Para melhor elucidação das modificações sofridas pelas formas de fundo, foram traçados nove (9) perfis batimétricos transversais ao eixo longitudinal da Baía de São Marcos, conforme demonstrado na figura 30.



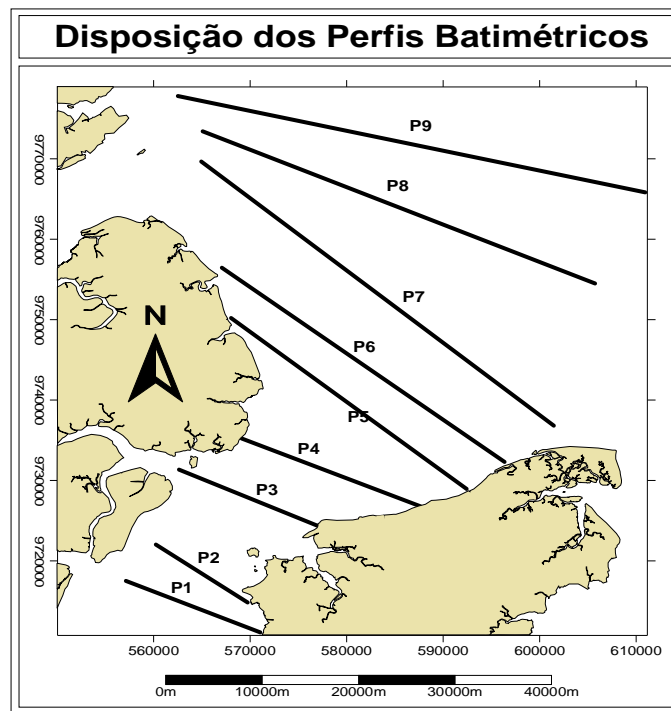


Figura 30: Localização dos perfis batimétricos transversais traçados na Baía de São Marcos.

No perfil batimétrico P1 estão explícitos os resultados mostrados no tópico relativo ao dimensionamento das formas de fundo, onde o Banco dos Cavalos sofre um deslocamento lateral de 150m para SE, além de evidenciar a diminuição de aproximadamente 3 m na cota batimétrica. Além disso, é possível observar a erosão do Banco dos Lanzudos e crescimento vertical do Banco A, denotado pela diminuição de profundidade, de 10 m para 5 m (figura 31).

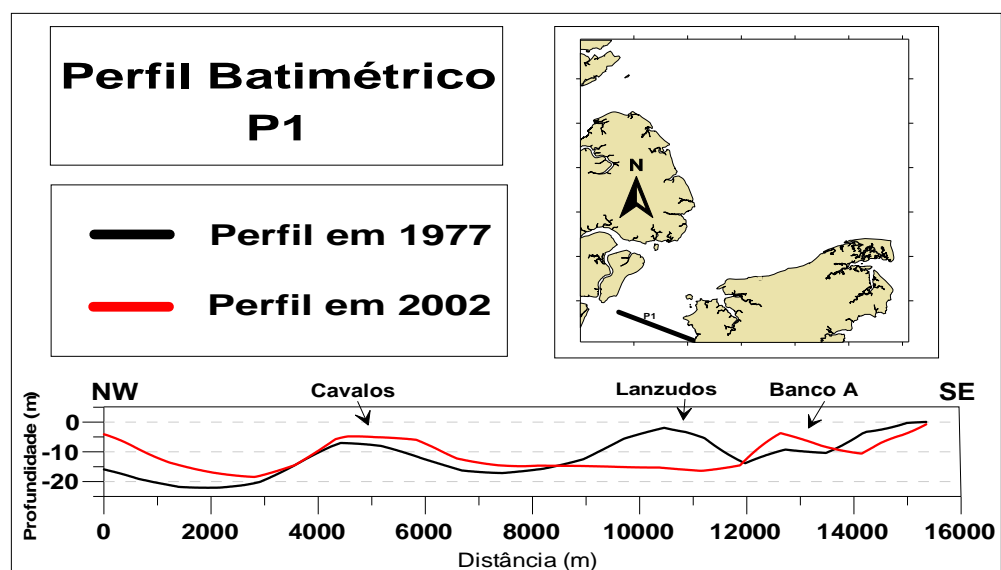


Figura 31: Perfil batimétrico multitemporal P1.

O perfil P2 mostra o processo de erosão de aproximadamente 1.000 m no sentido NW, ocorrido na margem esquerda da bifurcação oeste do Canal Principal, no sentido NW e mostra o desenvolvimento do Banco dos Cavalos. Além disso, apesar de não coincidir espacialmente com a seção 2, através do perfil P2 é possível observar o alargamento do Canal de Navegação, além do aprofundamento da calha em aproximadamente 3 m (figura 32).

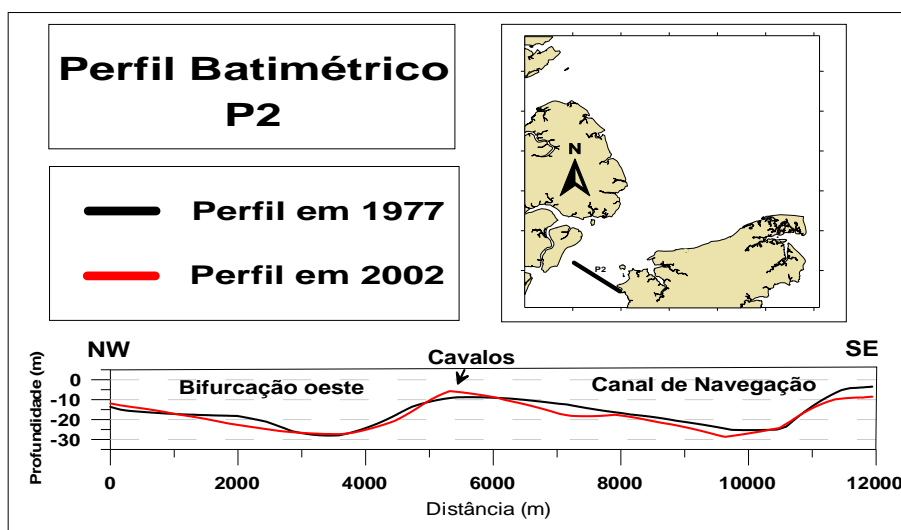


Figura 32: Perfil Batimétrico multitemporal P2.

