

Taxas de sedimentação recentes provenientes dos métodos Cs¹³⁷ e Pb²¹⁰ e estimativa de preenchimento do estuário Jacuípe, Bahia, Brasil

*Geraldo Marcelo Pereira Lima¹, Geraldo da Silva Vilas Boas¹,
Alexandre Barreto Costa² & Roberto Max de Argollo²*

Resumo O presente trabalho estimou as condições de preenchimento do estuário Jacuípe, localizado no litoral norte da Bahia, utilizando-se os métodos geocronológicos combinados Pb²¹⁰ e Cs¹³⁷ e a verificação dos espaços de acomodação de sedimentos ainda existentes. Duas taxas de sedimentação foram identificadas nesse estuário nos últimos 70 anos. A primeira, de 3,7 mm ano⁻¹, refere-se às condições naturais de sedimentação que ocorrera até meados da década de 1960 e, a segunda, mais recente, é provavelmente devido à influência antropogênica na bacia hidrográfica, que aumentou o aporte de sedimentos para a bacia, de 6,0 mm ano⁻¹. Estimou-se que o estuário do Jacuípe, com espaço de acomodação restante, de 6,97 x 10⁶ m³, pode ser totalmente preenchido em menos de 300 anos. Esse intervalo de tempo pode cair pela metade, caso se mantenha a atual taxa de sedimentação e se confirme as mudanças hidrológicas previstas nessa bacia.

Palavras-chave: preenchimento estuarino, taxas de sedimentação, geocronologia Cs¹³⁷ e Pb²¹⁰.

Abstract *Recent sedimentation rates derived from ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs methods and infilling estimate of the Jacuipe estuary, Bahia, Brazil.* The present work estimated the conditions of infilling of the Jacuipe estuary, located in the north coast of Bahia, using geochronology ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb combined methods and verification of accommodation sediments spaces still exist. Two sedimentation rates were identified in this estuary more less 70 years old. The first, from 3,7 mm y⁻¹, refers to the natural conditions of sedimentation that occurred until the mid-1960s, and the second, more recent, is probably due to anthropogenic influences in the watershed which increased the contribution sediments to 6,0 mm y⁻¹. It was estimated that Jacuípe estuary, with the remaining accommodation space of 6.97 x 10⁶ m³, can be completely filled in less than 300 years. This time interval may drop by half if it continues the current rate of sedimentation and hydrological changes of confirmation provided in this basin.

Keywords: estuarine infilling, sedimentation rates, geochronology ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb.

INTRODUÇÃO Estuários são ambientes formados pelo afogamento de um vale fluvial com a subida do nível relativo do mar, nos quais são criados espaços para acomodação de sedimentos fluviais e marinhos (Dalrymple *et al.* 1992; Perillo 1995). Geologicamente, os estuários são pouco duradouros e sua tendência evolutiva é serem gradualmente preenchidos até atingir um estágio final de evolução (em estágio regressivo) quando os sedimentos fluviais serão lançados diretamente no mar (Dalrymple *et al.* 1992). Em estágio regressivo, os estuários se mantêm quando a taxa de sedimentação não superar a taxa de descida do nível do mar (Cattaneo & Steel 2003). No litoral brasileiro, os estuários tiveram sua origem a cerca de 5000 anos, quando o nível relativo do mar atingiu cerca de 5 m acima do atual (Martin *et al.* 1980; Martin *et al.* 2003). Desde então, esse litoral tem experimentado um estágio regressivo, possuindo os estuários espaços de acomodação com reduzidas dimensões (Lessa 2006).

Em estágio regressivo, a descarga fluvial torna-

se a variável de grande importância nos processos de sedimentação na zona estuarina. Além da descarga líquida, as drenagens têm o papel natural de transportar os sedimentos que foram erodidos no interior das bacias hidrográficas. Ao chegar à zona costeira, os sedimentos podem ser filtrados e depositados na zona estuarina, ou serem distribuídos ao longo da costa pelas correntes de deriva, ou ejetados até a plataforma continental externa nos episódios de alta energia (Wolanski *et al.* 1996). Esta última condição ocorre nos períodos de enchente fluvial, onde um grande volume de sedimento pode ser movimentado em um curto período de tempo (Figueiredo & Underkoffler 1996; Kuehl *et al.* 1998). A função natural dos estuários, portanto, é atuar como verdadeiros filtros, retendo o sedimento grosso e ejetando parcialmente os sedimentos finos.

As bacias de drenagem que afluem para os estuários podem ser periodicamente submetidas à redução e aumento do aporte de sedimentos (Goman 2000). Uma estimativa das descargas dos rios em todos os

1 - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Campus Ondina, Salvador (BA), Brasil.

E-mail: glima@ufba.br; gsvboas@ufba.br

2 - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física - Laboratório de Física Nuclear Aplicada, Campus Ondina, Salvador (BA), Brasil.

E-mail: abc@ufba.br; robmax@ufba.br

continentes nos últimos 200 anos tem demonstrado que as variações hidrológicas podem afetar a descarga de longo período (Pekárová *et al.* 2003). As variações já identificadas ocorrem por influência da variabilidade climática (Wolock & McCabe 1999; Pekárová *et al.* 2003; Gregory *et al.* 2006; Ekdahl *et al.* 2008) nos intervalos interanuais, em alternância aos períodos secos e úmidos. Na maior parte dos casos, tem-se observado a diminuição do aporte de sedimento fluvial devido à diminuição natural dos picos de enchentes.

Por outro lado, pode-se também observar em diversas partes do mundo, tanto alterações na sedimentação estuarina quanto alterações ambientais nas bacias hidrográficas causadas pela influência do crescimento econômico: opostamente às condições naturais cresceu o aporte de sedimentos para os estuários (Lu & Matsumoto 2005; Santos *et al.* 2008).

Apesar de sua grande importância, ainda se observa na literatura a ausência de uma análise adequada das descargas fluviais em estuários. T tamanha dificuldade é dada pelos custos operacionais que envolvem a coleta de dados sobre as descargas de sedimentos nas bacias de drenagem. Uma alternativa eficaz ao problema é o uso do método combinado dos radionuclídeos naturais Pb^{210} e Cs^{137} , que é uma ferramenta utilizada em estudos ambientais como traçadores de eventos ocorridos até 150 anos (Chanton *et al.* 1983; Goodbred & Kuehl 1998; Argollo 2001). Esse método expõe as assinaturas marcadas pelos registros da sedimentação, além de fornecer informações importantes sobre o histórico hidrossedimentológico das bacias.

No caso do estado da Bahia, que possui a maior linha de costa do Brasil, com mais de 1000 km de extensão, pouco se sabe sobre o comportamento das descargas fluviais (sólidas e líquidas) ocorridas no passado e sobre as condições, seja de preenchimento, ou de sustentação dos estuários.

O estuário do rio Jacuípe personifica uma região em cujo ambiente conjugaram-se inúmeras mudanças ambientais, tais como: alterações na descarga fluvial por influência da variabilidade climática natural, exploração de petróleo, mudanças hidrológicas causadas por barramento do rio, rompimento de barragem, crescimento populacional, corpo receptor de efluentes industriais e as recentes retiradas de areias e argilas para a construção civil (Lima 2007).

O objetivo deste trabalho é de verificar as condições de preenchimento e/ou sustentação do estuário do Jacuípe, a partir das cronologias e das taxas de sedimentação, se foram ou não contínuas ao longo do tempo e comparando-as com os espaços de acomodação ainda existentes no estuário.

ÁREA DE ESTUDO O estuário do Jacuípe, localizado no litoral norte do Estado da Bahia (LNEB), no município Camaçari, representa grande importância econômica para a região. O rio Jacuípe possui uma bacia de drenagem relativamente pequena, com aproximadamente 1275 km² (Fig. 1), sendo o rio Capivara Grande seu maior tributário, abrangendo cerca de 23%

desse total (295 km²). O rio Jacuípe passou por alterações hidrológicas depois da construção da barragem Santa Helena (localizada a 35 km da embocadura, seguindo o curso do rio), em 1980, com o rompimento desta, em 1984, mas, principalmente, após sua reconstrução, em 2000.

