

HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO SAZONAL EM UM ESTUÁRIO DOMINADO POR MARÉ: ESTUÁRIO DE CARAVELAS (BA)

Marçal D. Pereira¹, Eduardo Siegle², Luiz B. de Miranda² e Carlos A.F. Schettini³

Recebido em 24 agosto, 2009 / Aceito em 2 março, 2010
Received on August 24, 2009 / Accepted on March 2, 2010

ABSTRACT. The objective of the present paper is to characterize the hydrodynamics and the suspended particulate matter (SPM) in the Caravelas Estuary under different tidal and river regimes. Four hydrographic campaigns were carried out comprising a complete semi-diurnal tidal cycle, comprising neap and spring tidal phases, and during dry and wet seasons. Water level, current speed and direction, salinity, temperature and turbidity were recorded in an anchored station near to the estuarine mouth. The residual SPM flux and the mechanisms of transport were calculated. The higher SPM concentrations were recorded during the spring tidal phase. During neap tides, the net SPM flux was up-estuary, although with low scale. During spring tides the tidal currents are strongly ebb dominant, and the net flux can be either up- or down-estuary. The estuary was classified as well mixed or weakly stratified. The hydrography and the sediment balance are firstly modulated by the tidal range, and the fresh water inflow is negligible.

Keywords: tidal currents, tidal asymmetry, suspended sediments.

RESUMO. O objetivo do presente estudo é caracterizar a hidrodinâmica e o transporte de material particulado em suspensão (MPS) no estuário de Caravelas sob diferentes condições de maré e vazão fluvial. Foram realizadas quatro campanhas hidrográficas durante ciclos completos de maré, sendo em condições de maré de sizígia e quadratura, e durante os períodos seco e chuvoso. Dados de nível de água, velocidade e direção de correntes, salinidade, temperatura e turbidez foram obtidos em uma estação fixa próxima da desembocadura do estuário. A partir destes dados foram obtidos os transportes residuais de MPS e calculado os mecanismos de transporte. As maiores concentrações médias de material particulado em suspensão ocorreram em condições de sizígia. Em condições de maré de quadratura o transporte resultante de MPS foi com sentido estuário acima, porém de pequena intensidade. Em condições de sizígia o estuário é caracterizado por correntes mais intensas e assimétricas, com dominância de vazante. Durante a condição de sizígia o estuário pode atuar como importador ou exportador de MPS. O estuário do rio Caravelas foi classificado como bem misturado e fracamente estratificado. A hidrografia e o balanço sedimentar são principalmente modulados pela altura da maré e o aporte de água doce é irrelevante.

Palavras-chave: correntes de maré, assimetria, sedimentos em suspensão.

¹Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGGeo/UFRGS), C.P. 15001, 91509-900 Porto Alegre, RS, Brasil – E-mail: marcalpereira@pop.com.br

²Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo (IO-USP), Praça do Oceanográfico, 191, 05508120 São Paulo, SP, Brasil – E-mails: esiegle@io.usp.br; bruner@usp.br

³Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco (DOcean/UFPE), Av. Prof. Moraes Rego, Cidade Universitária, 50670-901 Recife, PE, Brasil – E-mails: carlos.schettini@pq.cnpq.br; guto.schettini@gmail.com

INTRODUÇÃO

O Brasil é uma sociedade com alto nível de urbanização, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) no ano de 2005 o Brasil tinha uma taxa de urbanização de 84% e, segundo projeções até 2050 esta porcentagem deve ser superior a 90%. A população concentra-se principalmente nas zonas costeiras, pois seis em cada dez pessoas vivem dentro de um raio de 60 km da orla litorânea e dois terços das cidades do mundo, com população de 2,5 milhões de pessoas ou mais, localizam-se próximas dos estuários (CNUMAD, 1992). Os estuários são ambientes transicionais entre o continente e o oceano sendo encontrados em todas as regiões litorâneas do globo, sob diferentes climas e regimes de marés (Fairbridge, 1980).

Estuários podem ser definidos de diversas maneiras, baseando-se nas variáveis que estão sendo analisadas. Perillo (1995), lista mais de quarenta diferentes definições, desde as encontradas em dicionários e enciclopédias até as definições físicas, geológicas, químicas, biológicas e ecológicas. Em termos hidrodinâmicos, Pritchard (1955) e Cameron & Pritchard (1963), definiram um estuário como sendo um corpo de água costeiro semifechado com uma conexão livre com o mar aberto, dentro do qual a água do mar é mensuravelmente diluída com a água doce proveniente da drenagem continental.

Os ambientes estuarinos são considerados de extrema importância na produtividade primária, devido às altas concentrações de nutrientes, além de constituírem o habitat natural de aves, mamíferos e peixes, sendo ambientes de desova de muitas espécies de peixes de valor comercial e rota de aves migratórias. Devido à crescente expansão populacional das cidades litorâneas, estes ambientes também apresentam uma importância econômica significativa, pois são utilizados como vias de acesso para o interior do continente, para as atividades portuárias, instalação de indústria pesqueira, extração de areia, dentre outros. A ocupação desordenada, a utilização do estuário como corpo receptor de efluentes naturais, industriais e de substâncias patogênicas e a falta de gerenciamento colocam em risco o desenvolvimento sustentável desses ambientes (Moraes, 2007).

A região costeira do estado da Bahia, dentro da problemática ambiental, merece atenção especial, pois dentro dos 7.408 km de extensão da costa brasileira, esta perfaz aproximadamente 1.120 km, onde ocorrem recifes de corais ao longo de 900 km de extensão (Leão, 1996). O extremo sul da Bahia é uma área de grande potencial turístico, a qual vem sendo alvo de especulação imobiliária, projetos industriais, atividades agropecuárias, exploração de combustíveis fósseis, entre outros (An-

drade & Dominguez, 2002). Nesta região estão presentes ecossistemas frágeis como manguezais, brejos e restingas. Na faixa marinha adjacente, está localizado o complexo recifal de Abrolhos, o maior do Oceano Atlântico Sul Ocidental e com a maior diversidade de corais recifais do Brasil (Laborel, 1970; Castro, 1994; Leão, 1996). Os recifes conhecidos localizam-se aproximadamente entre 5 e 70 km da linha de costa e o maior recife próximo à costa com mais de 250 km² de área é denominado Parcel das Paredes (Leão, 1996).

O aporte de sedimento nas águas costeiras é um dos fatores que mais afetam a distribuição dos recifes de coral, a estrutura das comunidades recifais e o crescimento e o recrutamento dos corais (Maida & Ferreira, 1997). O aumento desta carga de sedimento pode resultar de processos naturais e/ou antrópicos. Os processos naturais incluem a descarga fluvial, a descarga de sedimento terrígeno após períodos de chuvas intensas, a erosão da linha de costa e a ressuspensão do sedimento de fundo durante tempestades (Loya, 1976; Rogers, 1990). Entre os fatores antrópicos destacam-se os efeitos da dragagem e da ocupação humana na região costeira (Dodge & Vaisnys, 1977; van Katwijk et al., 1993; Hodgson & Dixon, 2000). Leão (1996) comentou que os agentes antropogênicos mais comuns que afetam os recifes da Bahia estão relacionados ao desenvolvimento da zona costeira, turismo, pesca predatória, instalação de projetos industriais e exploração de petróleo. A autora indicou que os recifes localizados mais próximos da costa encontram-se sob estresse, devido ao aumento do aporte sedimentar causado pelo desmatamento realizado com fins industriais e de agricultura, o que foi efetivamente comprovado por Dutra et al. (2006). Coutinho et al. (1993) também sugeriram o aumento da taxa de sedimentação como responsável pela alta densidade de macroalgas encontrada nos recifes mais próximos à costa. O aumento do aporte de sedimentos foi sugerido como uma tendência a nível nacional por Maida & Ferreira (1997). Porém não há registros conclusivos da interferência do aporte sedimentar costeiro nos recifes da área de Abrolhos. Estudos preliminares indicam uma interação relativamente pequena entre a região costeira adjacente e os recifes (Lopes & Dutz, 1996; Marone & Camargo, 1996). Segundo Leão & Ginsburg (1997) os sedimentos encontrados na região são originários de grandes rios, como o Jequitinhonha, localizados cerca de 200 km ao norte. Contudo, isto é uma consideração especulativa, pois Segal et al. (2008), observaram que a maior disponibilidade de sedimentos em suspensão ocorre durante o inverno em função da passagem de frentes frias. Nestas condições, ocorre o aumento da energia de ondas, bem como as correntes derivam para o norte.

Os principais rios que desembocam na região costeira adjacente ao complexo recifal de Abrolhos são os rios Itanhém e Peruípe, além do rio Caravelas, que apesar de apresentar uma pequena bacia de drenagem corresponde ao segundo maior sistema estuarino da região Nordeste do Brasil, com 66 km² de área (Herz, 1991). Além da importância ecológica o estuário do rio Caravelas é o principal ponto de partida para o turismo de visitação ao Parque Nacional Marinho dos Abrolhos além de ser utilizado como via de acesso ao terminal de barcas da Aracruz Celulose.

A influência do aporte sedimentar do estuário do rio Caravelas na região costeira e nos ecossistemas coralíneos é desconhecida. A primeira caracterização do estuário em termos hidrodinâmicos e transporte de material particulado em suspensão é apresentada em Schettini & Miranda (2010). Os autores classificaram o estuário como bem misturado com o transporte de material particulado em suspensão modulado pela maré e processos costeiros, onde o aporte continental de água doce exerceria um papel irrelevante. Porém estes resultados foram obtidos a partir de uma única campanha durante um ciclo de maré de sizígia, apenas com estes resultados não foi possível caracterizar o comportamento sazonal do estuário em condições de maré e descarga continental distintas. O objetivo do presente estudo é justamente caracterizar a hidrodinâmica e o transporte de material particulado em suspensão no estuário sob diferentes condições de maré e vazão fluvial. Este tipo de avaliação se torna fundamental para compreender o papel desempenhado pelo estuário como exportador e/ou importador de propriedades ou de substâncias como salinidade e material particulado em suspensão. Este trabalho é parte integrante do Projeto Pró-Abrolhos (CNPq – Instituto do Milênio: Produtividade, Sustentabilidade e Utilização do Ecossistema do Banco de Abrolhos).

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no extremo sul do estado da Bahia, entre as cidades de Alcobaça (17°31'S; 39°11'W) e Nova Viçosa (17°52'S; 39°23'W), no estuário do rio Caravelas (17°43'S; 39°15'W). O estuário do rio Caravelas, com cerca de 66 km² de área, corresponde ao segundo maior estuário da região Nordeste do Brasil e abriga um importante ecossistema de manguezal (Herz, 1991). O estuário possui conexão com a desembocadura do rio Peruípe, através de pequenos canais meandantes, localizada a aproximadamente 27 km ao sul. Estes canais ocorrem em torno da Ilha da Cassumba, com cerca de 120 km² de área. A desembocadura do rio Caravelas é formada pelas regiões denominadas de Barra Velha e Canal do Tomba (Fig. 1).