O perfil P3 (figura 33) foi traçado no setor de maior profundidade do Canal Principal, ao lado do Banco da Cerca. Nesse perfil foi observado a diminuição da profundidade do canal em aproximadamente 35 m. Em 1977 o canal apresentava uma configuração geométrica em formato de V bem definido, que foi sendo suavizado no decorrer do período estudado (1977-2002). Segundo Miranda (2002) esse tipo de configuração geométrica é comum em estuários de regiões de planície costeira, que durante a transgressão marinha holocênica, apresentaram o processo de inundação maior que o de sedimentação originando uma topografia semelhante ao vale do rio. Segundo Castro (2008) o material sedimentar que compõe os canais profundos dessa região é composto predominantemente por areias médias e finas.

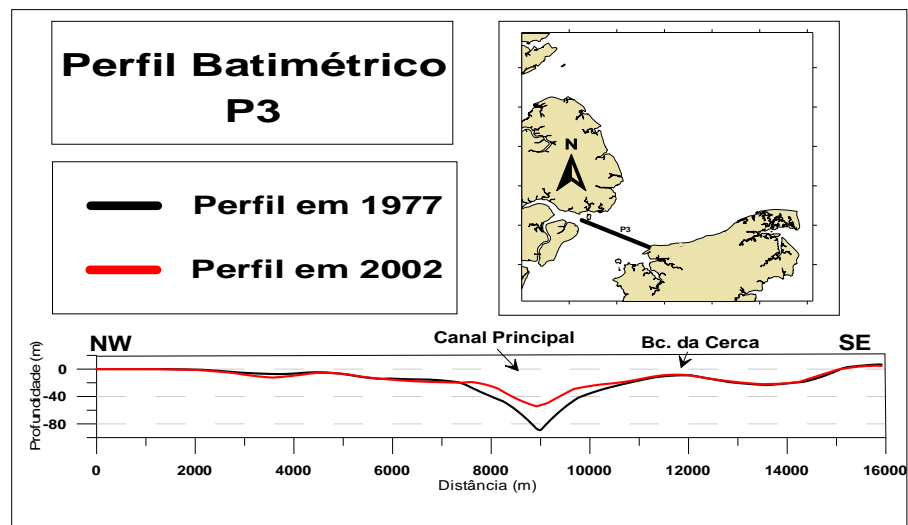


Figura 33: Perfil batimétrico multitemporal P3. Canal Principal entre Alcântara e São Luís.

O perfil P4 está localizado no setor norte da área de estudo, e mostra um aprofundamento de aproximadamente 15 m na calha do setor central do canal. A margem esquerda permaneceu relativamente estável, porém a morfologia de fundo próximo a esta margem tornou-se um pouco mais acidentada, exibindo o surgimento de um canal com aproximadamente 10 m de profundidade, entre 2000 e 2500 m de distância do ponto inicial do perfil. A margem direita sofreu suavização, diminuindo em aproximadamente 200 m a largura do canal (figura 34).

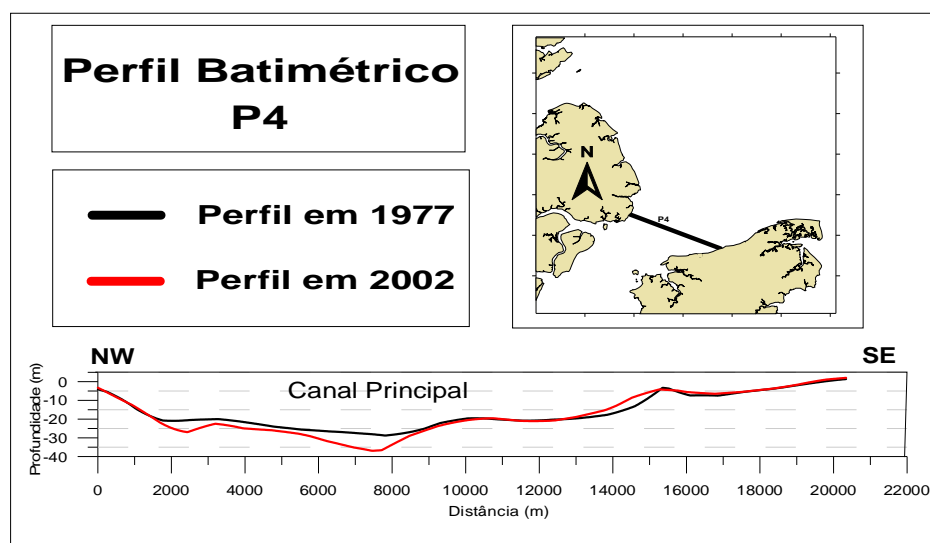


Figura 34: Perfil batimétrico multitemporal P4.