A maior parte da bacia hidrográfica do Jacuípe (mais de 90%) está instalada sobre rochas sedimentares friáveis da bacia do Recôncavo (Cretáceo) (Fig. 2). Um forte controle litológico e estrutural é exercido pela transição dessa bacia com o embasamento cristalino (Precambriano), seguindo o prolongamento da falha do Jacuípe (margem leste). Nesse trecho, o canal principal é deslocado para o lado da falha na qual o estuário encontra-se confinado, onde a falha é então recoberta pelos litotipos do Grupo Barreiras (Terciário). Por sua vez, os depósitos do Grupo Barreiras representam as maiores elevações da região (em torno de 50 m). Já as planícies de inundação da maré são extensas e apresentam uma morfologia monótona, sem grandes ressaltos topográficos, onde meandros abandonados são observados. A planície intermareal é ocupada por vegetação de mangue, enquanto que a borda externa da planície completa o limite do estuário, onde ocorrem áreas supramareais (apicuns), inundadas apenas sob alturas de marés extremas de sizígia.

As unidades geomorfológicas que constituem a planície do estuário são: terraços marinhos e depósitos flúvio-lagunares, modeladas pelos eventos de mudanças climáticas durante o Quaternário (Martin *et al.* 1980). Esse último período foi marcado por sucessivos estágios transgressivos e regressivos dos quais se originaram os contornos do estuário do Jacuípe.

MATERIAIS E MÉTODOS

Método combinado Cs^{137} e Pb^{210} Neste trabalho utilizou-se o método combinado Pb^{210} e Cs^{137} para determinação da taxa de sedimentação e cronologia do processo de sedimentação. A geocronologia com Pb^{210} ($T = 22,26$ a) e Cs^{137} ($T = 30,17$ a) é o método mais usado para avaliar a dinâmica de sedimentação recente. O método baseia-se por um lado no decaimento radioativo do excesso do Pb^{210} e, por outro, na detecção do Cs^{137} para identificar sedimentos depositados no período 1964-1965 (Hermanson 1990; Argollo 2001). O excesso do Pb^{210} , Pb_{exc}^{210} , é obtido pela diferença entre as atividades do Pb^{210} total e a do Ra^{226} presente no sedimento. Numa coluna de sedimento depositado em ambiente aquático numa taxa de sedimentação constante w e sem mistura, a atividade do Pb_{exc}^{210} numa profundidade z , $A(z)$, é dada por (equação 1):

$$A(z) = A_0 \exp(-\lambda z / \omega) \quad (1)$$

onde A_0 é a atividade em $z = 0$, λ é a constante de decaimento do Pb^{210} e ω é a taxa de sedimentação. O ω pode ser calculado pela expressão (equação 2):

$$\omega = -\lambda \log e / \alpha \quad (2)$$

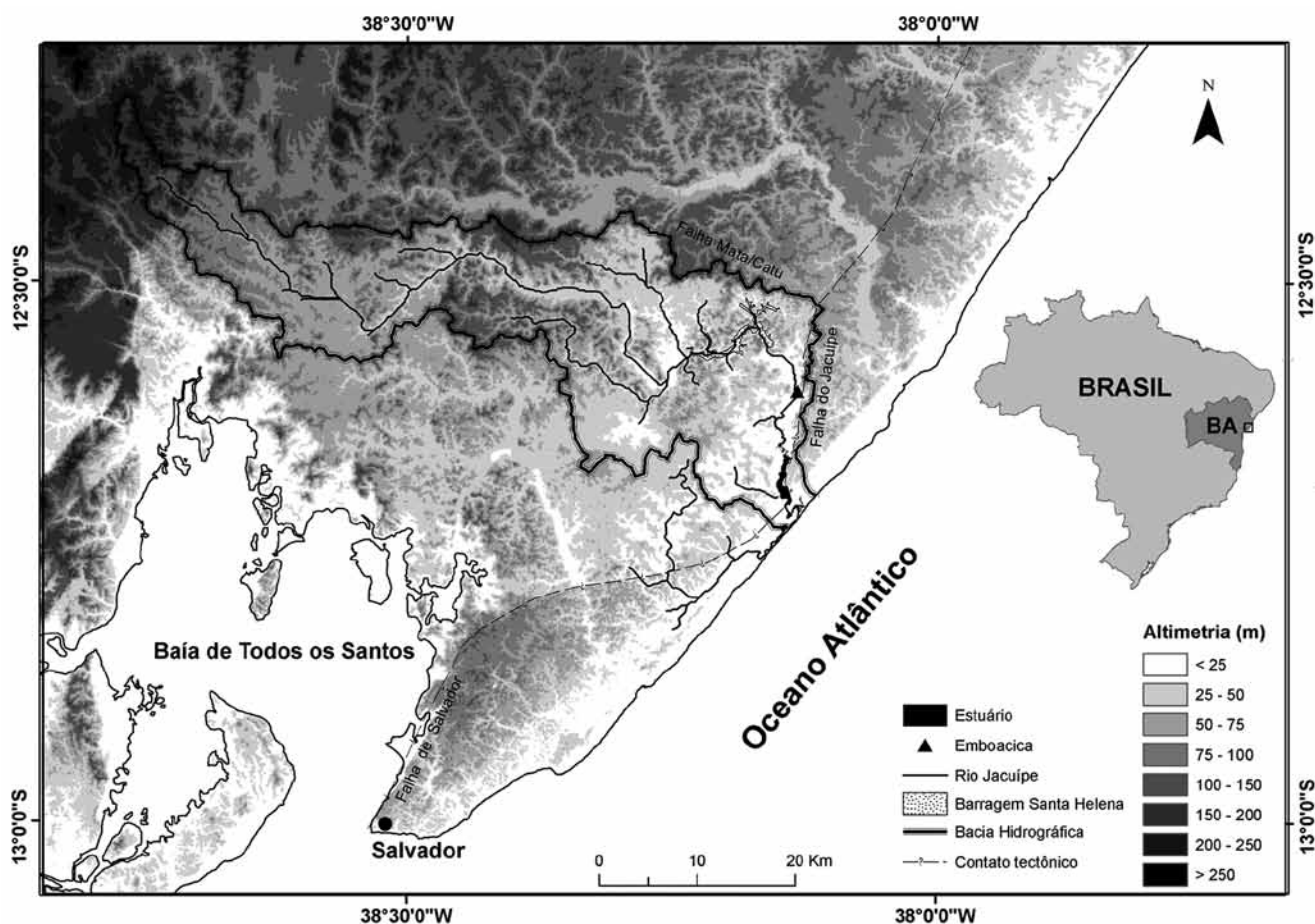


Figura 1 - Modelo digital de terreno (USGS 2009) delineando a bacia hidrográfica do rio Jacuípe e, ao final desta, a zona estuarina. Notar que a drenagem do rio Capivara Grande mesmo fazendo parte da bacia foi diminuída para efeito de análise, uma vez que seu deságue ocorre já próximo da foz do Jacuípe e fora da área de cobertura do testemunho (localizado mais a montante).

onde α é o coeficiente angular da regressão linear do gráfico de $\log A(z)$ versus z .

Assim, nesse método combinado, o Pb^{210} permite determinar a taxa de sedimentação e o Cs^{137} permite identificar a camada de sedimentos depositada em 1965, no caso do hemisfério sul (Argollo 2001).

Os dados analisados referem-se à determinação das cronologias e das taxas de sedimentação estuarina obtidas a partir de um testemunho raso de sondagem, de 0,60 m de comprimento, coletado em 2008 por percussão e localizado a 4 km da embocadura (ver Fig. 1) seguindo o curso do canal principal. Esse local de coleta foi previamente estabelecido por ser o único depósito de sedimentos finos (silte e argila) encontrado no canal estuarino, sendo essas frações as mais indicadas por fixarem os radionuclídeos investigados.

