

DINÂMICA DA ZONA DE RASA DE *SHOALING* E O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA DESEMBOCADURA SUL DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ – PR

SHALLOW SHOALING ZONE DYNAMICS AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE PARANAGUÁ BAY OUTLET.

Georgina Jacintho Martins¹
Eduardo Marone¹
Rodolfo José Angulo²
Mauricio Almeida Noernberg¹
Clécio José Lopes de Quadros¹

RESUMO

O presente trabalho caracteriza os parâmetros de ondas e analisa o potencial hidrodinâmico para o transporte de sedimentos por tração e de material particulado em suspensão, na costa adjacente à desembocadura sul do complexo estuarino de Paranaguá em decorrência do regime de ondas e das correntes de marés atuantes em períodos de mar calmo. A área estudada apresenta uma dinâmica complexa, devido à sua localização na saída de um grande estuário em uma costa com energia de onda relativamente elevada. Os objetivos principais foram os de caracterizar os parâmetros de ondas, avaliar o padrão de correntes junto à costa e estimar o potencial das correntes para o transporte de sedimentos. A caracterização dos parâmetros de ondas e das correntes paralelas à costa foi obtida através de correntômetro/ondômetro direcional eletromagnético InterOcean S4, fundeado imediatamente atrás da arrebentação das ondas na praia do Balneário Atami. Os fundeios foram realizados em períodos de baixa energia de ondas, quando era possível a sua instalação, sendo que os resultados são referentes a tais condições. Os resultados apontaram que a direção preferencial de chegada de ondas é de SE, sendo que a direção predominante de transporte médio longitudinal à costa foi de nordeste para sudoeste. As inversões das correntes associadas às variações da maré indicaram uma efetiva influência destas na direção do transporte. Com base nos resultados obtidos, são apresentadas sugestões visando incentivar a implementação de estratégias de monitoramento do fluxo de sedimentos costeiro.

Palavras-chave: ondas, correntes costeiras, transporte, balanço de sedimentos.

1 Centro de Estudo do Mar, Universidade Federal do Paraná, Av. Beira Mar s/n, 83255-000, Pontal do Paraná – Paraná.

2 Departamento de Geologia, Lecost, Universidade Federal Paraná.

ABSTRACT

This work presents a characterization of wave parameters and climate. It analyzes the hydrodynamic potential for sediments transport by traction as well by suspension (suspended particulate matter - SPM), carried out both by coastal currents, waves and the tidal circulation acting in the adjacent coast of the southern outlet of Paranaguá Estuarine Complex. This area presents a complex dynamics, due to its location, morphology and the interaction of several coastal processes acting among its limits. The main goal was to characterize the wave parameters and climate, to identify the coastal currents, and to understand the roles of these currents for the sediments transport, quantifying its magnitude. The characterization of the wave parameters and of the coastal currents was obtained through mooring a directional wave and current gauge InterOcean S4 immediately seaward of the surf of Atami beach, PR. The moorings were accomplished in periods of low wave energy, the only ones allowing the deployment, and the results are regarding such conditions. The results suggested that the preferential direction of wave propagation is SE and the predominant direction of the mean transport, longitudinal to the coast, was from Northeast to Southwest. The inversion of the longitudinal currents was associated to the tidal changes and they indicated an effective influence of the tidal currents, acting in the southern outlet of the Paranaguá estuary, in the direction of the mean mass transport. The hydrodynamic complexity of the place was directly related to these constraints, being linked to the net balance of the forcing of the tidal currents and the waves incidence. According to the obtained results, some suggestions were presented with the objective of suggesting strategies for the waves, currents and coastal transport studies, as a powerful tool for managing coastal zone problems.

Key-words: waves, coastal currents, transport, sediment budget

INTRODUÇÃO

As regiões costeiras apresentam uma dinâmica muito particular, devido à interação de ondas, marés, correntes litorâneas e processos atmosféricos, os quais conferem considerável dificuldade ao entendimento dos processos atuantes nessas áreas.

A costa do Estado do Paraná estende-se por aproximadamente 100 km na direção NE-SW, entre as coordenadas 25° 20' – 25° 55' de latitude sul e 48° 10' – 48° 35' de longitude oeste, sendo, segundo Angulo (1993), predominantemente arenosa, interrompida apenas por alguns pontais rochosos e pelas desembocaduras das baías de Guaratuba e de Paranaguá.

De acordo com a configuração geomorfológica e as características da dinâmica costeira, é possível identificar no Paraná três tipos principais de costas: as estuarinas ou protegidas (1317 km), as oceânicas ou de mar aberto (61km) e as de desembocaduras (105 km) (Angulo & Araújo 1996). As costas estuarinas ou protegidas, caracterizadas principalmente pela presença de mangues, localizam-se no interior dos estuários, e são influenciadas principalmente pelas variações das marés. As costas oceânicas são aquelas voltadas para mar aberto e que não apresentam influência significativa das desembocaduras estuarinas. Essas são dominadas por ondas e correntes de deriva litorânea, estando associadas principalmente a praias arenosas, que apresentam processos de sedimentação sazonais (Angulo 1996). As costas associadas às desemboca-

duas caracterizam-se pela ocorrência de praias arenosas e, em alguns locais protegidos, por pequenas planícies de marés. Ocorrem próximas às desembocaduras, tanto na parte interna dos estuários, como nas áreas de mar aberto. Morfológica e sedimentologicamente, as praias associadas a desembocaduras são semelhantes às oceânicas. Contudo, possuem dinâmica mais complexa, sendo dominadas não apenas por ondas e correntes de deriva litorânea, mas também por correntes de maré (Angulo & Araújo 1996).

