

# COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO E SEDIMENTO-LÓGICO DO ESTUÁRIO DO RIO BACANGA (SÃO LUÍS, ESTADO DO MARANHÃO, BRASIL) <sup>(1)</sup>

Erasmu da Silva Pitombeira  
Jáder Onofre de Moraes <sup>(2)</sup>

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

A parte do Atlântico Sul que aparece confinante com a costa brasileira apresenta desníveis de marés os mais variados, assumindo pequenos valores na região sul do Brasil e, gradativamente, aumentando na direção do litoral norte, onde atingem valores consideráveis, principalmente a partir da costa do Estado do Maranhão.

Tendo em vista a grande importância de se pesquisar todas as fontes alternativas de energia viáveis de serem exploradas e considerando que a região da Baía de São Marcos, no Estado do Maranhão apresenta ocorrências de marés de grandes amplitudes, surgiu a conveniência de se estudar o aproveitamento destes desníveis acentuados, para geração de energia elétrica, através de uma usina maré-motriz. A existência de uma barragem no estuário do Rio Bacanga, na Baía de São Marcos, foi o motivo para que este fosse escolhido para os estudos de viabilidade de instalação da referida usina maré-motriz (figura 1).

Com a finalidade de se conhecer os elementos necessários para o julgamento da validade do projeto e para definir as medidas a serem tomadas a curto, médio e longo prazos, foi desenvolvido um programa de estudos preliminares, composto de levantamentos batimétricos, medições de correntes, termo-salinidade e sólidos em suspensão, marés, levanta-

mentos hidrodinâmicos, topohidrográficos e de fácies sedimentares, além da avaliação, em primeira aproximação, do potencial hidroenergético disponível e utilizável no local.

## LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS

Os levantamentos ecobatimétricos foram efetuados com eco-sonda de medidas verticais comuns e "side scan sonar". Devido à peque-

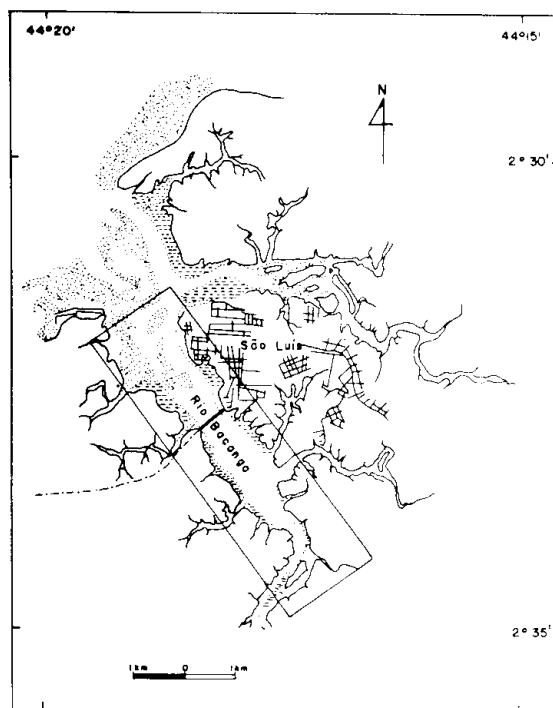


Figura 1 — Localização do Rio Bacanga.

(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).

na lâmina d'água existente, os registros de ecobatimetria e do "side scan sonar" devem ser considerados com certa reserva. Portanto,

as medições de profundidade exigiram a técnica dos levantamentos topo-hidrográficos, que foram executados visando a estabelecer