O testemunho coletado foi aberto e cortado em fatias de 1 cm de espessura. Em parte do material foram feitos os procedimentos granulométricos estatísticos (Folk & Ward 1957; Shepard 1954; Perjurup 1988) e a outra parte foi pulverizada, seca e retirada alíquotas de 9 a 12 g, para serem postas em recipientes de polietileno de dimensão 15 mm x 54 mm, os quais foram hermeticamente fechados para prevenir o escape do Rn^{222} que se forma pelo decaimento do Ra^{226} . Após uma espera de um

mínimo de 32 dias para que o Ra^{226} atinja o equilíbrio radioativo com o Pb^{214} e o Bi^{214} contou-se por um período de 24 h para obter-se o espectro gasoso da amostra. Os radioisótopos Ra^{226} , Pb^{210} , Pb^{214} e Cs^{137} foram analisados por espectrometria gama, um método não-destrutivo (sem qualquer tratamento químico preliminar), usando-se um espectrômetro gama com detector de germânio de alta pureza tipo poço e multicanal com 8.192 canais. As atividades dos radionuclídeos são determinadas através de seus fotopicos de absorção total no espectro da amostra: a do Pb^{210} , via seu fotopico de 46,5 keV; a do Ra^{226} , via o fotopico do Pb^{214} em 352 keV, e a do Cs^{137} , pelo seu fotopico em 661,6 keV. Os espectros que se obtêm da amostra foram superpostos ao espectro da radiação de fundo do espectrômetro. O espectro gama da amostra é obtido, então, subtraindo-se o espectro da radiação de fundo do espectrômetro. A subtração da radiação de fundo é feita canal por canal utilizando o programa Maestro 32 fornecido pela ORTEC e o espectro líquido resultante é o espectro da amostra.

Descarga fluvial Os dados de descarga fluvial referem-se à série histórica da estação fluviométrica Emboacica (1961 – 1979), ampliada sua série para 50 anos, a partir da estação Mata de São João (1955 – 1960 e 1980

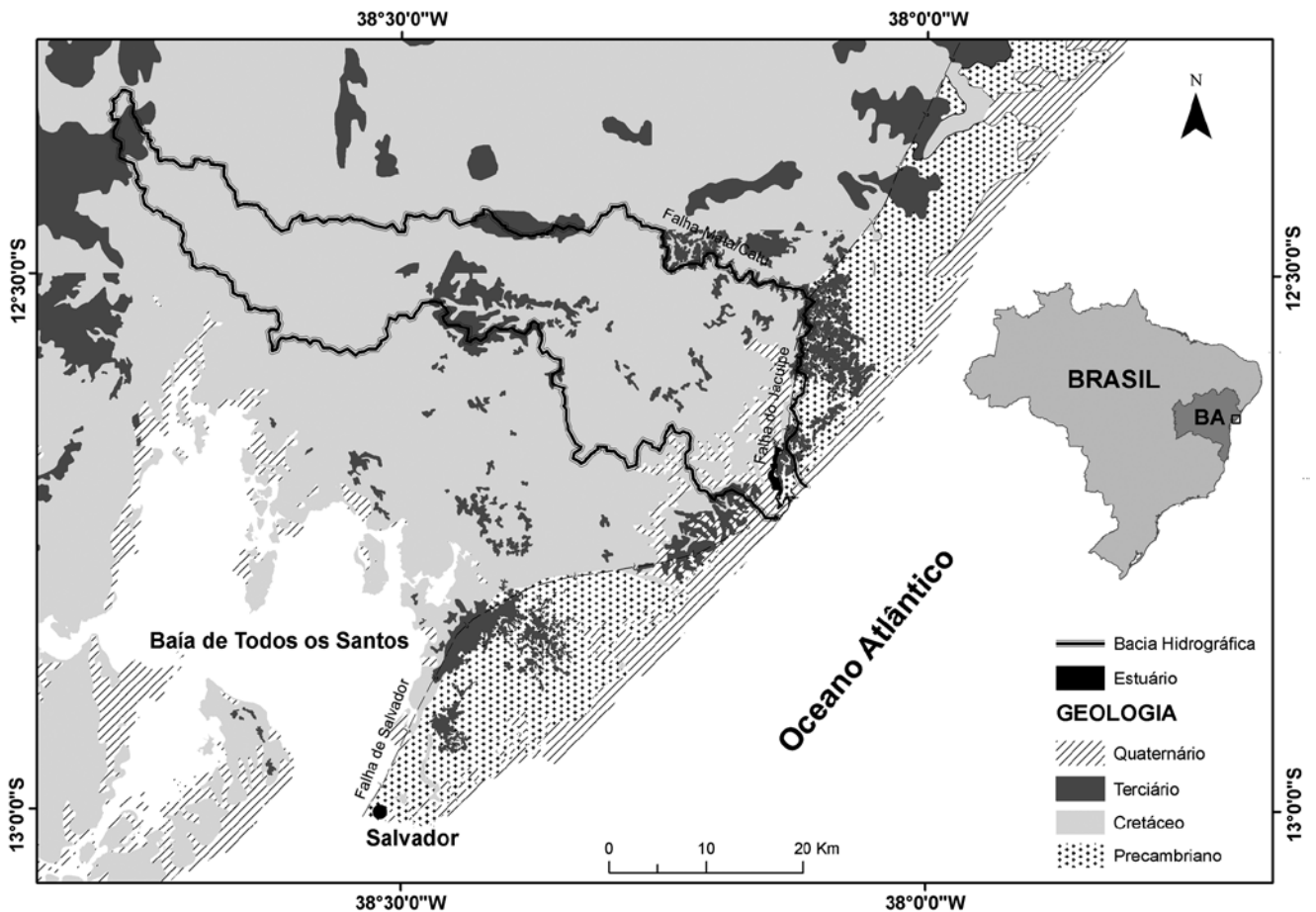


Figura 2 - Mapa geológico simplificado da bacia do rio Jacuípe (depois de Martin et al. 1980; Lima et al. 1981; Barbosa & Domingues 1996). Notar o estuário do Jacuípe instalado no limite tectônico entre a bacia do Recôncavo (Cretáceo) com o embasamento cristalino (Precambriano).

– 1997) (obtidos junto a Agência Nacional das Águas) e, a partir de 2000 até 2005 (obtidos junto a Empresa Baiana de Saneamento – EMBASA), pelos deflúvios da barragem Santa Helena (Lima 2007; Lima et al. no prelo). Para efeito de análise, será desconsiderada a área de drenagem do rio Capivara Grande por desaguar já próximo da embocadura estuarina e a jusante do local de amostragem (ver Fig. 1).

Espaço de acomodação estuarino O espaço de acomodação do estuário do Jacuípe pode ser dividido pelas áreas que compõem o canal principal (inframaré) e a planície de inundação (intermaré e supramaré). No primeiro caso, a amostragem batimétrica foi executada sob a forma de perfis transversais ao longo do canal estuarino, com o auxílio de um ecobatímetro acoplado a um GPS e a um computador portátil, obtendo-se simultaneamente as coordenadas x, y, z. Durante a amostragem, a altura da maré foi acompanhada em três pontos distintos ao longo do estuário para posterior redução dos dados. No tratamento dos dados batimétricos eliminaram-se os dados espúrios existentes na malha amostral (*spikes*) para posterior interpolação.

Para a planície de inundação, construiu-se um modelo digital de terreno estimando suas elevações a

partir das variações das alturas de maré (em sizígia e quadratura) até atingir as cotas da área externa ao estuário. A mesma estimativa foi atribuída para a cabeceira do estuário assim como para alguns trechos onde a amostragem foi insuficiente. A elevação das áreas de manguezal mais externa foi estimada com base na elevação da preamar de sizígia, com altura máxima de 1,27 m (Lima 2007). A interpolação das cotas batimétricas e os limites da área intermareal foram feitas com o programa SMS[®]. As cotas foram reduzidas ao nível médio do mar com base na análise harmônica das séries de maré (Lima 2007) e as elevações foram niveladas a um nível de redução arbitrário relacionado ao extremo da baixamar.

Finalmente, multiplicando-se as taxas de sedimentação ω ($m \text{ ano}^{-1}$) pela área total A (m^2) obtêm-se o volume de sedimento produzido a cada ano no estuário. Esse resultado, dividido pelos espaços de acomodação V (m^3) ainda existentes em níveis inframareal, intermareal e supramareal, resulta no quociente do preenchimento estuarino e o inverso desse valor dá o tempo de preenchimento do estuário em anos (equação 3):

$$\text{Tempo de preenchimento estuarino} = \frac{V}{\omega \cdot A} \quad (3)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Taxas de sedimentação estuarina A descrição dos dados referentes à taxa de sedimentação e granulometria segue no sentido do topo para base do testemunho. As atividades do Pb^{210}_{total} e do Ra^{226} assinalaram a atividade calculada do $Pb^{210}_{excesso}$ até 0,33 m do testemunho são apresentadas na tabela 1. O Cs^{137} foi detectado na fatia 24 cm do testemunho (correspondente a 1965), porém com valores abaixo do limite de quantificação.