As ondas oceânicas são formadas através de perturbações da superfície líquida, induzidas principalmente por ventos de tempestades. Sendo assim, energia e movimento são transmitidos para a massa d'água na direção de propagação da força perturbadora. Segundo Wright & Short (1984) as ondas representam a principal entrada de energia para os sistemas praias e a variabilidade desses sistemas fica, portanto, diretamente dependente da variabilidade do próprio clima de ondas.

O conhecimento das alturas, dos períodos e das direções das ondas na zona logo atrás da arrebentação, bem como as características geomorfológicas das praias, são fundamentais para o entendimento da evolução morfológica da costa, permitindo, por exemplo, prever respostas a possíveis ações antrópicas.

Por outro lado, atividades antrópicas também são influenciadas pela dinâmica dos sedimentos na costa, como os problemas de assoreamento no canal de acesso portuário do complexo estuarino de Paranaguá. Esse processo de assoreamento prejudica as atividades do

porto de Paranaguá. Acredita-se que uma das principais causas seja a ação de correntes costeiras e seu respectivo transporte de sedimentos longitudinal à costa adjacente à desembocadura sul do estuário.

Para se calcular o transporte litorâneo de sedimentos são necessárias informações sobre as características hidrodinâmicas do local e conhecimento das ondas na zona de surf, pois as mesmas, assim como as marés em alguns casos, são responsáveis pelas correntes longitudinais à costa.

O conhecimento da variação temporal e da estatística dos parâmetros de onda e a compreensão dos eventos meteorológicos que geraram os respectivos estados de mar, são alguns dos parâmetros que compõem o estudo do clima de ondas para uma determinada região. Portanto, quanto maior for o conhecimento do clima de ondas melhor será a compreensão dos processos morfodinâmicos que ocorrem na costa.

O presente trabalho tem como finalidade entender melhor a dinâmica sedimentar da região adjacente à desembocadura sul do complexo estuarino de Paranaguá, relacionando-a às correntes próximas do fundo, tanto as de deriva litorânea quanto as de marés em condições de mar calmo.

Para isso efetuou-se, durante as situações de mar calmo, um monitoramento dos processos hidrodinâmicos (ondas, correntes e marés) nessa área, através de fundeios com ondógrafos e correntômetros.

É importante apontar algumas das limitações do trabalho, tanto metodológicas quanto teóricas. Em primeiro lugar, a instalação dos instrumentos logo após a arrebenção só seria possível em condições de mar calmo, pelo que a dinâmica descrita neste trabalho corresponde tão somente a esses períodos que, por sinal, são os mais freqüentes. Desde o ponto de vista teórico, este trabalho se limita ao estudo da dinâmica de sedimentos relacionada às correntes de maré e de deriva litorânea, próximas ao fundo, consideradas a parte do fluxo médio da teoria de fluxos turbulentos. A parte das perturbações turbulentas do fluxo, tanto das correntes quanto das ondas capazes de re-suspender e/ou transportar sedimentos, não é estudada neste trabalho. O motivo é, como no caso anterior, uma limitação metodológica. O estudo da camada limite turbulenta próxima ao fundo só é possível com equipamentos sofisticados não disponíveis na época do estudo.