A região apresenta temperatura média máxima em torno de 25,5°C, entre os meses de janeiro e fevereiro, enquanto que a média mínima é 21,5°C, nos meses de junho a agosto (SRHSH, 1997). A precipitação média anual encontra-se em torno de 1.400 mm/ano. O trimestre mais chuvoso ocorre entre dezembro e fevereiro, e o período de seca acontece entre agosto e setembro (SRHSH, 1997). Segundo dados da Agência Nacional das Águas (ANA) as médias históricas de vazão, entre 1970 e 2007 para o rio Itanhém e 1975 e 2006 para o rio Peruípe, são apresentadas na Tabela 1 e na Figura 2, onde a sazonalidade hidrológica também pode ser observada. Não há registros hidrológicos para o rio Caravelas, porém por estar localizado entre os rios Itanhém e Peruípe pode-se assumir comportamento hidrológico sazonal semelhante.

Tabela 1 – Dados históricos de vazão em termos de médias mensais (média, mínima e máxima) dos rios Itanhém e Peruípe, normalizados para as respectivas áreas de drenagem. Fonte: Hidroweb, ANA (2008).

Rio	Período	Vazão (m ³ /s)		
		Média	Mínima	Máxima
Itanhém	Agosto-Setembro	28,8	21,9	42,7
	Dezembro-Fevereiro	66,6	29,4	145,5
Peruípe	Agosto-Setembro	22,5	18,6	29,5
	Dezembro-Fevereiro	36,9	24,0	57,1

A região costeira local é caracterizada por aportes fluviais de pequeno porte quando comparada com os grandes rios Doce e São Francisco localizados ao sul e ao norte da região respectivamente. Os cinco rios que desembocam nas proximidades da área de estudo (Buranhém, Jucuruçu, Itanhém, Peruípe e Caravelas) combinados apresentam uma descarga média anual em torno de 120 m³s⁻¹ (DNAEE, 1987 *apud* Teixeira, 2006). Localizado a cerca de 60 km ao sul da área de estudo encontra-se outro importante contribuinte de água doce, o rio Mucuri, com descarga média de aproximadamente 100 m³s⁻¹. Os rios Itanhém e Caravelas possuem suas nascentes no estado da Bahia, e o rio Peruípe no estado de Minas Gerais. A foz destes rios está localizada respectivamente nos municípios de Alcobaça, Caravelas e Nova Viçosa. A área de drenagem do rio Itanhém é de 5.215 km² e a do rio Peruípe é de 4.600 km², já a do rio Caravelas é comparativamente inferior, com apenas 597 km².

A plataforma continental na região é denominada de Plataforma Continental Leste Brasileira (PCLB), possui uma largura média de 50 km chegando a atingir 200 km em frente a Caravelas no Banco de Abrolhos. É uma plataforma continental com batimetria complexa, devido à presença de uma série de recifes de corais, ilhas vulcânicas e canais profundos. O complexo recifal

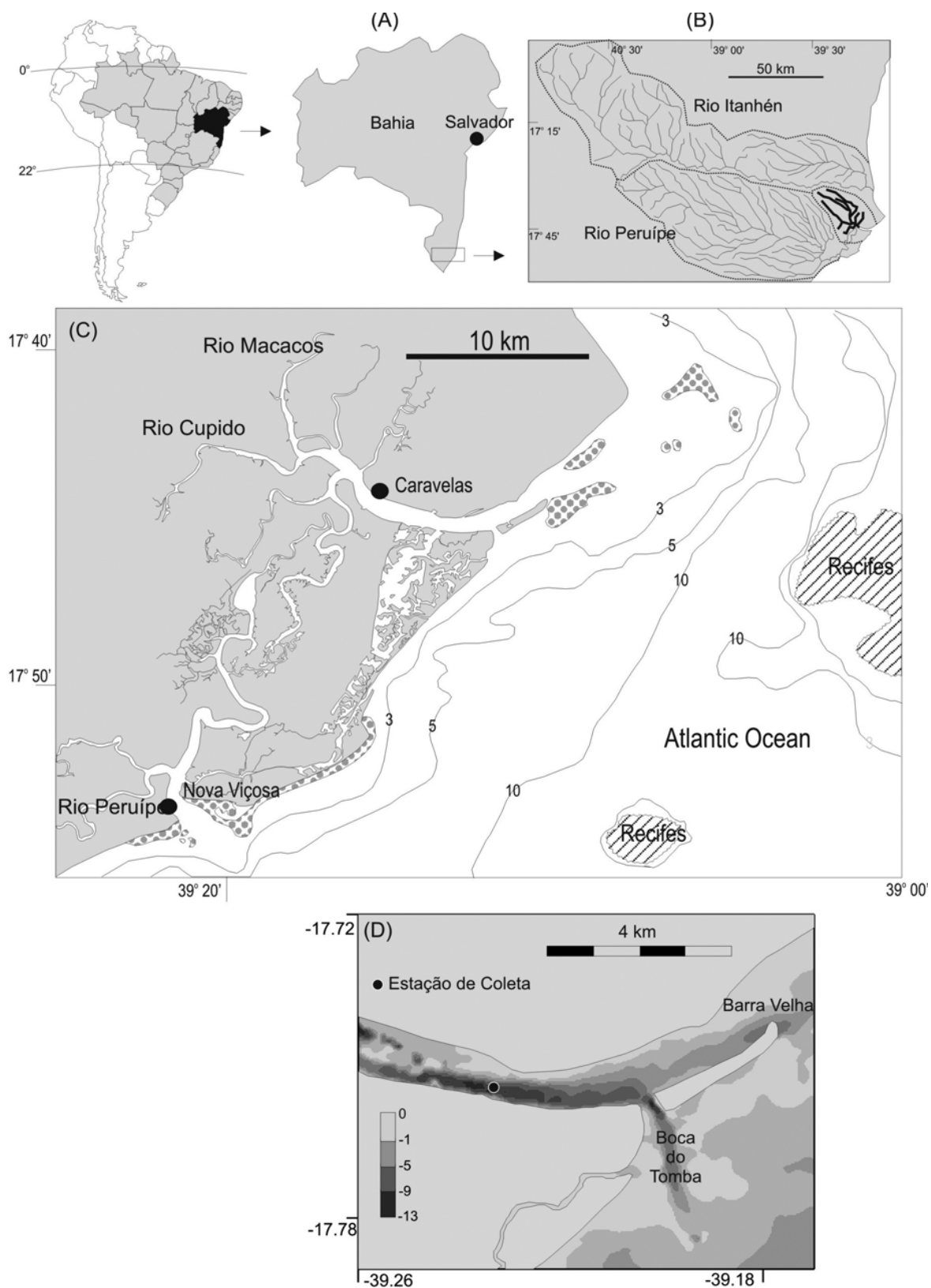


Figura 1 – Localização da área de estudo. A: no contexto do estado da Bahia; B: bacias de drenagens dos rios Peruípe, Itanhém e do estuário de Caravelas (em negro); C: o sistema estuarino de Caravelas; D: detalhe da região próxima da desembocadura do estuário com batimetria e indicação da estação de amostragem.

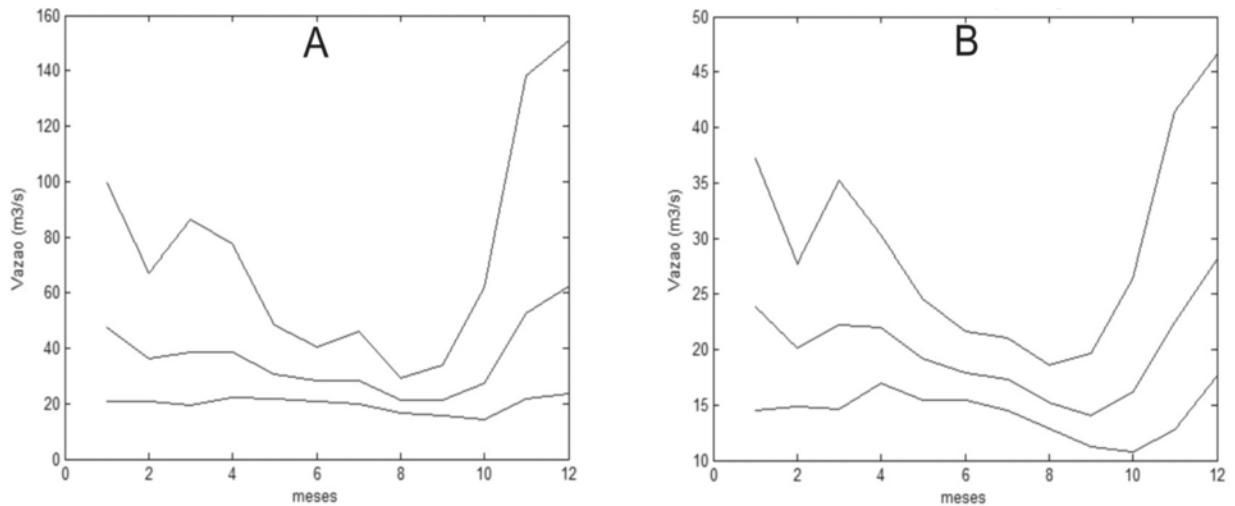


Figura 2 – Vazão mensal (média, mínima e máxima) para os rios (A) Itanhém e (B) Peruípe.

de Abrolhos possui área aproximada de 6000 km² que corresponde ao maior e mais rico sistema de recife de coral do Atlântico Sul (Leão & Ginsburg, 1997). Nessa região da plataforma continental as duas feições topográficas que se destacam são os canais Sueste e de Abrolhos, ambos atravessam o Banco com orientação NE-SW com aproximadamente 20 km de largura e 50 km de comprimento.

Segundo Summerhayes et al. (1976) e Leipe et al. (1999) a circulação sobre a plataforma continental e zona costeira é principalmente influenciada pela massa de água tropical (AT) associada à Corrente do Brasil e suas oscilações que resultam em vórtices e meandros. Os trabalhos de Lessa & Cirano (2006) e Teixeira (2006) sugerem que o vento de larga escala e fluxos sub-inerciais são os mecanismos de maior importância para a circulação, com a modulação da maré exercendo um papel secundário. Os autores classificaram o regime de maré como mesomaré e semidiurno ($Nf = (K_1 + O_1)/(M_2 + S_2) = 0,12$) de acordo com as características de altura e período respectivamente. Outro fato ressaltado nos trabalhos é que os maiores valores de amplitude de maré para toda a costa leste brasileira ocorrem nesta região (Lessa & Cirano, 2006).