O gráfico apresentado na figura 3a mostra que houve uma mudança na taxa de sedimentação numa época correspondente à profundidade de até 0,23 m, de 6,0 mm ano⁻¹ para 3,7 mm ano⁻¹ abaixo desse valor. Considerando o Cs^{137} aparecer em 24 cm, a mudança ocorreu entre 1962 e 1966. Com o Pb^{210} pode-se verificar 70 anos de sedimentação no estuário do Jacuípe. Entretanto, não há evidência unívoca de mudanças na descarga fluvial líquida que afetasse o comportamento sedimentológico desse estuário (Fig. 3c). Esse aumento da taxa de sedimentação deve ter sido provocado, portanto, pelas intervenções humanas no interior dessa bacia, nos municípios de Mata de São João e São Sebastião do Passé, que se deram após o início da exploração de petróleo em meados de 1960 e que, por conseguinte, ocasionou os primeiros pulsos de ocupação para a região (Fig. 4).

O aumento da taxa de sedimentação pode ser percebido, inclusive, pela mudança granulométrica, com o aumento da deposição de sedimentos finos (não ultrapassando 40% do total), em especial silte (em 0,18 - 0,22 m no testemunho) e que decresce novamente, mas a proporções menores (Fig. 3b). Do ponto de vista textural e mineralógico, predomina a deposição da fração areia, não apenas nesse trecho do canal, mas no estuário como um todo (Lima 2007), sendo principalmente formado de areia média a fina, bem selecionada, com predominância de quartzo (>95%). A base do testemunho (0,60 m), com idade de 140 anos, experimentou uma sedimentação com 95,4% de areia, destes 55,3% são areia média, diminuindo granulometricamente de forma quase que gradativa em sentido ao topo (Fig. 3b).

Entretanto, não foram registradas mudanças na sedimentação estuarina por conta das alterações nas descargas sólidas desse rio, com os eventos da construção (1980) e com o rompimento da barragem Santa Helena (1984). No primeiro caso, os efeitos previsíveis pela construção de uma barragem teriam a ver com a contribuição do sedimento grosso do rio, que normalmente são aprisionados a montante do barramento. No segundo caso, com o rompimento da barragem, a maior parte dos sedimentos finos carregados não teria ficado retida no estuário e, sim, ejetada para a plataforma continental.

Essas condições de sedimentação encontradas demonstram que, apesar de a bacia do Jacuípe possuir uma área de drenagem relativamente pequena (1275 km²), a produção de sedimento no seu interior pode ser considerada como alta, o que deve ser explicado pelos litotipos da bacia estarem submetidos mais intensamente ao processo de erosão. Suas drenagens recortam terrenos constituídos de rochas sedimentares da bacia do Recôncavo, as quais são propícias à erosão e, como consequên-

Tabela 1 - Atividades de Pb^{210}_{total} , Ra^{226} e $Pb^{210}_{excesso}$ encontrados até 0,33 m de profundidade no testemunho coletado no estuário do Jacuípe.

Profundidade (m)	$[Pb^{210}]_{total}$ (Bq kg ⁻¹)	$[Ra^{226}]$ (Bq kg ⁻¹)	$[Pb^{210}]_{exc}$ (Bq kg ⁻¹)
0,01	158,00	14,90	143,10
0,02	161,00	17,20	144,80
0,03	169,60	16,90	152,70
0,04	144,30	16,20	128,70
0,05	151,80	15,50	136,30
0,06	149,90	14,90	135,80
0,07	133,10	15,10	118,00
0,08	115,60	12,70	102,90
0,09	93,50	12,10	81,40
0,10	116,30	15,80	100,50
0,11	109,80	13,70	96,70
0,12	114,10	17,00	97,10
0,13	116,80	16,00	100,80
0,14	95,60	15,20	80,40
0,15	112,20	16,20	96,00
0,16	104,50	14,60	89,90
0,17	96,00	14,40	87,60
0,18	99,80	12,60	87,20
0,19	97,70	12,30	85,40
0,20	81,10	14,70	66,40
0,21	62,60	16,40	66,20
0,22	80,90	14,30	66,60
0,23	50,50	14,50	46,00
0,24	46,41	12,79	33,62
0,25	33,45	11,86	21,59
0,26	56,84	11,61	25,23
0,27	33,90	13,31	20,59
0,28	25,00	9,36	15,64
0,29	19,94	10,01	9,93
0,30	18,85	9,81	9,04
0,31	18,99	10,36	8,63
0,32	17,46	10,82	6,64
0,33	19,51	13,67	5,84

cia, um maior aporte de sedimentos é produzido.

Uma comparação análoga a outros locais no Brasil e no mundo é ainda bastante incipiente, pois poucos canais estuarinos dispõem de cálculos de taxas de sedimentação (Tab. 2). De modo geral, os trabalhos já realizados demonstraram que a natureza das taxas de sedimentação estuarina apresentam ordem de grandeza de poucos milímetros por ano, em ambos estágios de evolução do nível do mar. Santos (2007) verificou uma taxa de sedimentação de 16 mm ano⁻¹ no estuário do rio São Francisco (entre Sergipe e Alagoas) nos últimos 20

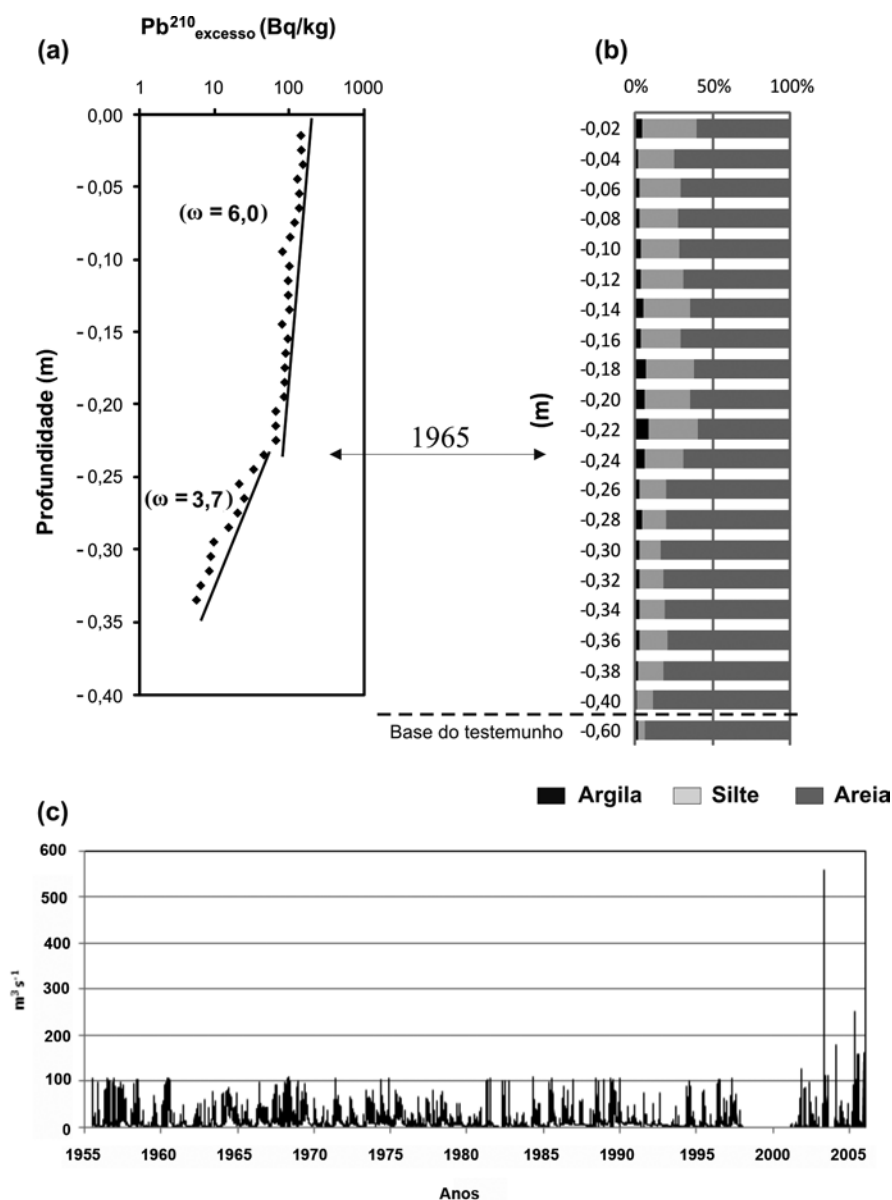


Figura 3 - (a) Taxas de sedimentação do estuário do Jacuípe, (b) distribuição granulométrica e (c) a descarga fluvial do rio Jacuípe entre 1955 e 2005.

anos com testemunhos retirados de uma área de manguezal (Tab. 2). Saito *et al* (2001) encontraram a taxa de 5 a 10 $mm\ ano^{-1}$ no complexo estuarino Cananéia-Iguape (SP). Madsen *et al* (2007) verificaram que nos últimos 300 anos um pequeno estuário no mar do norte (Dinamarca) experimenta uma taxa de sedimentação de $\sim 1,2\ mm\ ano^{-1}$. Quando esses valores em milímetros por ano são superados geralmente ocorre progradação do leito e a formação de deltas (Corbett *et al*. 2004).