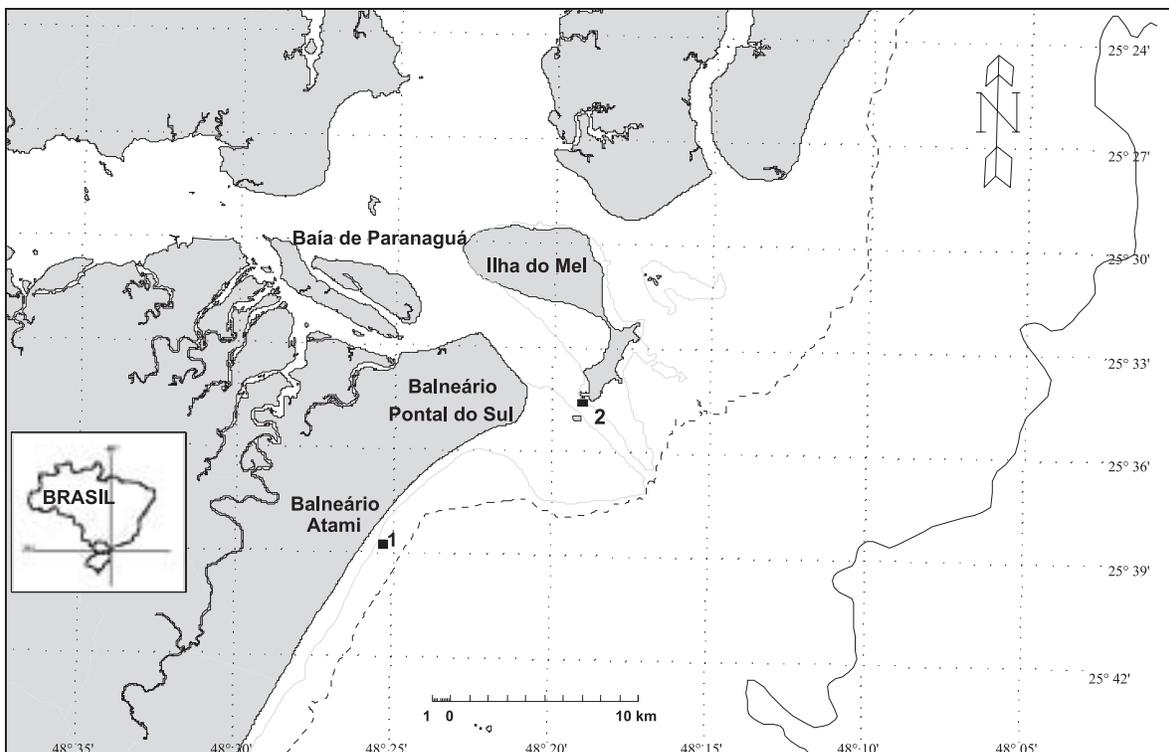


Figura 1: Localização e batimetria da área de estudo. *Bathy medry and Place of study.*

ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para o monitoramento dos processos hidrodinâmicos está localizada no setor central da costa paranaense. Os fundeios foram localizados no Balneário Atami, município de Pontal do Paraná, tendo como suas coordenadas geográficas 25°35'36" de latitude sul e 48°22'27" de longitude oeste (figura 1).

O Balneário Atami localiza-se nas adjacências da desembocadura sul do complexo estuarino de Paranaguá, orientado no sentido SW - NE e está dentro dos limites das costas associadas a desembocaduras conforme classificadas em Angulo & Araújo (1996).

Os sedimentos da praia são compostos por areias quartzosas finas e muito finas, muito bem selecionadas (Soares et al. 1996). Segundo Bigarella et al (1978), o diâmetro médio da areia das praias aumenta de Pontal do Sul para Praia de Leste (região central da planície), e decresce em direção a Matinhos. Entretanto, as areias em Matinhos não se apresentam tão finas como as de Pontal do Sul.

METODOLOGIA

ESTAÇÕES DE AMOSTRAGENS

O ponto de amostragem 1 foi localizado adjacente à desembocadura sul do complexo estuarino de Paranaguá, mais precisamente no Balneário Atami (figura 1 e, no detalhe, figura 2).

Como informações comparativas e complementares, em algumas análises utilizaram-se dados referentes a parâmetros de onda da estação oceanográfica da Ilha do Mel (ponto 2, figura 1). Essa estação foi instalada no mês de julho de 2001, e está localizada nas proximidades de uma rocha na Ilha do Mel, aproximadamente a 5 Km do Balneário Atami, sendo separada da Ilha da Galheta pelo canal de acesso ao Porto de Paranaguá (Canal da Galheta), o qual apresenta profundidades superiores a 30 metros.

A zona rasa de *shoaling* aqui considerada é a região imediatamente após a zona de arrebentação, onde a deformação da forma da onda é suficientemente significativa como para não mais poder ser tratada como uma onda senoidal.