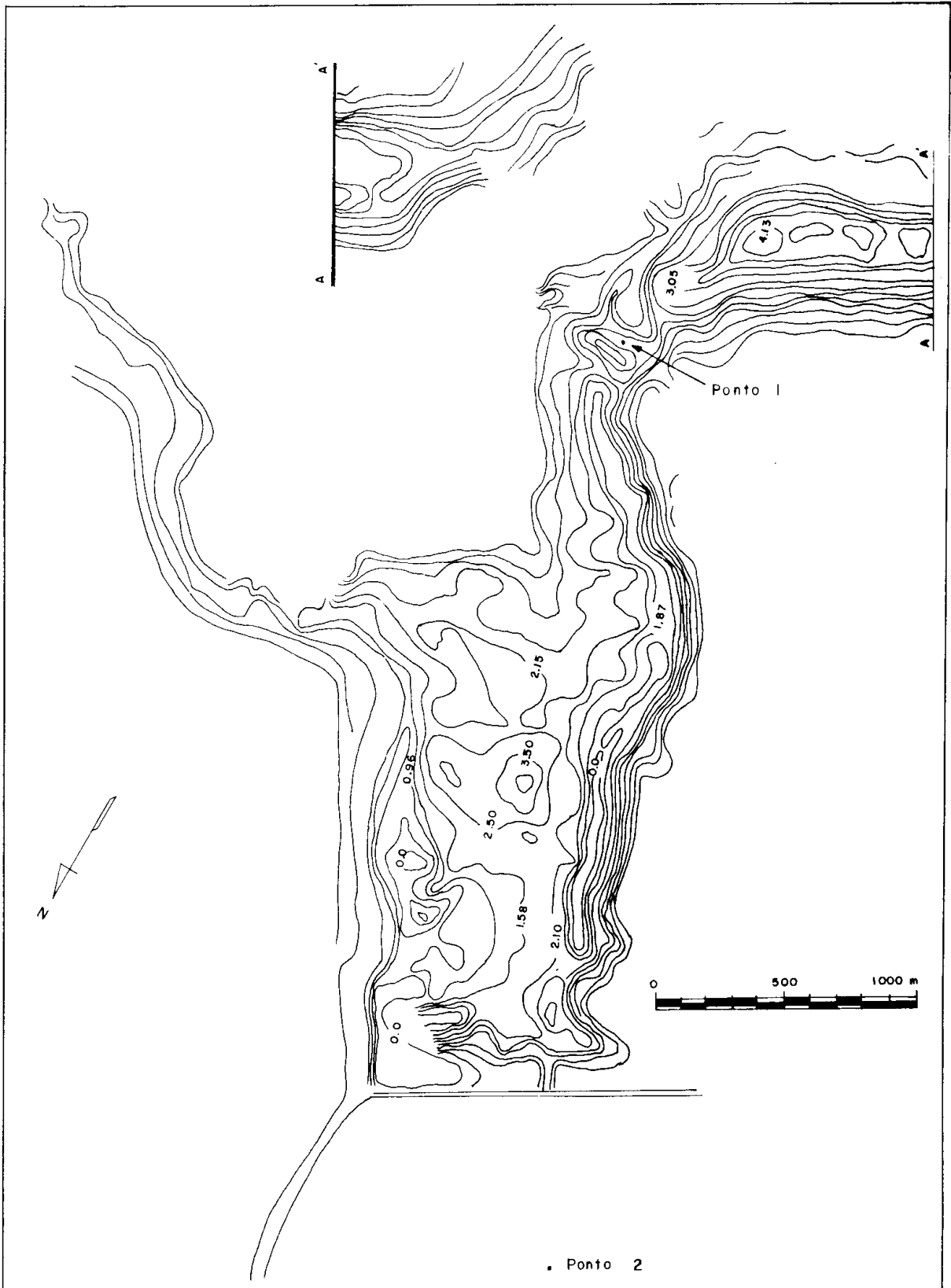


Figura 2 – Levantamento das batimétricas de fundo do Rio Bacanga.

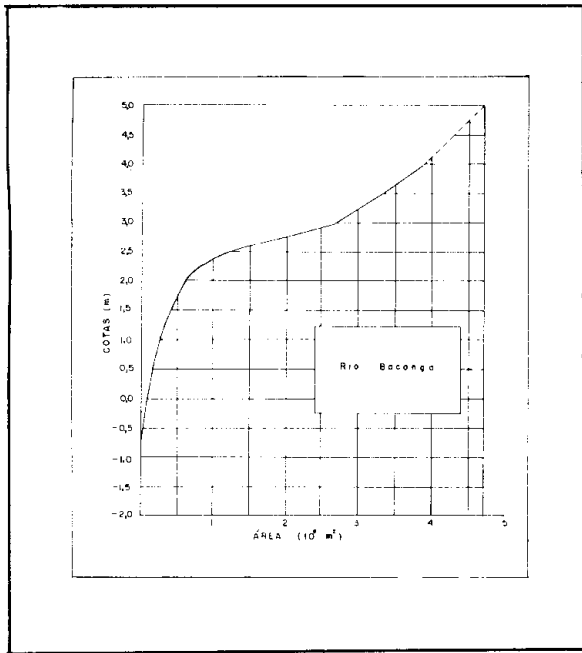


Figura 3 — Curva cota x área.

uma carta topo-hidrográfica definidora da conformação dos fundos do Rio Bacanga e de seu tributário, Rio das Bicas.

O levantamento foi realizado a partir de duas linhas de base em cada margem do curso d'água principal, ambas amarradas ao RN localizado na barragem. No Rio das Bicas, tributário pela margem limite, foi estabelecida uma

poligonal em ambos os lados, fechando com o eixo de dois boqueirões. Foi estabelecida uma seção transversal a 1.150 m a jusante da barragem, formando uma poligonal fechada com o eixo desta. As seções transversais estabelecidas no leito do rio foram equidistantes uma da outra 100 metros. Com a implantação dos pontos de planimetria, foram determinadas as cotas de cada ponto utilizando o processo geométrico. A partir das cadernetas de campo foram desenhados em planta na escala 1:5.000 os levantamentos efetuados e plotados as cotas obtidas para cada ponto. Estes pontos cotados formam um sistema de quadrículas desenvolvido de forma a acompanhar os estuários dos Rios Bacanga e das Bicas.

Objetivando identificar o relevo da bacia foram traçadas curvas de nível a cada 0,50 m, assim como perfis das seções transversais nas escalas 1:2.000 (H) e 1:2.000 (V). Considerando as seções transversais e as duas linhas de base implantadas nas margens dos dois cursos d'água levantados, a linha de nivelamento atingiu uma extensão de 50.323,94 m, cobrindo uma área de 456,70 ha (figura 2). Desse levantamento topo-hidrográfico foi obtido o material cartográfico que definiu todo o comportamento da bacia em termos de variação de cota, área de superfície livre e volume