No que diz respeito à comparação quanto às recentes mudanças ocorridas na sedimentação no estuário do Jacuípe, essa poderia ser feita, de forma aproximada, e apenas do ponto de vista qualitativo, com algumas baías brasileiras, a exemplo de: Guanabara e Sepetiba (RJ), Todos os Santos (BA) e Paranaguá (PR) (Tab. 3), salientando que nas três primeiras, as taxas de sedimen-

tação mais que dobraram em poucas décadas. Na Baía de Guanabara, os valores encontrados localmente foram de 22 $mm\ ano^{-1}$ (Godoy *et al*. 1998), na baía de Todos os Santos a taxa média é de 6,9 $mm\ ano^{-1}$ (Argollo 2001), enquanto que em Paranaguá, atinge 12,2 $mm\ ano^{-1}$ (Souza *et al*. 2001). Do ponto de vista quantitativo, essa comparação é indébita, pois as baías acima relacionadas possuem grandes espaços de acomodação para os sedimentos e, por consequência, o efeito armadilha nessas baías seriam diferentes a um estuário estreito, meandrante e raso, como é o caso do Jacuípe.

Em demais lugares no mundo, as taxas de sedimentação estuarina são também restritas e refletem duplamente ao cenário encontrado no Brasil, onde apenas grandes baías dispõem de cálculos de taxas de sedimentação e onde o aumento desta foi também pro-



Figura 4 - Imagens aéreas do estuário do Jacuípe (a) praticamente sem ocupação humana e (b) atualmente urbanizada. Os polígonos referem-se as áreas de maior adensamento populacional.

Tabela 2 - Taxas de sedimentação em ambientes estuarinos, utilizando-se radionuclídeos de Pb^{210} , Cs^{137} e C^{14} em alguns estuários no mundo.

Estuário	País	Taxas de sedimentação registradas ($mm\ ano^{-1}$)	Referências
Cananéia (SP)	Brasil	5,0 – 10,0	(Saito <i>et al.</i> 2001)
São Francisco (SE-AL)	Brasil	16,6	(Santos 2007)
Caravelas (BA)	Brasil	6,68	(Neto 2008)
Ho Havn	Dinamarca	1400 (anos A.P.) = 9 1340-970 (anos A.P.) = 0,3 300 (anos A.P.) = 1,2	(Madsen <i>et al.</i> 2007)
Vermelho	Vietnã	3,0 – 14,0	(Van Santen <i>et al.</i> 2007)
Brahmaputra	Índia	14,7	(Goodbred & Kuehl 1998)
Tagus	Portugal	Testemunho 1 5150 (anos A.P.) = 0,1 2100 (anos A.P.) = 0,4 150 (anos A.P.) = 5,0 Testemunho 2 8100 - 7500 (anos A.P.) = 7,0 7500 - 5750 (anos A.P.) = 1,5	(Van der Schriek <i>et al.</i> 2007)
Vigo	Espanha	2001 e 484 (anos A.P.) = 1,1 484 (anos A.P.) e atual = 4,4	(Perez-Arlucea <i>et al.</i> 2005)
Ravenglass / Windscale	Inglaterra	2 – 7	(Aston & Stanners 1981)
Scheldt	Bélgica	Testemunho 1 = 13 - 17 Testemunho 2 = 8,4 – 9,0	(Zwolsman <i>et al.</i> 1993)
Hudson	Estados Unidos	13 1	(Woodruff <i>et al.</i> 2001) (McHugh <i>et al.</i> 2004)

vocado pela influência humana nas últimas décadas. Na baía de Chesapeake (costa leste estadunidense), a taxa de sedimentação é cerca de $12\ mm\ ano^{-1}$ na cabeceira,

uma modesta taxa de $3\ mm\ ano^{-1}$ no meio da baía e uma taxa intermediária de $8\ mm\ ano^{-1}$ na embocadura. A principal descarga de sedimento na cabeceira dessa baía é

trazida pelo rio Susquehanna, enquanto que, na embocadura, a proveniência dos sedimentos é de origem marinha (Officer *et al.* 1984). Não foi possível comparar se as taxas de sedimentação foram significativamente mais altas por setores no estuário do Jacuípe, seja aproximando-se da cabeceira ou da embocadura, devido no leito estuarino predominar a fração areia e por essa dificultar a fixação dos radionuclídeos necessários à investigação geocronológica estabelecida.

Preenchimento estuarino O estuário do Jacuípe possui uma área de 6,22 km², configura-se em uma morfologia meandrante, sendo bastante irregular e raso (predominando menos de 3 metros), com profundidade média (volume total/área total) de 1,08 m (Fig. 5). Uma barra arenosa que ocorre na embocadura formou-se por conta da importação de sedimento da antepraia para o estuário, devido às correntes de maré serem mais forte durante a enchente que durante a vazante (Lima *et al.* no prelo). Ao longo do estuário, outras barras longitudinais ficam emersas (entre os quilômetros 3 e 3,5 e 5), apenas durante as baixamares de sizígia, o que demonstra um estágio de parcial preenchimento do estuário. A planície de inundação estuarina é ampla e plana em relação ao canal principal, correspondendo a 67,3% da área do estuário o que origina a assimetria negativa nas correntes de maré descrita acima. Depressões pontuais de até 9,5 m encontradas nos km 4 e 5,5 e de 8 m no km 13,5 a partir da embocadura, ocorrendo alinhadas no limite da bacia do Recôncavo não garantem uma maior sustentação desse estuário, como mostra as profundidades do talvegue, inferiores a 3m (Fig. 5).

Resta atualmente ao estuário do Jacuípe um espaço de acomodação total de 6,77 x 10⁶ m³ a ser preenchido (correspondente ao prisma de sizígia mais o volume inframaré) e o volume inframaré representa pouco menos de 1/3 desse total, com 1,96 x 10⁶ m³ (Tab. 4). O completo preenchimento deste espaço indica, assim, o desaparecimento do estuário – menor volume menor o tempo necessário para o preenchimento sedimentar.

Considerando-se os volumes encontrados e uma estimativa de sedimentação uniforme e em condições naturais (a 3,7 mm ano⁻¹), o estuário do Jacuípe seria totalmente preenchido (Tab. 3) em menos de 300 anos (calculado pelo Pb²¹⁰). No entanto, a condição de parcial extinção do estuário já seria cogitada pelo preenchimento do canal principal devido ao efeito de bloqueio na penetração das marés no estuário, o que afetaria drasticamente a sua existência em 260 anos. Contudo, mantida a condição de elevada produção de sedimentos que recentemente se configurou na bacia hidrográfica, o estuário poderia deixar de existir em 160 anos. A média de preenchimento prevista entre os diferentes volumes analisados foram de apenas 25 anos, sendo 222 anos para o preenchimento total e 197 anos parcial (Tab. 3).

Rios com extensas bacias hidrográficas e consideráveis alturas de precipitação dispõem de grande volume de sedimentos para os estuários a ponto de preenchê-los rapidamente. Já nas descargas superiores

Tabela 3 - Estimativa de preenchimento calculada a partir das taxas de sedimentação e dos espaços de acomodação do estuário do Jacuípe.