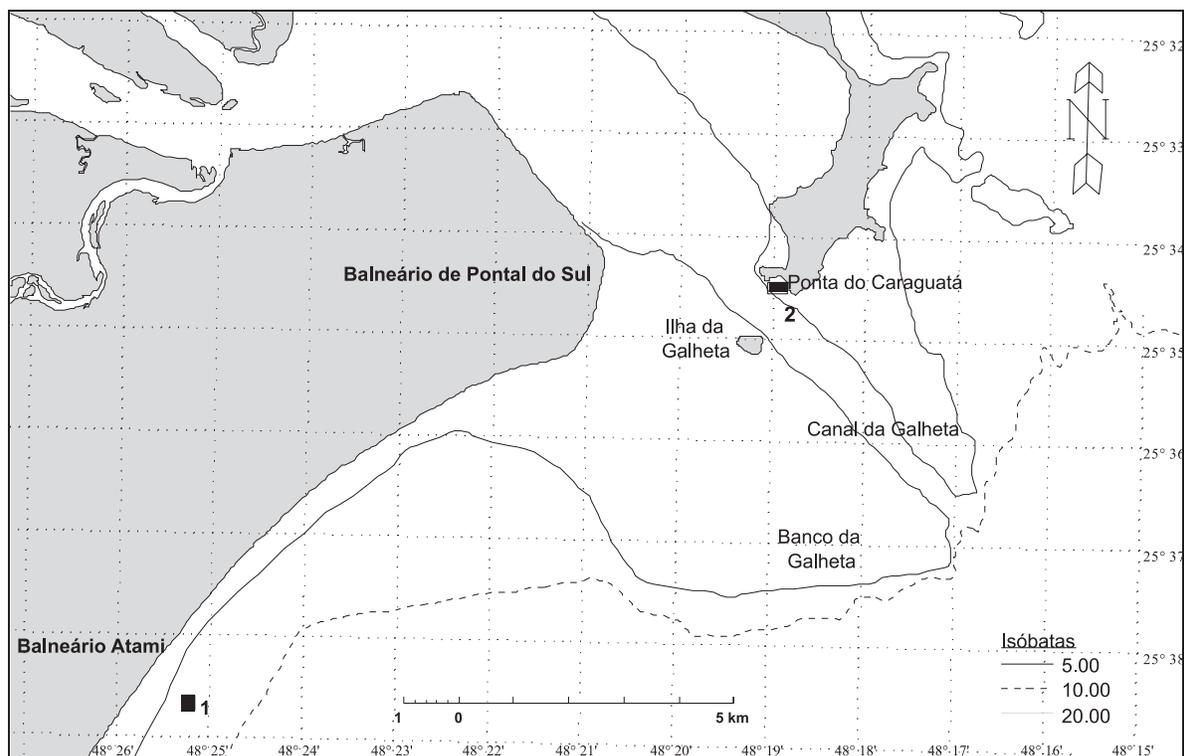


Figura 2: Detalhe da área de estudo. *Detail of studied area.*

OBTENÇÃO DOS DADOS

No Balneário Atami (ponto 1, figura 1), os dados foram obtidos através de fundeios, em períodos que variaram de 10 a 12 horas, com um ondógrafo S4 InterOcean. O equipamento foi instalado em uma estrutura de fundeio, a qual foi transportada através de embarcação (canoa de pescadores) e lançada na parte imediatamente atrás da arrebentação. A estrutura foi instalada a uma profundidade entre 5 metros e 7 metros, variável nas diferentes coletas, e o instrumento ficando a aproximadamente 30 cm do fundo.

O ondógrafo S4 InterOcean registra dados referentes às correntes horizontais e verticais (x,y,z), calculando, conhecida a profundidade, as alturas e direção de propagação das ondas, a direção e intensidade das correntes, além de profundidade, temperatura e salinidade, sendo que esses três últimos parâmetros não foram utilizados nas análises deste trabalho.

O Planejamento amostral visou coletar dados mensalmente durante um ano. Entretanto, devido a problemas técnicos, apenas oito fundeios obtiveram registros.

As correntes e os parâmetros de onda foram medidos pelo equipamento a cada 30 minutos. Para a obtenção dos parâmetros de onda, o instrumento ficava ligado durante 18 minutos, amostrando de forma contínua numa taxa de 2 Hz, com um total de 9 a 12 registros diários. As correntes a cada média hora correspondem à média dos 3 minutos iniciais dos 18 de medição contínua.

Vale ressaltar que as campanhas foram realizadas em dias de mar calmo, com pouca incidência de ondas. Isso foi necessário, pois há considerável risco da embarcação transpor a arrebentação em dias de mar agitado, pondo em risco a segurança do instrumento e do condutor do barco. Assim, a metodologia não inclui amostragens em período de alta energia, sendo desnecessário ressaltar que os resultados obtidos são referentes a tais condições.

Como complemento deste estudo utilizaram-se dados da estação oceanográfica da Ilha do Mel. Nessa estação, os dados são obtidos durante 15 min a cada hora, numa taxa de 4 Hz por ondógrafo/correntômetro de efeito Doppler Falmouth 3DW.

Os dados referentes à maré foram obtidos através dos registros do marégrafo da Ponta do Caraguatá, Ilha do Mel, apenas para os períodos de amostragens. Esses dados são registrados analogicamente num marégrafo e digitalizados a intervalos de 30 minutos.

CÁLCULO DO FLUXO E TRANSPORTE MÉDIO DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR TRAÇÃO.

A orientação da costa no local de amostragem é N45°E. Dessa forma, para analisar as correntes paralelas e transversais à linha de costa, as mesmas foram decompostas em componentes transversais (NW-SE) e componente paralela (NE-SW).

A estimativa do fluxo médio foi obtida através da seguinte equação:

$$\bar{F} = \bar{V} \cdot \frac{b \cdot h}{2} \quad (\text{eq.1})$$

onde \bar{F} é o fluxo médio, \bar{V} é a velocidade média da corrente paralela à costa (componente paralela), e o restante da fórmula corresponde à área:

$$A = \frac{b \cdot h}{2} \quad (\text{eq.2})$$

onde b corresponde à profundidade, e h à distância.

