

PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO NA BAÍA DE SÃO MARCOS, ESTADO DO MARANHÃO, BRASIL ⁽¹⁾

Jáder Onofre de Moraes ⁽²⁾

Laboratório de Ciências do Mar
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza — Ceará — Brasil

A Baía de São Marcos está situada no litoral do Estado do Maranhão, separando dois tipos distintos de litoral, além de posicionar-se próximo a três bacias sedimentares (figura 1).

A largura da baía varia de 55 km no seu limite norte (em direção ao mar) a 13 km na sua meia extensão, aumentando para 25 km no seu limite sul ao iniciar-se a Ilha dos Caranguejos. Seu comprimento é de aproximadamente 64 km. A baía é a continuação do estuário do Rio Mearim que se bifurca na Ilha dos Caranguejos.

A Baía de São Marcos é a principal via de acesso ao Porto de Itaqui, motivo pelo qual os estudos dos processos de sedimentação associados ao estudo hidrodinâmico revestem-se de interesse especial.

Neste trabalho são considerados os resultados obtidos em campanhas de campo para correntometria, salinidade, temperatura das águas, material em suspensão, sedimentos de fundo da baía e das suas margens, batimetria e aspectos geomorfológicos que, associados, levam a definir seu comportamento hidrodinâmico sedimentar.

MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos de campo foram realizados a bordo do barco PROJEPE II, utilizando-se dragas cônicas, garrafas de Nansen, garrafas Van Dorn, correntômetros, ecobatímetro, "side scan sonar" e sextante. Foram realizadas campanhas de campo anuais durante três anos, nas estações de chuva e seca.

Em laboratório foram utilizadas cartas náuticas já existentes na Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), até as proximidades do Porto de Itaqui. Deste porto até a

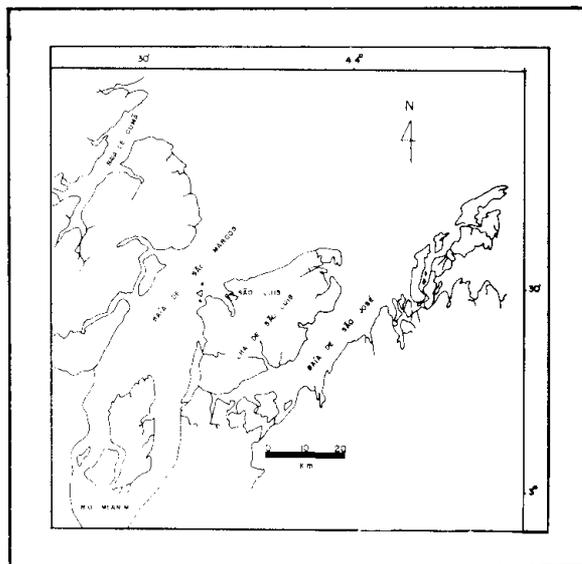


Figura 1 — Localização da Baía de São Marcos.

(1) Trabalho apresentado no IX Simpósio de Geologia do Nordeste, em outubro de 1979.

(2) Pesquisador do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Ilha dos Caranguejos, toda batimetria é original e pioneira, interpretada de ecogramas obtidos em diferentes etapas do trabalho. Interpretações de fotografias aéreas de épocas diferentes foram comparadas, além de fotografias obtidas de vôos locais utilizando-se avião bimotor. Estudos de morfometria, morfoscopia, granulometria, material em suspensão e minerais leves e pesados foram feitos pela metodologia clássica conhecida.

SALINIDADE E TEMPERATURA

As medições de salinidade foram feitas sempre que as amostras de fundo fossem coletadas. Além disso, três estações fixas foram mantidas para ciclos completos de marés.

Depois que o Rio Mearim atinge a Ilha dos Caranguejos (figura 2), torna-se verticalmente homogêneo, havendo falta de interface água doce - água salgada. Na extremidade norte da Ilha dos Caranguejos os valores de salinidade atingem $20,4\text{‰}$ mas a uma pequena distância no braço direito do Rio Mea-

rim é apenas $6,6\text{‰}$. Coincidentemente neste ponto a deposição dos Bancos dos Lanzudos começa.

No mesmo nível de marés os valores de salinidade parecem ser maiores no lado esquerdo do que no lado direito. Isto ocorre porque o canal principal é defletido pela ilha em direção ao braço esquerdo do Rio Mearim. Este braço parece ter sido criado por ação da maré erodindo os terrenos adjacentes. É notório que muitas ilhotas são sobrejacentes aos terrenos terciários. A partir dos bancos Rasemili e Lanzudos em direção ao mar a salinidade não tem variação lateral significativa, e na parte externa da baía seus valores mais altos estão concentrados dentro dos limites do canal central.

MATERIAL EM SUSPENSÃO

A quantidade de material em suspensão varia consideravelmente quando se compara a parte interna e a parte externa da baía.

O transporte do material em suspensão depende do movimento da água. Em um movimento turbulento, as partículas se deslocam continuamente para cima e para baixo, devido à natureza do escoamento, de modo que o movimento vertical em um escoamento horizontal é zero.

Em maré alta, praticamente todo material em suspensão tem descido para o fundo, e o material muito fino ainda em suspensão consiste de argila e matéria orgânica. Isto ocorre perto da Ilha dos Caranguejos e Banco das Almas, mas não ocorre na parte central da baía. As concentrações variam de 160 a 300 mg/l. As correntes de marés são muito fortes e não permitem sedimentação. Durante a maré vazante grandes quantidades de lama são trazidas em suspensão do Rio Mearim. A maior parte deste material é depositado na margem leste da Baía de São Marcos e não se escoam até o mar. Parte do silte precipita-se em maré baixa mas uma quantidade apreciável permanece em suspensão.

