

Avaliação dos impactos da barragem de Santa Helena no trecho estuarino do rio Jacuípe, litoral norte da Bahia - Brasil

Evaluation of the Santa Helena dam impacts on the Jacuípe river estuary, north coast of Bahia - Brazil

Geraldo Marcelo Pereira Lima^{ab}, Guilherme Camargo Lessa^{ac}, Taoan Silva Franklin^{ad}

^aInstituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia
glima@ufba.br^b, gcleessa@gmail.com^c, taoansf@gmail.com^d

RESUMO

A construção de barramentos fluviais normalmente causa impactos hidráulicos e hidrológicos no sistema estuarino localizado próximo à foz do rio. A literatura relaciona como consequências hidráulicas comuns associadas à regulação das descargas, o aumento da vazão média e a redução das vazões instantâneas, com atenuação dos picos de cheia. Este estudo objetivou caracterizar a hidrodinâmica e os padrões de mistura do estuário do rio Jacuípe (litoral norte do Estado da Bahia) e avaliar a influência da Barragem de Santa Helena, erguida em 2001, no fluxo estuarino. Observou-se que a barragem alterou o regime de vazão fluvial, afetando todas as faixas de vazão. No entanto, os resultados são inversos aos relatados na literatura, com redução das vazões médias e aumento das descargas de pico. A liberação de água doce atingiu os extremos da curva de descarga, e a ausência de descarga passou a ocorrer com períodos mais prolongados. O estuário apresentou-se parcialmente misturado em marés de quadratura e bem misturado em sizígia, mas, em ambas as condições de maré, com pequena descarga da barragem ou descarga nula, predominou a circulação gravitacional. Valores elevados de descarga fluvial ($70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) causam a expulsão da água marinha do estuário e o bombeamento fluvial, com fluxo exclusivamente de vazante. Com o início da planejada transposição de água ($10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) para a vizinha bacia do rio Joanes, os efeitos da barragem sobre o estuário serão alterados, com redução dos picos de cheia e provável assoreamento da calha e canal de entrada. Este processo poderá causar degradação da qualidade ambiental do estuário.

Palavras-chave: Estuário; Barramento fluvial; Circulação e mistura.

ABSTRACT

River dams are normally associated to hydraulic and hydrologic impacts in estuaries. Hydraulic consequences, reported in literature, are the increase of the mean and the reduction of maximum discharges, with the attenuation of the flood waves. This study aimed to characterize the hydrodynamics and mixing patterns of the Jacuípe river estuary (northern State of Bahia), and to evaluate the influence of Santa Helena dam, erected in 2001, upon the estuarine flow. It was observed that the dam altered the natural discharge regime, impacting all ranges of fluvial discharge. The changes were, however, opposite to those related in the literature, as post-dam mean discharge value was reduced and peak discharge values were increased. Water release rates topped the extreme of the natural discharge curve, whereas null discharges were sustained for a much longer period. The estuary was partially mixed during neap and well mixed during spring tides, with gravitational circulation predominating with low and null dam discharge values in both tidal conditions. Larger discharge values ($70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) expelled the salt water from the estuary and caused ebbing flow throughout the tidal cycle. The implementation of water transposition from Santa Helena dam to the neighboring Joanes river will reduce peak flows and probably cause shoaling of the estuary channel and inlet. This process is likely to cause degrading environmental conditions in the estuary.

Keywords: Estuary; Dam; Circulation and mixture.

1. Introdução

Estuários são ambientes de transição entre o oceano e a bacia hidrográfica, onde a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental (Pritchard 1952). Sendo assim, a descarga fluvial é de grande importância para os processos estuarinos e para manter o equilíbrio natural da zona costeira (Miranda *et al.* 2002). Entretanto, diante do crescimento populacional nas últimas décadas, a maior demanda por água e energia tem levado ao constante represamento dos rios (principal modelo de captação de água e geração de energia do Brasil). Em menos de meio século, a construção de barragens fluviais afetou consideravelmente os ambientes estuarinos, provocando significativas alterações em seu regime hidrológico, na intensidade do aporte fluvial, e a perda da capacidade de renovação das massas d'água (Collier *et al.* 2000).

No Estado da Bahia, até a metade do século passado, as alterações hidrológicas nas bacias de drenagem que alimentavam os estuários eram pequenas, e os efluentes das cidades e indústrias lançados nesses corpos d'água eram ainda adequadamente diluídos e renovados, com impactos praticamente desprezíveis.

A implantação do Complexo Petroquímico de Camaçari (1978), terceiro maior polo industrial do Brasil, trouxe consigo duas grandes consequências: pulsos de crescimento populacional na Região Metropolitana de Salvador e a emissão de carga de poluentes atmosféricos e hídricos. A primeira acarretou o aumento da demanda de abastecimento de água, a qual foi respondida com a construção de diversos barramentos, entre eles Santa Helena no rio Jacuípe. A segunda consequência foi à contaminação de diversos cursos e corpos d'água, como no caso do rio Jacuípe, onde elevados níveis de Pb, Co, Ar, Zn e Cr foram encontrados em sedimentos da zona estuarina (Queiroz 1989). Com a regulamentação da Lei Federal n.º 9.433, de 1997, que instituiu o Programa Nacional de Recursos Hídricos, os ecossistemas que envolvem a zona costeira passaram a ser considerados nos programas de gerenciamento das bacias hidrográficas. Porém, desde então, pouca discussão ocorreu sobre a quantificação do volume necessário de água doce para promover a manutenção dos ambientes estuarinos.

Este estudo tem como objetivos a caracterização da circulação e mistura no trecho estuarino do rio Jacuípe e a investigação do impacto que a barragem poderá gerar na capacidade de descarga do estuário.

2. Área de estudo

A bacia de drenagem do rio Jacuípe, com área de 1.275 km² é uma das dez bacias hidrográficas que

deságuam no trecho de 200 km da costa brasileira conhecida como Litoral Norte do Estado da Bahia (figura 1). Este trecho da costa apresenta dois domínios climáticos, um úmido próximo do litoral e uma estreita faixa intermediária subúmida mais para o interior do continente. Desse modo, observa-se na bacia do rio Jacuípe, um forte gradiente pluviométrico, com precipitação acumulada média, variando de 1.900 mm.ano⁻¹ junto ao litoral a <1.000 mm.ano⁻¹ na cabeceira do rio. O período considerado úmido ocorre entre março e agosto, e o seco entre os meses de setembro e fevereiro. Contudo, precipitações concentradas podem ocorrer ocasionalmente, mesmo no período considerado seco. O mês com maior precipitação é maio e o mês mais seco é janeiro, com médias climatológicas de, respectivamente, 235 mm e 60 mm. A máxima acumulada no mês de maio pode superar 800 mm (Lima 2007).

A Barragem de Santa Helena (BSH) foi erguida em 1980, a 40 km da foz (seguindo o curso do rio Jacuípe), recebendo a descarga de uma bacia de drenagem de 880 km² (75% do total da bacia). A barragem cedeu em 1984, tendo sido reconstruída em 2000, com capacidade de armazenamento, no reservatório formado, de 240,6.10⁶ m³ e espelho d'água de 40,3 km², com descarga de projeto de 10 m³s⁻¹, em caso de escassez hídrica na região.

A jusante da barragem deságuam apenas dois tributários, sendo eles os rios Capivara Pequeno e o Capivara Grande, este segundo afluindo próximo à desembocadura do rio Jacuípe (figura 1).

3. Metodologia

3.1. Descarga fluvial

Os dados hidrológicos foram obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas (SIH), da Agência Nacional das Águas (ANA), e as estações fluviométricas utilizadas nas análises foram aquelas localizadas na porção mais a jusante dos rios, dispondo-se de séries históricas de cotas (h), vazões (Q) e resumos de descargas. As séries históricas de cotas e vazões são constituídas de valores discretos médios diários, obtidos pelos registros de descargas mínimas e máximas realizados às 9h e 17h. Os dados de descargas foram analisados quanto à sua intensidade e regime sazonal, objetivando-se verificar três situações de entrada de água doce no estuário: 1) a descarga natural do rio, 2) a descarga liberada pela BSH e 3) a captação de água doce restrita à área a jusante do barramento. Médias de vazão diária, associadas às condições naturais do rio, foram monitoradas entre 1961 e 1979 na estação fluviométrica de Emboacica (figura 1), localizada cerca de 35 km da foz e que drena uma área de 905 km². A série histórica de Emboacica foi estendida em 26 anos (1955-1960 e 1980-2000) através da correlação existente com a estação de

Mata de São João, localizada cerca de 30 km a montante. A figura 2 mostra a distribuição das vazões simultâneas às duas estações, com índice de

correlação de 0,92 e o polinômio utilizado para o cálculo da vazão em Emboacica.