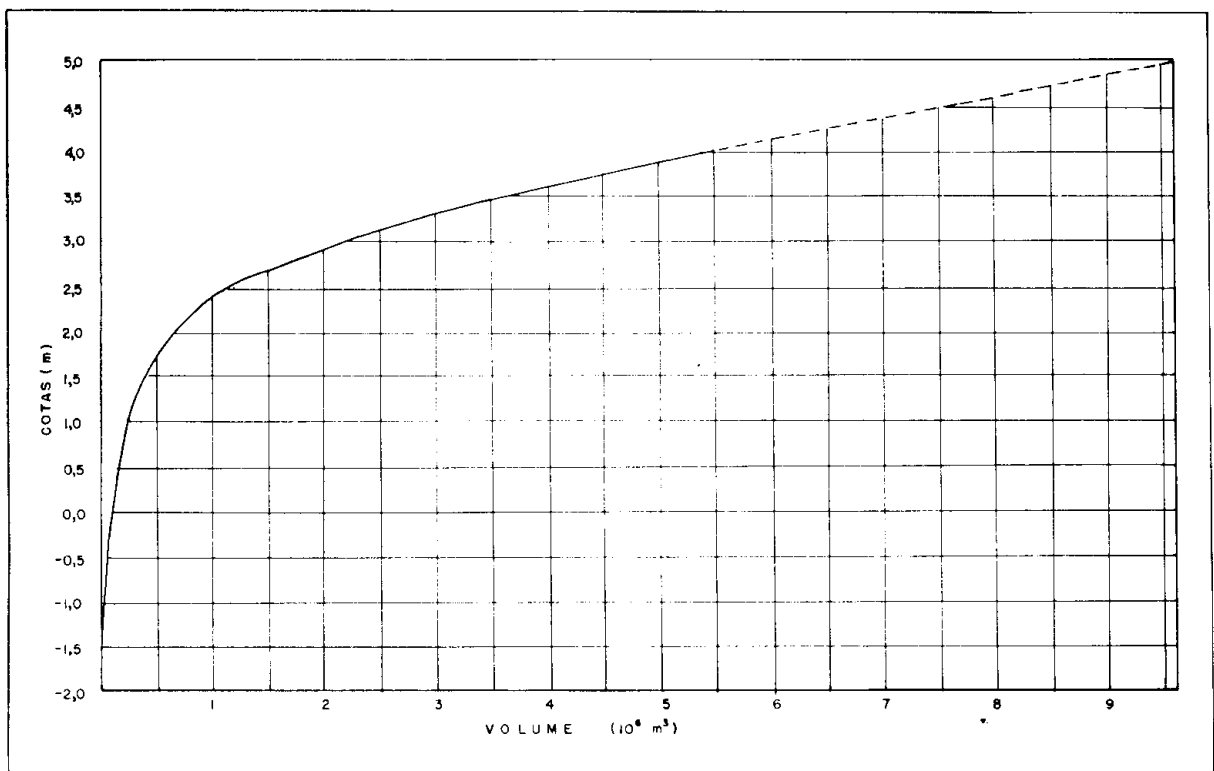


Figura 4 — Curva cota x volume.

d'água aprisionado dentro da bacia, como se segue:

*Superfície livre* — relacionando a cota dos diversos níveis d'água com a área de espelho d'água respectivo, encontramos o gráfico cota x área, entre as cotas - 2,00 e + 4,00 m (figura 3).

*Volume da bacia* — de posse dos diversos valores da bacia relacionados com as cotas respectivas, ficou estabelecido um gráfico cota x volume entre as cotas - 2,00 e + 4,00 m (figura 4).

**SEDIMENTAÇÃO**

A primeira fase dos trabalhos foi composta de dragagens em estações dentro da bacia do reservatório do Rio Bacanga e a jusante da referida barragem. Estas dragagens foram

executadas segundo uma malha, de modo a obter o testemunho do material de fundo representativo de toda a bacia. Nas regiões onde havia possibilidade de acesso, a amostragem foi feita na maré baixa com coleta manual. Nos locais onde o acesso era difícil, a coleta foi realizada nos momentos de maré cheia utilizando-se um busca-fundo modelo Dietz-Lafond. A seguir, as amostras coletadas no campo eram acondicionadas em embalagens específicas e transportadas em condições favoráveis para o laboratório.

Dos estudos em laboratório das referidas amostras de sedimentos, conseguimos as definições sedimentológicas da bacia do Rio Bacanga, a montante e a jusante da barragem,

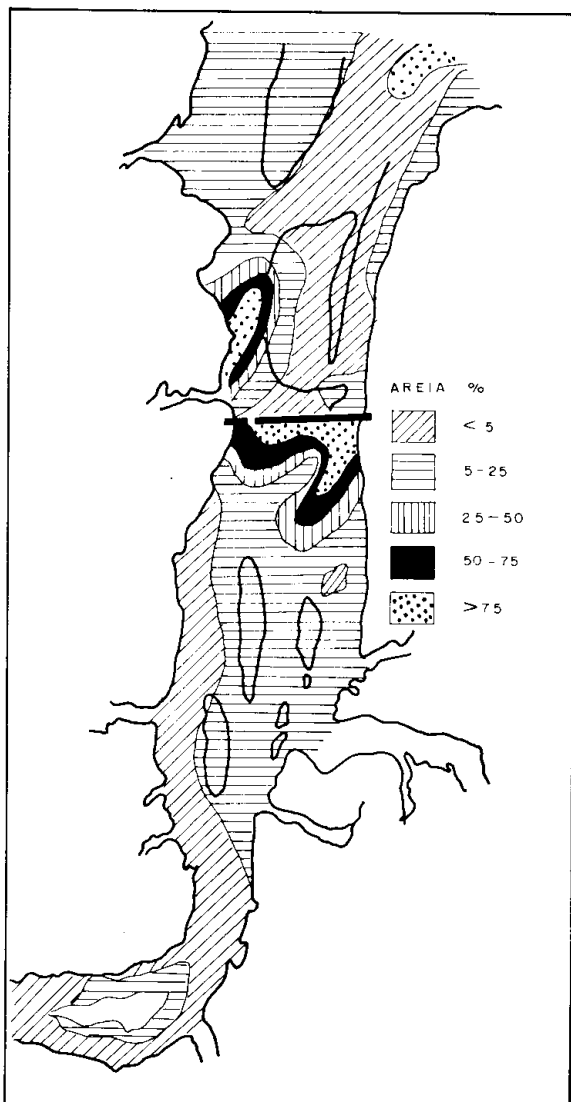


Figura 5 — Distribuição de areia no Rio Bacanga.