Apesar da importância tanto ecológica como econômica do estuário do rio Caravelas, o papel deste no ecossistema costeiro e coralíneo é desconhecida. Há um programa de monitoramento das características hidrodinâmicas realizado pela empresa de consultoria CEPEMAR iniciado em 2001, tanto no estuário como na plataforma continental interna. Sazonalmente são realizadas amostragens no estuário e dados de ondas, marés e velocidade de correntes continuam sendo obtidos na plataforma con-

tinental interna por dois fundeios em profundidades de 8 e 10 metros (Teixeira, 2006), contudo estes dados são de circulação restrita e pouco explorados para estudos científicos. Um recente estudo (Schettini & Miranda, 2010) corresponde à primeira caracterização em termos hidrodinâmicos e transporte de material particulado em suspensão do estuário do rio Caravelas. Os autores coletaram dados de corrente, salinidade, maré e material particulado em suspensão (MPS) em duas seções transversais próximas da desembocadura do estuário durante um ciclo de maré de sizígia, além de dois perfis longitudinais de salinidade e temperatura perfazendo distâncias de 16 km e 26 km estuário acima, durante a baixa-mar e a preamar respectivamente. O estuário foi classificado como bem misturado controlado principalmente por correntes de maré, com dominância das correntes de vazante. O transporte de MPS também apresentou comportamento modulado pela maré e por processos costeiros, com o aporte continental de água doce exercendo papel irrelevante. Por outro lado, apontaram que o fluxo de água e materiais através dos estreitos que interconectam a desembocadura de Nova Viçosa (rio Peruípe) e de Caravelas pode desempenhar um papel importante no balanço de materiais.

MATERIAL E MÉTODOS

Campanhas amostrais

Foram realizadas campanhas hidrográficas durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas) em condições de maré de sizígia e quadratura, durante o período de menor precipitação na região (seco) e durante o período de maior precipitação (chu-

voso). As campanhas de quadratura e sizígia do período seco foram realizadas nos dias 22/08/07 e 28/08/07, respectivamente, as campanhas de quadratura e sizígia do período chuvoso foram nos dias 16/01/08 e 21/01/08, respectivamente. Nas quatro campanhas foi adotada a mesma estação fixa (17°45'14"S; 39°13'52"W) localizada próxima a desembocadura do estuário, no talvegue do canal com profundidade de 11 m (Fig. 1). Dados de nível de água, velocidade e direção de correntes, salinidade, temperatura e turbidez, foram registrados em intervalos de 30 minutos e em espaçamento de 0,5 m na coluna de água.

O nível da água foi registrado com um marégrafo de pressão da marca RBR modelo XR-420-TG, instalado na margem da seção de coleta, próximo da estação. Dados de velocidade e direção de correntes foram obtidos por um Perfilador Acústico de Correntes por efeito Doppler (PACD) da marca Sontek™, modelo ADP de 1500 kHz, configurado para realizar células de 0,5 metro com taxa de amostragem de 5 s. Para cada momento de coleta o PACD registrou dados durante 5 minutos, a partir dos quais foi calculada a média temporal. A salinidade e temperatura foram obtidas por uma sonda CTD (acrônimo do inglês *Conductivity, Temperature, Depth*) modelo SD 204 da marca SAIV/AS™ nas campanhas do período seco, e por uma sonda CTD da marca ALEC™ nas campanhas do período chuvoso. Esta última dispunha de um turbidímetro de retroespalhamento ótico (REO) acoplado. Durante o período seco a turbidez foi registrada com uma sonda de REO da marca SeaPoint™ com leitura direta da voltagem. Os dados de salinidade, temperatura e turbidez foram registrado em perfis na coluna de água que posteriormente foram reduzidos para intervalos de 0,5 m.

Material Particulado em Suspensão

As concentrações de MPS, em mg l^{-1} , foram determinadas indiretamente a partir dos dados de turbidez registrados pelo turbidímetro de REO e a partir do retroespalhamento acústico (REA) registrado pelo PACD (Schettini & Zaleski, 2006; Schettini et al., 2010). Este último procedimento foi realizado porque o sensor de REO utilizado na campanha seca não funcionou corretamente. Desta forma, foi utilizado o procedimento indicado em Zaleski & Schettini (2006), onde a calibração do REA é realizada indiretamente pela calibração prévia do REO.

A calibração para converter dados de REO, em NTU (*nephelometric turbidity unit*), em MPS, consiste em obter pares de dados de REO e MPS para diversas concentrações de MPS. Isto é feito em laboratório, onde a partir de um volume de água inicialmente limpo é acrescentado gradualmente MPS de uma solução concentrada. Entre cada acréscimo são realizadas leituras de REO e retiradas amostras para determinação de MPS por gravimetria.

A solução concentrada de MPS foi obtida a partir do MPS do estuário de Caravelas. Grandes volumes de água foram armazenados (~200 l) e mantidos em repouso por cerca de 3 horas para decantação do MPS. O volume em excesso foi sifonado, e o material de fundo acumulado em um recipiente menor, onde os processos de decantação e sifonagem foram repetidos. As amostras de água foram filtradas em filtros de peso inicial conhecidos, armazenados em estufa para a secagem por 24 horas e pesados em balança analítica. A concentração de MPS foi obtida pela relação da massa total retida em um filtro (peso seco) pelo volume filtrado através do mesmo. A função de conversão de MPS a partir do REO obtida ($r^2 = 0,99$; Fig. 3A) é descrita por

$$MPS(REO) = 1,0277 REO - 1,0499. \quad (1)$$

O PACD registra a intensidade acústica em unidade de "contagens" (unidade logarítmica interna do equipamento). Para que esta variável possa ser relacionada com o MPS, é necessário converter antes para potência sonora, em decibéis (dB), e normalizar para torná-la independentes da profundidade em que foram coletados, obtendo-se assim o REA (Zaleski & Schettini, 2006). A normalização do sinal acústico é feita através da equação do sonar (Deines, 1999; Lohrmann, 2001; Gartner, 2004)

$$ABS = K_C(E - E_r) + 20 \log_{10}(R) + 2\alpha_w(R) + TS \quad (2)$$

onde E é a intensidade do eco registrada em 'counts', a qual deve ser subtraída do nível de ruído natural do equipamento E_r , e convertido em intensidade acústica em dB por um fator de escala K_C . O segundo e terceiro termos pesam sobre as perdas de transmissão de duas vias (ida e volta), o segundo devido ao espalhamento e o terceiro devido à absorção. R é a distância do instrumento, dada por $Z / \cos \theta$ onde Z é a distância do transdutor, e θ é o ângulo do transdutor em relação à vertical. α_w é o coeficiente de absorção da água. TS refere-se às características do alvo, sendo função do tamanho e concentração das partículas. Após a sincronização vertical entre os dados de MPS(REO) e de REA, a função de conversão a partir do REA obtida ($R^2 = 0,85$, Fig. 3B) é descrita por

$$MPS(REA) = 0,005263^{0,1233 REA} \quad (3)$$

Classificação e decomposição do transporte advectivo de sal e MPS

A classificação do estuário foi feita para cada experimento com base no diagrama de estratificação-circulação proposto por Hansen & Rattray Jr. (1966) descrita por Miranda et al. (2002). Esta classificação leva em consideração dois parâmetros adimensionais: o parâmetro de estratificação definido pela razão $\delta S / \bar{S}$,

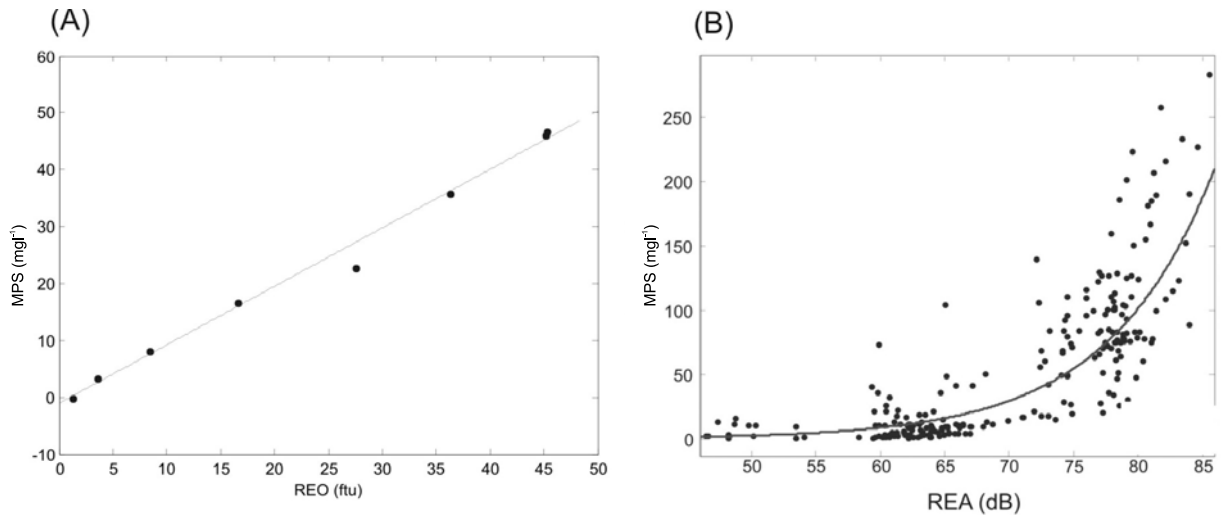


Figura 3 – A: Relação entre REO (ftu) e MPS (mg l^{-1}), e B: entre REA (dB) e MPS (mg l^{-1}).

onde $\delta S = S_f - S_s$ é a diferença entre os valores de salinidade de fundo (S_f) e de superfície (S_s) e \bar{S} é o valor médio da salinidade na coluna de água. O parâmetro de circulação é determinado pela razão U_s/\bar{u} , onde U_s é o valor médio do componente longitudinal de velocidade na superfície e \bar{u} é a média da velocidade na coluna de água.

A decomposição advectiva de sal e MPS foi feita seguindo Miranda et al. (2002), baseada em trabalhos de Bowden (1963), Dyer (1974), Fischer (1976), Hunkins (1981) e Kjerfve (1986). Considerando um canal lateralmente homogêneo. A velocidade longitudinal instantânea em um dado instante pode ser decomposta como uma componente devido à contribuição fluvial, u_a , uma componente barotrópica, u_t , uma componente baroclínica, u_s , e uma componente residual

$$u(x, z, t) = u_a(x) + u_t(x, t) + u_s(x, z) + u'(x, z, t). \quad (4)$$

A componente de advecção fluvial é obtida pela média vertical e temporal dos dados de corrente por um ou mais ciclos completos de maré, $\langle \bar{u} \rangle$, onde a média vertical é representada pelos símbolos $\langle \rangle$ e a média vertical é representada pela sobre barra. A componente barotrópica representa a variação da velocidade média da coluna de água ao longo de um ou mais ciclos de maré, descontada a componente da advecção fluvial, ou $\bar{u}(t) - \langle \bar{u} \rangle$. A componente baroclínica representa a variação da velocidade média de cada nível de observação descontado a componente de advecção fluvial, $\langle u(z) \rangle - \langle \bar{u} \rangle$. O resíduo é obtido isolando o último termo do lado direito da Equação 4. A mesma decomposição pode ser aplicada para salinidade e para a concentração de MPS (e.g. Schettini et al., 2006). A variação da coluna de água, h , pode ser decomposta como a média tem-

poral mais a variação da maré, $h(x, t) = h_a + h_t(x, t)$.