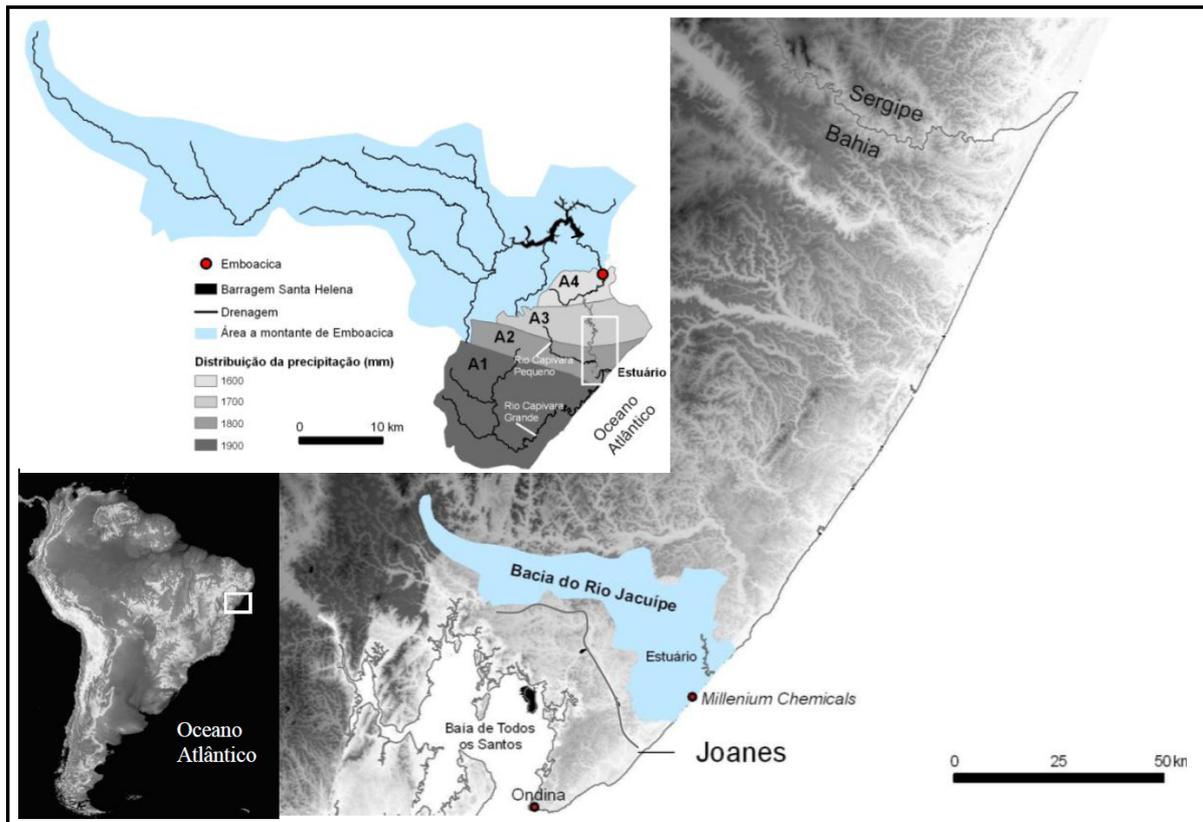


Figura 1: Localização do rio Jacuípe no litoral norte do Estado da Bahia e detalhe da localização do reservatório formado pela Barragem Santa Helena, da estação fluviométrica de Emboacica e da distribuição das áreas de precipitação

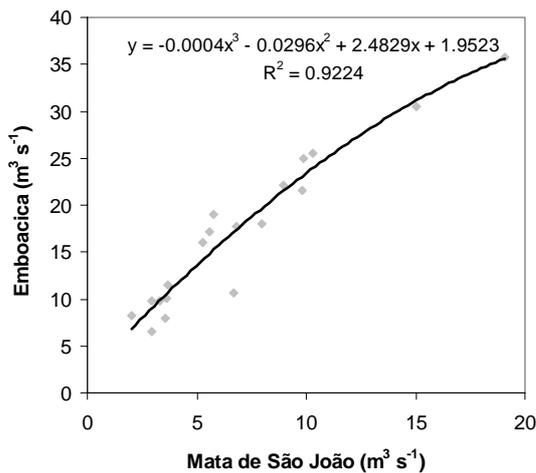


Figura 2: Curva de melhor ajuste dos dados de vazão média anual das estações fluviométricas de Mata de São João e Emboacica

Após a construção da barragem, entre os anos de 2001 e 2005, a vazão passou a ser estimada a partir de dados horários da abertura das comportas (fornecidos pela Empresa Baiana de Água e

Saneamento - EMBASA) através do método de *descarregamento em orifícios* (Porto 1998). A descarga da barragem é dada pelo coeficiente de descarga (C_d), obtido empiricamente em função da carga e dimensões do vertedor, largura do vertedor (6,97m), espessura da coluna d'água acima do vertedor (H_1), carga sobre a elevação inferior do orifício (H_2) e, finalmente, altura da abertura da comporta (Arauz 2005) (a). A curva da descarga da BSH (figura 3) é descrita pela equação (Porto 1998):

$$(1) \quad Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (H_1^{3/2} - H_2^{3/2})$$

O *coeficiente de descarga* (C_d) foi então determinado por:

$$\begin{aligned}
 Cd = & -4,0211 \left(\frac{a}{H_1} \right)^5 + 8,9104 \left(\frac{a}{H_1} \right)^4 \\
 (2) \quad & -7,4396 \left(\frac{a}{H_1} \right)^3 + 2,8974 \left(\frac{a}{H_1} \right)^2 \\
 & -0,6303 \left(\frac{a}{H_1} \right) + 0,7547 \\
 \frac{a}{H_1} = & \frac{(a \div 100)}{(NA - 8m)}
 \end{aligned}$$

sendo NA o nível da água no reservatório, e 8m a coluna d'água abaixo da altura da comporta.

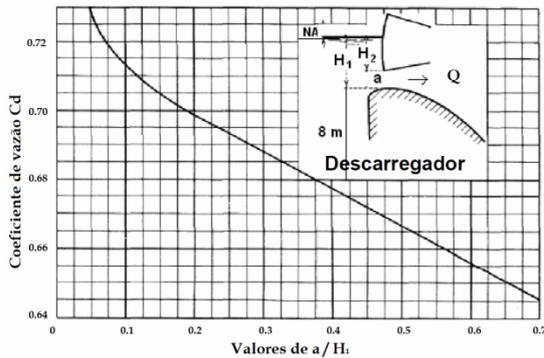


Figura 3: Coeficiente de descarga (Cd) em função da relação a/H₁ estabelecido para a Barragem de Santa Helena

A descarga potencial a jusante da barragem foi estabelecida a partir do método empírico de estimativa de descarga, conhecido como método de Schreiber (Miranda *et al.* 2002). A fração da precipitação que se transforma em escoamento superficial ($\Delta f/P$) é estimada em função da taxa de precipitação (P, em mm) e evapotranspiração potencial regional (E_v, em mm) por:

$$(4) \quad \frac{\Delta f}{P} = \exp \left(- \frac{E_v}{P} \right),$$

A evapotranspiração potencial (E_v) é estimada pelo método de Thornthwaite (Tucci 1998), por meio da equação:

$$(5) \quad E_v = 16 \cdot F_c \left(10 \frac{T}{1} \right)^a$$

onde, E_v corresponde a evapotranspiração potencial para meses de 30 dias e insolação de 12 horas (mm.mês⁻¹), T é a temperatura média (°C) e F_c é o fator de correção em função da latitude e meses do ano. O coeficiente “a” é calculado a partir da expressão:

$$(6) \quad a = 67,5 \cdot 10^{-8} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 0,0179 \cdot I + 0,492$$

$$(7) \quad I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5} \right)^{1,514}$$

onde t_i é a temperatura média do mês i. Finalmente, a descarga líquida (Q) é obtida por:

$$(8) \quad Q_2 = \frac{\Delta f}{P} PA_T = \Delta f A_T$$

Devido à discrepância pluviométrica da área a jusante da BSH, valores de descarga foram calculados para quatro subáreas da bacia de drenagem (A₁, A₂, A₃ e A₄), limitadas pelas isoietas anuais com espaçamento de 100 mm (ver figura 1). As taxas de precipitação mensais foram obtidas a partir da relação entre a precipitação total de cada subárea (observada nas isoietas), multiplicada pela precipitação média mensal e a média anual (estação pluviométrica de Emboacica).

As médias mensais dos dados de precipitação (P) e evapotranspiração (E_v) encontram-se na figura 4. Os dados de temperatura e evapotranspiração foram obtidos da estação meteorológica de Ondina, localizada a 50 km da bacia (em Salvador), dentro da mesma isoterma (25° C). A série de vazão foi analisada estatisticamente para obtenção das médias e desvios-padrão das descargas mensais e anuais da curva de permanência das descargas e o comportamento do regime hidrológico do rio (modelo-padrão de distribuição sazonal das vazões).

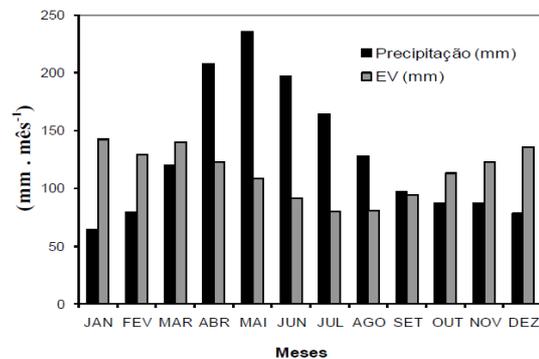


Figura 4: Dados de precipitação e evapotranspiração da Estação Meteorológica de Ondina (em Salvador)

3.2. Maré

Marégrafos analógicos (bóia e contrapeso) foram instalados em duas estações ao longo do estuário: a estação #1, localizada a aproximadamente 5,5 km da embocadura, e a estação #2, a 5 km a partir da primeira (figura 5). Estes permaneceram operacionais entre os meses de maio e agosto de 2002, totalizando 103 dias de amostragem. Os registros foram computados em mesa digitalizadora, e as lacunas na série temporal foram

preenchidas por interpolação polinomial. A série temporal foi submetida à análise harmônica (Franco 1988) para extração das principais componentes. Para identificar a interferência causada pelo vento e pela vazão, foi utilizado um filtro passa-baixa tipo *Doodson*, para eliminar variações nas frequências inferiores a 72 horas. Os dados de vento foram obtidos com a empresa *Millenium Chemicals*, localizada aproximadamente 10 km ao sul da embocadura do rio Jacuípe (ver figura 1).