CORRENTES

As figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, os deslocamentos de derivadores perto do Porto de Itaqui em maré enchente e maré vazante. Da observação dos derivadores podemos concluir que:

a) Durante a maré vazante a massa d'água limitada pelas isóbatas de 10 e 20 m,

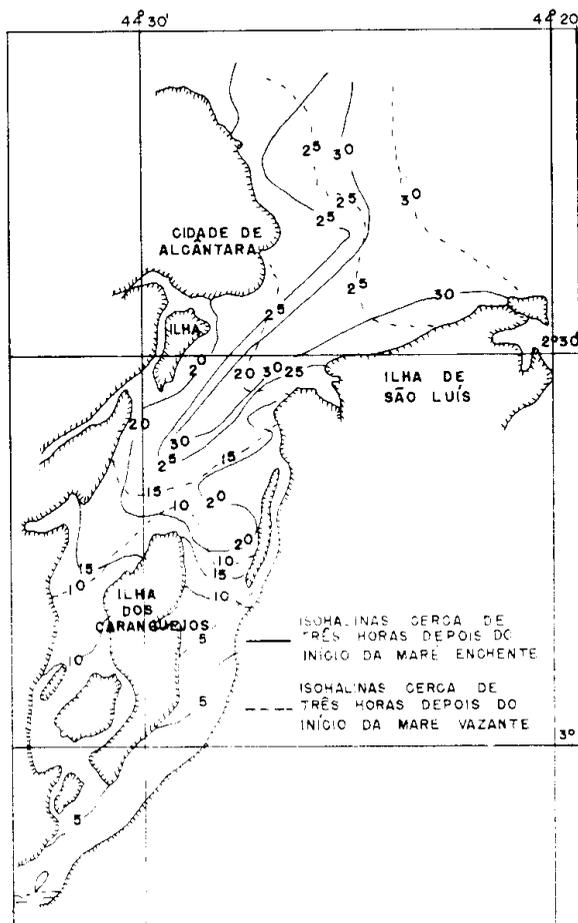


Figura 2 – Distribuição da salinidade na Baía de São Marcos

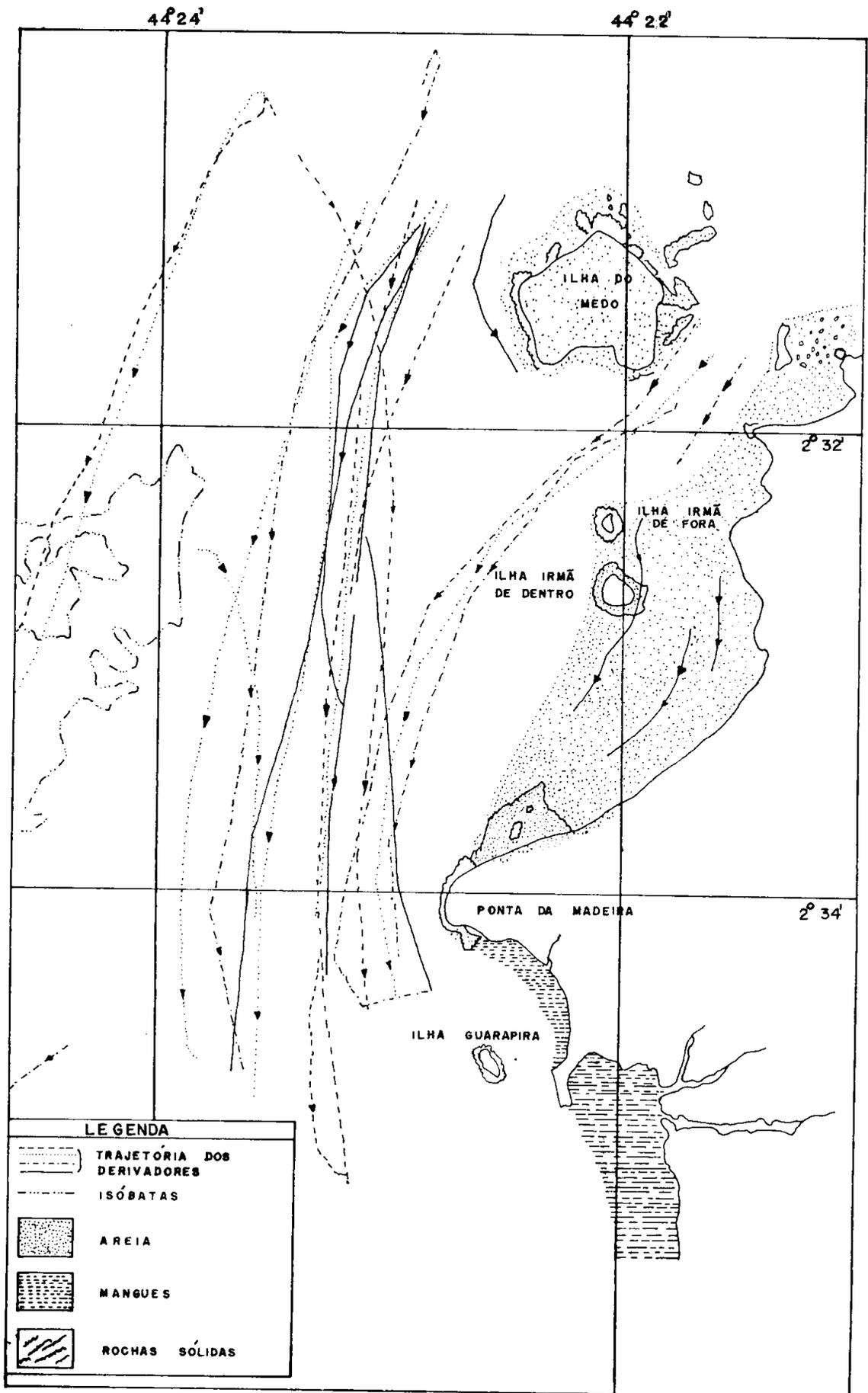


Figura 3 — Trajetória dos derivadores em maré enchente.