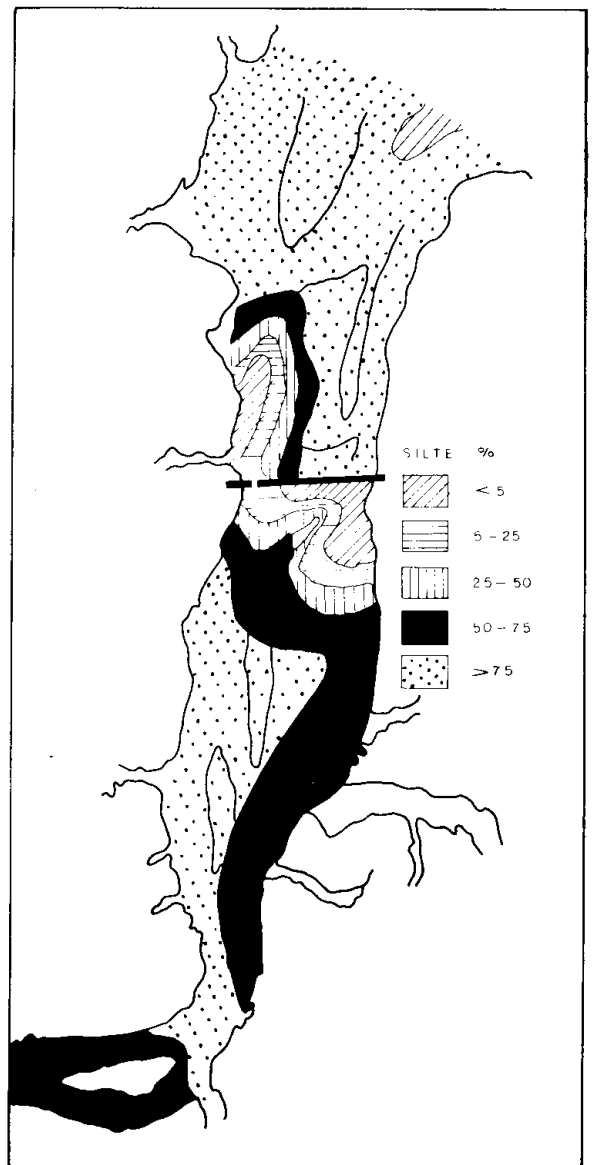


Figura 6 — Distribuição de silte no Rio Bacanga.

tendo-se obtido mapas de distribuição dos sedimentos, representados nas figuras 5 a 8 (segundo Morais & Smith, 1978), os quais serão analisados na parte referente a discussão, deste trabalho.

**HIDRODINÂMICA**

As medições de correntes objetivaram obter dados para o cálculo dos perfís de velocidades residuais que, associados aos perfís de concentração, permitiram uma primeira estimativa dos transportes residuais e sólidos em suspensão; as de salinidade e temperatura objetivaram o reconhecimento inicial da circulação salina no estuário. Tais medições seguiram um esquema pré-determinado sendo efetuadas nos pontos 1 e 2 (figura 2).

Duas equipes se posicionaram em duas

verticais, uma a montante e outra a jusante da barragem, tendo-se determinado topograficamente a posição das embarcações. Para caracterizar a distribuição de velocidades e concentrações de sólidos em suspensão, foram feitas na vertical medições simultâneas de corrente, salinidade, temperatura e sólidos em suspensão em, pelo menos, 5 pontos, dos quais o mais alto ficou sempre a 0,50 m da superfície e o mais baixo a 0,50 m do fundo. Para profundidades entre 3 e 1,50m, o número de pontos foi diminuído para três por vertical e para valores menores do que 1 m, somente um ponto (ponto central).

Cada equipe permaneceu varrendo a respectiva vertical de medições durante ciclos completos de maré. As medições foram suficientemente frequentes no tempo, de modo a permitir o traçado da curva de variação da velocidade ao longo de ciclos completos de ma-