Machado et al. (1997) investigou as variações sazonais dos parâmetros físico-químicos da coluna d'água no período de julho de 1994 até julho de 1995 na região próxima à Ilha da Galheta (desembocadura sul do CEP). Essas variações apresentaram valores médios de 32 g/m³ de material particulado em suspensão (MPS), valor esse utilizado neste trabalho para o cálculo da estimativa, de ordem zero, do fluxo médio e do transporte médio de MPS. Esclarece-se que o uso destes valores é para se obter uma primeira estimativa que, com as limitações apontadas, permite conhecer apenas a ordem de grandeza do transporte, o que é um primeiro passo apenas. Essa ordem de grandeza pode não ter um grau de precisão para a elaboração de hipóteses científicas, mas é suficiente para, por exemplo, estimar o grau da contribuição das correntes litorâneas e de maré no transporte de sedimentos na área.

O cálculo de transporte de sedimento (volume) longitudinal à costa foi obtido através da fórmula de Kamphuis (1991) (eq.3), utilizada também por Gobbi (1997) e Alfredini (1999), os quais calcularam transporte de sedimentos longitudinal à costa do Paraná.

Onde Hsb é a altura da onda significativa na chegada à zona de arrebentação, Tp é o período de pico, mb é a declividade da praia, $D50$ é o diâmetro médio, e θb o ângulo de incidência da onda na chegada à arrebentação.

$$Q \left(m^3 / ano \right) = 6,4 \times 10^4 H_{sb}^2 T_p^{1,5} m_b^{0,75} D_{50}^{-0,25} \text{sen}^{0,6} (2\Theta_b) \quad (\text{eq.3})$$

O valor admitido para o tamanho médio do grão de sedimento para o balneário Atami é de 2.89 ϕ (areia fina) (Borzzone et al. 1998), sendo esse valor considerado constante para todas as amostragens.

Para avaliar o transporte de sedimentos por tração, foram utilizados os valores apresentados por Araújo (2001), o qual utilizou o método gráfico proposto por Yalin (1972). Araújo (2001), estudando um local com características granulométricas semelhantes, determinou que os sedimentos iniciam sua movimentação quando as velocidades de correntes atingem o valor de 15,8 cm/s medidos a 50 cm do fundo, para o diâmetro médio dos grãos de 0,016 cm e velocidade de cisalhamento de 1,19 cm/s.

RESULTADOS

PARÂMETROS DE ONDAS

A variabilidade da direção de incidência de ondas para o setor da costa do Balneário Atami apresentou como direção preferencial as ondas vindas de S e SE. As maiores alturas significativas coincidiram com ondas vindas desses quadrantes e a altura máxima registrada (1,48 m) foi decorrente de ondas vindas de SE. O maior período significativo observado (7,3 s) foi para ondulações provenientes de S (tabela 1).

CORRENTES E TRANSPORTE PARALELO À COSTA

Analisando os dados, o fundeio que apresentou maior potencial de transporte de MPS foi o de 28 de julho de 2000, em que se observam valores de transporte médio de 146.211 g/s e fluxo líquido em torno de 4.569 m³/s, e direção resultante de 255° e velocidade resultante de 19 m/s (tabela 2).

O menor valor para o potencial do transporte de MPS foi observado na amostragem do dia 27 de Abril de 2000 (53.668 g/s), e o fluxo líquido obtido para essa ocasião foi de 1.677 m³/s, a direção e velocidade resultantes foram 212° e 20 m/s, respectivamente (tabela 2).

Todas as direções resultantes do transporte de MPS calculado coincidiram com as direções resultantes das correntes paralelas, sendo que o deslocamento teórico de uma partícula em suspensão durante os períodos, para cada fundeio, sugeridos pela análise dos vetores progressivos, também coincidiu com as direções resultantes da corrente paralela e do transporte médio calculado (tabela 2 e figura 3).

Para os gráficos de vetor progressivo é necessário considerar a orientação da costa no local de amostragem em relação ao Norte, que é de 45°.

Em 21 de janeiro de 2000 o deslocamento da partícula apresentou uma tendência direcional para sudoeste (transversal) (figura 3a).

Em 23 de março de 2000, o deslocamento da partícula inicialmente foi para leste 3.200 m, invertendo o sentido para oeste perfazendo 5.600 m (figura 3b).

Tabela 1: Direção predominante, altura significativa (Hs), altura máxima (Hmáx) e período (Ts) de ondas, para a estação Atami no período de janeiro de 2000 a junho de 2001. *Predominant direction, significant height, highest height, period of waves for Atami Station from jan 2000 to june 2001*

Data de Amostragem	Direção	Hs (m)	Hmáx (m)	Ts (s)
21.01.2000	SE	0,75	1,35	5,5
23.03.2000	SSW	0,74	1,15	5,7
27.04.2000	SSE	0,83	1,35	6,3
28.06.2000	SE	0,75	1,27	5,8
28.07.2000	SSW	0,64	0,78	5,8
09.11.2000	SE	0,9	1,48	5,5
05.01.2001	S	0,59	0,94	5,3
06.06.2001	SSW	0,76	1,20	7,3