O transporte total de sal (T_s) durante um ou mais ciclos de maré é calculado por

$$T_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h \rho u S dz dt \quad (5)$$

onde ρ é a densidade da água e S é a salinidade. Substituindo os parâmetros da integral u e S pela Equação 4 e sua análoga para a salinidade ou MPS, resulta em 32 parcelas, das quais somente 7 possuem significância no processo do transporte total médio de sal durante um ou mais ciclos de maré. Podendo assim, ser descrito por

$$T_s = \bar{\rho} (u_a h_a S_a + \langle h_t u_t \rangle S_a + h_a \langle u_t S_t \rangle + h_a \bar{u}_s \bar{S}_s + h_a \langle \bar{u}' s' \rangle + \langle u_t S_t h_t \rangle + u_a \langle S_t h_t \rangle) \quad (6)$$

que pode ser representada como $T_s = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7$. Onde o termo 1 representa o transporte gerado pela descarga fluvial e com seu valor sempre estuário abaixo, de natureza advectiva. O termo 2 representa o transporte de massa gerado pela propagação da onda de maré no estuário (deriva de Stokes), geralmente transportando sal estuário abaixo. O termo 3 é a correlação de maré dos valores médios de velocidade e salinidade na coluna de água, normalmente gerencia o transporte de sal estuário acima. O termo 4 é o transporte da circulação estacionária (diferença entre a corrente de gravidade pelo componente gerado pela descarga fluvial ou residual). O resultado do cisalhamento oscilatório e o movimento gerado pelo vento e flutuações turbulentas de velocidade, com escala de tempo inferior ao período de maré, está representado no termo 5. O termo 6 é a dispersão da maré. E por último, o termo 7 que corresponde a media temporal da correlação entre salinidade e a

maré ponderada pela velocidade residual (Miranda et al., 2002). O transporte de sedimentos em suspensão pode ser trabalhado da mesma forma, tendo-se o cuidado de eliminar a densidade e utilizar a concentração nas mesmas unidades métricas da velocidade. Neste trabalho foi utilizada a convenção vetorial longitudinal ao estuário, sendo que o sentido estuário adentro é positivo, e estuário afora, negativo.

Medição da vazão dos rios

A despeito de que a vazão dos rios é monitorada diariamente e os dados são disponibilizados pela ANA através do Hidroweb (<http://www.ana.gov.br>), os dados costumam levar algum tempo para se tornarem disponíveis. Desta forma, optou-se por realizar a medição da vazão dos rios Itanhém e Peruípe durante as campanhas com o objetivo de avaliar a contribuição fluvial.

Durante a campanha do período seco as medições de velocidade do escoamento dos rios foram feitas com um correntômetro da marca Valleport com leitura direta da velocidade. Na campanha do período chuvoso as medições foram feitas com um fluxômetro da marca GeneralOceanics. Em todas as campanhas as medições foram realizadas em perfis verticais separados em intervalos de 2 metros horizontalmente, com medições próximas da superfície ($-0,2$ m), e em intervalos de 0,5 m até o fundo, quando havia profundidade para tal. A área da seção transversal foi obtida em intervalos de 2 m na horizontal, utilizando um prumo em um cabo graduado. As vazões foram normalizadas linearmente para a área integral das respectivas bacias de drenagem.

RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os resultados das medições de vazão nos rios Itanhém e Peruípe durante as campanhas. A vazão do rio Itanhém no período seco foi de $45 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto que a vazão do rio Peruípe foi da ordem de $33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. No período chuvoso as vazões foram da ordem de 33 e $26 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para os rios Itanhém e Peruípe, respectivamente. Em termos comparativos com os dados estatísticos (Tab. 1), as vazões de ambos os rios foram maiores dos que os valores médios mensais máximos no período seco, e próximo aos valores médios mensais mínimos no período chuvoso. As campanhas não foram bem sucedidas em acompanhar a sazonalidade hidrológica regional, e as condições de descarga fluvial é basicamente similar entre as campanhas, com inclusive vazões no período seco um pouco maiores do que as registradas no período chuvoso. A vazão estimada para o rio Caravelas ficou da ordem de $4-5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em ambas as campanhas.

A Tabela 3 apresenta um sumário dos resultados encontrados para cada experimento em termos de valores médios, mínimos e

máximos. Na campanha do período seco de quadratura a variação da maré foi de 0,58 m. A baixa-mar ocorreu no início da campanha as 7 h e a preamar ocorreu por volta das 11 h. A segunda baixa-mar ocorreu por volta das 17 h. A Figura 4 apresentada as distribuições de velocidade, salinidade, MPS e fluxo de MPS. A magnitude da velocidade máxima de correntes tanto de enchente quanto de vazante foi similar, em torno de $0,3 \text{ ms}^{-1}$. No início da campanha (7 h) ocorreram as correntes de enchente mais intensas na metade inferior da coluna de água que foram progressivamente perdendo intensidade. Em torno das 10:30 h ocorreu a estufa de enchente com valores nulos de corrente ao longo de toda coluna de água. Três horas após a estufa as correntes de vazante atingiram as máximas velocidades na porção intermediária da coluna de água. A partir das 15 h as correntes mais próximas do fundo foram perdendo intensidade e se aproximando de zero. Entre as 16 e 19:30 h é possível observar o comportamento bidirecional da velocidade, com correntes de vazante ocorrendo na porção superior da coluna de água e correntes de enchente na metade inferior. Apenas neste intervalo de tempo (3,5h) foi possível observar uma pequena estratificação de velocidade na coluna de água que durante o restante do experimento teve comportamento vertical homogêneo. Os valores de salinidade apresentaram pequena variação ao longo de todo o experimento, com valores variando entre 34 e 36,5. Na metade superior da coluna de água os valores de salinidade mantiveram-se ligeiramente inferiores. A concentração de material particulado em suspensão (MPS) foi baixa durante todo o experimento, com valores abaixo de 10 mg l^{-1} . O pico de concentração ocorreu entre as 9:30 e 11:30 h, nas profundidades maiores que 8 metros, atingindo valores de 30 mg l^{-1} que corresponderam ao período de inversão das correntes de enchente para vazante. O fluxo instantâneo de material particulado em suspensão variou entre $-1,97$ e $2,58 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$. O fluxo residual de MPS foi $0,107 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$, e o transporte por ciclo de maré foi da ordem de $4,7 \times 10^3 \text{ kg m}^{-1}$ estuário acima. A altura da maré durante a campanha de sizígia no período seco foi de 3,2 m. A primeira preamar ocorreu no início da campanha (4,5h) e a baixa-mar as 10:30 h com a segunda preamar ocorrendo as 16 h. As velocidades das correntes apresentaram padrão verticalmente homogêneo controlado pela variação da maré. As correntes de vazante foram mais intensas, com máxima de $-1,43 \text{ ms}^{-1}$, e a velocidade máxima de enchente foi de $0,96 \text{ ms}^{-1}$. As estufas de baixa-mar e preamar ocorreram em fase com o nível da maré. A variação da salinidade ao longo das 13 horas do experimento variou entre 33 e 36, sendo verticalmente homogênea, com os menores valores ocorrendo na baixa-mar e os maiores valores coincidindo com a preamar. As maiores concentrações de MPS ocorreram em

Tabela 2 – Resultados das medições de vazão realizadas durante as campanhas nos rios Itanhém e Peruípe, com valores normalizados para as respectivas áreas de drenagem, e vazão estimada para o rio Caravelas em termos proporcionais de área.

Rio	Data	Estação	Área de drenagem (km ²)	Vazão (m ³ s ⁻¹)	Vazão normalizada (m ³ s ⁻¹)	Vazão Caravelas (m ³ s ⁻¹)
Itanhém (5215 km ²)	21/08/2007	Cascata	3736	37,1	50,1	5,7
	27/08/2007	Cascata	3736	29,0	39,2	4,5
	17/01/2008	Cascata	3736	24,8	32,4	3,7
	24/01/2008	Cascata	3736	25,7	34,7	4,0
Peruípe (4600 km ²)	21/08/2007	BR-101	717	6,7	37,2	4,8
	27/08/2007	BR-418	2624	18,1	27,9	3,6
	17/01/2008	BR-418	2624	17,0	26,1	3,4

Tabela 3 – Resumo dos resultados encontrados para cada campanha. Am: altura da maré; MCV: máxima corrente de vazante (ms⁻¹); MCE: máxima corrente de enchente (ms⁻¹); Vm: velocidade média de corrente (ms⁻¹); Sm: salinidade média; Smax: salinidade máxima; Smin: salinidade mínima; Tm: temperatura média (°C); MPSm: material particulado em suspensão médio (mg l⁻¹); MPSmax: MPS máximo (mg l⁻¹); MPSmin: MPS mínimo (mg l⁻¹); FR: fluxo residual (kg m⁻¹s⁻¹); TCM: transporte por ciclo de maré (kg m⁻¹).

Estação	Período seco		Período chuvoso	
	Quadratura	Sizígia	Quadratura	Sizígia
Am	0,58	3,2	1,28	2,5
MCV	-0,3	-1,43	-0,65	-1,38
MCE	0,3	0,96	0,4	0,88
Vm	0,016	-0,215	0,027	0,007
Sm	33,8	33,2	32,8	33,5
Smax	36,6	36	35,7	36,2
Smin	36	35	35	35,3
Tm	24,9	25,3	28,2	27,6
MPSm	8,8	87	15,3	100
MPSmax	35	740	63	990
MPSmin	0,41	7,1	1,5	14,5
FR	0,107	-30,79	1,14	9,90
TCM (1/1000)	4,7	1,374	50,9	442

dois momentos, entre as 14 e 14:30 h, com concentrações superiores a 100 mg l⁻¹ associadas às correntes de enchente mais intensas. O outro pico na concentração de MPS foi as 17 h, coincidindo com a estufa de baixamar, quando as correntes ao longo da coluna de água eram nulas. Comparativamente com o experimento de quadratura, as concentrações de MPS na sizígia foram consideravelmente superiores. A concentração média na sizígia foi cerca de 10× maior, de 87 mg l⁻¹. O fluxo instantâneo de MPS variou entre -153,6 e 86,1 kg m⁻¹s⁻¹, e o fluxo residual foi de -30,79 kg m⁻¹s⁻¹, com transporte por ciclo de maré de -1.374 × 10³ kg m⁻¹.

A altura da maré na campanha de quadratura no período chu-

voso foi de 1,28 m. A preamar ocorreu as 10:30 h com a segunda baixa-mar ocorrendo em torno das 16:30 h (Fig. 6). As velocidades máximas de enchente e vazante foram 0,4 e -0,65 ms⁻¹, respectivamente, sendo verticalmente homogêneas. A salinidade variou entre 32,7 e 35,7 com os menores valores ocorrendo próximos da superfície durante as baixa mares. A concentração de MPS ficou abaixo de 20 mg l⁻¹ na maior parte da campanha, com um pico de aproximadamente 60 mg l⁻¹ entre as 8 h e 9 h, associado às correntes de enchente mais intensas. Os fluxos instantâneos de MPS variaram entre -7,2 e 14 kg m⁻¹s⁻¹, com fluxo residual de 1,14 kg m⁻¹s⁻¹, e transporte total por ciclo de maré de 50,9 × 10³ kg m⁻¹.