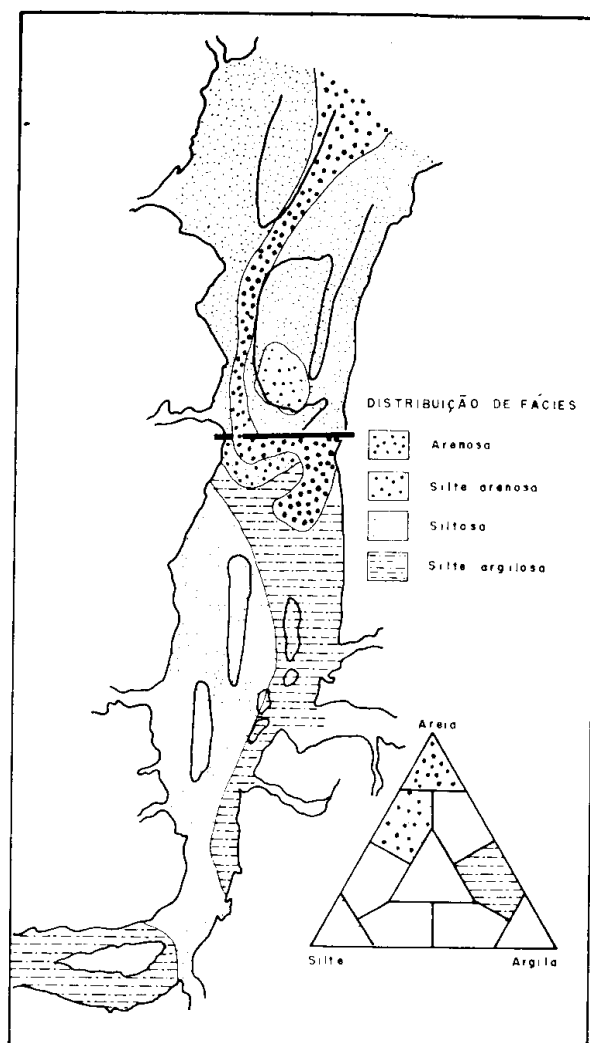
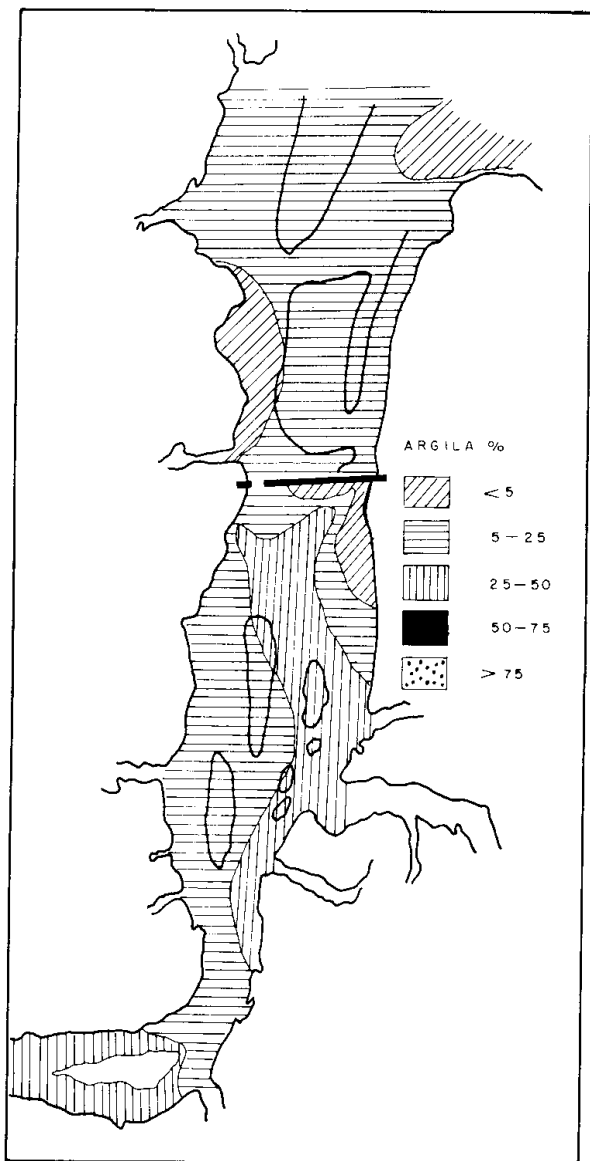


Figura 7 – Distribuição porcentual de argila no Rio Bacanga.

Figura 8 – Distribuição de fácies sedimentares do Rio Bacanga.

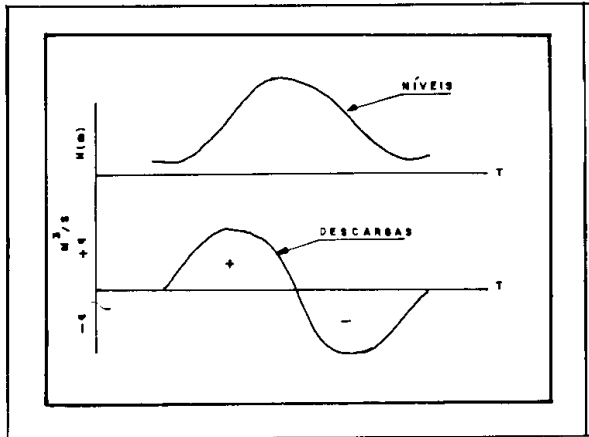


Figura 9 – Gráfico de cálculo das descargas instantâneas.

ré, em particular para os pontos próximos ao fundo, onde são maiores as concentrações de sólidos em suspensão. A fim de atender as exigências de cobertura total da variação da maré, a equipe retornou a cada ponto de medições na vertical a intervalos de 30 minutos, aproximadamente. Atendendo estas especifi-

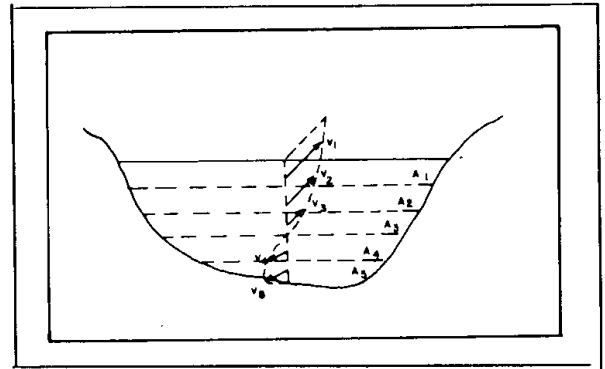


Figura 10 – Gráfico da variação da descarga em função do tempo.