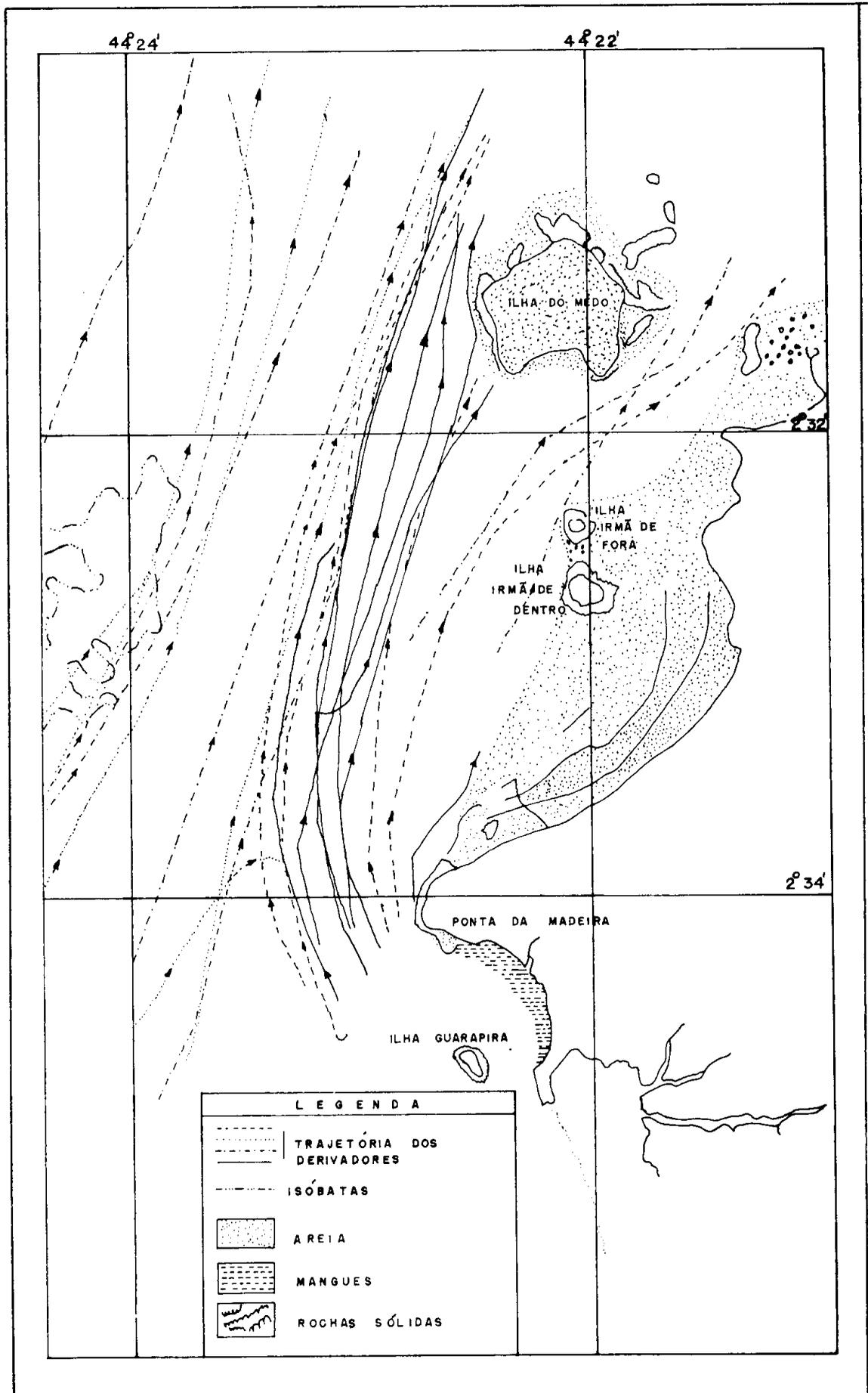


Figura 4 – Trajetória dos derivadores em maré vazante.

em frente a Ponta da Madeira, correm através do canal do Boqueirão.

b) Em uma faixa de cerca de 100 m ao longo da isóbata de 20 m (na Praia do Boqueirão), a água corre em volta da Ilha do Medo, durante maré enchente e vazante.

c) Para o lado leste do Banco dos Cavalos a água passa pelo canal principal.

As velocidades mais altas na parte interna da baía ocorreram no canal do Boqueirão, com 2,5 m/s. No canal a leste do Banco dos Cavalos, a velocidade apresentou um valor médio de 2,3 m/s, e, na parte externa da baía, variou de 1,2 a 1,5 m/s.

A situação torna-se bastante diferente em relação à zona do canal principal, onde as correntes de maré atingem velocidades inacreditáveis no momento correspondente a 3 horas antes e 3 horas depois da preamar.