Volume estuarino (10 ⁶ m ³)	ω (mm ano ⁻¹)	$\omega \cdot A$ (m ³)	Preenchimento estuarino (em anos)
Total 6,77	6,04	37568	180
	3,70	23014	294
Inframaré 1,96	6,04	12261	160
	3,70	7511	261
Pb ²¹⁰ média	4,90	9947	197

a 200.000 m³ s⁻¹ do rio Amazonas, verifica-se que os sedimentos são atualmente lançados diretamente no mar, com pouca sedimentação na embocadura (apenas 10 mm ano⁻¹), que a partir da plataforma continental interna a taxa é de 60 cm ano⁻¹ (Dukat & Kuehl 1995), e que na plataforma externa a taxa é altíssima, da ordem de 5 a 15 m ano⁻¹ (Kuehl *et al.* 1986).

Há de se mencionar os efeitos da variabilidade interanual do clima que, para a região nordeste do Brasil, são esperados déficits hídricos (Molion & Moraes 1987; Marengo & Tomasella 1998; IPCC 2007). Isso significa que, entrará em funcionamento a operação de retirada de água da barragem Santa Helena para fins de atender o aumento na demanda da região. Nos últimos 10 anos, essa barragem tem ajudado na manutenção do estuário do Jacuípe, com picos de descargas liberados artificialmente, tendo esses, a capacidade de erodir os sedimentos e auxiliando na desobstrução do canal. Diversos picos de descargas foram liberados pela barragem, com valores acima da vazão máxima natural desse rio, de 109 m³ s⁻¹ (ver Fig. 3). Alguns desses picos instantâneos (de 834 m³ s⁻¹) superam oito vezes a magnitude das máximas naturais e depois são amortecidos na média diária (em 561 m³ s⁻¹ – ver Fig. 3c). Lima (2007) demonstrou que a uma descarga de 80 m³ s⁻¹, ocorre o bombeamento fluvial (*river pumping*) o que faz facilmente o sedimento ser ejetado do estuário.

Conforme se mantém o crescimento populacional da Região Metropolitana de Salvador (IBGE 2009) aumenta também a ocupação das margens do estuário do Jacuípe. Não obstante a esse crescimento, soma-se a expansão imobiliária da cidade de Salvador, da qual os materiais utilizados para construção civil são provenientes da bacia do rio Jacuípe. Dezenas de lavras abertas exploram areias e argilas em terrenos friáveis das sub-bacias Capivara Grande e Capivara Pequeno (Fig. 6a e 6b), provocando a formação de inúmeros sulcos e voçorocas e maior aporte de sedimentos liberados para a calha fluvial. A consequência imediata dessa intensa exploração afetou principalmente a parte baixa do estuário, com o aumento de sedimentos finos como pôde ser percebido no topo do testemunho (ver Fig. 3b).

A combinação do aumento da sedimentação estuarina com a redução dos picos de descarga da barra-

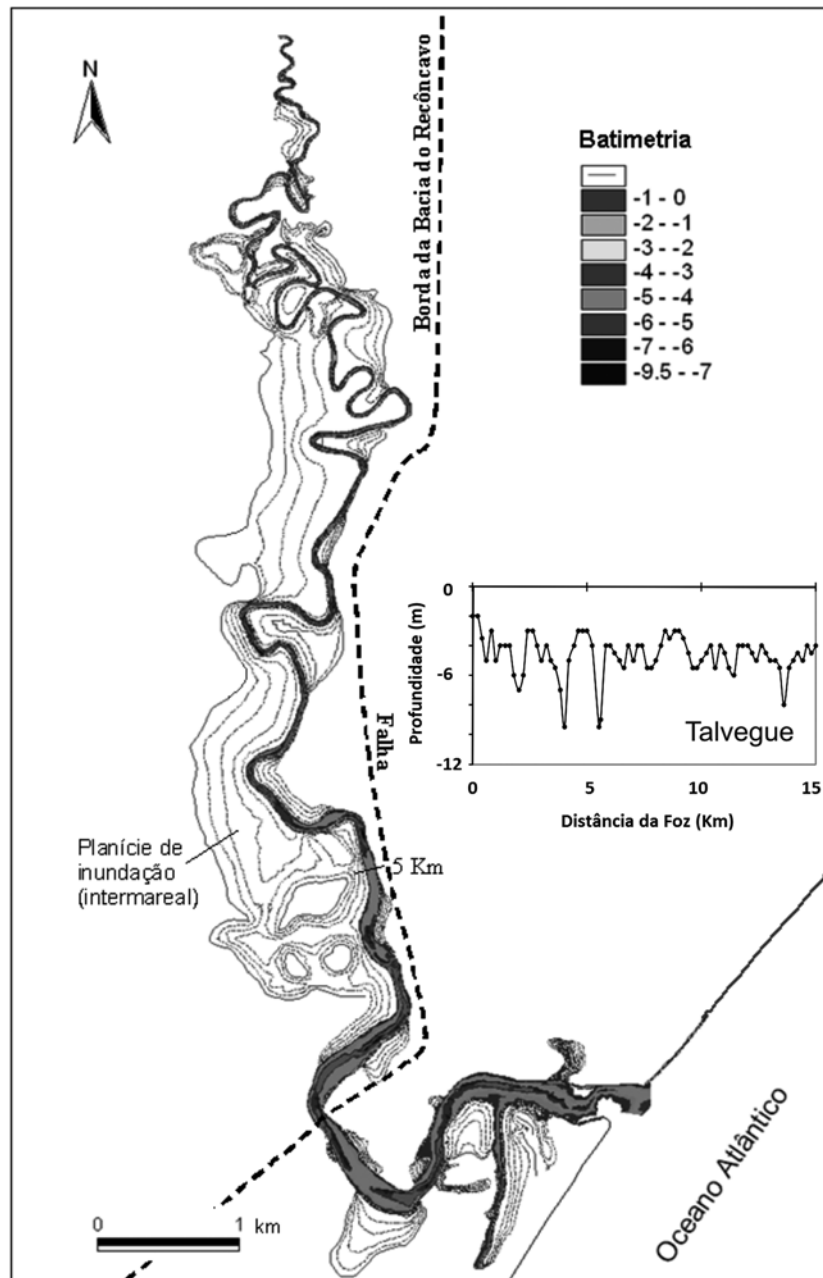


Figura 5 - Mapa batimétrico do estuário do Jacuípe, com detalhe para o perfil longitudinal retirado do talvegue do canal principal.

gem deverá reduzir ainda mais o tempo de existência do estuário estimado nesse trabalho. Do ponto de vista ambiental, estuários são os ambientes de transição entre as bacias hidrográficas e o oceano, sendo considerados os berçários para a vida marinha (peixes, mamíferos, além da micro, meio e macro fauna característica), terrestre (mamíferos, aves e répteis) e do ecossistema manguezal. Além disso, uma preocupação tornar-se-á ainda maior, devido ao crescimento exponencial da população humana em menos de um século (IPCC 2007). Tal preocupação é razoável, pois milhares de ribeirinhos habitam as zonas costeiras e as margens de estuários brasileiros, de onde retiram o seu sustento diário, por

meio da atividade pesqueira. Geralmente, a capacidade adaptativa dessas comunidades é baixa, especialmente frente a eventos extremos, podendo ser suprimidas frente às mudanças econômicas. O preenchimento de um estuário, entre outros impactos negativos severos, provoca o impedimento à navegação e às atividades turísticas, risco a muitas propriedades e a redução importante de rendimentos em muitas localidades e o desequilíbrio ecológico da região afetada.