cações, foram efetuadas as medições de velocidade e direção da corrente, temperatura e salinidade da água e concentração de sólidos em suspensão. Para tanto, foram utilizados dois correntômetros Hidrocean – IRFE S/03, dois termosalinômetros Kalshico e dois amostradores pontuais Van Dorn. Para controle da lâmina d'água vertical, foram efetuadas as medições em dias controlados, tais como:

Data	Hora Inicial	Hora Final	Tipo de Maré
17/03/78	13 : 00	01 : 00	Quadratura
18/03/78	14 : 00	03 : 00	"
21/03/78	17 : 30	06 : 00	Intermediária
23/03/78	06 : 30	19 : 00	Sizígia
24/03/78	07 : 00	19 : 30	"
25/03/78	08 : 00	20 : 00	"
28/03/78	09 : 30	22 : 00	Intermediária
29/03/78	10 : 30	23 : 00	"
30/03/78	11 : 00	23 : 30	Quadratura

As etapas que compõem o esquema de medições do comportamento hidrodinâmico do Rio Bacanga, compreenderam:

a) Definição da curva nível-área de medição.

b) Traçado dos perfís verticais instantâneos das componentes normais à seção ao longo do ciclo de maré médio. Nesta etapa foi considerado o sentido do fluxo, isto é, entrando no estuário as velocidades são positivas; e saindo do estuário, são negativas.

c) Homogeneização dos referidos perfís, na qual foram eliminadas as discrepâncias que porventura tenham durante a medição.

d) Cálculo das descargas instantâneas (figura 9).

e) Elaboração do gráfico da variação da descarga em função do tempo (figura 10).

f) Cálculo dos volumes líquidos transitados por ciclo de maré.

Sob o aspecto salino, por ser um estuário

praticamente sem descargas fluviais, o traçado dos perfís verticais de salinidade ao longo do tempo demonstrou ser o mesmo plenamente misturado, com salinidades iguais à oceânica, dispensando assim o traçado de cunha salina.

Com a finalidade de completar a série de dados necessários ao estudo do comportamento hidrodinâmico do estuário do Rio Bacanga, foi levada a efeito uma campanha de campo que estabeleceu observações mareométricas desenvolvidas em dois marégrafos denominados Bacanga I e Bacanga II, instalados respectivamente a montante e a jusante da barragem do Bacanga, em coordenadas geográficas aproximadas de 2° 32' S e 44° 18' W. Tais postos registradores estão equipados com marégrafo IH, sendo o de jusante de autonomia semanal e o de montante de autonomia diária. Os dois registradores operam em escala vertical 1:40 e tiveram suas análises de registros através de

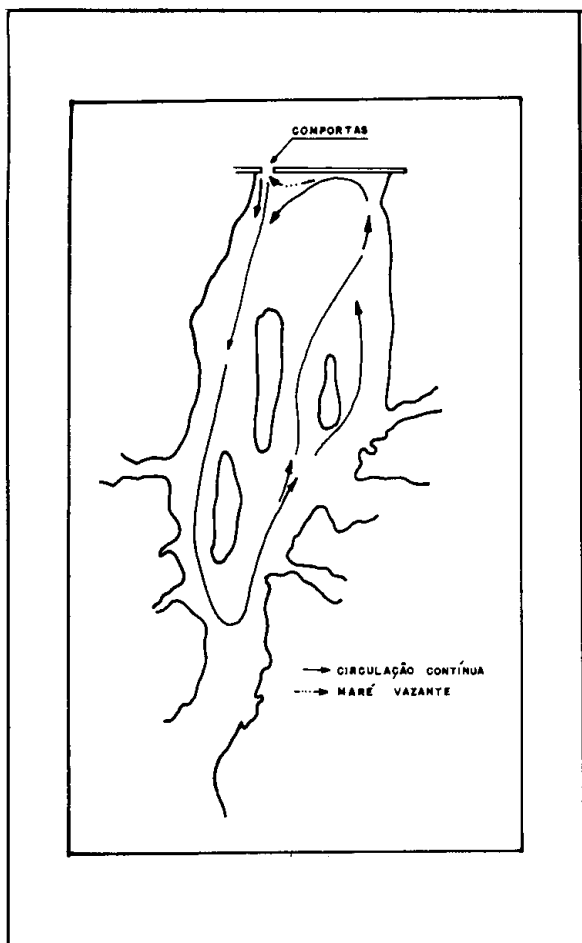


Figura 11 – Circulação interna das águas.

método matemático de aproximação aceitável.

Todos os cálculos referentes ao processo de análise do registro de maré foram efetuados em computadores IBM 370, através de modelos matemáticos baseados nas análises harmônicas de Fourier, algoritmo simétrico de Watt, sendo as marés classificadas segundo o critério de Courtier e o nível de redução estabelecido de acordo com Beleg. As análises computacionais nos deram: espectro residual de amplitude, definição das constantes harmônicas, e nível de redução de sondagem (nível médio, nível de redução, classificação das marés, nível médio das preamares de sizígia, nível médio das preamares de quadratura, nível médio das baixamares de sizígia e nível médio das baixamares de quadratura).

## DISCUSSÃO

O Rio Bacanga representa um braço de mar que entra na região continental fronteira à cidade de São Luís, tendo dimensões reduzidas. Seu maior tributário, no caso o Rio das Bicas, também apresenta pequenas dimensões

e o seu comportamento hidrodinâmico se deve quase que exclusivamente à elevação e ao abaixamento das marés. Como as marés dentro da Baía de São Marcos têm valores consideráveis, quando dos níveis de preamar temos um grande prisma de maré confinado no estuário.