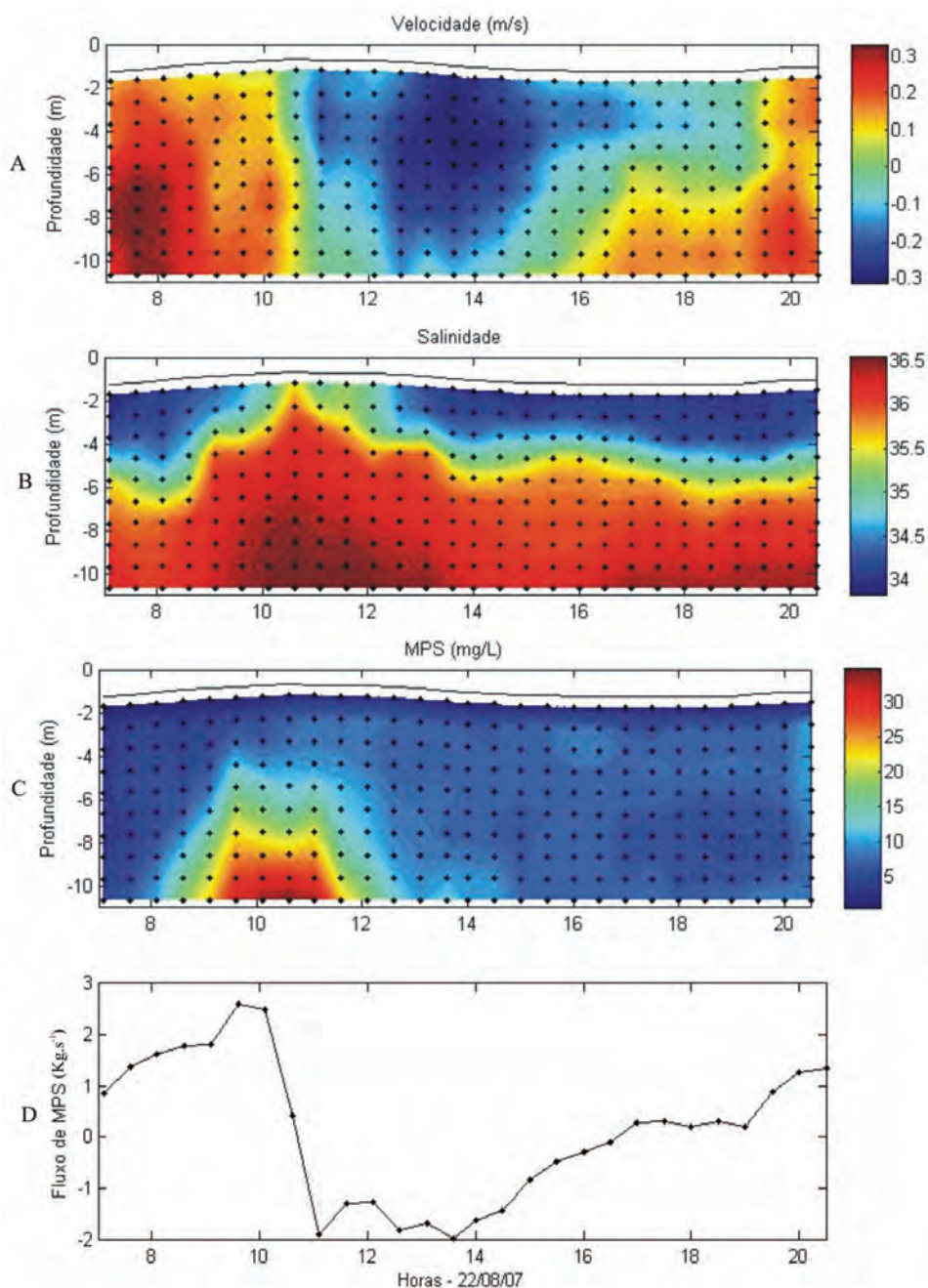


Figura 4 – Variação vertical e temporal de velocidade de corrente (A), salinidade (B) concentração de MPS (C) e fluxo de MPS (D) para a campanha de quadratura do período seco (22 de agosto de 2007).

Na campanha de sizígia do período chuvoso a altura da maré foi de 2,5 m, com a primeira preamar ocorrendo as 6 h e a segunda no final da campanha as 17 h, e a baixa-mar ocorreu às 11:30 h (Fig. 7). As correntes apresentaram um comportamento verticalmente homogêneo, com valores máximos de $0,88 \text{ ms}^{-1}$ e $-1,38 \text{ ms}^{-1}$ para enchente e vazante, respectivamente. A salini-

dade variou entre 33,5 e 36, sendo que os menores valores de salinidade ocorreram simultaneamente com os níveis de maré mais baixos. A concentração de MPS foi superior a 50 mg l^{-1} durante toda a campanha, ocorrendo um pico de MPS na metade inferior da coluna de água, entre as 15:30 h e 17 h, associado às correntes de enchente mais intensas. A concentração média de MPS

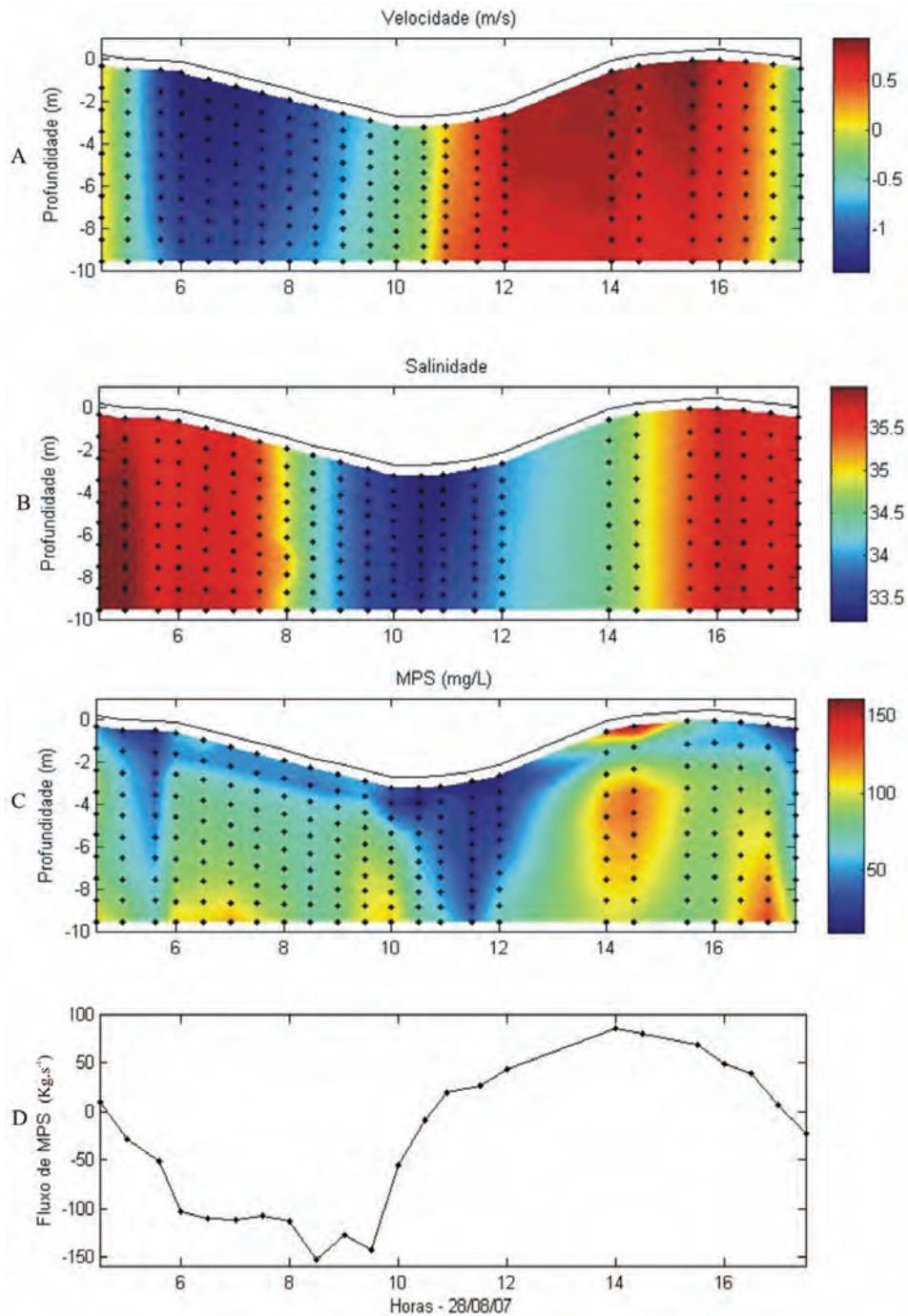


Figura 5 – Variação vertical e temporal de velocidade de corrente (A), salinidade (B) concentração de MPS (C) e fluxo de MPS (D) para a campanha de sizígia do período seco (28 de agosto de 2007).

ao longo do experimento foi de 108 mg l^{-1} . O fluxo instantâneo de MPS variou entre -114 e $109 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e o transporte residual foi de $9,90 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, com transporte total por ciclo de maré de $442 \times 10^3 \text{ kg m}^{-1}$.

Classificação dos sistemas

Os valores dos parâmetros de estratificação e circulação calculados para os quatro experimentos estão apresentados na Tabela 4. Os valores sobre o diagrama estratificação-circulação estão