3.3. Monitoramento do fluxo e propriedades hidrográficas

O monitoramento das correntes e massas d'água foi realizado entre 2001 e 2002. Para o monitoramento dos campos de salinidade, temperatura e turbidez, foi realizada uma série de campanhas diárias, no intervalo de 15 dias entre sizígia e quadratura, entre 7 e 21 de setembro de 2001. Leituras em intervalos de 1 metro de profundidade foram executadas em estações preestabelecidas, espaçadas em aproximadamente 500m a partir da embocadura, acompanhando a progressão das estofas de preamar e baixamar. Os perfis foram interrompidos quando a concentração de sal não mais podia ser detectada pelo aparelho. Os instrumentos utilizados foram sondas multiparâmetros *Horiba* e *Hydrolab*, as quais foram calibradas em campo diariamente.

Para o monitoramento da variação temporal do fluxo, os mesmos parâmetros supracitados foram amostrados em estação fixa, localizada no talvegue do canal, distante 6,5 km da embocadura (figura 5). As campanhas se deram entre os meses de abril e julho de 2002, compreendendo ciclos de 13 horas, com perfilagens a cada 30 minutos, em intervalos verticais de 1m a partir do fundo.

4. Resultados

4.1. Descarga fluvial

A vazão média diária da estação de Emboacica (vazão natural), considerando o intervalo de 1961 a 1979 (figura 6a), foi de $16,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com valor mínimo e máximo de $0,8$ e $109,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. O desvio-padrão apresenta pequenas oscilações na descarga de longo período, da ordem de $19,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

A distribuição das médias mensais da vazão natural acompanha a distribuição da precipitação, com característica unimodal (figura 6c). Já, a distribuição da média das vazões máximas mensais é bimodal, ocorrendo um máximo de $67,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no mês de maio, e outro em novembro de $33,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (figura 6e). Os menores valores de descarga média acontecem nos meses de setembro a março (figura 6c).

Durante o período de operação da represa, a descarga média foi reduzida para $9,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

(figura 6f). A retenção de água no reservatório acarretou valores anormalmente altos de vazão, inserção de vazões nulas e alterações do regime hidrológico do rio.

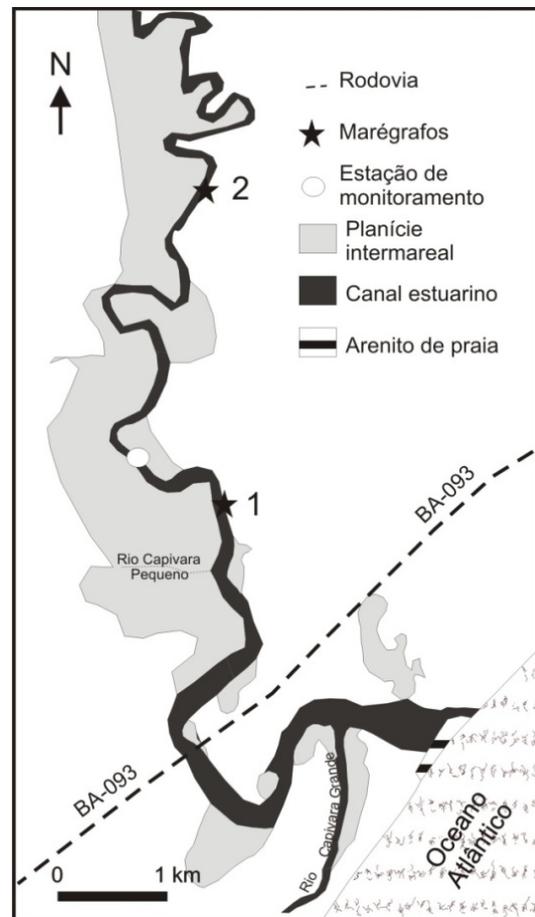


Figura 5: Localização das estações maregráficas no rio Jacuípe e da estação de monitoramento do fluxo

As alterações da frequência de ocorrência das vazões naturais foram observadas em praticamente todas as faixas de descarga (figura 7b). Como a represa tem operado no limite da capacidade de armazenamento (figura 7a), descargas anormalmente elevadas passaram a ocorrer em momentos de cheias. Foram observados, desde 2001, 28 picos de descarga máxima da série histórica, que era de $109 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (1961 a 1979). Os picos de vazões máximas diárias atingiram $561 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, e valores médios horários alcançaram o máximo de $834 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, geralmente perdurando por poucas horas.

A ausência de descarga abrangeu longos períodos, principalmente durante o enchimento do reservatório, em 2001 e o segundo semestre de 2003. As descargas nulas representam 36,7% dos registros entre 2001 e 2005. A retenção excessiva de água no reservatório causou também alterações no padrão de distribuição das médias mensais de vazão, com o aparecimento de uma segunda moda em janeiro (figura 6 d).

A vazão média calculada para o rio Capivara Grande (A_1) é de $6,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, podendo atingir $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no mês de maio, devido à extensão da bacia e elevado índice pluviométrico. Já, a descarga média para o trecho a montante, até a represa, foi estimada em $5,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sendo a mínima de $0,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em janeiro e máxima de $12,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em maio (figura 7c). Somando-se a vazão média da barragem com aquela calculada para o setor a jusante, a vazão para todo o estuário é de $28,22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ocorre que o rio

Capivara Grande encontra o rio Jacuípe bem próximo da foz e, desta forma, a vazão na cabeceira do estuário é de $21,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

A distribuição das vazões médias mensais, expostas na figura 8, mostra que no período úmido (maio), a vazão média esperada é de $48 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e, no período seco, inferior a $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

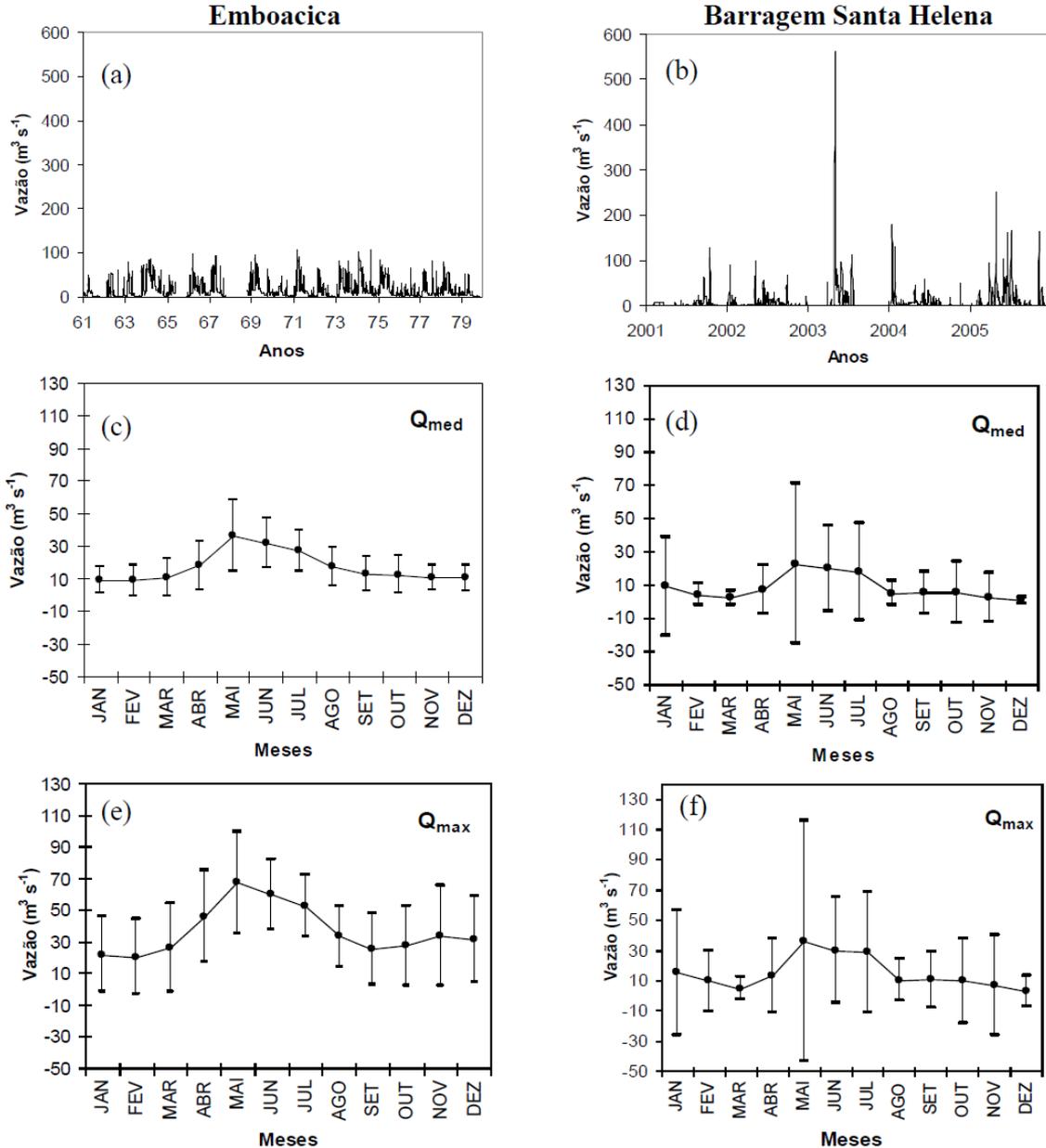


Figura 6: (a) Hidrogramas do rio Jacuípe (média diária), com fluxo natural entre 1961 e 1979 (Estação Emboacica), (b) com o fluxo regido pela Barragem Santa Helena, entre 2001 e 2005, (c) vazão média mensal da estação de Emboacica e (d) da Barragem Santa Helena, (e) máxima mensal em Emboacica e (f) na Barragem Santa Helena. A linha tracejada refere-se ao desvio padrão.