O setor do Canal Principal correspondente ao perfil P5 evidencia um leve processo de erosão próximo à margem esquerda e, de forma mais acentuada, na região central, junto à calha do canal, causando modificação em sua configuração geométrica, fazendo com que assumisse um formato mais afunilado, semelhante a um V. A profundidade da calha passou de aproximadamente 37 m para 50 m. A margem direita apresentava-se levemente mais abrupta, porém se tornou plana e topograficamente suave (figura 35).

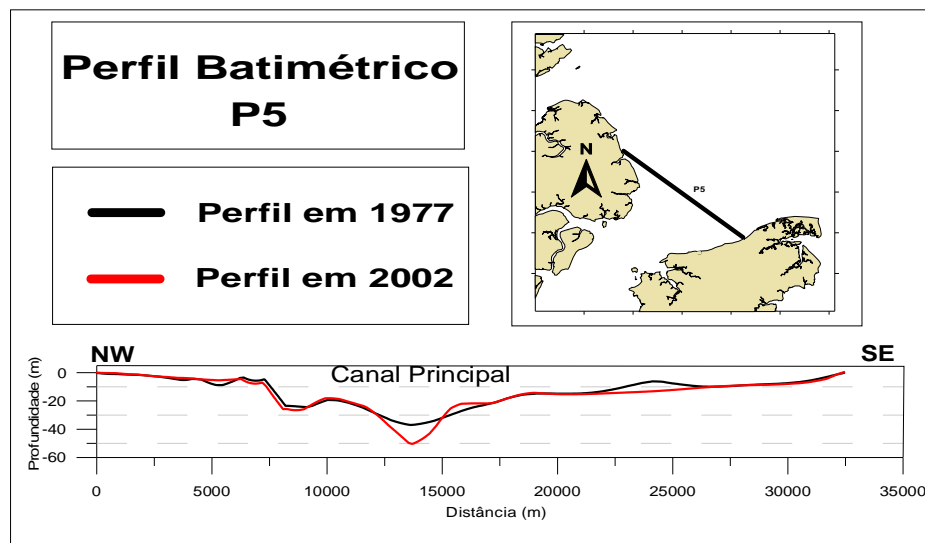


Figura 35: Perfil batimétrico multitemporal (P5) do Canal Principal da Baía de São Marcos.

O perfil P6 (figura 36) cruza a seção inferior do Banco Itacolomi, abrangendo ainda o Canal Intermediário, Banco das Almas, Canal Principal e o Banco da Cerca. É possível observar um leve deslocamento para NW das margens direitas dos canais Intermediário e Principal. Em termos batimétricos, a calha do Canal Principal permaneceu estável na profundidade de 40 m, enquanto que a do Canal Intermediário sofreu uma leve diminuição de aproximadamente 25 m para 30 m. A margem esquerda, em ambos os canais, permaneceu estável com uma topografia suave.

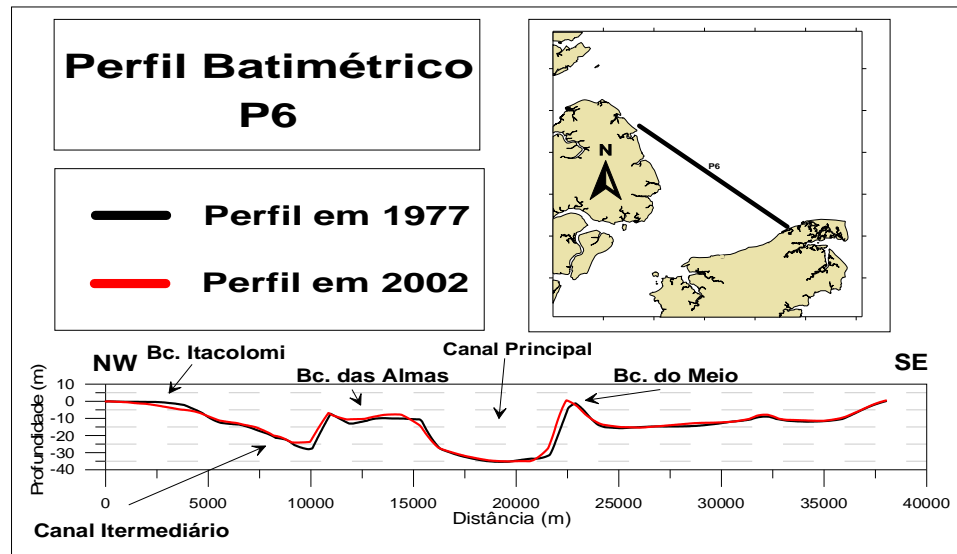


Figura 36: Perfil P6 mostrando a variação espaço-temporal das formas de fundo.

No perfil P7 (figura 38) não foram detectadas muitas modificações na morfologia de fundo. O Banco Itacolomi apresentou pequenas variações em sua altura e o Canal Intermediário também não modificou significativamente sua morfologia. A borda esquerda do Banco das Almas sofreu uma leve diminuição em sua declividade. O Canal Principal, em forma de U, sofreu assoreamento, conforme evidenciado pela diminuição na profundidade em sua calha de 37 m para 30 m. A margem esquerda do Banco do Meio sofreu um deslocamento para NW. O pequeno canal que separa os bancos do Meio e Darlan sofreu assoreamento, com diminuição da cota batimétrica de 20 para 15 m de profundidade. Dentre os bancos que compõem o Complexo do Coral, o Coral do Norte sofreu um pequeno deslocamento de sua margem esquerda para NW, enquanto que o Coral do Meio mostrou um aumento em sua altura em aproximadamente 3m.