Canal principal	Maré de sizígia (m/s)	Maré de quadratura (m/s)
6 horas antes da Pr	1,37	0,78
5 " " " "	1,77	2,36
4 " " " "	6,10	5,12
3 " " " "	8,47	5,51
2 " " " "	7,68	4,53
1 " " " "	4,72	2,95
PM (preamar)	1,77	0,59
1 hora depois da Pr	1,57	0,98
2 " " " "	6,30	4,13
3 " " " "	8,07	6,30
4 " " " "	7,09	6,50
5 " " " "	4,92	4,72
6 " " " "	2,16	1,97

Para termo de comparação, podemos citar a Baía de Fundy, Canadá, onde as correntes de maré e de fundo atingem valores máximos de 2,8 m/s e 1,1 m/s (Klein, 1970). Além das correntes de maré existem em São Marcos as ondas geradas pelo vento que causam erosão nas falésias e sedimentação nos baixios de marés. Os ventos alíseos (15-30 nós) geram ondas, variando de 60 cm a 3 m de altura. A ação das ondas diretamente nas falésias erodem o "bedrock" e o deslocamento lateral faz a redistribuição do material.

MARÉS

Os registradores evidenciaram que as marés em Pirajuba ocorriam 1:20 h mais cedo do que em Itaqui, e que a altura média das marés na baía é de aproximadamente 7 metros. Esta é uma das maiores diferenças de marés

do mundo, comparadas com as da Baía de Fundy (Canadá), Saint Malo (França) e The Bristol Channel (Inglaterra) (Swift, 1966; Klein, 1963 e 1970).

Swift (1966) resumiu a origem das altas diferenças de marés, nos seguintes termos: as dimensões da Baía de Fundy produzem um período natural de oscilação que é idêntico ao componente vertical semi-diurno das marés. Conseqüentemente, amplificações de ressonância desses períodos de oscilações dão origem a um grande volume de água entrante, que prediz a diferença de altura vertical.

ONDAS

As ondas na baía apresentam características exclusivamente originadas da ação do vento, e pela freqüência de suas alturas, verificou-se que não ultrapassam 3 metros. A seguir, estão relacionados valores percentuais da freqüência de ocorrência das alturas de ondas.

Altura	Freqüência
Acima de 0,20 m	95%
" " 0,40 m	86%
" " 0,60 m	71%
" " 0,80 m	57%
" " 1,00 m	42%
" " 1,20 m	27%
" " 1,40 m	18%
" " 1,60 m	12%
" " 1,80 m	8%
" " 2,00 m	6%
" " 2,20 m	4%
" " 2,40 m	2%
" " 2,60 m	1%
" " 2,80 m	1%

ASPECTOS MORFOLÓGICOS DA BAÍA

Praias, falésias e mangues

A maioria das praias são arenosas e são submetidas a forte retrabalhamento pelas marés. Em algumas delas como no Farol de São Marcos e em Alcântara, o trabalho das marés formam plataformas de abrasão. De Alcântara até a Ponta de Itacolomi aparece uma seqüência contínua de falésias esculpidas em formações terciárias. Formações cretácicas e terciárias aparecem nas praias da Ilha do Medo, Ilhas Irmã de Dentro e de Fora e em baixios de maré (figura 5).

Os mangues ocorrem ao longo dos di-

versos braços de maré e riachos que desaguam na baía. A área coberta pela água do mar, até mesmo em maré baixa, tem *Rizophora mangle* como principal espécie, enquanto que *Avicennia* desenvolve-se em áreas afetadas pela água do mar somente em maré alta. Onde excepcionalmente a maré alta ocorre,

há predominância de *Laguncularia* sp. A maioria da área continental é caracterizada por *Conocarpus*. Zenkovitch (1967) sugere que os mangues causam acumulação de lama no sistema de caule e raiz promovendo a precipitação de material em suspensão da água do mar. A superfície cresce, portanto,