Tabela 2: Estimativas do fluxo médio e transporte de material particulado em suspensão (MPS), no balneário de Atami, no período de janeiro a novembro de 2000. *Estimates of average flux and transportation of particled material in suspension at Atami Balneary Station from ja. to nov. 2000.*

Mês	Ângulo de Inclinação da Praia	Onda Ts (s)	Onda Hs (m)	Onda Direção	Corrente Transversal NW/SE (cm/s)	Corrente Paralela NE/SW (cm/s)	Corrente Velocidade (cm/s)	Corrente Direção	Fluxo Médio \bar{F} (m ³ /s)	Transporte Médio * \bar{T} (g/s)
Janeiro	1,9°	5,5	0,75	SE	3.97	9.11	9,9	111°	3,42	109.332
Março	1,8°	5,7	0,74	SSW	-9.79	-4.14	10	247°	-1,71	- 54.600
Abril	1,8°	6,3	0,83	SSE	-19.53	4.22	20	212°	1,68	53.668
Junho	1,4°	5,8	0,75	SE	-4.46	3.59	5,7	186°	1,86	59.515
Julho	1,6°	5,8	0,64	SSW	-17.11	-10.15	19,9	255°	-4,57	- 146.211
Novembro	1,5°	5,5	0,90	SE	12.42	7.38	14,4	75°	3,52	112.631
Média Total									2,79	89.326

* Fluxo e Transporte Médio negativo indica que é na direção sul

O sentido preferencial da partícula para 27 de abril de 2000 foi para nordeste (paralelo) e a resultante transversal para noroeste correspondendo a 5.600 m de deslocamento (figura 3c).

Em 28 de Junho de 2000, a partícula direcionou para nordeste (paralelo) havendo para essa amostragem um deslocamento transversal significativo. Inicialmente o sentido era para sudeste com 2.000 m onde ocorreu a inversão do sentido para noroeste perfazendo em média 1.400 m (figura 3d).

Na campanha do dia 28 de julho de 2000 prevaleceu o sentido direcional de sudoeste (paralelo) e o deslocamento transversal para noroeste, em média 4.900 m de deslocamento (figura 3e).

Para 9 de novembro de 2000 a partícula deslocou-se no sentido nordeste (paralelo) e transversalmente para sudeste, perfazendo 1.200 m (figura 3f).

Relacionando as intensidades das correntes no Balneário Atami com o limiar de movimentação dos grãos por tração, nota-se que nas campanhas de 21 de janeiro, 23 de março e 27 de abril de 2000, houve períodos em que a velocidade das correntes ultrapassa o limiar de movimentação dos grãos (figura 4, 5 e 6). Nas campanhas de 28 de junho, 28 de julho e 9 de novembro de 2000, não foram observadas correntes com intensidades superiores ao limiar de transporte (figura 7, 8 e 9).

Apenas na campanha de março de 2000, observaram-se correntes com intensidades que ultrapassaram o limiar de transporte e orientadas no sentido de NE para SW, sendo que nos outros casos que apresentaram as mesmas condições os sentidos direcionais apresentaram-se de SW para NE.

Em relação às máximas intensidades de correntes obtidas, pode-se notar que essas não se apresentaram muito acima do valor limiar do transporte por tração, sendo prudente lembrar que as amostragens fo-

ram realizadas em dias de mar calmo pelas limitações operacionais apontadas.

COMPONENTE PARALELA À COSTA (NE-SW) E AS VARIAÇÕES DA MARÉ

Devido à proximidade entre o local dos fundeios e a desembocadura sul do complexo estuarino de Paranaguá e a possibilidade das correntes paralelas à costa nesse setor sofrerem influência das correntes de marés especialmente intensas na desembocadura do estuário, tornou-se necessária a análise das amplitudes de marés durante os períodos das amostragens.

As amplitudes de maré apresentadas correspondem apenas aos períodos em que os fundeios estavam em funcionamento, esclarecendo assim a não padronização dos horários encontrada nas mesmas.

Apenas uma amostragem coincidiu com um dia do período de maré de sizígia (21 de Janeiro de 2000). A amostragem do dia 6 de junho de 2001 foi efetuada um dia após uma maré dessa natureza e a do dia 23 de março de 2000 três dias após. As amostragens dos dias 2 de julho de 2000 e 9 de novembro de 2000 foram realizadas dois dias antes de uma maré de sizígia e a do dia 28 de junho de 2000 três dias antes. As amostragens dos dias 27 de abril de 2000 e 5 de janeiro de 2001 foram efetuadas a um e três dias respectivamente de uma maré de quadratura.

Para a campanha de 21 de janeiro de 2000 não foi observada variação direcional da componente da corrente paralela à costa, ficando essa orientada para NE durante todo o período. Devido ao curto período de amostragem, não foi possível observar uma maior variação da amplitude da maré, ficando evidenciado apenas o pico da maré vazante (figura 4).