O estado avançado de preenchimento estuarino parece não ser exclusivo apenas ao Jacuípe. Estudos em estuários desse próprio litoral (por exemplo: Pojuca, Inhambupe, Sauípe, Subaúma, Joanes e Itariri) apontam

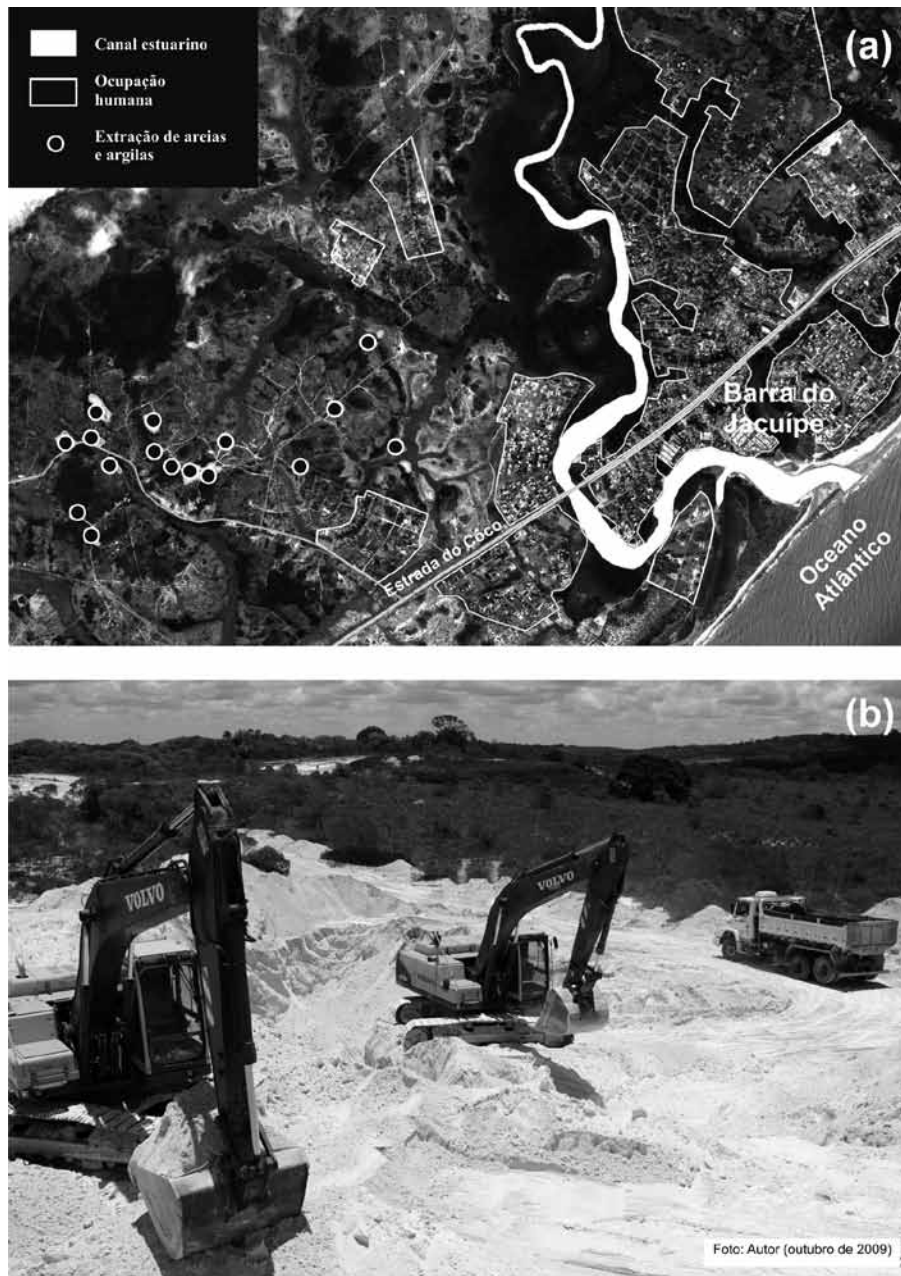


Figura 6 - (a) Situação da ocupação humana atual no baixo curso da bacia hidrográfica do Jacuípe (imagem original: Google Earth^{Pro} 2007) e (b) destaque para um grande número de lavras de areia e argila nas sub-bacias dos rios Capivara Grande e Capivara Pequeno.

para tempos de preenchimento unívocos ao do Jacuípe (Lima *et al.* em preparação) e, em demais litorais brasileiros, alguns estuários não mais existem (Lessa 2006).

CONCLUSÕES Ao tratar do preenchimento dos estuários, há de levar-se em consideração uma série de fatores responsáveis por esse fenômeno, tais como: (1) taxa de sedimentação, (2) variações do nível relativo do mar, (3) espaços de acomodação (4) e o fator tempo. Este trabalho estimou o tempo de preenchimento sedimentar necessário para que o estuário do Jacuípe fosse extinto. Sendo assim, os dados obtidos e comparados

com as informações da literatura pertinente levam-se a concluir o seguinte:

- A ordem de grandeza da sedimentação em estuários é sempre de poucos milímetros ao ano e, no caso do Jacuípe foi de 3,7 mm ano⁻¹. Essa ordem foi perturbada a partir da década de 1960, com o início das atividades humanas no interior da bacia, aumentando para 6,0 mm ano⁻¹;

- O espaço de acomodação atual nesse estuário é relativamente pequeno, devendo seu preenchimento, iniciado a cerca de 5000 anos atrás, ocorrer em 3 séculos, assumindo-se um nível médio do mar estacionário

nesse período. Esse intervalo de tempo pode ser ainda reduzido caso se mantenha a taxa de sedimentação estuarina e ocorra a redução nos deflúvios atuais na barragem Santa Helena.

Agradecimentos Ao apoio financeiro do CNPq (Processo nº 140128/2008-5); à CAPES, pela concessão da bolsa de pesquisa; ao Departamento de Sedimentologia – UFBA, sempre pela logística laboratorial e pelo incenti-

vo dos companheiros, em especial, ao Prof. Félix Ferreira de Farias; à Companhia de Polícia de Proteção Ambiental (COPPA) do Estado da Bahia, pelo apoio na etapa de mapeamento da lavras; ao Laboratório de Física Nuclear Aplicada – UFBA, pelas análises isotópicas; ao Núcleo de Estudos Ambientais – UFBA, pela refrigeração dos testemunhos; à Carolina de A. Poggio e Taoan S. Franklin, pela ajuda durante as amostragens de campo, e a Felipe Moraes, pela ajuda com a confecção dos mapas.

Referências

- Argollo R. M. 2001. *Cronologias de sedimentação recente e de deposição de metais pesados na Baía de Todos os Santos usando ²¹⁰Pb e ¹³⁷Cs*. Tese de Doutorado em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, 104 p.
- Aston S.R. & Stanners D.A. 1981. Americium in intertidal sediments from the coastal environs of Windscale. *Marine Pollution Bulletin*, **12**(5):149-153.
- Barbosa J.S.F. & Dominguez J.M.L. 1996. *Mapa Geológico do Estado da Bahia*. Texto Explicativo. Salvador: Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração. Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, Salvador-BA, 382 p.
- Cattaneo A. & Stell R.J. 2003. Transgressive deposits: a review of their variability. *Earth-Science Reviews*, **62**:187-228.
- Chanton J.P., Martens C.S., Kipphut G.W. 1983. ²¹⁰Pb sediment geochronology in a changing coastal environment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**:1791-1804.
- Corbett D.R., McKee B., Duncan D. 2004. An evaluation of mobile mud dynamics in the Mississippi River deltaic region. *Marine Geology*, **209**(1-4):91-112.
- Dalrymple R.W., Zaitlin B.A., Boyd R. 1992. Estuarine Facies Models: Conceptual Basis and Stratigraphic Implications. *Journ. Sedim. Petrol.*, **62**(6):1130-1146.
- Dukat D.A., Kuehl S.A. 1995. Non-steady-state ²¹⁰Pb flux and the use of ²²⁸Ra/²²⁶Ra as a geochronometer on the Amazon continental shelf. *Marine Geology*, **125**:329-350.
- Ekdahl E.J., Fritz S.C., Baker P.A., Rigsby C.A., Coley K. 2008. Holocene multidecadal-to millennial-scale hydrologic variability on the South American. *The Holocene*, **18**:867-876.
- Figueiredo I. & Underkoffler E.C. 1996. Sediment deposition, accumulation, and seabed dynamics in a energetic fine-grained coastal environment. *Continental Shelf Research*, **16**:787-815.
- Folk R.L. & Ward W.C. 1957. Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain-Size Parameters. *Jour. Sedim. Petrol.*, **27**(1):3-26.
- Godoy J.M., Moreira I., Bragança M.J., Wanderley C., Mendes L.B. 1998. A study of Guanabara Bay sedimentation rates. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **227**(1-2):157-160.
- Goman M. 2000. Trends in River Flow Affecting the Northeastern Reach of the San Francisco Bay Estuary over the Past 7000 Years. *Quaternary Research*, **54**:206-217.
- Goodbred S.L., Kuehl S.A., 1998. Floodplain processes in the Bengal Basin and the storage of Ganges–Brahmaputra river sediment: an accretion study using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb geochronology. *Sedimentary Geology*, **121**:239-258.
- Gregory K.J., Benito G., Dikau R., Golosov V., Jones A.J.J., Macklin M.G., Parsons A.J., Passmore D.G., Poesen J. Starkel L., Walling D.E. 2006. Past hydrological events related to understanding global change. *Catena*, **66**:2-13.
- Hermanson M.H. 1990. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs chronology of sediments from small, shallow Arctic lakes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**:1443-1451.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) 2009. *Indicadores Populacionais*. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acessado em 24 maio 2010.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2009. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acessado em 24 maio 2010.
- INTERGOVERNAMENTAL PAINEL OF CLIMATE CHANGE (IPCC) 2007. *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the IPCC Third Assessment Report. Disponível em <http://www.ipcc.ch/>. Acessado em 15 maio 2010.
- Kuehl S.A., DeMaster D.J., Nittrouer C.A. 1986. Nature of sediment accumulation on the Amazon continental shelf. *Cont. Shelf Res.*, **6**:209-225.
- Kuehl S.A., Martin A.M.A., Hassan A.T.C. 1998. The importance of floodplain sedimentation for river sediment budgets and terrigenous input to the oceans: Insights from the Brahmaputra–Jamuna River. *Geology*, **26**(2):175-178.
- Lessa G. C. 2006. Brazilian coastal bays: large estuaries in a regressive coast. In: Angulo R., Klein H., Souza C. (eds.) 3rd IGCP 495 Meeting, Camburiú, Brazil, Proceedings, p. 1-4.
- Lima G.M.P., Vilas Boas G.S., Costa A.B. (em preparação). Analogias entre as taxas de sedimentação dos estuários no litoral norte da Bahia.
- Lima G.M.P., Lessa G.C., Franklin T.S. (no prelo) Avaliação dos impactos da barragem Santa Helena no trecho estuarino do rio Jacuípe, litoral norte da Bahia - Brasil. *Quaternary and Environmental Geosciences*. (Aceito ainda sem data de publicação).
- 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 em Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 137 p.