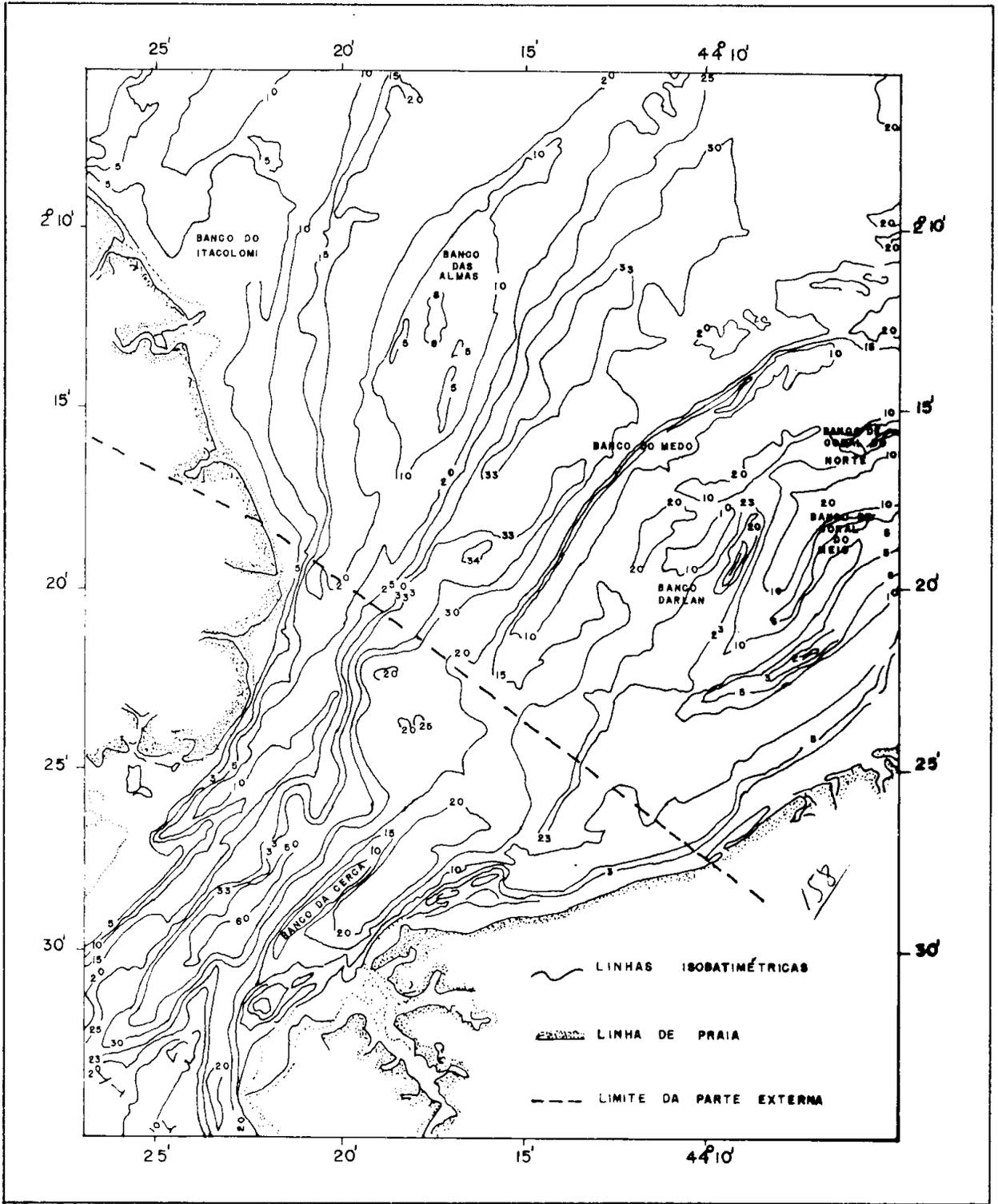


Figura 5 — Morfologia da área da Baía de São Marcos.