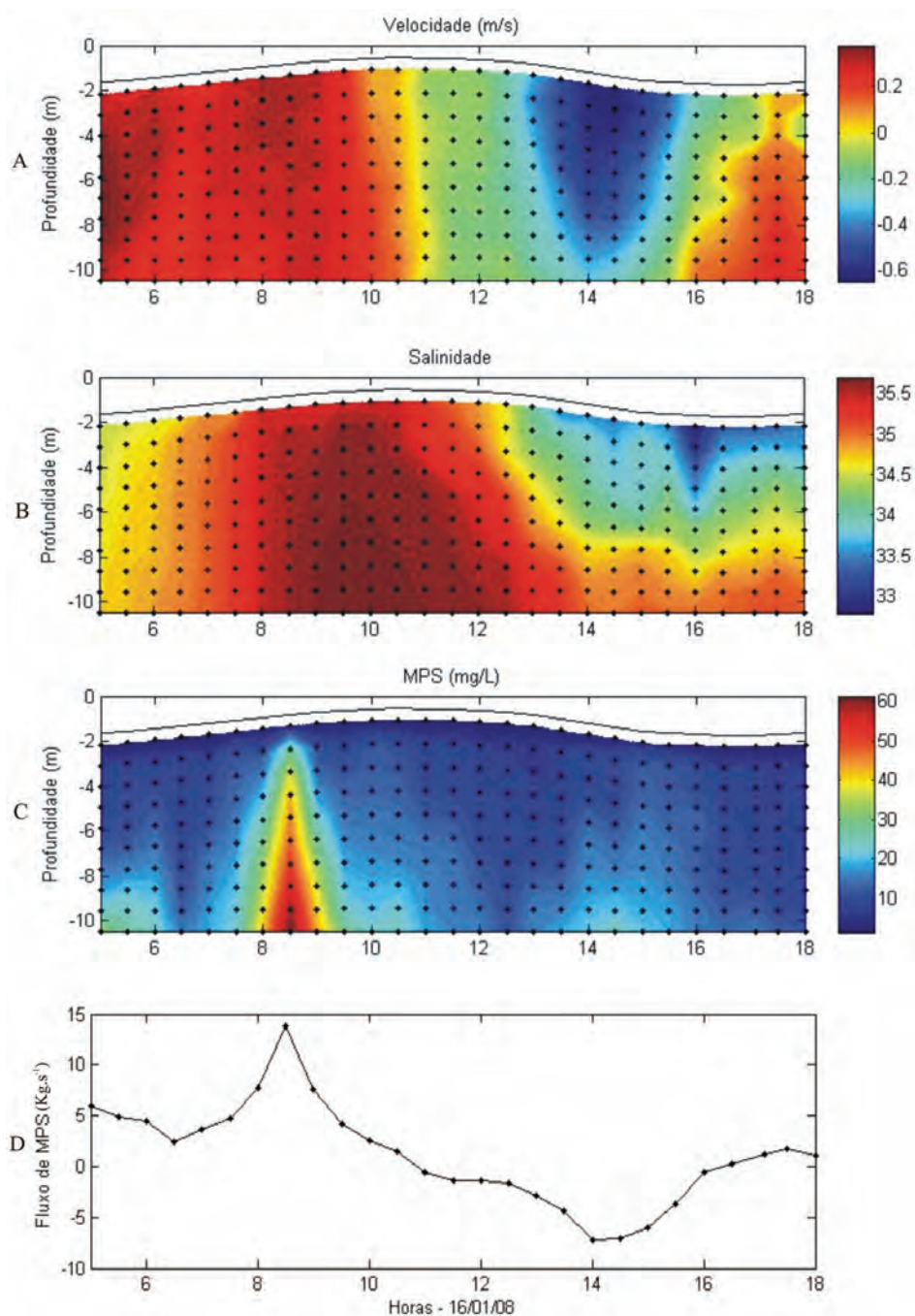


Figura 6 – Variação vertical e temporal de velocidade de corrente (A), salinidade (B) concentração de MPS (C) e fluxo de MPS (D) para a campanha de quadratura do período chuvoso (16 de janeiro de 2008).

representados na Figura 8. Durante as quatro condições amostrais o estuário foi classificado como bem misturado e fracamente estratificado (Tipo 1a). Segundo Hansen & Rattray Jr. (1966) nos estuários do Tipo 1 o fluxo residual é estuário abaixo em todas as profundidades, e o transporte de sal estuário acima é devido

somente ao processo de difusão turbulenta. É possível observar que apesar do estuário ser classificado da mesma forma nas quatro campanhas, nas duas campanhas de quadratura o parâmetro estratificação foi superior, mostrando um padrão mais estratificado em relação aos dois experimentos de sizígia.

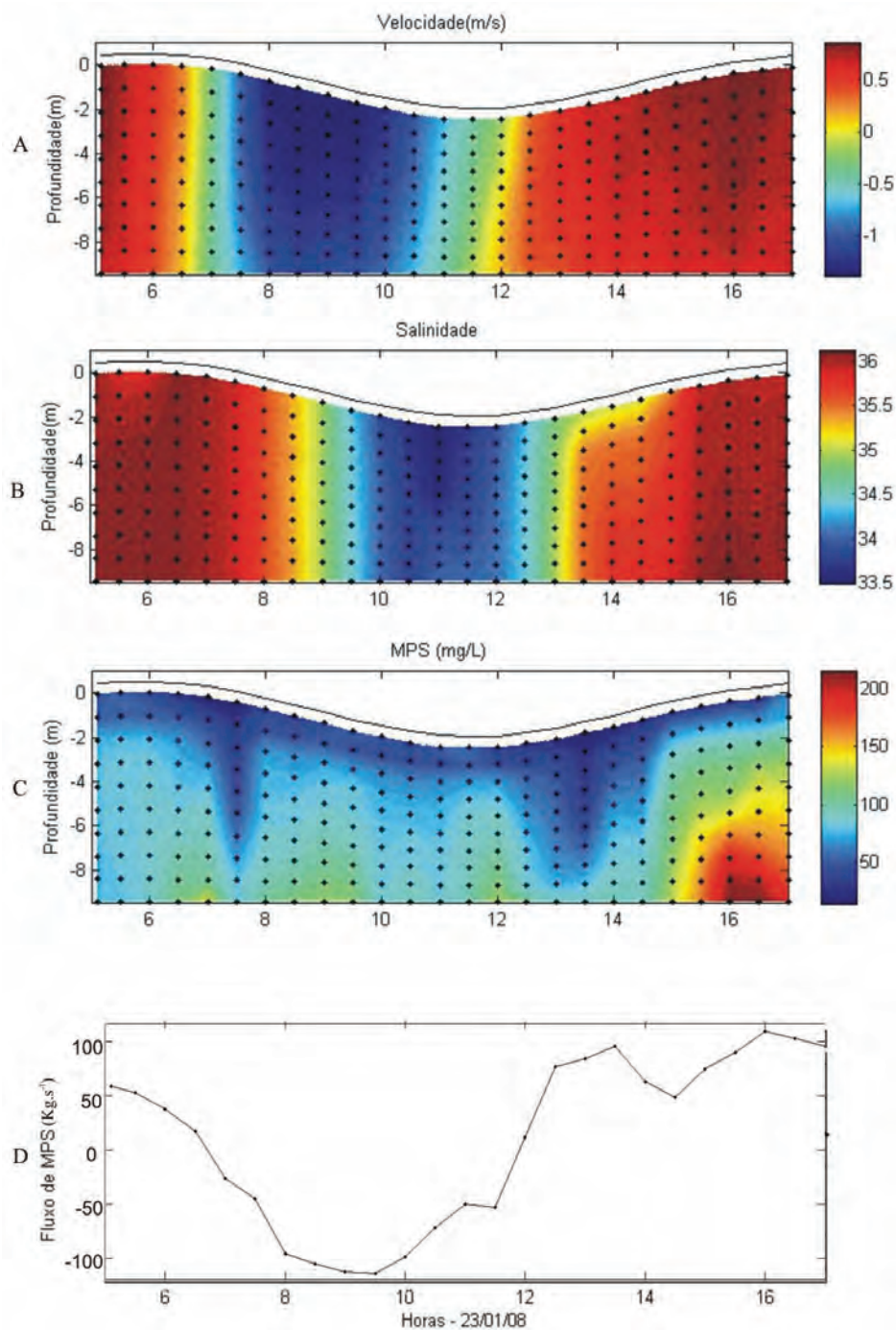


Figura 7 – Variação vertical e temporal de velocidade de corrente (A), salinidade (B) concentração de MPS (C) e fluxo de MPS (D) para a campanha de sizígia do período chuvoso (23 de janeiro de 2008).

Transporte advectivo de sal e MPS

Os valores do transporte advectivo de sal e MPS nos quatro experimentos são apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente. Na primeira campanha de quadratura do período seco os termos

dominantes no transporte de sal foram o transporte advectivo gerado pela descarga fluvial com intensidade de $1,95 \text{ gm}^{-1}\text{s}^{-1}$ e o transporte dispersivo gerado pela circulação gravitacional estuário acima, com valor de $0,47 \text{ gm}^{-1}\text{s}^{-1}$. O transporte de MPS foi dominado por mecanismos dispersivos que transpor-

tam o MPS no sentido estuário acima. A circulação gravitacional alcançou valor de $1,81 \text{ mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$, seguido do bombeamento da maré com $0,56 \text{ mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros de estratificação, E, e circulação, C, para classificação hidrodinâmica do estuário segundo Hansen & Rattray Jr. (1966).

Campanha	E	C
1 (seco_quad.)	0,059	0,809
2 (seco_siz.)	0,004	1,146
3 (chuvoso_quad.)	0,025	1,084
4 (chuvoso_siz.)	0,007	1,140

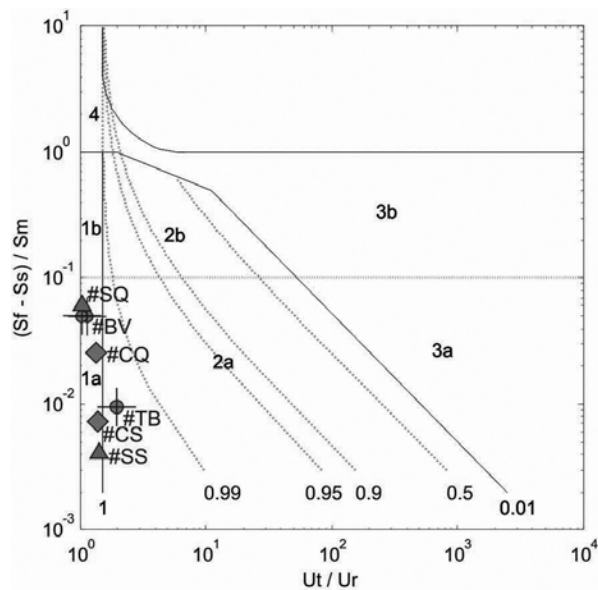


Figura 8 – Diagrama estratificação-circulação (Hansen & Rattray Jr., 1966), indicando as condições apresentadas pelo estuário de Caravelas nos períodos seco (Δ) e chuvoso (\diamond), comparados com resultados de Schettini & Miranda (2010, \circ). SQ = seco-quadratura; SS = seco-sizigia; CQ = chuvoso-quadratura; CS = chuvoso-sizigia; BV = Barra Velha*; TB = Tomba*. *Nome das desembocaduras do estuário de Caravelas.

Na campanha de sizigia no período seco os valores de transporte foram muito superiores em relação aos da campanha de quadratura. O transporte total de sal foi da ordem de $-86,5 \text{ gm}^{-1}\text{s}^{-1}$ e de MPS foi de $-322 \text{ mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. O mecanismo de transporte mais importante tanto de sal como de MPS foi o termo 1, associado à descarga continental, com valores de -81 e $-245 \text{ mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$, respectivamente. No experimento de quadratura durante o período chuvoso o transporte total de sal e de MPS foi de $11,6$ e $13,8 \text{ mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$, respectivamente. O transporte de sal foi principalmente associado à descarga continental com $10,7 \text{ gm}^{-1}\text{s}^{-1}$, e as demais parcelas foram comparativamente muito pequenas. O principal responsável pelo transporte de MPS foi o movimento dispersivo estuário acima associado com

a correlação com a maré, com valor de $8,0 \text{ mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$, seguido pelo transporte advectivo da descarga fluvial ($4,7 \text{ mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e pela circulação gravitacional ($2,4 \text{ mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$).

Tabela 5 – Termos do transporte advectivo de sal nas quatro campanhas no estuário do rio Caravelas durante um ciclo completo de maré. 1: descarga fluvial; 2: transporte de Stokes; 3: correlação de maré; 4: circulação gravitacional; 5: bombeamento de maré; 6: cisalhamento de maré; 7: flutuação devida ao vento; 8: transporte total.