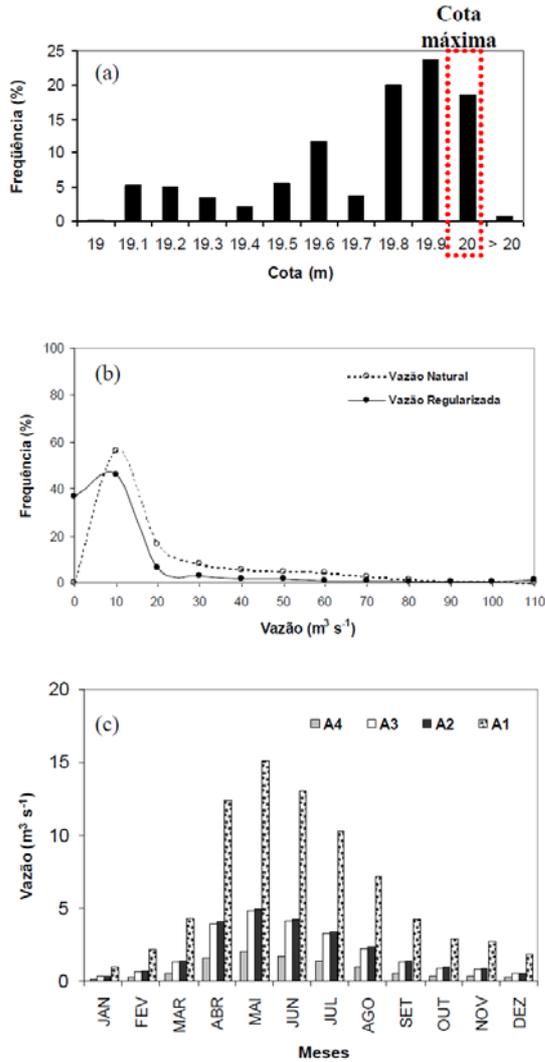


Figura 7: (a) Frequência de permanência do nível do lago a montante da Barragem de Santa Helena, (b) frequência de ocorrência das vazões do rio Jacuípe e com o seu curso natural e atualmente controlado pela Barragem de Santa Helena e (c) descarga média mensal esperada para cada subárea a jusante da barragem

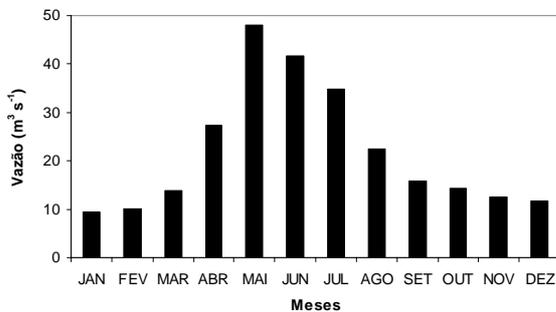


Figura 8: Hidrograma das descargas médias totais mensais do rio Jacuípe

A variabilidade hidrológica interanual de maior frequência (1/3 a 1/5 anos) causa oscilações da descarga média anual de até 29 m³ s⁻¹. Estas

oscilações estão superpostas a ciclos mais longos, com períodos de aproximadamente 10 anos e amplitude de 10 m³ s⁻¹ (figura 9), e bem correlacionadas com as oscilações de baixa frequência de pluviosidade, com amplitude de 200 mm (Lima 2007).

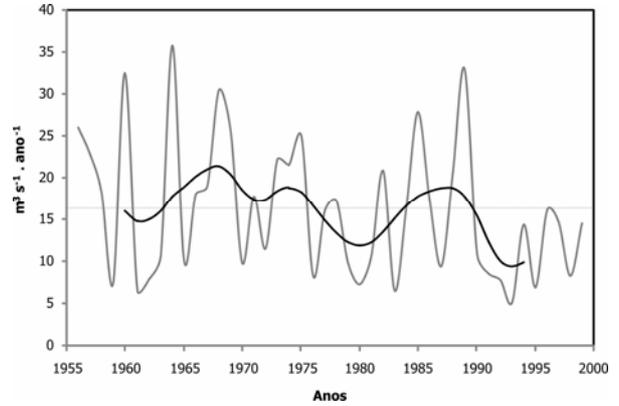


Figura 9: Variação temporal da vazão média anual (m³ s⁻¹) do rio Jacuípe com série estendida de 1956 a 1999 e oscilações de baixa frequência indicando ciclos decenais. A linha horizontal tracejada refere-se à média histórica da vazão natural em Emboacica, podendo-se observar a magnitude das amplitudes anuais e decenais.

4.2. Marés

A maré no estuário é caracteristicamente semidiurna (com número de forma $\approx 0,095$) e hipossincrônica, com maré oceânica sendo amortecida em média em 0,37m na estação #1 e assim se mantendo para montante. O amortecimento da onda de maré ocorre já na embocadura devido à presença de um delta de maré. A atenuação da maré oceânica varia entre os períodos de sizígia e quadratura, apresentando amortecimento médio de 0,75m e 0,21m, respectivamente.

Além do amortecimento, a maré sofre distorção, com tempos de elevação do nível d'água mais curtos que os de descida. As desigualdades entre os tempos de enchente e vazante foram superiores a 1 ½ horas, com média de 5:35h para a enchente e 7:08h para a vazante (figura 10). Em sizígia, a subida teve duração de 5h e a descida, 7:20h. A variação da razão do tempo de enchente e vazante junto à altura de maré mostra que a distorção acentua-se com o aumento da altura de maré, dado o maior impacto do delta de maré no escoamento de vazante.

A maré astronômica explica 89% da variação do nível d'água observado na estação #1. O percentual restante se deve principalmente aos efeitos do vento, cujas oscilações de baixa frequência apresentam um coeficiente de correlação de 0,86, com as oscilações de mesma frequência do nível d'água (figura 11). Ventos de N-NE deprimiram o nível médio, enquanto ventos de S-SE (figura 11) elevaram o nível médio em até 0,25m (Lima 2007).

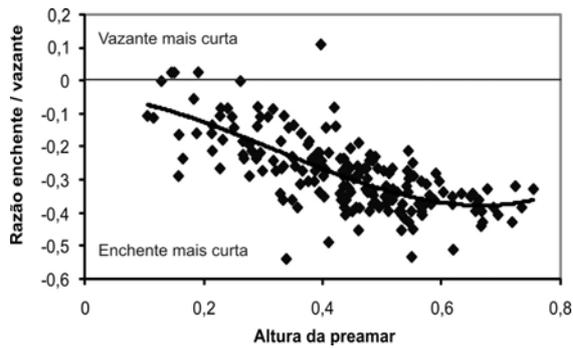


Figura 10: Logaritmo natural da razão do tempo de enchente e vazante pela altura da preamar, em que os valores positivos indicam tempos de descida maiores que os tempos de subida da onda de maré, e os valores negativos predominantes apontam para subidas mais rápidas

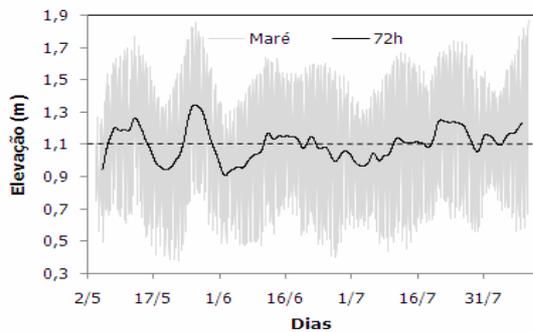


Figura 11: Registro de maré no estuário (seção #1), entre maio e agosto de 2002, mostrando a maré observada (linha cinza) e as oscilações de baixa frequência (linha preta). A linha horizontal tracejada refere-se ao nível médio d'água.

4.3. Circulação e mistura estuarina

Condições variadas de descarga fluvial e altura de maré permitiram o registro de diferentes situações de fluxo e mistura no estuário.

De modo geral, observou-se que em sizígia a coluna d'água se mantém bem misturada e, em quadratura, parcialmente misturada (figura 12). Devido à menor capacidade de mistura em quadratura, formam-se bolsões de água salgada, com elevado gradiente vertical de salinidade, em depressões topográficas nos primeiros 6 km do estuário.