Devido à sua localização geográfica, o Rio Bacanga representava um empecilho natural à ligação rodoviária entre São Luís e o Porto de Itaqui, havendo necessidade de se vencer o obstáculo representado pelo estuário de modo a que fosse viável o acesso rodoviário. Naturalmente, o Rio Bacanga representa o depositário dos esgotos de São Luís recebendo os dejetos de descargas diretas ou através de um seu tributário que tem suas nascentes dentro da própria cidade, o que gerou a idéia de se construir um aterro – barragem, de modo que o volume de água represado funcionasse como uma lagoa de decantação, melhorando as condições sanitárias da região marginal de São Luís.

O sistema construído seria uma barragem de terra transversal ao estuário, com esta superior ao maior nível de maré conhecido, tendo em sua extremidade norte três comportas semi-cilíndricas responsáveis pela liberação e pelo estrangulamento das seções. O funcionamento hidrodinâmico seria simples: quando do processo de elevação de nível as comportas se manteriam abertas havendo portanto a inundação da represa; no limite de preamar se fechariam as comportas, proporcionando assim, no abaixamento da maré, o aprisionamento de um volume d'água que funcionaria como uma bacia sanitária de decantação. Como a vazão permitida pelas comportas abertas são menores que a secção natural do estuário, o volume de água aprisionado é bem menor que o volume do prisma de maré inicial, de modo que parte da área anteriormente alagada passou a ficar emersa durante a maré cheia.

As comportas foram construídas sob a forma de seções cilíndricas móveis, tracionadas por cabos solidários a eixos móveis, e seu dimensionamento foi traçado para suportar esforços no sentido montante – jusante, já que a idéia inicial era de que a barragem funcionaria como barramento a um curso d'água de descargas unidirecionais. Entretanto, tais esforços não se comportaram unicamente no sentido montante – jusante e, como as comportas não previam esforços no sentido inverso, durante a preamar de uma maré de sizígia em que as comportas estavam fechadas, ocorreu o desengate das ponteiros e uma comporta

foi levada para o interior da bacia da barragem. Isto provocou a entrada de determinado volume d'água em excesso e resultou na inundação da área marginal. A partir de então, funcionando sem a comporta que foi arrancada, o prisma de maré do interior da barragem passou a ter outro valor e determinou outro ponto de equilíbrio limite entre o final das águas e o início das construções.

Os traçados de fácies sedimentares aliadas aos mapas de distribuição de areia, silte e argila nos informam sobre a circulação das águas dentro do reservatório. Com a definição do comportamento hidrodinâmico ditado pela situação delineada com a utilização das comportas para alagação e esvaziamento da barragem, nota-se a formação de pontos especiais de acumulação de sedimentos e locais de evidenciados trabalhos de erosão (figura 8).

A movimentação hidráulica se faz de uma maneira circular em todos os dois períodos, de elevação e de abaixamento da maré. O aparecimento de bancos sedimentares com nítida supremacia das dimensões longitudinais sobre as dimensões transversais, alimentados pelas correntes de entrada e saída, evidenciam a atuação de uma corrente circular unidirecional irreversível que nasce nas fronteiras das comportas, subindo pela margem esquerda, voltando pela margem direita e fechando o ciclo pela borda da parede de contenção (figura 11). Tal percurso pode ser observado pela distribuição de sedimentos e ficou comprovado pela utilização de traçadores visuais ao longo de períodos completos de marés. A existência física deste deslocamento é também comprovada pela localização de um canal de maiores profundidades ao longo do percurso percorrido e da contínua movimentação circular das massas d'água.

Antes da construção da barragem, o canal principal de descarga situava-se pela margem direita do estuário o que foi totalmente modificado pela obrigaçã das descargas através das comportas, aparecendo um novo canal no alinhamento das comportas e restando como testemunho um bolsão de areia na margem direita ao pé da barragem a barlar e uma depressão antiga recoberta por sedimento fino a sotamar da barragem e seguindo o alinhamento da margem direita. Todo o complexo de distribuição de fácies demonstra uma tendência natural da ocorrência de processos de deposição e assoreamento dentro da barragem. O aparecimento de bancos emersos bem como a conformação dos referidos bancos evidenciam um processo de assoreamento e

consequente diminuição, do prisma de maré.

Na tentativa de quantificar o processo de assoreamento dentro da bacia, realizaram-se várias medições hidro-sedimentométricas quando foram desenvolvidas medições de correntes, salinidade e sólidos em suspensão durante 9 ciclos completos de marés, em dois pontos do estuário, um a montante e outro a jusante da barragem. Tais resultados mostram que, em média, na seção de montante existe um saldo de apenas 2,45 ton/ciclo de maré para montante, o que representaria estarem entrando para a montante do estuário 1.733 ton/ano. Para a seção de jusante, o saldo médio é de - 670 ton/ciclo de maré, o que representa 472.439 ton/ano saindo do estuário, evidenciando um processo erosivo.