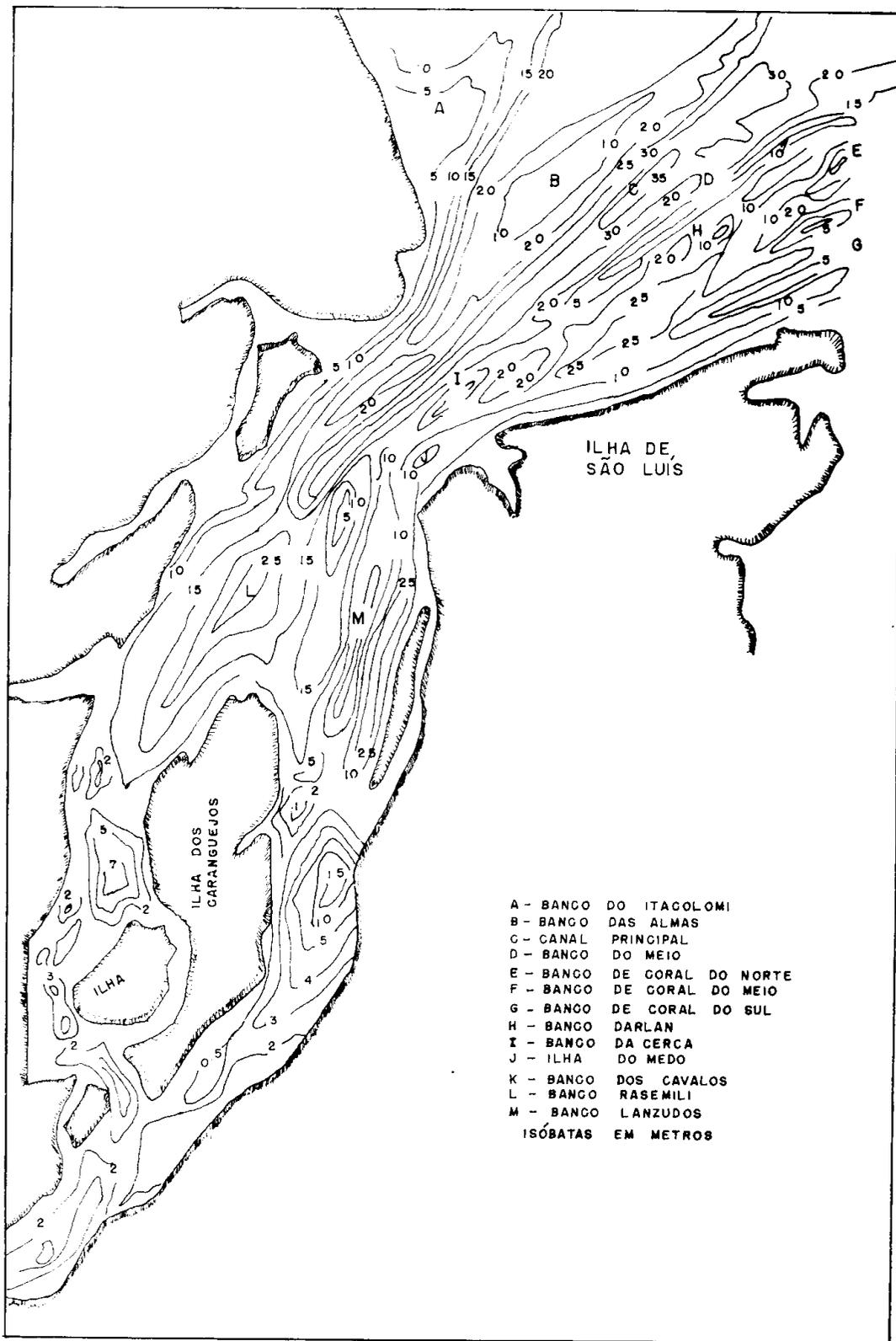


Figura 6 – Batimetria da Baía de São Marcos

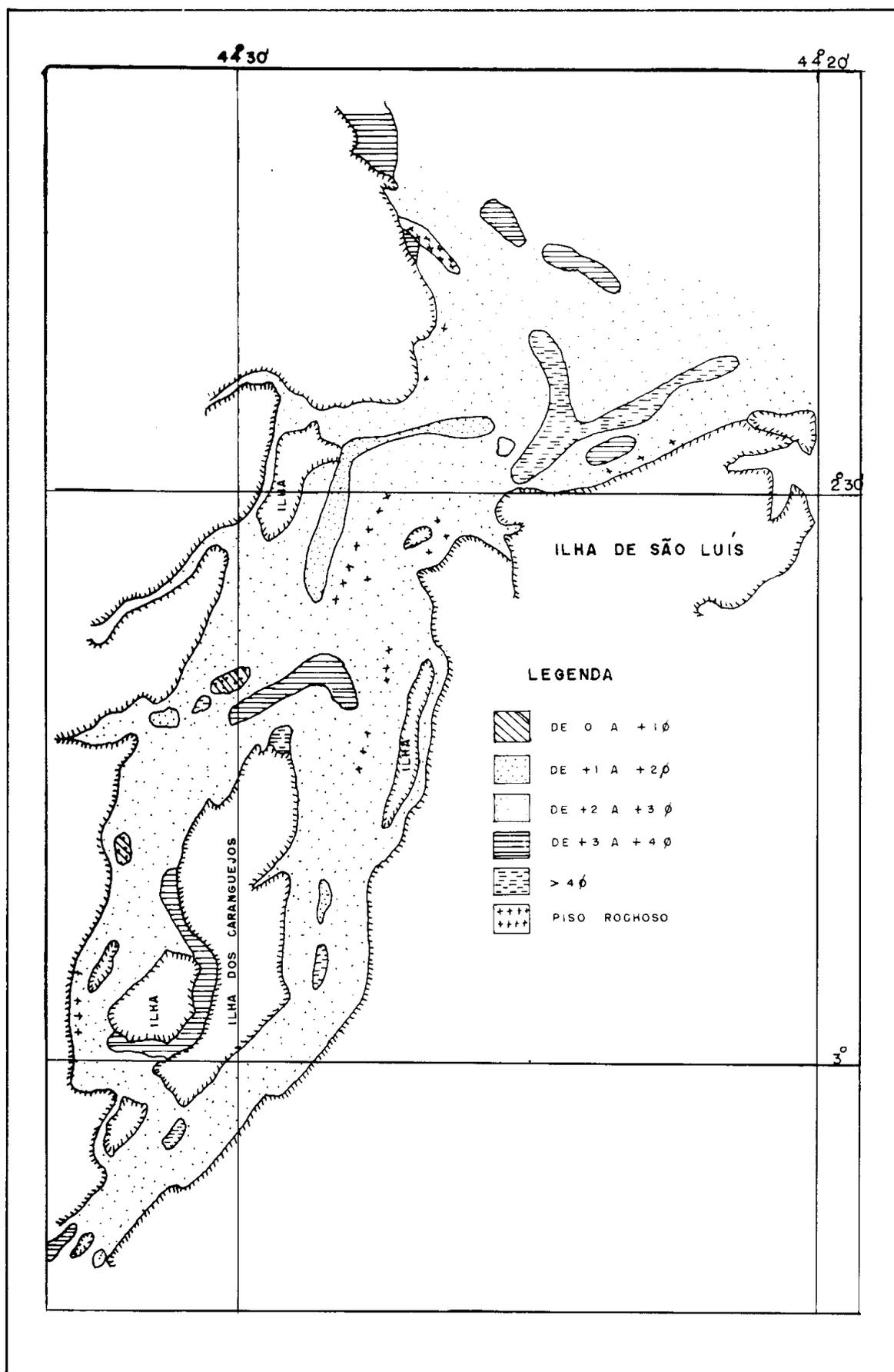


Figura 7 – Granulometria dominante dos sedimentos.

gradualmente na área dos mangues e a costa avança à medida que a lama se acumula. Deve-se levar em consideração que é necessário haver uma camada pré-existente de lama antes da formação dos mangues, pois eles não crescem em areia.

Bancos e baixios de maré

Os baixios de maré desenvolvem-se ao longo de costas de mergulho suave com elevada diferença na altura de maré, onde haja disponibilidade de sedimentos e onde fortes ações de ondas não estejam presentes (Reineck & Singh, 1973). Ao longo da Baía de São Marcos extensos baixios de marés estão formados tanto na margem direita como na margem esquerda (figuras 5 e 6).

Os bancos posicionam-se entre os canais de marés, muitos migram e estão distribuídos tanto na parte externa da baía, como nas partes média e externa. Os principais bancos são o Banco do Meio e o Banco das Almas devido a sua posição na entrada da baía dando acesso aos navios que se dirigem até o cais (figura 6).

Sistema de canais de marés

A intenção do estudo em detalhe destes canais foi um reconhecimento da melhor maneira de se ter acesso até o cais. O canal principal, que se estende desde a plataforma continental até as proximidades do Porto do Itaqui, é a principal via de acesso a navios.

A oeste e a leste deste canal outros canais também são viáveis a navegação de pequeno porte, tais como os situados a oeste do canal central entre os Bancos Itacolomi e Banco das Almas e, ao leste, entre o Banco do Meio, Banco Darlan e Banco Coral do Norte (figura 5).