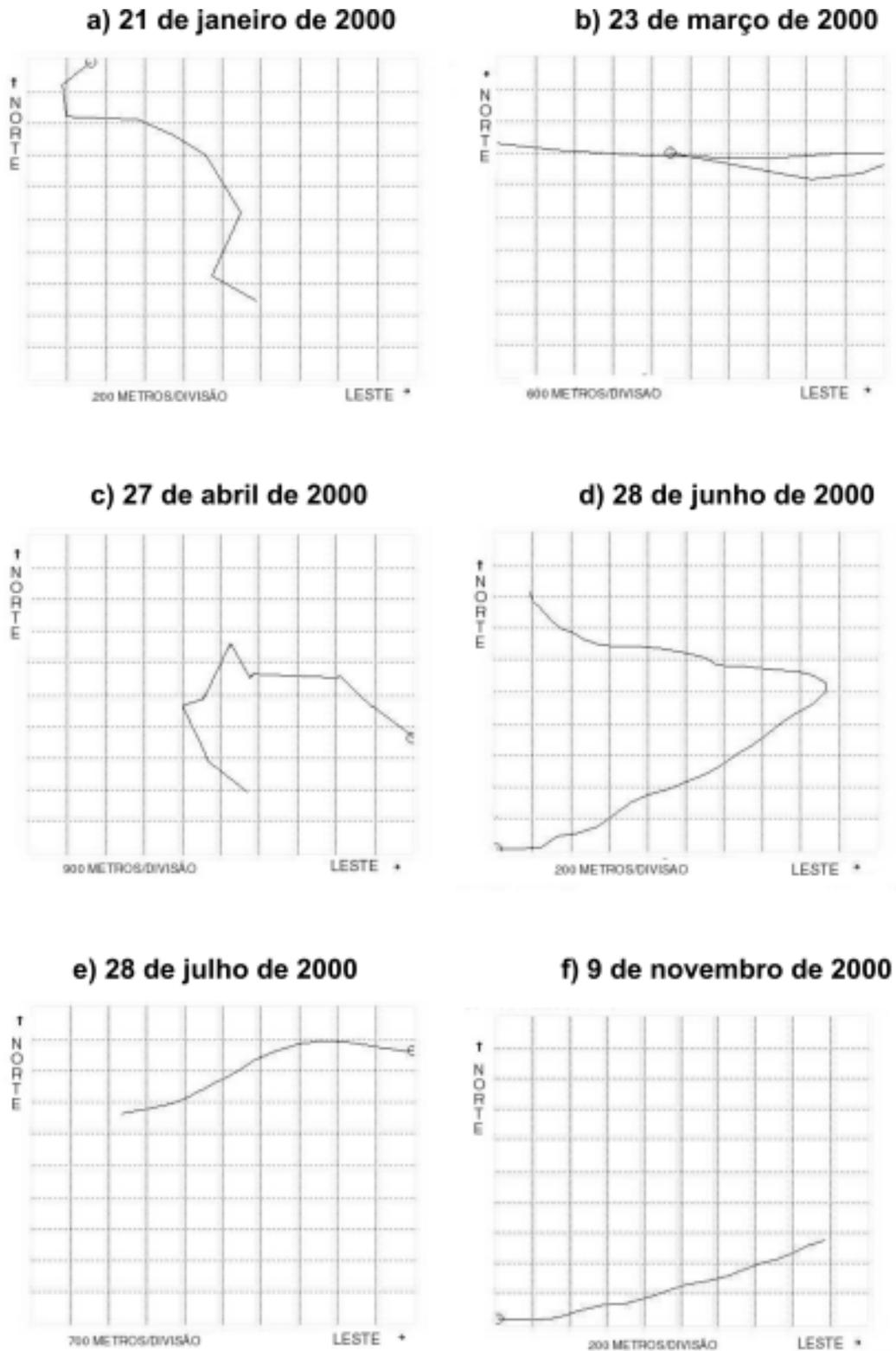


Figura 3: Deslocamento teórico de uma partícula em suspensão durante os períodos dos fundeios - vetor progressivo.

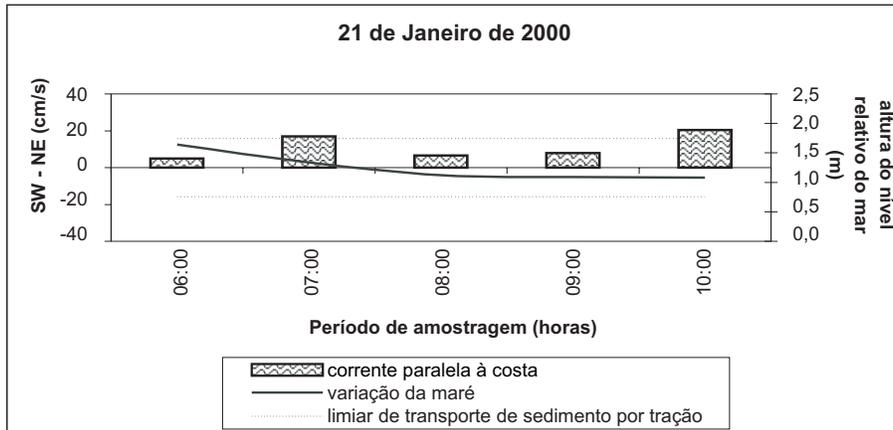


Figura 4: Variação da maré, variação direcional da componente NE – SW da corrente e o limiar de transporte de sedimentos por tração - 21.01.2000. *Tide variation, directional variation of NE – SW component of current and transportation limiar of sediments per traction on jan. 21st, 2000.*