A intrusão salina variou entre 13 km e 7 km respectivamente em maré de sizígia e quadratura, com a vazão nula da barragem (figuras 12 a e b). Ainda com vazões nulas ou pequenas vazões, salinidades típicas de água marinha (>30) foram registradas até o quilômetro 9 em sizígia e quilômetro 5 em quadratura. Com uma vazão média diária da barragem de $86 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, considerada elevada para as características naturais do rio e em condições próximas a sizígia, a água marinha limitou-se aos 2 km na preamar, e a água doce ocupou praticamente todo o estuário na baixamar (figuras 12 i e j).

A posição das isohalinas apresentou estreita correlação com a descarga fluvial, elevação do nível d'água e precipitação. A correlação múltipla com estas variáveis e a posição da isohalina de zero em relação à foz do estuário (limite da intrusão salina) apresentaram coeficiente de correlação de 0,77, sendo a relação descrita pela seguinte equação:

$$(9) \quad S_0 = 7,519 - 0,128 Q + 0,015 Z + 0,076 P$$

Onde S_0 é a posição da isohalina de 0 (em quilômetros), Q é a descarga média diária (precedendo 12 horas da medição – tempo médio que leva para os deflúvios da barragem atingirem a cabeceira do estuário), Z é a elevação do nível d'água e P é a precipitação do dia anterior. Correlação semelhante ocorreu com a isohalina de 5 (limite entre ambientes mesohalino e oligohalino), onde o coeficiente de correlação na superfície foi de 0,74 (significativa a $p = 0,034$) e no fundo de 0,82 (extremamente significativa $p = >0$). A melhor correlação junto ao fundo deve-se à menor influência do aporte de água doce. A posição da isohalina de 5 na superfície e no fundo foi dada, respectivamente, pelas equações:

$$(10) \quad S_{5 \text{ superfície (km)}} = 2,0 - 0,09 Q + 0,028 Z + 0,071 P$$

$$(11) \quad S_{5 \text{ fundo (km)}} = 5,59 - 0,06 Q + 0,025 Z + 0,004 P$$

Apesar do alto índice de correlação, Lima (2007) relaciona erros significativos no valor calculado pelas equações, e os associa a diferentes condições morfológicas da embocadura.

Em situação de vazões nulas da barragem, a velocidade média da corrente na coluna d'água foi de $0,30 \text{ m s}^{-1}$ na vazante e $0,25 \text{ m/s}$ na enchente. O valor máximo de velocidade de enchente registrado junto ao fundo foi de $0,69 \text{ m s}^{-1}$ e o máximo de vazante registrado na superfície foi de $0,72 \text{ m/s}$. A circulação gravitacional ocorreu na maior parte dos monitoramentos, com correntes residuais de vazante na superfície e de enchente no fundo (figura 13). Em períodos de alta descarga fluvial, a circulação gravitacional foi substituída por fluxos estacionários unidirecionais de vazante (figura 14). Nesta situação, as velocidades máximas de vazantes em sizígia alcançaram $0,98 \text{ m s}^{-1}$.

O padrão de mistura na seção transversal variou entre pobremente estratificado, em marés de sizígia (figuras 13 e 14), a altamente estratificado e parcialmente misturado, em marés de quadratura. A figura 15 mostra os diferentes modos de mistura do estuário através do diagrama de estratificação e circulação de Hansen & Rattray (1966).

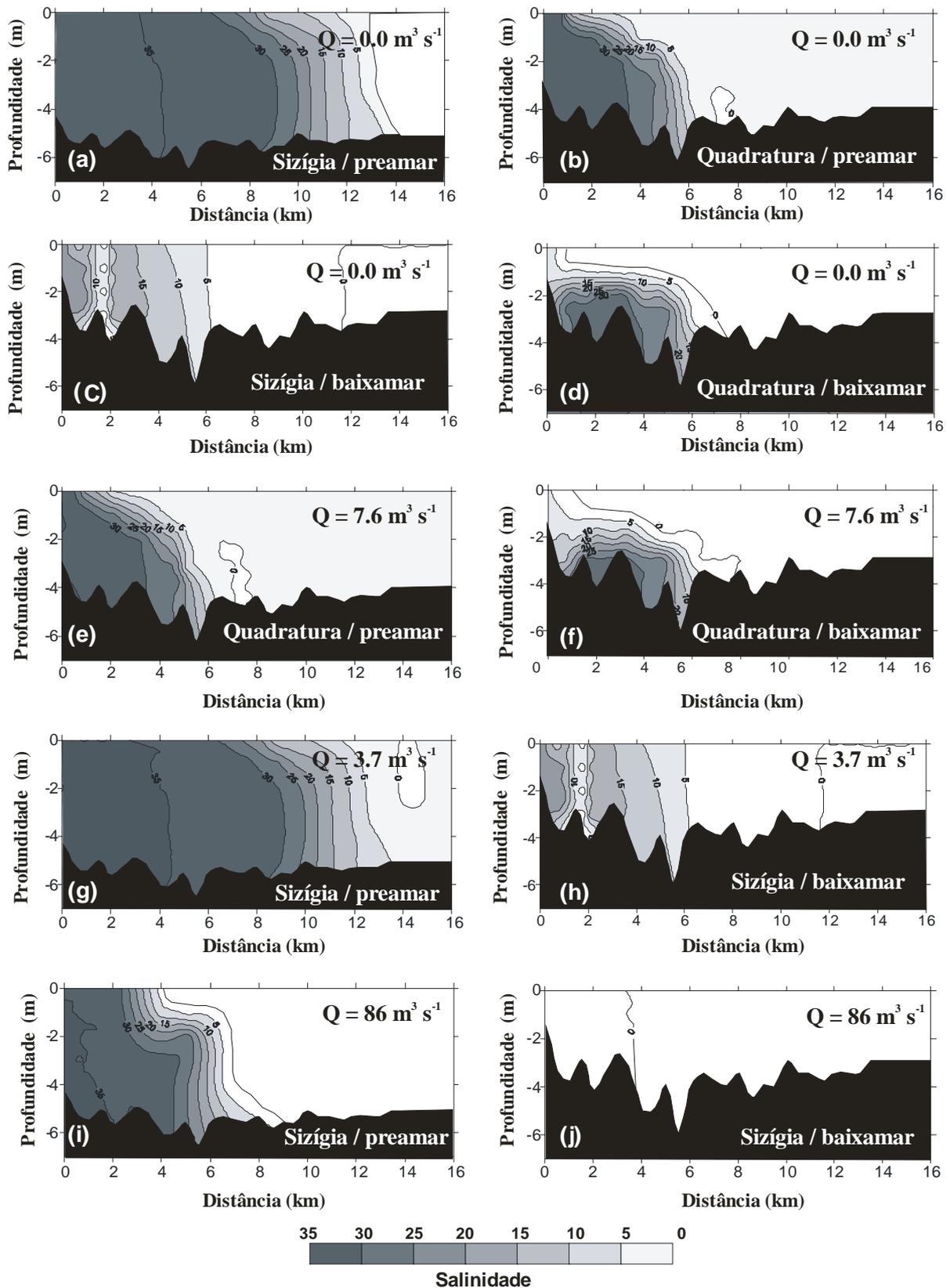


Figura 12: Perfis longitudinais de salinidade para vazões fluviais (Q) nulas, em (a) preamar de sizígia, (b) preamar de quadratura, (c) baixamar de sizígia, (d) baixamar de quadratura, com vazões próximas da média atualmente liberadas pela barragem, em (e) preamar de quadratura, (f) baixamar de quadratura, com pequenas vazões (g) em preamar de sizígia, (h) baixamar de sizígia e com vazões de $86 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na (i) preamar de sizígia e (j) na baixamar de sizígia