O Canal Central é inclinado suavemente em direção ao Banco das Almas onde o fundo é plano e arenoso mas desce abruptamente até o Banco do Meio. Um perfil longitudinal neste canal mostra "sandwaves" somente interrompidas com o aparecimento de afloramentos. Sua parte mais profunda atinge 93 metros formando uma falésia submarina de 70 metros onde sedimentos cretácicos estão expostos. O Canal do Boqueirão, via de acesso mais curta para quem vai de São Luís ao Porto de Itaqui, situa-se entre a margem leste da baía e a Ilha do Medo. Comparação com cartas da Diretoria de Hidrografia e Navegação para esta área permite con-

cluir que o canal sofreu erosão de, pelo menos, 6 metros desde 1956.

DISTRIBUIÇÃO DOS SEDIMENTOS

Sedimentos cretácicos e terciários afloram no canal central, nos baixios de maré, nas praias das Ilhas do Medo, Irmã de Fora, de Dentro, no braço esquerdo do Rio Mearim e, ainda, como blocos rolados no fundo de alguns canais. Os locais onde estes sedimentos afloram são aqueles em que as correntes são mais fortes, com cerca de 3 m/s. Há afloramentos deste tipo em todos os canais que se ligam às ilhas e ao longo da costa.

Lama, na proporção de 90 a 100%, ocorre somente no começo da Ilha dos Caranguejos (figura 7) e, na proporção de 30 a 70%, ao longo do braço esquerdo do Rio Mearim, podendo ser originada de folhelhos e sedimentos argilosos pré-existentes, ou ainda depositada pelo rio ao contornar as ilhotas desta área. Ao longo da margem direita da parte externa da baía, na altura da praia de Olho d'Água e Araçagi, há uma faixa de areia lamosa derivada da erosão da Ilha do Medo. Há uma corrente de quase 3 m/s no Canal do Boqueirão. Isto deve ser a fonte desta lama que está relacionada também com descargas dos rios e das correntes de marés.

Existem duas áreas de deposição máxima de areia, situadas na entrada da baía e ao longo da extremidade norte da Ilha dos Caranguejos.

Uma facies sedimentar formada de 90 a 100% de areia de granulometria 2 a 3 ϕ ocorre na maior parte da baía, da entrada até as proximidades da Ilha dos Caranguejos. No canal central não há praticamente deposição de sedimentos. Na margem esquerda da baía, próximo ao porto de Itaúna, há uma grande quantidade de sedimentos marinhos associados a material proveniente de erosão das Barreiras.

DISCUSSÃO

A erosão na margem leste da baía parece ter sido maior do que na parte oeste. Nas falésias da margem leste não há mais nenhum nível calcário encontrado na margem oeste perto de Alcântara. Estes níveis de calcário parecem ser do Terciário Superior, e na margem direita da baía estão espalhados em blocos erodidos sobre as praias. Além de mais intensa, a erosão parece ter iniciado

mais cedo na parte leste já que fragmentos arredondados de arenitos ferruginosos são abundantes na margem oeste entre Alcântara e Itaúna. Os minerais pesados nos baixios de maré da margem oeste apresentam um grau de maturidade maior que os que se situam na margem leste.

Foraminíferos, com predominância de *Quinqueloculina lamarckiana*, foram encontrados no Banco do Meio, Banco das Almas, Coral do Norte, Banco Darlan na margem leste da região externa da baía, testemunhando a ocorrência de sedimentos marinhos nos bancos, apesar destes possivelmente serem de origem marinha. Inicialmente se pensou que as areias finas tanto na entrada da baía como na parte próxima à Ilha dos Caranguejos tivessem origem marinha, devido ao conteúdo de foraminíferos e moluscos encontrados. O grau de seleção dos sedimentos ao longo da baía (figura 8) parece indicar que os processos de entrada e saída de água agem diretamente nos sedimentos, selecionando-se mais nestes dois locais.

A lama acumulada na margem direita da baía parece ser proveniente da erosão da Ilha do Medo associado ao próprio transporte do Rio Mearim. É acumulada naquele local (figura 7), devido à posição dos Bancos Darlan, Coral do Norte, Coral do Meio, que agem como barreira ao transporte deste material.

A ação das ondas e marés são responsáveis pelas estruturas sedimentares e marcas de ondulações que ocorrem nos baixios de marés, bancos e canais da baía. Com exceção dos Bancos das Almas e do Meio, que podem ser considerados tipo "tidal ridges", todas as outras estruturas duram somente o período de baixa-mar ou preamar. O Banco Rasemili, mencionado neste trabalho pela primeira vez, parece ser também uma acumulação permanente oriunda de sedimentos selecionados da erosão do braço direito do Rio Mearim.

A distribuição dos valores de seleção mostra que o efeito da mudança progressiva nas características dos sedimentos pode ser detectado pela análise de uma série de amostras coletadas na direção de transporte. Esta mudança progressiva é refletida no diâmetro médio, morfometria dos grãos e na composição mineral dos sedimentos. Na entrada da baía é possível correlacionar a ação das correntes com a seleção progressiva dos grãos. Perto de Itacolomi os valores bem selecionados indicam que a ação da corrente é quase

uniforme selecionando o material proveniente da erosão da área. Onde as velocidades são grandes, a seleção do material é muito pobre, pois quando as velocidades são grandes somente material grosso é depositado. Este material mistura-se com material fino no momento da estofa da maré. É o que acontece em volta da Ilha do Medo.