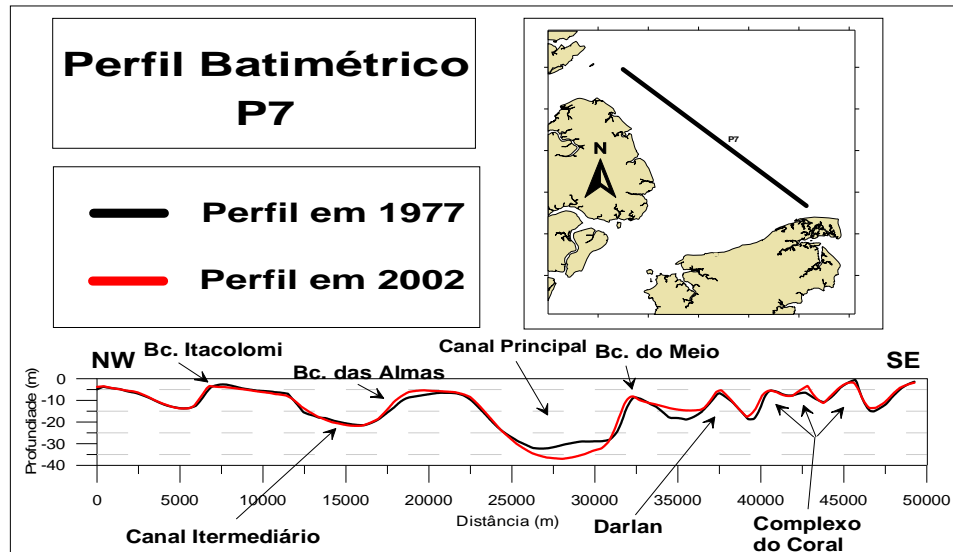


Figura 37: Perfil batimétrico multitemporal P7.

Os perfis P8 e P9 (figuras 38 e 39) estão na região mais externa da Baía de São Marcos, na zona de influência dos processos marinhos. A margem esquerda desses perfis permaneceu relativamente estável, sendo que na distância de 1.5000 m os perfis sofreram um assoreamento, com diminuição das cotas batimétricas em até 7 m.

O perfil P8 alcança a parte superior do Banco das Almas, que apresentou certa estabilidade, assim como a porção correspondente ao Canal Intermediário. As regiões marginais do Canal Principal sofreram erosão, principalmente na face leste do perfil. O setor leste do perfil P8, que apresenta um canal de 10 m de profundidade (considerando a isóbata de 10 m), também permaneceu relativamente constante.

O perfil P9 está localizado na porção mais externa, e em 1977 apresentava-se com uma topografia relativamente plana, quando comparado com os perfis de regiões interiores. O Canal Principal apresenta-se mais suavizado, diferente do formato afunilado visto no perfil P4. Em 2002 a morfologia do perfil P9 perdeu o relativo aplainamento, com erosão em toda extensão do Canal Principal e aparecimento de bancos arenosos paralelos ao eixo longitudinal do canal. Sua borda direita sofreu erosão de aproximadamente de 2500 m na direção SE.

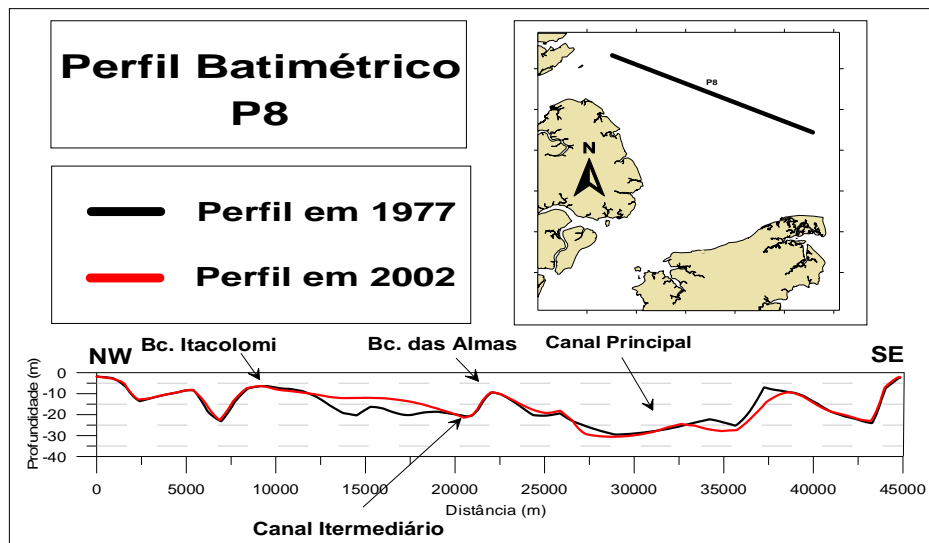


Figura 38: Perfil batimétrico transversal multitemporal P8.

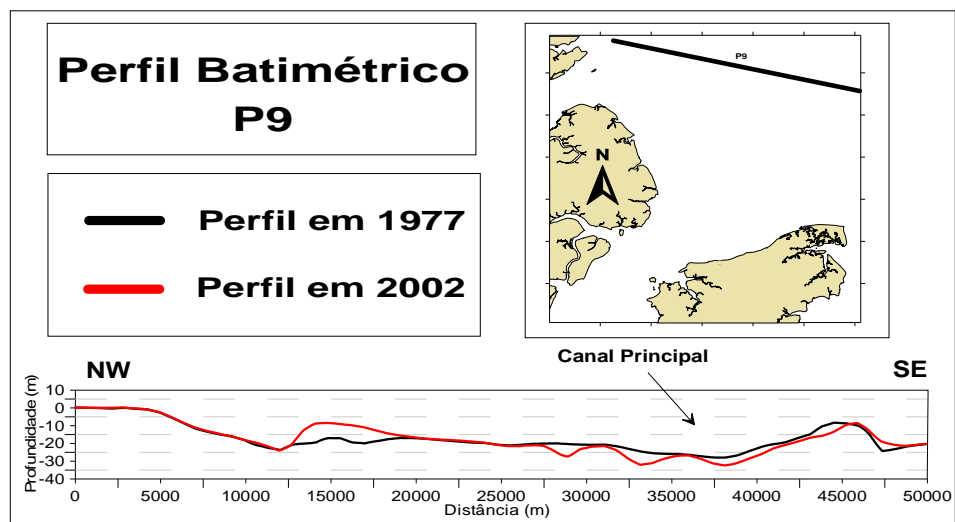


Figura 39: Perfil batimétrico multitemporal P9.