- Lima M.I.C., Fonseca E.G., Oliveira E.P. 1981. In: Brasil. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RadamBrasil. *Levantamento de Recursos Naturais, 24 - Folha SD.24 Salvador*. Rio de Janeiro, p. 25-192.
- Lu X. & Matsumoto E. 2005. Recent sedimentation rates derived from ^{210}Pb and ^{137}Cs methods in Ise Bay, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **65**:83-93.
- Madsen A.T., Murray A.S., Andersen T.J., Pejrup M. 2007. Temporal changes of accretion rates on an estuarine salt marsh during the late Holocene - Reflection of local sea level changes? The Wadden Sea, Denmark. *Marine Geology*, **242**:221-233.
- Marengo J.A. & Tomasella J. 1998. Trends in Streamflow and Rainfall in Tropical South America: Amazonia, Eastern Brazil and Northwestern Peru. *Journ. Geophys. Res.*, **103**:1775-1783.
- Martin L., Bittencourt A.C.S.P., Vilas Boas G.S., Flexor J.M. 1980. *Texto Explicativo para o Mapa Geológico do Quaternário Costeiro do Estado da Bahia*. Escala 1:250 000. Salvador, CPM/SME. 60 p.
- Martin L., Dominguez J.M.L., Bittencourt A.C.S.P. 2003. Fluctuating Holocene sea levels in Eastern and Southeastern Brazil: evidence from multiple fossil and geometric indicators. *J Coastal Res.* **19**:101-124.
- McHugh C.M.G., Pekar S.F., Christie-Blick N., Ryan W.B.F., Carbotte S., Bell R. 2004. Spatial variations in a condensed interval between estuarine and open-marine settings: Holocene Hudson River estuary and adjacent continental shelf. *Geology*, **32**(2):169-172.
- Molion L. & Moraes J. 1987. Oscilação Sul e Descarga de Rios na América do Sul tropical. *Rev. Bras. Eng., Caderno de Hidrologia*, **5**(1):53-63.
- Neto A.M. 2008. *Modificações da zona costeira do extremo sul da Bahia nos últimos 150 anos, e sua relação com a sedimentação do banco de Abrolhos*. Tese de Doutorado em Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 176 p.
- Officer C.B., Lynch D.R., Setlock G.H., Helz G.R. 1984. Recent Sedimentation Rates in Chesapeake Bay. In: Kennedy V.S. (ed.) *The Estuary as a Filter*. New York, Academic Press, p. 131-157.
- Pekárová 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.
- Perez-Arlucea M., Mendez G., Clemente F., Nombela M., Rubio B., Filgueira M. 2005. Hydrology, sediment yield, erosion and sedimentation rates in the estuarine environment of the Ria de Vigo, Galicia, Spain. *Journal of Marine Systems*, **54**:209-226.
- Perillo G.M.E. (ed.) 1995. *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. Developments in Sedimentology 53, Elsevier Science B.V. Amsterdam, 471 p.
- Perjrup M. 1988. The Triangular Diagram Used for Classification of Estuarine Sediments: A New Approach. In: Boer P.L., van Gelder A., Nio S.D. (eds.) *Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies*. Reidel, Dordrecht, p. 289-300.
- Saito R.T., Figueira R.C.L., Tessler M.G., Cunha I.I.L. 2001. ^{210}Pb and ^{137}Cs geochronologies in the Cananeia-Iguape estuary and in the southern continental shelf of São Paulo State, Brazil. *J. Radioanalytical Nuclear Chemistry*, 249 p.
- Santos E.S. 2007. *Aplicação de marcadores geoquímicos para a avaliação dos impactos das barragens nos sedimentos do estuário do Rio São Francisco (Al/Se)*. Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense, 139 p.
- Santos I.R., Burnett W.C., Godoy J.M. 2008. Radionuclides as tracers of coastal processes in Brazil: review, synthesis, and perspectives. *Brazilian Journal of Oceanography*, **56**(2):115-131.
- Sheppard F.P. 1954. Nomenclature Based on Sand, Silt, Clay Ratios. *Journ. Sed. Petrol.*, **24**:151-158.
- Souza M.C., Angulo R.J., Tessler M.G., Figueira R.C.L. 2001. Taxas de sedimentação no complexo estuarino da Baía de Paranaguá, Estado do Paraná, estimadas a partir do método de datação por espectrometria gama: resultados preliminares. In: ABEQUA, Congresso da Abequa, 7, Imbé, Brazil, p. 182-183.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS) 2009. *Shuttle Radar Topography Mission*. Disponível em http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/srtm3/south_america/. Acessado em janeiro de 2010.
- Van der Schriek T., Passmore D.G., Rolão J., Stevenson A.C. 2007. Estuarine–fluvial floodplain formation in the Holocene Lower Tagus valley (Central Portugal) and implications for Quaternary fluvial system evolution. *Quaternary Science Reviews*, **26**:2937-2957.
- Van Santen P., Augustinus P.G.E.F., Janssen-Stelder B.M., Quartel S., Tri N.H. 2007. Sedimentation in an estuarine mangrove system. *Journal of Asian Earth Sciences*, **29**:566-575.
- Wolanski E., Huan N.N., Dao L.T., Nhan N.H. 1996. Fine-sediment Dynamics in the Mekong River Estuary, Vietnam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **43**(5):565-582.
- Wolock D.M. & McCabe G.J. 1999. Simulated effects of climate change on mean annual runoff in the conterminous United States. *Journal of the American Water Resources Association*, **35**:1341-1350.
- Woodruff J.D., Geyer W.R., Sommerfield C.K. 2001. Seasonal variation of sediment deposition in the Hudson estuary. *Marine Geology*, **179**:105-119.
- Zwolsman J.J.G., Berger G.W., Van Eck G.T.M. 1993. Sediment accumulation rates, historical input, postdepositional mobility and retention of major elements and trace metals in salt marsh sediments of the Scheldt estuary, SW Netherlands. *Marine Chemistry*, **44** (1):73-94.

Manuscrito ID 17613
submetido em 31 de maio de 2010
Aceito em 23 de novembro de 2010