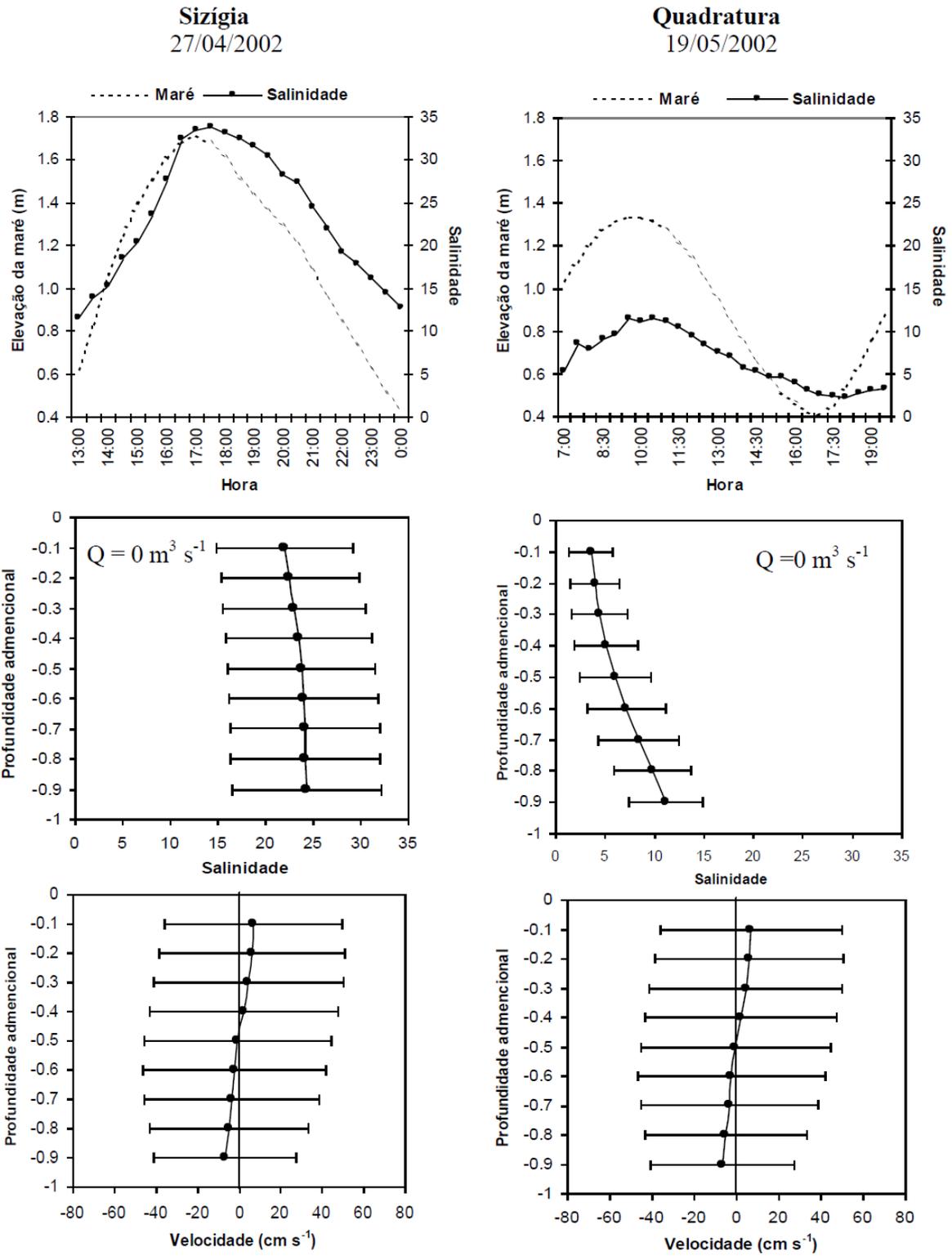


Figura 13: Distribuição das médias de salinidade e velocidade na coluna d'água nos monitoramentos de sizígia e quadratura, com ausência de descarga da barragem (Q). As linhas horizontais referem-se ao desvio-padrão em torno da média (pontos), e a linha vertical à halocline.

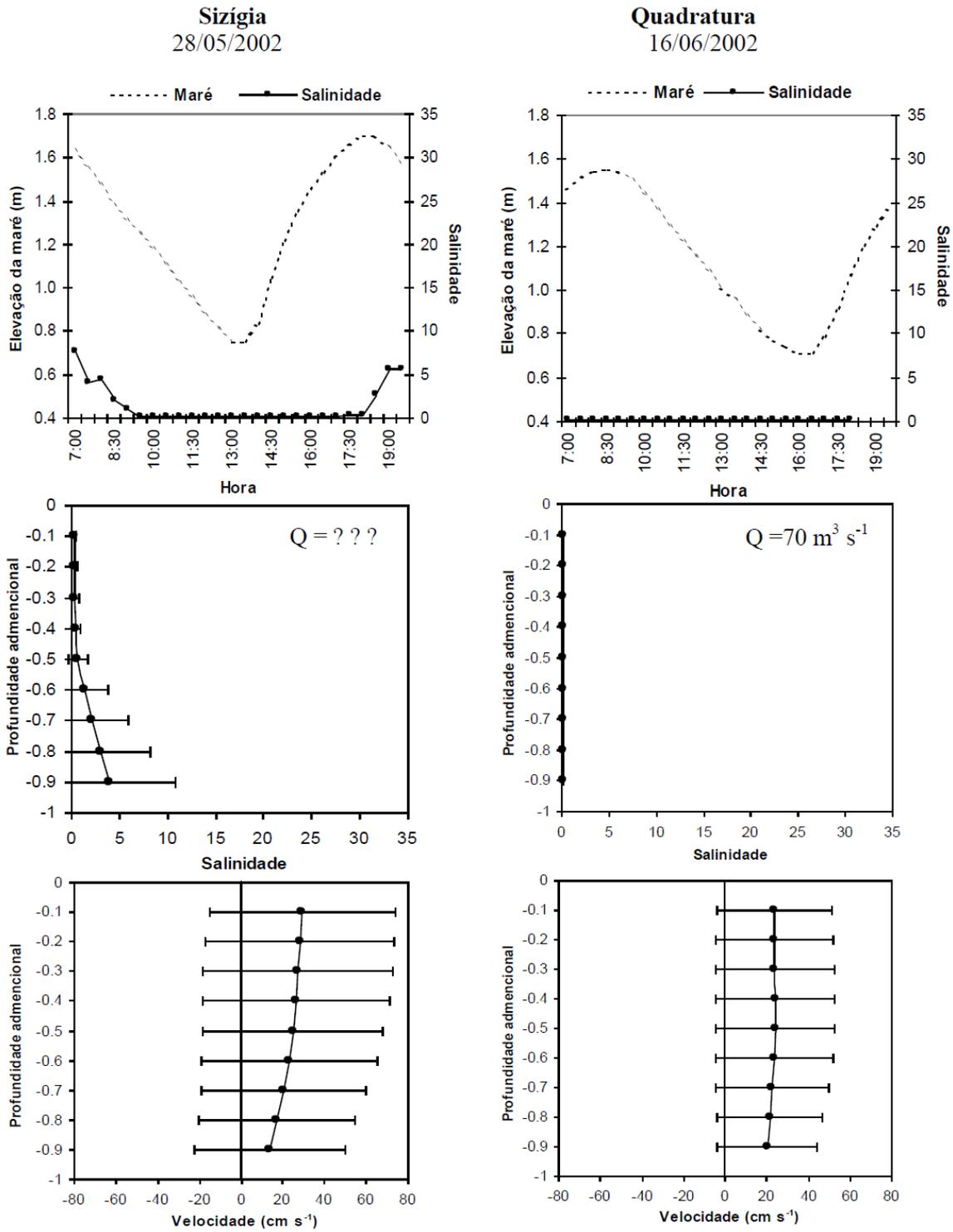


Figura 14: Distribuição das médias de salinidade e velocidade na coluna d'água nos monitoramentos de sizigia e quadratura, com descarga da barragem desconhecida e $70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. As linhas horizontais referem-se ao desvio-padrão em torno da média (pontos), e a linha vertical à haloclina.

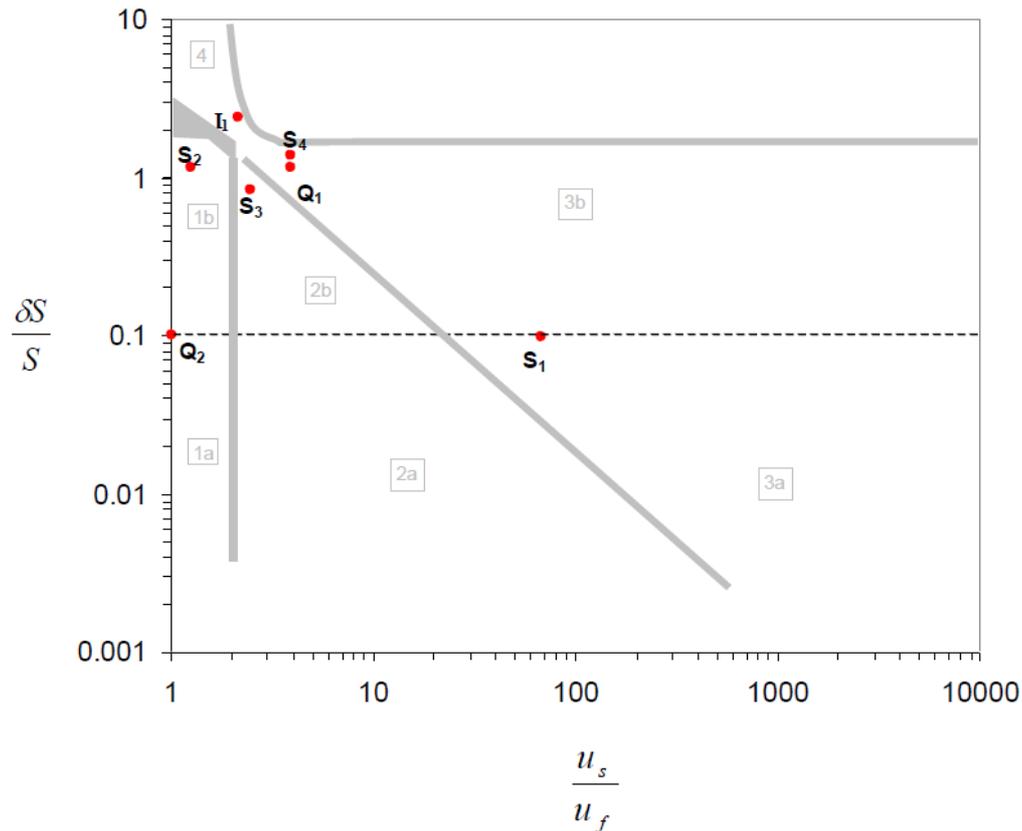


Figura 15: Distribuição dos padrões de estratificação/circulação do estuário do rio Jacuípe. As letras Q, S e I referem-se às campanhas realizadas em quadratura, sizígia e na fase da maré intermediária.