## 6.5 HIDRODINÂMICA E DINÂMICA DE FEIÇÕES

Pereira (1995) realizou um estudo de modelagem numérica visando reproduzir a circulação gerada pela maré e pelos efeitos meteorológicos na plataforma continental do Maranhão. De maneira geral, a circulação de maré astronômica total é similar à componente M2, sendo que esta é amplificada desde o contorno aberto localizado na plataforma continental (amplitude de ordem de 1.0 m) até a Baía de São Marcos (cuja amplitude atinge 2.2 m no Porto de Itaqui). As correntes e os transportes da M2 são fortemente influenciados pelo Canal Principal e pela borda da plataforma adjacente, havendo predominância do sentido

SW de enchente e NE de vazante. A circulação decorrente dos efeitos meteorológicos é bem mais fraca que a de maré, porém apresenta grande importância na determinação dos padrões de circulação sazonal média da área da plataforma aberta.

Pereira (1995) observou que o efeito das irregularidades topográficas de fundo, representadas por áreas muito rasas, barras arenosas longitudinais, bem como regiões aflorantes na baixamar são determinantes na propagação da maré na região da plataforma e da Baía de São Marcos, fazendo com que as isolinhas de fase e amplitude sejam mantidas aproximadamente paralelas, sendo que, especificamente na Baía de São Marcos, há uma inversão do comportamento dessas, pois em regiões mais internas, as ondas de maré (nesse caso a M2) apresentam características de ondas estacionárias. A combinação entre a ação de ondas estacionárias e amplificação da maré (até 120 cm) na Baía de São Marcos podem ser evidências da ocorrência de fenômenos físicos locais, como por exemplo, a ressonância.

Com base no acima exposto, a região que compreende os Bancos do Meio, Darlan e Complexo Coral, pode estar sendo fortemente influenciada pelo fenômeno de ressonância ocorrente na região. Tal fato pode justificar o comportamento anômalo dos bancos Darlan e da porção inferior do banco Coral do Sul, com deslocamento e crescimento no sentido SW, respectivamente.

Segundo Kjerfve e Ferreira (1993) na região compreendida entre a Baía de São Marcos e a foz do Rio Mearim, os intervalos de tempo entre a maré enchente e a vazante têm um comportamento assimétrico. Em Itaqui (foz do estuário) e Arari (estuário acima) os registros instantâneos de maré indicam que a variação do nível do mar passa de uma oscilação praticamente senoidal (Itaqui) para uma curva assimétrica e bastante atenuada (Arari), com intervalos de enchente e vazante de 4,0 e 9,0 horas respectivamente em Arari (figura 39). Nesse caso, o estuário classifica-se como sendo *hiposíncrono*, ou seja, a altura da maré é diminuída ao longo do estuário, em virtude do atrito com o fundo ser maior que o atrito da convergência das margens (NICHOLS; BIGGS, 1985).



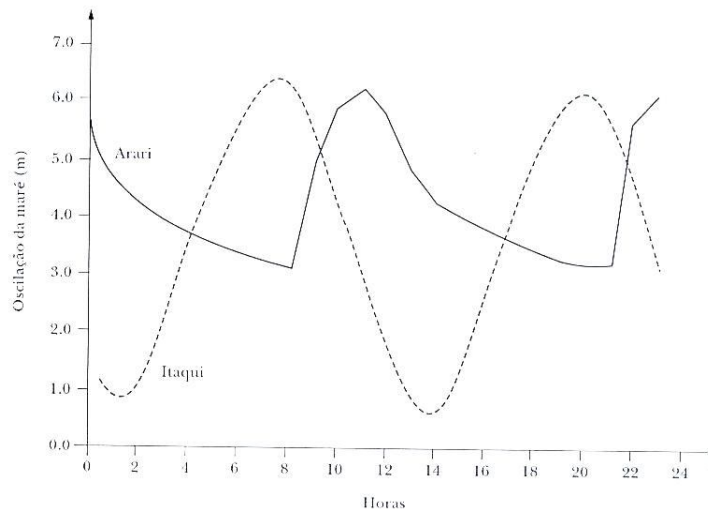


Figura 40: Comparação da oscilação de maré no estuário do Rio Mearim (MA) em Itaqui e em Arari, e, 21 de Agosto de 1991.

Fonte: Modificado de Kjerfve e Ferreira (1993) apud Miranda (2002).

Portanto, na ocorrência de um ciclo de maré assimétrico, como no estuário do Rio Mearim, pelo princípio da conservação de volume, durante o evento de menor duração (maré enchente) a velocidade do fluxo será mais intensa, e conseqüentemente maior será o transporte de sedimento em suspensão, considerando um suprimento de sedimento adequado para os dois eventos (enchente e vazante). Com isso, o setor entre Itaqui e Arari diz-se dominado pela maré enchente, caracterizando-se como importador de sedimento (FRENCH, 1997). Tal situação pode explicar o processo de preenchimento sofrido pelo setor do Canal Principal compreendido entre Alcântara e São Luís observado no perfil P3.