Os resultados obtidos na seção de montante parecem razoavelmente consistentes, porém para os obtidos na seção de jusante já não se pode dizer o mesmo. As evidências locais indicam a existência de um processo de deposição dentro do reservatório, o que contradiz os resultados das medições. No entanto deve-se considerar que as medições na seção de jusante foram efetuadas em somente uma vertical, numa seção de aproximadamente 1.000 m de extensão e que, portanto, podem estar afetadas pela existência de desvios importantes uma vez que tomou-se para toda a seção o mesmo perfil de sólidos em suspensão existente no canal principal, onde foi medido. Além disto, foram efetuadas medições somente em período de estiagem, não se podendo detectar os ciclos de equilíbrio dinâmico de longo prazo. Sendo assim, os resultados das medições sedimentométricas devem ser vistos com as restrições colocadas anteriormente.

Os problemas de transporte de sedimentos podem ser complexos no estuário e, portanto, somente campanhas de medições de maior duração e com maior densidade de pontos de medição é que poderão esclarecer com o grau de segurança necessário o comportamento sedimentométrico do estuário.

O objetivo principal do reconhecimento hidrodinâmico e sedimentológico do estuário do Rio Bacanga era quantificar, em primeira aproximação, as potencialidades hidrenergéticas do estuário, passíveis de aproveitamento através de uma usina maré-motriz experimental. Para que haja condições de dimensionar a usina maré-motriz, é necessário ter-se conhecimento do volume d'água existente na Bacia e do comportamento futuro dos fundos do estuário, a fim de se definir possíveis mudanças nos prismas de maré ocorrentes. Pode aconte-



cer que um processo de assoreamento acentuado diminua o prisma de maré a tal ponto que o volume d'água aprisionado não seja suficiente para manter a usina em funcionamento. Pode também ocorrer que um processo erosivo de maiores proporções comprometa o funcionamento normal da usina. Para desenvolver os trabalhos normativos para a construção, torna-se necessária a admissão de determinados fatores físicos limitantes, tais como, prováveis variações nos prismas de marés, cotas máxima e mínima possíveis no reservatório, queda mínima necessária a descarga máxima para geração. As condições locais e as características das máquinas geradoras impõem algumas limitações físicas, dentre as quais a cota máxima permitida no reservatório a montante da barragem é de vital importância.

A barragem existente foi originalmente projetada para manter níveis internos à cota 5,80 m. Posteriormente, visando ao aproveitamento de certas áreas marginais ao lago, a operação no reservatório foi modificada objetivando a fixação de cotas máximas em torno de 3,50 m. Foi efetuado o traçado da curva cota x volume através do levantamento topohidrográfico desenvolvido na área, atingindo a cota + 4,00 m, obtendo-se o volume para as cotas superiores por extrapolação. Tendo em vista estas limitações, foram analisadas alternativas para cotas máximas no reservatório entre 4,50 e 5,50 m, pois ficou evidenciado que para cotas inferiores a 4,50 m não há possibilidade de aproveitamento, uma vez que as quedas se tornam desprezíveis; cotas superiores a 5,50 m somente serão possíveis em marés excepcionais.

## CONCLUSÕES

1 – Para que haja condições suficientes de implantação da usina piloto maré-motriz é necessário um limite mínimo de cota de água de 4,5 m.

2 – É necessário fazer uma restituição aerofotogramétrica da área marginal acima de 4 m ou uma complementação dos trabalhos topográficos até atingir a cota de 4,5 m, para substituir a curva cota x volume extrapolada pela curva cota x volume real.

3 – As facies sedimentares associadas à análise aerofotogramétrica revelaram um padrão de

correntes circulares na área a montante da barragem.

4 – Há uma área de acumulação de sedimentos próxima à margem direita da barragem devido a este padrão circular de correntes.

5 – Seria conveniente que o canal de alimentação das turbinas se localizasse na margem direita do estuário, mas como a geologia local não permite, terá que ser implantado em zona externa, à esquerda da barragem com a vantagem de evitar erosão e assoreamento da margem direita a jusante.

## SUMMARY

*English title:* Hydrodynamic and sedimentary behaviour of the estuary of Bacanga River, São Luís, Maranhão State, Brazil.

This paper deals with the bathymetry, suspended materials, sediment transport, salinity, currents and tides, aiming to delineate the diagnosis of the viability of this region as far as tidal – produced electric power is concerned.

The field work lasted over two years, and besides all the collected data, a variety of information of several sources, including aerial photogrametry has been taken into account.

As the local geology of the right bank is not very suitable for the heavy foundations, it is suggested that a channel should be cut to the left side of the barrage connecting upstream and downstream parts of the estuary. This would correct the silting-up upstream and reduce the shoaling of the channels downstream.

The main results are summarized as follows:

1 – Conditions for the installation of a pilot plant for tidal-produced electric power depend on a minimum water level of 4.5 m being attained.

2 – An aerophotogrametric restitution to the marginal area above 4 m or a completion of the topographic work up to the 4.5 m elevation, is needed, in order to substitute the extrapolated elevation x volume curve for the true one.

3 – The sedimentary facies related to the aerophotogrametric analysis have shown a

pattern of circular currents in the upstream area of the barrage.

4 – There is an accumulation area of sediments near the right margin of the barrage due to that pattern of circular currents.

5 – It would be most convenient that the supplying channel for the water turbines be located off the right margin of the estuary, but as the local geological conditions do not allow it, the outer zone to the left of the bar-

rage must be chosen, having the advantage of avoiding erosion and silting up of the right margin downstream of the barrage.

#### BIBLIOGRAFIA

Morais, J.O. & A. J. Smith – 1978 – **A preliminary report on two tidal deposits in São Marcos Bay, northeastern Brazil**. Proceedings of the "1978 International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary", pp. 212 – 231, 9 figs., São Paulo.