5. Discussão

Os ciclos hidrológicos interanuais do rio Jacuípe estão de acordo com os ciclos identificados por Pekárova *et al.* (2003) e, parcialmente, relacionados a ciclicidade dos eventos do fenômeno ENOS, ocorrendo com intervalos de frequência de 3 a 5 anos. De dez eventos de ENOS registrados na América do Sul, a partir da década de 1960, nove foram sincrônicos com a redução na taxa das vazões do rio Jacuípe. Subimpostos a estes ciclos observam-se ciclos com períodos de aproximadamente 11-12 anos, os quais mostram uma fase de incremento da vazão na década de 1980 e duas fases de supressão entre 1968 e 1980 e após 1989. A queda dos valores médios anuais neste último período ocorreu a uma taxa de $1,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}/\text{ano}$ no rio Jacuípe.

A variabilidade interdecenal observada parece afetar toda a extensão do litoral da Bahia. As investigações da descarga de alguns rios nos litorais Sul e Extremo Sul da Bahia apontam para a redução das descargas fluviais neste mesmo período (Queiroz 2003, Genz *et al.* 2003). Esta variabilidade parece estar associada às alterações nos padrões da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre o Atlântico tropical, os quais afetam a posição e a intensidade da Zona de Convergência Intertropical (Hastenrath & Heller 1977 in Nobre &

Melo 2001), bem como a incidência dos fenômenos El Niño Oscilação Sul (ENOS).

A barragem de Santa Helena foi erguida com a finalidade de suporte ao abastecimento de água para a Região Metropolitana de Salvador, mas pelo menos até 2008, esta função ainda não havia sido posta em prática. A barragem operou até 2006 próximo do seu nível máximo durante 99,3% do tempo (Lima 2007), e a falta de uma estação fluviométrica a montante do barramento impossibilita o monitoramento das ondas de cheias originadas na cabeceira, assim como compromete o controle adequado da abertura das comportas. Dessa forma, as descargas ocorrem aleatoriamente, sendo liberadas bruscamente durante períodos de elevada precipitação.

A comparação da vazão de $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (com 95% de garantia), projetada para a barragem, com média de longo período de $16,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (1961 a 1979) indica um alto controle da barragem sobre as vazões para o estuário. No entanto, deve-se estar atento para a influência exercida por ciclos naturais de precipitação dificilmente distinguidos nos curtos registros da fluviometria. A análise da série histórica de 1904 a 1989 dos totais anuais de precipitação em Salvador (Lessa *et al.* 2009) mostra a existência de ciclos superiores a 20 anos, e amplitudes de até $500 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1}$, que dificilmente são observados nas séries fluviométricas. O período de registro das vazões na estação de Emboacica

(1961 a 1979) ocorreu concomitantemente a uma fase de máximas precipitações em Salvador e, desta forma, a redução da descarga associada à operação da Barragem de Santa Helena pode representar também uma diminuição de longo prazo da precipitação.

Antecipa-se que, com o início de transferência de água para o rio Joanes (ver figura 1), a maior perda de água ocorrerá durante a estiagem no verão, quando a demanda supera a capacidade de vazão da barragem (figura 16a) com a chegada da alta estação. Confirmado este cenário, a vazão ecológica (descarga fluvial necessária para que ocorra a manutenção do ambiente) para o estuário estará severamente limitada, restringindo-se à captação da área a jusante do barramento. A vazão associada a este trecho, excluindo-se o rio Capivara Grande, corresponde a menos de 25% do total de água doce que flui em média para a zona estuarina (figura 16b) e, dessa forma, será insuficiente para garantir a manutenção das condições estuarinas típicas.

Para avaliar preliminarmente os efeitos da redução de descarga na zona estuarina, foi calculada a variação da razão de fluxo entre a descarga de água doce (R) e o prisma de maré (P), tida como o mais simples indicador do potencial de mistura estuarina (Miranda *et al.* 2002). Para $R/P \geq 1$ o estuário é considerado altamente estratificado, para $R/P \sim 0.25$ é parcialmente misturado e para $R/P < 0.1$ o estuário é bem-

misturado. Foram utilizados o prisma de maré de sizígia ($4,81 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) e quadratura ($2,69 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), obtidos através de um modelo digital de terreno (Lima 2007), e três cenários de descarga fluvial: (i) vazões com intervalos crescentes de $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, (ii) as vazões médias mensais estimadas de janeiro a dezembro antes do barramento ser erguido e (iii) as vazões médias mensais estimadas da área a jusante do mesmo, que correspondem a cerca de 24% do volume total da descarga de água doce (figura 17). Por fim, a descarga fluvial (R) foi integrada no tempo ao longo de meio ciclo de maré, de forma que:

$$(12) \quad (R = Q_f \cdot T/2)$$

Os resultados da análise, expostos na figura 17 sugerem que: *i*) com descarga fluvial inferior a $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, em sizígia e quadratura, respectivamente, predominarão as condições eurihalinas, com a coluna d'água bem misturada; *ii*) sob condições naturais, apenas nos meses úmidos (abril a agosto), o estuário se tornará parcialmente misturado, com tendência para altamente estratificado e *iii*) com descarga nula da barragem e vazão limitada à drenagem a jusante da mesma, condições euhalinas deverão dominar o estuário durante todo o ano.

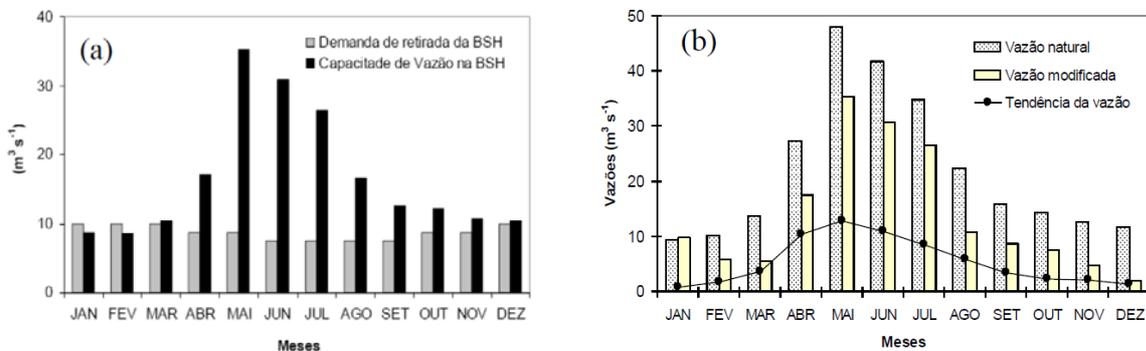


Figura 16: (a) Demanda de retirada de água e capacidade de vazão anual da Barragem de Santa Helena (segundo EMBASA, comunicação pessoal) e (b) histórico e tendência da descarga fluvial do rio Jacuípe

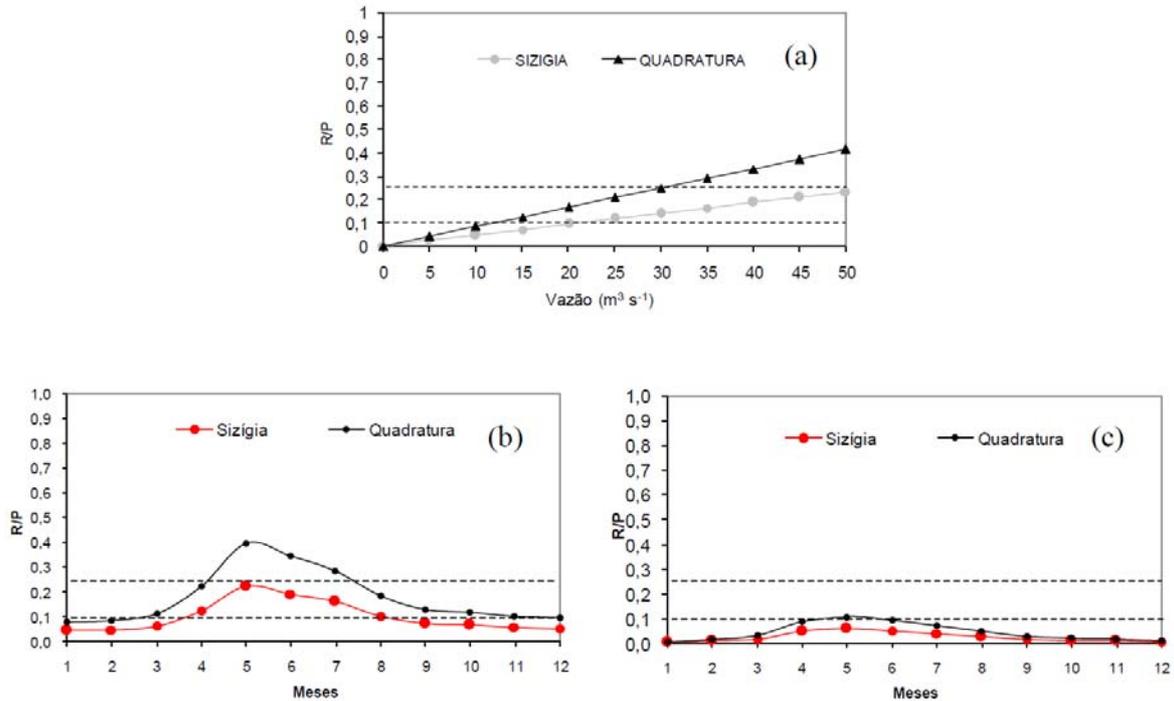


Figura 17: Razão de fluxo (R/P) entre os prismas de quadratura e sizígia, (a) com os respectivos volumes estimados de água doce para promover mistura no estuário, de $35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $>50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, (b) o fluxo natural mensal que deveria fluir para a zona estuarina e (c) com descarga referente apenas à captação a jusante da Barragem de Santa Helena. As linhas tracejadas horizontais separam a condição de mistura, em bem-misturado ($< 0,1$) e parcialmente misturado ($\approx 0,25$).