## 7 CONCLUSÕES

Os resultados das análises multitemporais da dinâmica batimétrica, evidenciaram mudanças tanto de ordem morfológica quanto das profundidades na área estudada. As análises multitemporais da batimetria e morfologia das formas de fundo evidenciaram a alta dinâmica em função da ação das macromarés e de correntes reversas atuantes na área.

Os bancos arenosos identificados na área de estudo, encontram-se inseridos na classificação de Perillo (1995) como barras alongadas de maré, com disposição longitudinal ao fluxo das correntes de maré reversa, sendo que os bancos do Meio e da Cerca, podem ainda ser classificados como barras lineares marginais aos canais.

Em alguns setores ocorreu redução de profundidade em virtude do assoreamento dos canais. Além disso, algumas formas de fundo foram removidas (erodidas) como, por exemplo, o Banco dos Lanzudos, cartografado em 1977.

Os bancos mantiveram orientação longitudinal e deslocamento e/ou crescimento no sentido NE, em taxas de deslocamento que variam de 2,9 a 8,2 m/ano, evidenciando a ação mais pronunciada das correntes de vazante no processo de retrabalhamento das feições de fundo. Contudo, o Banco Darlan e a porção inferior do eixo longitudinal do Banco Coral do Sul, apresentaram movimentação para SW, fato que pode estar associados aos fenômenos de ressonância e amplificação de maré ocorrentes na região, conforme demonstrado por Pereira (1995).

O Banco dos Cavalos, feição deposicional mais proeminente, corresponde a uma barra alongada de maré com elevado crescimento no sentido NE, favorecido pelo efeito cone de sombra causado pela Ilha dos Caranguejos e pela ação das correntes de maré vazantes que, aliadas ao fluxo dos rios Mearim e Pindaré, proporcionaram condições favoráveis ao crescimento do banco.

Em linhas gerais, o Canal Principal vem sofrendo aumento de profundidade, ressaltando-se o setor compreendido entre Alcântara e São Luís que, apesar de ser uma zona de estrangulamento de fluxo, foi constatado a diminuição da profundidade. As razões para justificar a diminuição de profundidade dizem respeito à composição do substrato, que por ser rochoso (CASTRO, 2008), oferece maior resistência ao desgaste imposto pelo intenso fluxo.

O Canal Principal e o Canal Intermediário sofreram deslocamento no sentido NW, tal deslocamento pode estar associado à ação das correntes de deriva litorânea.

O fato da Baía de São Marcos estar localizada no setor frontal ou superior do estuário do rio Mearim, faz com que este corpo hídrico apresente uma tendência natural de

assoreamento, constatada no presente estudo. Os produtos cartográficos gerados sugerem um processo gradativo de assoreamento em alguns pontos da área estudada, que pode estar associado à deposição de material detrítico por rolamento ou saltação proveniente da drenagem continental que, aliada à diminuição da capacidade e competência de transporte na Baía de São Marcos, aumentaram a espessura do pacote sedimentar. Esse processo pode estar associado não só com a ação abrasiva dos rios sobre o substrato e margens, mas, também, com lavagem das vertentes feita pelo escoamento superficial. Outra possibilidade a respeito do preenchimento sedimentar dessa região do canal é a entrada de sedimentos provenientes da plataforma continental adjacente à Baía de São Marcos, o que precisa ser comprovado mediante estudo da assembléia mineralógica, sobretudo de minerais pesados contidos nos sedimentos de fundo.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS / AÇÕES PROPOSTAS

- O presente estudo e os produtos cartográficos gerados sugerem um processo gradativo de assoreamento em alguns pontos da área estudada. Há necessidade de determinação da taxa de sedimentação por espectrometria gama ( $^{210}\text{Pb}$ ), para que seja obtido o registro histórico do processo deposicional nesse setor costeiro e, conseqüentemente, o prognóstico evolutivo com maior exatidão.
- Definição da proveniência (áreas-fonte) e percentual de contribuição de sedimentos continentais (fluviais) e plataformais na Baía de São Marcos, mediante estudos da assembléia mineralógica contida nos sedimentos de fundo.
- O cruzamento das informações multitemporais da morfologia de fundo, séries históricas dos parâmetros hidrodinâmicos e da cobertura sedimentar de fundo e em suspensão, podem trazer excelentes contribuições para a modelagem hidrodinâmica e, por conseguinte, melhor entendimento do padrão de circulação e transporte de sedimentos na área estudada.