Campanha	Período seco		Período chuvoso	
	Quadratura	Sizigia	Quadratura	Sizigia
($\text{gm}^{-1}\text{s}^{-1}$)				
1	1,95	-80,99	10,74	2,77
2	0,22	-4,00	-0,02	-7,97
3	-0,13	-1,59	0,66	3,37
4	0,46	0,01	0,12	0,01
5	0,01	-0,00	0,13	-0,00
6	-0,00	-0,12	0,00	0,04
7	-0,00	0,20	0,00	-0,00
8	2,52	-86,50	11,63	-1,76

Tabela 6 – Termos do transporte advectivo de MPS nas quatro campanhas no estuário do rio Caravelas durante um ciclo completo de maré. 1: descarga fluvial; 2: transporte de Stokes; 3: correlação de maré; 4: circulação gravitacional; 5: bombeamento de maré; 6: cisalhamento de maré; 7: flutuação devida ao vento; 8: transporte total.

Campanha	Período seco		Período chuvoso	
	Quadratura	Sizigia	Quadratura	Sizigia
($\text{mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)				
1	0,47	-244,89	4,67	9,79
2	0,05	-12,10	-0,01	-28,12
3	-0,30	-95,79	8,04	154,42
4	1,80	27,30	2,38	18,62
5	-0,55	22,99	-0,96	-13,43
6	-0,02	-14,37	-0,26	11,51
7	-0,00	-5,27	-0,01	0,25
8	1,44	-322,14	13,80	153,05

Na campanha de sizigia do período chuvoso o transporte total de sal foi de $-1,8 \text{ gm}^{-1}\text{s}^{-1}$ e de MPS foi de $153 \text{ mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. O termo dominante no transporte de sal foi o transporte de Stokes, $-7,9 \text{ gm}^{-1}\text{s}^{-1}$, que corresponde ao transporte de massa gerado pela propagação da onda de maré no estuário, seguido pelos termos associados com a correlação de maré, $3,4 \text{ gm}^{-1}\text{s}^{-1}$, e o transporte gerado pela descarga fluvial, $2,8 \text{ gm}^{-1}\text{s}^{-1}$. O transporte de MPS foi dominado pelo transporte associado à correlação de maré dos valores médios de velocidade e salinidade na coluna de água, com intensidade de $154 \text{ mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. Neste experimento foi

evidenciado que o estuário comportou-se como um importador de MPS, pois cerca de 90% do transporte de MPS resultou de transporte dispersivo estuário acima.

DISCUSSÃO

A estratégia de amostragem planejada previu a realização de quatro levantamentos acompanhando condições de sizígia e quadratura em nos períodos seco e chuvoso. Quanto às condições variáveis da maré, esta foi devidamente acompanhada dada à sua natureza determinística. Por outro, não foi possível verificar a modulação sazonal esperada, dado que os índices pluviométricos até a realização da segunda campanha não caracterizaram plenamente a estação chuvosa. Os valores de descarga dos rios vicinais foram maiores na campanha do período seco do que no período chuvoso, e a descarga estimada para o estuário do rio Caravelas foi praticamente o mesmo.

O regime de maré local é caracterizado como de mesomaré, puramente semidiurno, com número de forma de 0,12 (Lessa & Cirano, 2006), o que justifica amostragens de 13 horas para caracterizar um ciclo completo de maré. O prisma de maré corresponde ao volume de água que entra no estuário durante a maré enchente e está intimamente relacionado com a altura da maré, pois é calculado pelo produto entre a altura de maré e a área do sistema. A importância do prisma da maré no ambiente estuarino está relacionada à capacidade de renovação da massa de água a cada ciclo completo de maré (Miranda et al., 2002). O prisma de maré foi calculado para os quatro experimentos, considerando a altura máxima da maré (Tab. 3) e a área superficial do estuário de 66 km² (Herz, 1991). Para a campanha do período seco o prisma de maré foi de 38.280 m³ e 211.200 m³ para quadratura e sizígia respectivamente. Na campanha do período chuvoso o prisma de maré variou entre 84.480 m³ e 165.000 m³ para quadratura e sizígia respectivamente. Tendo em vista que o regime hidrológico devido à precipitação pouco variou, tem-se então um quadro que consiste de quatro experimentos de 13 horas em quatro condições distintas de altura de maré.

O estuário foi caracterizado como bem misturado e fracamente estratificado (Tipo 1a; Hansen & Rattray Jr., 1966) em todas as condições amostrais. Esta classificação é típica para estuários forçado principalmente pela maré, tendo a contribuição fluvial papel secundário ou irrelevante (Dyer, 1997; Miranda et al., 2002). Segundo Dyer (1977) em estuários bem misturados a amplitude de maré é grande o suficiente para proporcionar a homogeneização vertical, e a onda de maré se propaga por grandes distâncias estuário acima. Apesar da aparente similari-

dade das condições hidrodinâmicas, levando em consideração a classificação de Hansen & Rattray Jr. (1966), foi possível observar comportamentos distintos do estuário entre as condições amostrais principalmente nos parâmetros de velocidade e MPS. A salinidade, por outro lado, apresentou comportamento muito semelhante nos experimentos, o que está associado ao pequeno aporte de água doce no sistema, reflexo direto da pequena área de drenagem do rio Caravelas.

As correntes de enchente e vazante na campanha de quadratura do período seco foram simétricas, o que foi refletido na ausência de fluxo residual de MPS. Nas demais campanhas, as correntes foram assimétricas, com as correntes de vazante sendo maiores do que as de enchente. A assimetria das correntes de maré com dominância das correntes de vazante foi relatada para este estuário por Schettini & Miranda (2010) em condições de maré de sizígia. Geralmente os estuários dominados pela maré vazante atuam principalmente como exportadores de sedimento para o ambiente costeiro (Dyer, 1977, 1995; French, 1997). Contudo, no caso do estuário de Caravelas, o estuário atuou como importador de MPS em três das quatro campanhas realizadas. Apenas na campanha de sizígia do período seco o transporte residual de MPS teve sentido estuário afora.

A concentração de MPS apresentou grande variação comparativamente entre os experimentos. As maiores concentrações médias ocorreram nas campanhas de sizígia com concentrações acima de 100 mg l⁻¹. Já nas duas campanhas de quadratura as concentrações médias foram inferiores a 15 mg l⁻¹. Este fato mostra a grande influência do regime de maré na intensidade das correntes e na concentração do MPS, e, adicionalmente, sugere que a origem do MPS é o leito do estuário, onde as maiores correntes possibilitarão a remobilização de uma maior quantidade de material (e.g. Nichols, 1984; Siegle et al., 2009).

Os principais mecanismos de transporte de MPS e sal foram os termos advectivos da descarga fluvial e o transporte de Stokes, seguido pelo transporte dispersivo da correlação de maré. A intensidade destes mecanismos de transporte foi modulado pela altura da maré. Nas campanhas de sizígia o estuário apresentou comportamento antagonico. Na campanha do período seco atuou como exportador de sal e MPS, onde o principal mecanismo foi o transporte advectivo da descarga fluvial. Já na campanha do período chuvoso o estuário importou MPS, e o principal mecanismo de transporte foi a correlação de maré. O termo de correlação de maré entre a velocidade e a propriedade em questão (sal ou MPS) tende a ser pequeno quando o regime de correntes é periódico e simétrico, com diferença de fase de 90° em relação à variação da propriedade (Miranda et al., 2002). Porém em

condições em que há assimetria do regime de correntes em termos de tempo e/ou intensidade este termo pode assumir grande importância no mecanismo de transporte (Siegle et al., 2009).

Um fato que merece destaque foi a intensidade do transporte associado à descarga fluvial nos quatro experimentos, quando o esperado seria uma contribuição irrelevante uma vez que o aporte água doce é pequeno. Entretanto, este resultado pode ser explicado pela conexão existente com o rio Peruípe e a desembocadura de Nova Viçosa, através da qual o fluxo de troca ainda não foi estudado. No estudo anterior realizado no estuário de Caravelas (Schettini & Miranda, 2010), quando foram medidas as vazões líquidas, foi encontrado um valor residual de fluxo estuário abaixo da ordem de $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, não explicado pelo aporte fluvial. Este fato foi associado ao aporte através da conexão com o estuário do rio Peruípe, que atuaria como um importante mecanismo no transporte de sal e material particulado no estuário de Caravelas.

Os mecanismos de transporte de MPS apresentaram comportamento mais complexo do que os de sal. O MPS, diferente da salinidade, não é uma propriedade conservativa, pois participa de um ciclo contínuo composto por erosão, sedimentação, deposição e consolidação (Wright & Nittrouer, 1995). Os maiores valores de transporte total ocorreram durante os experimentos de sizígia. Na campanha de sizígia do período seco o estuário comportou-se como exportador de MPS, pois os mecanismos advectivos de transporte estuário abaixo foram responsáveis por 80% do transporte total. Já na campanha de sizígia do período chuvoso o estuário foi caracterizado por comportamento oposto, como importador de MPS, pois o termo que dominou o transporte foi o mecanismo dispersivo de correlação de maré. Nas duas campanhas de quadratura o transporte total de MPS foi praticamente insignificante.

CONCLUSÕES

O estuário do rio Caravelas é um estuário bem misturado e fracamente estratificado. A hidrografia e o balanço sedimentar são principalmente modulados pela altura da maré e o aporte de água doce é irrelevante. A variabilidade dos resultados encontrados deveu-se muito mais as diferenças de altura de maré entre condições de quadratura ou sizígia do que a modulação sazonal entre período seco e chuvoso. Ainda, a presença de um canal de interconexão entre o estuário de Caravelas e a desembocadura de Nova Viçosa aumentam a complexidade da hidrodinâmica, o que foi demonstrado pelos resultados dos mecanismos de transporte advectivo.

Os principais mecanismos de transporte de sal e MPS foram os termos advectivos da descarga fluvial e o transporte de Stokes, contrabalanceados pela correlação de maré. A importância destes mecanismos de transporte variam ao longo do tempo em resposta à variação das condições de maré. Em condições de maré de quadratura o transporte resultante de MPS é com sentido estuário acima, porém de pequena intensidade. Em condições de sizígia o estuário é caracterizado por correntes mais intensas e assimétricas, com dominância de vazante. Durante a condição de sizígia o estuário pode atuar como importador ou exportador de MPS. Na primeira condição predomina o mecanismo de transporte da correlação de maré responsável pelo transporte estuário acima. Já na segunda situação o principal mecanismo de transporte é assumido pela descarga fluvial, porém não devido ao aporte de água doce no sistema e sim à conexão existente com o estuário do rio Peruípe.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os envolvidos diretamente nas campanhas de campo, Cassia, Camila, Piero, Leo, Pablo, Franci, Japa, Marta, Wilson, e todos os tripulantes dos barcos do Tião; aos revisores anônimos por suas contribuições para melhoria do manuscrito. Este estudo é uma contribuição do Projeto Pró-Abrolhos (Instituto do Milênio – CNPq). Bolsas CNPq-PQ ES-308303/2006-7, LBM-302702/2002-4, CAFS-306217/2007-4.

REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional das Águas. 2008. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 1 jun. 2008.
- ANDRADE ACS & DOMINGUEZ JML. 2002. Informações Geológico-Geomorfológicas como Subsídios à Análise Ambiental: o Exemplo da Planície Costeira de Caravelas – Bahia. *Boletim Paranaense de Geociências*, 51: 9–17.
- BOWDEN KF. 1963. The mixing processes in a tidal estuary. *J. Air Wat. Pollut.*, 7: 343–356.
- CAMERON WM & PRITCHARD DW. 1963. Estuaries. In: HILL MN (Ed.). *The sea: ideas and observations on progress in the study of the seas*. Interscience, New York, p. 306–324.
- CASTRO CB. 1994. Corals of Southern Bahia. In: HETZEL B & CASTRO CB (Eds.). *Corals of Southern Bahia*. Nova Fronteira, Rio de Janeiro, p. 160–176.
- CNUMAD. Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. 1992. Rio de Janeiro. Agenda 21... Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 1996.

- COUTINHO R, VILLAÇA RC, MAGALHÃES CA, GUIMARÃES MA, APO-LINÁRIO M & MURICY G. 1993. Influência antrópica nos ecossistemas coralinos da região de Abrolhos, Bahia, Brasil. *Acta Biol. Leopoldensia*, 15(1): 133–144.
- DEINES KL. 1999. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers. In: *Proceedings of the IEEE Sixth Working conference on Current Measurements*, San Diego, CA, 13-16 September 1999, p. 249–253.
- DODGE RE & VAISNYS JR. 1977. Coral populations and growth patterns: responses to sedimentation and turbidity associated with dredging. *Journal Mar. Res.*, 35: 715–730.
- DUTRA LXC, KIKUCHI RKP & LEÃO ZMAN. 2006. Effects of sediment accumulation on reef corals from Abrolhos, Bahia, Brazil. *J. Coast. Res. SI*, 39: 633–638.
- DYER KR. 1974. The salt balance in stratified estuaries. *Estuar. Coast Mar. Sci.*, 2: 273–281.
- DYER KR. 1977. Lateral circulation effects in estuaries. In: *Estuaries, geophysics and the environment*. National Academic Press, Washington D.C. p. 22–29.
- DYER KR. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: PERILLO GME (Ed.). *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Elsevier Science, New York, p. 423–449.
- DYER KR. 1997. *Estuaries: a physical introduction*. 2 ed., John Wiley & Sons, New York, 195 pp.
- FAIRBRIDGE RW. 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: OLAUSSON E & CATO I (Eds.). *Chemistry and biogeochemistry of estuaries*. John Wiley and Sons, New York, p. 1–35.
- FISCHER HB. 1976. Mixing and dispersion in estuaries. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 8: 107–133.
- FRENCH PW. 1997. *Coastal and Estuarine Management*. London, Routledge. 251 pp.
- GARTNER JW. 2004. Estimating suspended solid concentrations from backscatter intensity measured by Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Mar. Geol.*, 211: 169–187.
- HANSEN DV & RATTRAY JR M. 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnology and Oceanography*, 11: 319–326.
- HERZ R. 1991. *Manguezais do Brasil*. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo. 233 pp.
- HODGSON G & DIXON JA. 2000. El Nido revisited: ecotourism, logging and fisheries. In: CESAR HSJ (Ed.). *Collected essays on the economics of coral reefs*. CORDIO, p. 55–68.
- HUNKINS K. 1981. Salt dispersion in the Hudson estuary. *J. Phys. Oceanogr.* 11: 729–738.
- KJERFVE B. 1986. Circulation and salt flux in a well mixed estuary. In: VAN DE KREEKE J (Ed.). *Physics of Shallow Estuaries and Bays*. Springer-Verlag, Berlin, p. 22–29.
- LABOREL J. 1970. Les peuplements de madréporaires des côtes tropicales du Brésil. *Ann. Univ. Abidjan.*, 2(3): 1–260.
- LEÃO ZMAN. 1996. The coral reefs of Bahia: morphology, distribution and the major environmental impacts. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 68(3): 339–452.
- LEÃO ZMAN & GINSBURG RN. 1997. Living reefs surrounded by siliclastic sediments: The Abrolhos coastal reefs, Bahia, Brazil. In: *Proceedings of 8th Int. Coral Reef Symp.*, Panama, 1997, v.2, p. 1767–1772.
- LEIPE T, KNOPPERS B, MARONE E & CAMARGO R. 1999. Suspended matter transport in coral reef waters of the Abrolhos bank Brazil. *Geo-Marine Letters*, 19: 186–195.
- LESSA GC & CIRANO M. 2006. On the circulation of a coastal channel within the Abrolhos Coral-Reef system-Southern Bahia, Brazil. *J. Coast. Res.*, SI 39: 450–453.
- LOHRMANN A. 2001. Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments. Nortek AS, Rud, Norway, Nortek Technical Note N. 03, 5 pp.
- LOPES R & DUTZ J. 1996. Zooplankton. In: EKAU W & KNOPPERS B (Orgs.). *Sedimentation processes and productivity in the continental shelf waters of East and Northeast Brazil*. Joint Oceanographic Projects. JOPS II. Cruise report and first results. Center for tropical marine ecology, Bremen. p. 38–39.
- LOYA Y. 1976. Effects of water turbidity and sedimentation on the community structure of Puerto Rican corals. *Bull. Mar. Sci.*, 26(4): 450–466.
- MAIDA M & FERREIRA BP. 1997. Coral reefs of Brazil: an overview. In: *Proceedings of 8th Int. Coral Reef Symp.*, Panama, 1997, v.1, p. 263–274.
- MARONE E & CAMARGO R. 1996. Leg 3: physical oceanography. In: EKAU W & KNOPPERS B (Orgs.). *Sedimentation processes and productivity in the continental shelf waters of East and Northeast Brazil*. Joint Oceanographic Projects. JOPS II. Cruise report and first results. Center for tropical marine ecology, Bremen. p. 35–36.
- MIRANDA LB, CASTRO BM & KJERFVE B. 2002. *Princípios de oceanografia física de estuários*. EDUSP, São Paulo, 414 pp.
- MORAES ACR. 2007. *Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil: elementos para uma geografia do Litoral Brasileiro*. 2 ed. Annablume, São Paulo, 232 pp.
- NICHOLS MM. 1984. Effects of fine sediment resuspension in estuaries. In: MEHTA AJ (Ed.). *Estuarine cohesive sediment dynamics*. Springer-Verlag, Berlin, p. 5–42.

- PERILLO GME. 1995. Definitions and geomorphologic classifications of estuaries. In: PERILLO GME (Ed.). *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Elsevier Science, New York, p. 17–47.
- PRITCHARD DW. 1955. Estuarine Circulation Patterns. *Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, 81: 1–11.
- ROGERS CS. 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Marine Ecol. Prog. Series*, 62: 185–202.
- SCHETTINI CAF & MIRANDA LB. 2010. Circulation and suspended particulate matter transport in a tidally dominated estuary: Caravelas estuary, Bahia, Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1): 1–11.
- SCHETTINI CAF & ZALESKI AR. 2006. A utilização de perfiladores acústicos de corrente por efeito Doppler na determinação do material particulado em suspensão na água: aplicações. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 11(2): 201–208.
- SCHETTINI CAF, RICKLEFS K, TRUCCOLO EC & GOLBIG V. 2006. Synoptic hydrography of a highly stratified estuary. *Ocean Dynamics*, 56: 308–319.
- SCHETTINI CAF, ALMEIDA DC, SIEGLE E & ALENCAR ACB. 2010. A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijuca Bay, Brazil. *Geo-Marine Letters*, doi: 10.1007/s00367-009-0152-8.
- SEGAL B, EVANGELISTA H, KAMPEL M, GONÇALVES AC, POLITO PS & SANTOS EA. 2008. Potential impacts of polar fronts on sedimentation processes at Abrolhos coral reef (South-West Atlantic Ocean). *Continental Shelf Res.*, 28: 533–544.
- SIEGLE E, SCHETTINI CAF, KLEIN AHF & TOLDO JR EE. 2009. Hydrodynamics and suspended sediment transport in the Camboriú Estuary – Brazil: pre jetty conditions. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(2): 123–135.
- SRHSH. Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Habitação. 1997. Plano Diretor de Recursos Hídricos: Bacias Hidrográficas do Extremo Sul; documento síntese. Salvador, Bahia: HYDROS. 432 pp.
- SUMMERHAYES CP, MELO U & BARRETO HT. 1976. The influence of upwelling on suspended matter and shelf sediments off southeastern Brazil. *J. Sedimentary Research*, 46(4): 819–828.
- TEIXEIRA CEP. 2006. Caracterização e Variabilidade da Hidrodinâmica da Zona Costeira Adjacente ao Banco de Abrolhos. Dissertação, Instituto Oceanográfico da USP, São Paulo, 93 pp.
- VAN KATWIJK MM, MEIER NF, VAN LOON R, VAN HOVE EM, GIESEN WBJT, VAN DER VELDE G & DEN HARTOG C. 1993. Sabaki river sediment load and coral stress: correlation between sediments and condition of the Malindi-Watamu reefs in Kenya (Indian Ocean). *Mar. Biol.*, 117: 675–683.
- WRIGHT LD & NITTROUER CA. 1995. Dispersal of river sediments in coastal seas: six contrasting cases. *Estuaries*, 18(3): 494–508.
- ZALESKI AR & SCHETTINI CAF. 2006. Procedimentos para Calibração de Perfiladores Acústicos de Corrente por efeito Doppler na Determinação da Concentração de Material Particulado em Suspensão na Água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 11: 191–200.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Marçal Duarte Pereira. Oceanógrafo formado pela Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI) em 2006. Mestre em Geociências (Geologia Marinha) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em 2009. Doutorando em Ciências Marinhas Tropicais pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Atua como *surveyor* na empresa de dragagem SOMAR – Serviços de Operações Marítimas Ltda. Áreas de interesse: hidrodinâmica costeira e estuarina.

Eduardo Siegle. Graduado em Oceanologia pela Fundação Universidade do Rio Grande (FURG) em 1996; Mestre em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em 1999; Doutor em Ciências Marinhas pela Universidade de Plymouth (Reino Unido, 2003). É professor do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo desde 2005, onde lidera o grupo de pesquisa em dinâmica costeira. Áreas de interesse: morfodinâmica e circulação costeira. Pesquisador do CNPq.

Luiz Bruner de Miranda. Licenciado em Física (1964) e Doutor em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo (1972). Atualmente é Professor Emérito do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. É um dos autores do livro *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*, vencedor do Prêmio Jabuti de 2003. Atua na área de oceanografia física, com ênfase em oceanografia física de estuários. Pesquisador do CNPq.

Carlos Augusto França Schettini. Oceanógrafo formado pela Fundação Universidade do Rio Grande (FURG) em 1991; Mestre em Geociências pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em 1994; Doutor em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em 2001. Professor colaborador no Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO) da UFRGS. Professor do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará. Áreas de interesse: oceanografia física estuarina e costeira. Pesquisador do CNPq.