A costa arenosa a sudeste da baía de São Marcos em direção ao Estado do Piauí, de clima semi-árido, fornece material que em parte penetra na baía ou acumula-se entre esta e a Baía de São José.

Da observação de fotografias aéreas e sobrevôos na área estudada nota-se a presença de dunas à cota de 8 m de altitude, perto de Itaúna, na margem esquerda da baía, e de extensas regiões de mangues na Baixada de Perizes, 10 km na margem direita da baía. Estes podem ser os únicos testemunhos da oscilação do nível do mar acima do nível atual, assim como cascalheiros marinhos na Baía de São José a 3 metros de altura. Mas durante os últimos 2000 anos o nível do mar deve ter permanecido estável para favorecer a formação de bancos, "spits", e distribuição dos sedimentos pelas correntes de marés.

CONCLUSÕES

1 — Os dois tipos de litoral adjacentes à Baía de São Marcos são devidos à diferença de natureza climática. Por ser árido, o litoral a sudeste é caracterizado por extensos campos de dunas e praias arenosas resultando em linha de costa retilínea. O litoral a noroeste, sendo úmido, favorece o aparecimento de mangues que em grande escala condicionam as indentações na costa.

2 — Os sedimentos dos baixios de marés e bancos que margeiam a baía, e dentro de sua própria bacia, são provenientes da erosão do Grupo Barreiras durante o Pleistoceno. Os próprios fragmentos bem rolados de sedimentos típicos de Barreiras confirmam isto.

3 — Os sedimentos de origem marinha acumularam-se na parte oeste da baía, principalmente no litoral entre as cidades de Alcântara e Itaúna. Isto é evidenciado pela associação faunística de moluscos e foraminíferos.

4 — A margem leste da baía parece ter atingido o estado de equilíbrio.

5 — As correntes de marés tomam a direção principal para o braço esquerdo do Rio Mearim, como mostram os valores de salinidade.

6 — Com base na direção principal das correntes de maré, pode-se pensar que a Ilha dos Caranguejos foi formada pela erosão e abertura do braço esquerdo do Rio Mearim, talvez em períodos de oscilação do nível do mar.

7 — A profundidade exagerada do canal principal é devida principalmente a erosão pelas correntes de fundo, que naquele local assumem valores exagerados (8 m/s).

8 — A presença da faixa de lama ao longo da margem direita da baía é devida à disposição dos bancos Darlan, Coral do Norte, Coral do Meio e Coral do Sul, que agem como barreiras para esses sedimentos.

9 — As estruturas sedimentares são formadas por correntes de marés, e, à exceção dos bancos situados na entrada da baía, na sua meia extensão e próximos a Ilha dos Caranguejos, todos são episódicos. Permanecem apenas durante o período de preamar ou baixa-mar.

SUMMARY

English title: Sedimentation process in the São Marcos Bay, Maranhão State, north-eastern Brazil.

In this paper we consider the bathymetry, sediment distribution and the hydrodynamic relationships in the São Marcos Bay, Maranhão State. The areas of erosion and accumulation have been defined and the circulatory pattern achieved. The sources of sediments in the bay have been found to be the marginal cliffs, when eroded, associated with sediments carried along by the Mearim River.

The following conclusions have been arrived at:

1 — The two types of littoral adjacent to São Marcos Bay are due to differences of climatic nature. By being arid, the south-east littoral is characterized by large dune fields and sandy beaches which result in a straight coastline. The northwest littoral, being humid, favours the appearance of mangroves that are largely responsible for the coast indentations.

2 — The sediments of the tidal flats and banks that flank the bay and those within it are derived from erosion of the

Barreiras Group during the Pleistocen. The well sorted fragment themselves support this fact.

3 — The sediments of marine origin pile up in the western side of the bay, mainly in the littoral between the towns of Alcântara and Itaúna. This is made clear by faunistic association of molluscs and foraminifera.

4 — The eastern margin of the bay seems to have achieved its equilibrium.

5 — The tidal currents are bound for the left branch of Mearim River, as indicated by salinity values.

6 — Based upon the main direction of the tidal currents, it may be concluded that Ilha dos Caranguejos derived from erosion and opening of that branch, perhaps during oscillation periods of the sea level.

7 — The exaggerated depth of the main channel is due principally to erosion by the bottom currents, whose speed in that place is very high, namely 8 m/sec.

8 — The occurrence of mud strip along the right margin of the bay is brought about by the arrangement of the Darlan, Coral do Norte, Coral do Meio and Coral do Sul banks, which act as barriers to those sediments.

9 — The sedimentary frameworks are formed through tidal currents and, except for the banks situated at the entrance of the bay and near Ilha dos Caranguejos, all are efemeral. They stay only during the high tide and ebb tide periods.

BIBLIOGRAFIA

Klein, G. V. — 1963 — Bay of Fundy intertidal sediments. *Jour. Sedim. Petr.*, **33** (4): 844-854, 11 figs.

Klein, G. V. — 1970 — Depositional and dispersal dynamics of intertidal sand bars. *Jour. Sedim. Petr.*, **40** (4): 1095-1195, 34 figs.

Reineck, E. H. & J. B. Singh — 1973 — *Depositional sedimentary environments*. Springer-Verlag, 439 pp., illus., New York.

Swift, D. J. P. — 1966 — Bay of Fundy, pp. 118-119 in Fairbridge, R. W. (ed.), *The Encyclopedia of Oceanography*. Reinhold Publishing Corporation, XIII + 1021 pp., illus., New York.

Zenkovitch, V. P. — 1967 — *Processes of coastal development*. Oliver and Boyd, 438 pp., illus., New York.