## REFERÊNCIAS

- ASHLEY, G. M. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at na old problem. SEPM Bedforms and Bedding strutures Research Symposium. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 60, n.1, p. 160-172. 1990.
- BARBOSA, G.V.; PINTO, M.N. Geomorfologia da Folha SA-23 (São Luís) e parte da Folha SA-24 (Fortaleza). In: BRASIL. DNPM. **Projeto Radam Brasil**. Rio de Janeiro, 1973. Cap.2, p. 3-26.
- BAPTÍSTA NETO, J. A.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. (Ed.). **Introdução à geologia marinha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.
- BEARDSLEY, R.C. et al. The M2 tide on the Amazon shelf. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. C2, p. 2283-2319. 1995.
- BRANDÃO, J.A.S.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Pará-Maranhão. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 1, n.8, p. 101-102. 1994.
- BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Cartas de correntes de maré: proximidades da baía de São Marcos e portos de São Luís e Itaqui**. Rio de Janeiro, 1972.
- BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Projeto Gurupi**: relatório final de etapa. Brasília, 1977. p. 24.
- CARVALHO, I. S.; PEDRÃO, E. **Brazilian Theropods from the Equatorial Atlantic margin: behavior and environmental setting**. Gaia, Lisboa, v. 15, p. 369-378, 1998.
- CARVALHO, I.S. A Bacia de São Luís. In: BRITO, I.M. (ed.). **Geologia histórica**. Minas Gerais: Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 2000. p. 141-150.
- CASTRO, M. S. **Sedimentologia da baía de São Marcos – proximidades do porto de São Luís: implicações para a diversidade de habitats**. 2008. 36f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Biologia) – Campus Bragança, UFPA, Bragança, 2008.
- COSTA, J.L. et al. **Projeto Gurupi**. Relatório Final. Belém: DNPM/CPRM, 1977. v.1, 258p.
- DAWRIMPLE, R. W.; KNIGHT, R. J.; ZAITLIN, B. A.; MIDDLETON, G. V. Dynamics and facies model of a macrotidal sand-bar complex, Cobequid Bay-Salmon river estuary (Bay of Fundy). **Sedimentology**, v. 37, p. 577-612. 1990.
- DAWRIMPLE, R. W.; ZAITLIN, B. B.; BLOYD, R. **A conceptual model of estuary sedimentation**. Journal of Sedimentology Petrology, v. 62, p. 1130- 1146. 1992.

DAVIES, J. H. A morphogenic approach of word shorelines. **Geomorphology**, v.8, p. 127-142. 1964.

DEFANT, A. **Physical Oceanography**. Oxford: Pergamon Press, 1960. v. 2. 598p.

DYER, K. R. **Estuaries: A Physical Introduction**. London: Wiley, 1997. 140p.

EL-ROBRINI, M. **Evolution rapide des fonds d'une zone estuarine**: le secteur d'Itaqui-baie São Marcos – Maranhão (Brésil). In: MARIE-THÉRÈSE PROST. Évolution des littoraux de guyane et de la zone caraibe méridionale pendant le quaternaire. Cayenne-Guyane: Orstom, p. 159-176. 1990.

EL-ROBRINI, M.; SOUZA FILHO, P.W.M. **Potential of SAR / RADARSAT data for coastal and estuarine environment study, Golfão Maranhense, Brazil Amazon Region**. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31. Rio de Janeiro. Abstracts. Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 12-18. 2000.

EL-ROBRINI, M. et al. Atlas de erosão e progradação da zona costeira de Estado do Pará – Região Amazônica: Áreas oceânicas e estuarinas. In: MUEHE, D. (Org.). **Atlas de erosão e progradação da zona costeira brasileira**. São Paulo: [s.n.], 2006. p. 1-34.

FEITOSA, A. C. **Evolução morfogenética do litoral Norte da Ilha do Maranhão**. 1989. 210f. Dissertação (Mestrado) - UNESP, Rio Claro, 1989.

FEITOSA, A. C. **Parâmetros analíticos dos sedimentos da praia do Canto, Paço do Lumiar - Ma**. In: REUNIÃO ESPECIAL DA SBPC, 3., 1996, Florianópolis. **Ecosistemas costeiros**: do conhecimento à gestão. Florianópolis: UFSC, 1996. v. 1, p. 408-409.

FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR (FEMAR). **Catálogo das estações maregráficas do Brasil**. 1997.

FELGUEIRAS, C.A. **Modelagem numérica de terreno**. 2004.

FLAGG, C.N.; GORDON, R.L.; MCDOWELL, S. Hydrographic and current observations on the continental slope and shelf in the western equatorial Atlantic. **Journal Of Physical Oceanography**, 16: 1412-1429. 1986.

FRENCH, P. W. Coastal and Estuarine Management. London, Routledge. **Environmental Management Series**. 1997. 251p.

FROIDEFOND, J. M. **Rapport de mission**. Projet Cordet. Universidade de Bordeaux – I. 1985-1985.

GOMES, M. P.; VITAL, H.; MACEDO, J. W. P. **Aplicação da geoestatística na filtragem de dados batimétricos e altimétricos da Bacia Potiguar**. Revista de Geologia, Vol. 20, nº 2, 243-254, 2007.

GORINI, M.A. **Estrutura da margem continental norte brasileira e áreas adjacentes**. In: PETROBRÁS. Projeto REMAC. Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira, e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais. Rio de Janeiro, 1981. p. 11-116. (Levantamento de Recursos Naturais, 9).

GUILCHER, A. Origin of sediments in Estuarines. *Estuaries Am. Assoc. Advanc. Sci., public.*, v.83, p. 149-157. 1967.

HASTENRATH, S.; LAMB, P.J. **Climatic atlas of the tropical Atlantic and eastern Pacific oceans**. Wisconsin: The University of Wisconsin Press, 1977. 111 p.

HIDROGRAFIA. Disponível em: <<http://webpages.fc.ul.pt>>. Acesso em 25 de março de 2009.

KJERFVE, B. Estuarine geomorphology e physical oceanography. In: DAY JR., J. W.; HALL, C. H. A. S.; KEMP, W. M; Yánes-Araciba, A. (eds.). **Estuarine Ecology**. New York: Wiley, 1987. p. 47-48.

KJERFVE, B. **Estuarine morphology and physical oceanography**: 47- 48. In: *Estuarine Ecology*, J. W. Day Jr., C. A. S. Hall, W. N. Kemp and A. Yaez-Arancibia (eds.). Wiley Interscience: 558p. 1989.

KJERFVE, B; FERREIRA, H. O. Tidal bores: first ever measurements. **Ciência Cult.**, São Paulo, v.45, n. 2, p. 135-137. 1993.

LUEDEMANN, E.F. **Preliminary results of drift-bottle releases and recoveries in the western Tropical Atlantic**. Boletim do Instituto Oceanográfico, v. 16, n. 1, p. 13-22. 1967.