A redução da vazão fluvial poderá também trazer sérias consequências à condição de salubridade do estuário, pois o tempo de residência será severamente aumentado. A capacidade de remoção de substâncias conservativas no estuário (*flushing time*) pode ser estimada pela equação:

$$(13) \quad T_Q = \frac{(S_o - \bar{S}) V}{Q_f}$$

(Miranda *et al.* 2002), onde, T_Q é o tempo de descarga (em horas) referente a um ciclo de maré, S_o = salinidade oceânica, considerando o limite inferior da Água Tropical (36), \bar{S} = salinidade média da estação, V = volume do compartimento considerado ($3,2 \text{ km}^3$) e Q_f = descarga fluvial.

O tempo de descarga calculado para condições de vazão natural ($21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e vazões próximas da média liberada atualmente pela barragem ($9,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), ambos em maré de quadratura, resulta em um tempo de 17,7 e 46,7 horas. No caso de descargas limitadas apenas à área a jusante da represa, o tempo de descarga é da ordem de 10^3 horas.

A atual estratégia de operação da barragem talvez possa ser apontada como um caso único em recursos hídricos e, sob uma perspectiva sedimentológica, pode estar trazendo efeitos positivos ao ambiente estuarino.

Vários estudos sobre efeitos sedimentológicos de barragens em estuários mostram que a obstrução das ondas naturais de cheias causam assoreamento da região estuarina, redução da área de escoamento da embocadura e maior dificuldade de trocas com o oceano (Oliveira 1999, Campos 2001, Wolanski 2003, Schöne *et al.* 2003). A liberação de descargas superiores aos valores naturais pela Barragem de Santa Helena estaria dessa forma erodindo sedimentos e auxiliando na desobstrução do canal provocada pelo delta de maré enchente, além de aumentar a área da embocadura. Esta ação estaria assim facilitando os processos de troca com o oceano.

O início da operação de transferência de água para o rio Joanes deverá implantar o cenário clássico de diminuição da capacidade do fluxo com a interrupção das descargas de cheia. O resultado seria então o crescimento do delta de maré enchente e a maior restrição do fluxo. Como relatado por Oliveira (1999) e Campos (2001) nos rios Joanes e Contas, ambos com barramentos fluviais, sedimentos marinhos foram depositados próximos à foz após o início da operação das barragens, alterando a morfologia e comprometendo a dinâmica do fluxo estuarino.

5. Conclusões

Este trabalho analisou a variabilidade dos mecanismos controladores da circulação e mistura

estuarina, envolvendo diferentes condições do prisma de maré e da vazão fluvial no estuário do rio Jacuípe. A análise dos dados obtidos permite tecer as seguintes conclusões:

- A maré sofre distorção dentro do estuário, com tempo de subida 1 ½ horas mais curto que o tempo de descida. Esta assimetria é decorrente das características da geometria lateral e batimetria do estuário e normalmente conduz a importação de sedimentos da zona costeira.
- O estuário é parcialmente misturado em marés de quadratura, e bem misturado em sizígia, apresentando em ambos os casos o predomínio da circulação gravitacional estuarina quando em situação de vazão da barragem nula ou reduzida. Uma intensa descarga fluvial ($> 70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) resulta no bombeamento fluvial, com fluxo exclusivamente de vazante no médio curso do estuário e predomínio de água doce.
- O fluxo do rio Jacuípe foi alterado com a operação da Barragem de Santa Helena no que diz respeito à magnitude e ao regime de descarga. A alteração atingiu os extremos da curva de descarga, sendo que a ausência de descarga passou a ocorrer em períodos mais prolongados e, devido à retenção de água do reservatório, elevaram-se os picos de cheias.
- Uma vez iniciada a transposição das águas para a bacia do rio Joanes, a vazão ecológica (descarga fluvial necessária para que ocorra a manutenção do ambiente) para o estuário estará severamente limitada, restringindo-se à captação da área a jusante do barramento. Este valor corresponde a menos de 25% do total de água doce que flui em média para a zona estuarina. No período úmido (abril a julho), poderá ocorrer uma pequena diluição da água marinha, nos quilômetros iniciais da embocadura. Porém, na primavera e verão, esta deverá ser insuficiente para garantir a diluição da água marinha, o transporte de sedimentos de fundo e ajudar na ejeção dos efluentes industriais e esgotos domésticos ainda existentes na bacia de drenagem, o que poderá comprometer a salubridade do estuário.

6. Referências

Arauz I.J. 2005. Vertedor de Superfície e Escoamento sob Comportas. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 116p.

Campos E.V.M. 2001. O Assoreamento do Baixo Curso do Rio de Contas: uma abordagem hidráulica e sedimentológica. Dissertação de Mestrado, IGEO, Universidade Federal da Bahia, 76p.

Collier M., Webb R., Schmidt J.C. 2000. Dams and River: A Primer on the downstream Effects of Dams. USGS. Circular 1126. 94 p.

Franco A.S. 1988. Tides: Fundamentals, Analysis and Prediction. São Paulo. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. 249p.

Genz F., Lessa G.C., Cirano M., Lima G.M.P. 2003. As Tendências de Longo Prazo das Vazões Fluviais no Litoral do Estado da Bahia. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Anais.

Hansen D.V., Rattray J.R.M. 1966. New Dimensions in Estuarine Classification. *Limnol. Ocean.*, 18: 849-862.

Hastenrath S., Heller E L. 1977. Dynamics of climatic hazards in north-east Brazil. *Quart. Jour. Res. Meteor. Soc.*, 110: 411-425.

Lessa G.C., Cirano M., Genz F., Tanajura C.A.S., Silva R. 2009. A oceanografia física da Baía de Todos os Santos. In: Andrade J. & Hatje V. (eds). Baía de Todos os Santos: Ambiente Físico. EDUFBA, Salvador, 308p.

Lima G.M.P. 2007. Caracterização sedimentológica e dos padrões de circulação e mistura do estuário do Rio Jacuípe - Litoral Norte do Estado da Bahia. Dissertação de Mestrado. IGEO, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 137p.

Marengo J.A., Tomasella J. 1998. Trends in Streamflow and Rainfall in Tropical South America: Amazonia, Eastern Brazil and Northwestern Peru. *Journ. Geophy. Res.*, 103: 1775-1783.

Miranda L.B., Castro B.M, Kjerfve B. 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. Editora da USP, São Paulo, 414 p.

Nobre P., Melo A.B.C. 2001. Variabilidade climática intrasazonal sobre o nordeste do Brasil em 1998-2000. CPTEC/INPE.

Nobre P. , Shukla J. 1996. Variations of SST, Wind Stress and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *Journ. Clim.*, 9: 2464-2479.

Oliveira M.Q.C. 1999. Impacto das Mudanças no Uso do Solo nas Características Hidrossedimentológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Joanes e sua Repercussão na Zona Costeira. Dissertação de Mestrado, IGEO, Universidade Federal da Bahia, 93p.

Pekárova P., Miklánek P., Pekár J. 2003. Spatial and Temporal Runoff Oscillation Analysis of the Main Rivers of the World During the 19th–20th Centuries. *Journ. Hydrol.*, 274: 62-79.

Porto R.M. 1998. Hidráulica Básica. Editora da Universidade São Carlos, 540p.

Pritchard D.W. 1952. Estuarine hydrography. In: *Advances in Geophysics*, Vol 1, Academic press, New York, pp.: 243-280.

Queiroz I.G. 2003. Produção de Sedimento e Alterações no Regime Hidrossedimentológico da Bacia Hidrográfica do Rio Mucuri – Repercussão na Zona Costeira. Dissertação de Mestrado. IGEO, Universidade Federal da Bahia, 112 p.

Queiroz A.F.S. 1989. Estudos Geoquímicos e Sedimentológicos no Manguezal do Estuário do Rio Jacuípe-Camçari-Bahia. IGEO, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 227p.

Schöne B.R., Flessa K.W., Dettman D.L., Goodwin D.H. 2003. Upstream dams and downstream clams: growth rates of bivalve mollusks unveil impact of river management on estuarine ecosystems - Colorado River Delta, Mexico. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 58: 715–726.

Tucci C.E.M. 1998. Modelos Hidrológicos. Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 650p.

Wolanski E., Richmond R.H., Davis G., Bonito V. 2003. Water and fine sediment dynamics in transient river plumes in a small, reef-fringed bay, Guam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56: 1029–1040.

Recebido 25 de março de 2009
Aceito 24 de março de 2010