MARINHA DO BRASIL. Disponível em: < <https://www.mar.mil.br>>. Acessado em: 20 de maio de 2009.

MELO, T. de. **Dinâmica de nutrientes e da matéria orgânica em um manguezal NE da Ilha de São Luis (MA)**. 2002. 152f. Tese (Doutorado) - CPGG, UFPA, Belém, 2002.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br>. Acessado em: 26 de junho de 2009.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios da oceanografia física de estuários**. São Paulo : Editora da Universidade de São Paulo. 2002.

MIRANDA, A.G.O. **Dinâmica batimétrica da Baía de Guajará (Belém/PA)**. 2007. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - CG, UFPA, Belém, 2007.

MOCHEL, F. R.; GUEIROS, B.; ALCANTARA, E. H. Caracterização geoambiental para a avaliação da sensibilidade a derrames de óleo na Baía de São Marcos, Maranhão, Brasil. In: WORKSHOP TÉCNICO-CIENTÍFICO PROJETO PETRORISCO, 3., Rede 05/01, CTPETRO/FINEP/CNPq, 2004, Belém. **Anais...** CTPETRO/FINEP/CNPq. Natal: UFRN, 2004.

MUEHE, D. ; NICOLODI, J. Geomorfologia. In: ZAMBONI, A.; NICOLODI, J. L. (Org.). **Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2008. p. 23-58.

NICHOLS, M. M.; BIGGS, R. B. Estuaries. In: DAVIES, R. A. (ed.). **Coastal sedimentary environments**. Berlin: Springer-Verlag, 1985. p. 77-186.

ODRESKI, L. L. R; SOARES, C. R; ANGULO, R. J. Taxas de assoreamento e a influência antrópica no controle da sedimentação da Baía de Antonina-PR. 2002. **Revista brasileira de Geociências**, v. 53, p. 7-12. 2002.

PALMA, J. J. C. Geomorfologia da plataforma continental norte brasileira. In: CHAVES, H. A (ed.), **Geomorfologia da Margem continental brasileira e áreas oceânicas adjacentes**. Rio de Janeiro, Petrobras, Projeto REMAC, 1979. v. 7, p.25-51.

PEREIRA, J. E. R. **Modelagem numérica tri-dimensional da circulação na plataforma continental do Estado do Maranhão**. Dissertação (Mestrado) - IOUSP/USP, São Paulo. 1995.

PERILLO G.M.E (Ed). **Geomorphology and sedimentology of estuaries**. Amsterdam: [s.n.], 1995. 471p. (Developments in Sedimentology, 53)

PONTES, P.H. P. **Identificação e caracterização das massas d'água da plataforma continental do Maranhão, durante os períodos seco (novembro, 1997) e chuvoso (junho,1999)**. Dissertação (Mestrado) – PPGG, IG, UFPA, Belém. 2007.

PORTOBRAS. **Parecer técnico quanto aos aspectos hidráulicos/sedimentológicos referentes às alternativas de solução para implantação do píer petroleiro do porto comercial do itaqui**, [S.l], 1988. v.1, p.51.

PORTO do Itaqui. 2009. Disponível em: <<http://www.portodoitaqui.ma.gov.br>>. Acesso em 10 de março, 2009.

PROST, M. T. O. Observations sur l'évolution morpho-sedimentaire du littoral Guyanais. In: INTER. SYMP. SEA LEVEL CHANGES AND QUARTER. SHOREL., São Paulo- Brasil. 1986. 20p.



RINE, J. M.; GINSBURG, R.M. **Depositional facies of the mud shorface in Suriname, South American. A mud analogue to sandy, shallow-marine deposits.** Florida: Comparative Sed. Lab. Univ. Miami, 1985. p. 633-651.

ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, J. B. M.; EL-ROBRINI, M. **Caracterização climática da faixa litorânea PA-MA-PI-CE.** (no prelo).

SANTOS, J. H. **Análise por geoprocessamento da ocupação da franja costeira ao norte da cidade de São Luís-MA.** 1996. Dissertação (Mestrado) - UFRJ. Rio Janeiro. 1996.

SILVA, P. T. A. F. **Evolução batimétrica do Canal de Santana e Canal Norte do Rio Amazonas** – setor adjacente as cidades de Santana e Macapá /AP. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - CG, UFPA, Belém. 2009.

SOUTHARD, J.B.; STANLEY, D.J. Shelfbreak processes and sedimentation. In: STANLEY, D.J.; SWIFT, D.J.P. **Marine sediment transport and environmental management.** New York: Wiley-Interscience, 1976. p. 351-377.

SOUZA, P. F. R. **Circulação hidrodinâmica na região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes durante o verão austral.** 2007. Dissertação (Mestrado) - UFPE/PPGO. 2007.

VAZ, L. G. D; TSUJI, T. C. **O setor pesqueiro no Maranhão:** aspectos de infra-estrutura. Parte II. Suporte de Tomada de decisão - Centro de Referência de Navegação - Ofício-Circular nº. 38/CGPEPT/DFPEPT/SETEC/MEC 12 de junho de 2008. Disponível em: <<http://web3.iff.edu.br/aquicultura/artigos>>. Acesso em: 10 de março de 2009.

YALIN, M. S. **On the formation mechanism of dunes and ripples.** Euromech Colloq. Proc. 1987. p.261.

ZEMBRUSCKI, S. G.; GORINI, M. A.; PALMA, J. J. C. ; COSTA, M. P. A. Fisiografia e distribuição dos sedimentos superficiais da Plataforma Continental Brasileira. **Boletim Técnico da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v.14, n.3/4, p. 127-55. 1971.