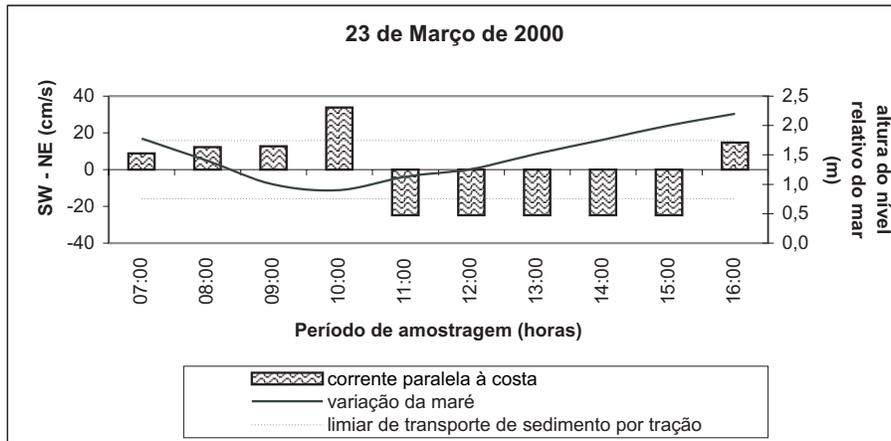


Figura 5: Variação da maré, variação direcional da componente NE – SW da corrente e o limiar de transporte de sedimentos por tração em 23 de março de 2000. *Tide variation, directional variaton of NE – SW component of current and transportation limiar of sediments per traction on march 23th, 2000.*

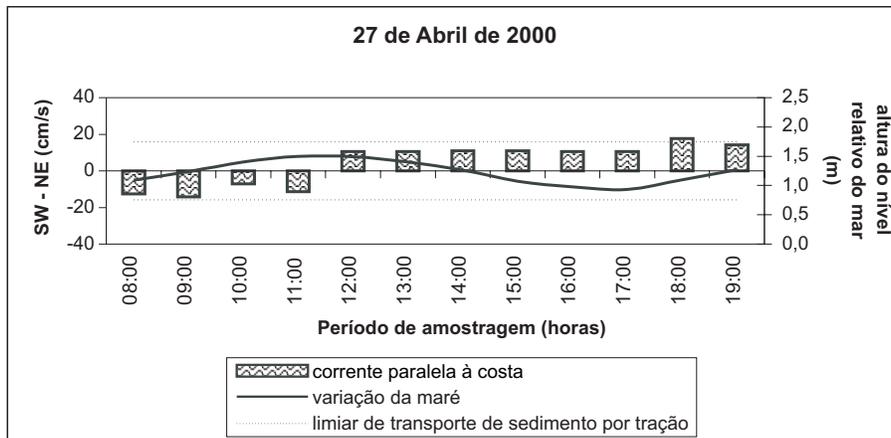


Figura 6: Variação da maré, variação direcional da componente NE – SW da corrente e o limiar de transporte de sedimentos por tração em 27 de abril de 2000. *Tide variation, directional variation of NE – SW component of current and transportation limiar of sediments per traction on april 27th, 2000.*

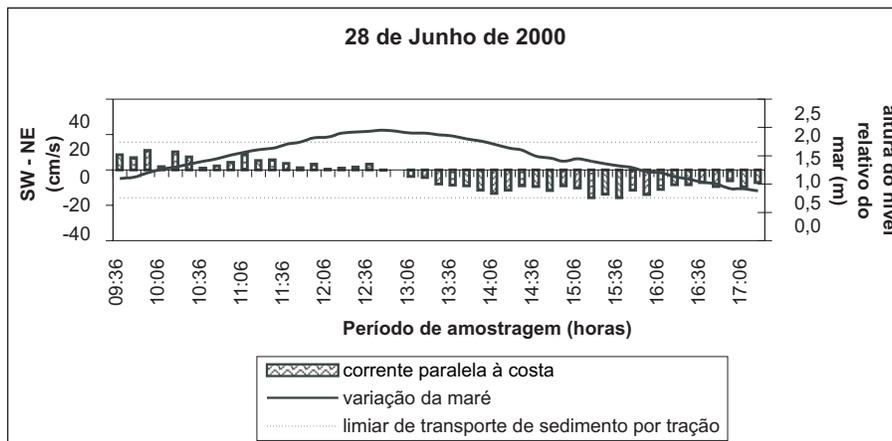


Figura 7: Variação da maré, variação direcional da componente NE – SW da corrente e o limiar do transporte de sedimentos por tração em 28 de junho de 2000. *Tide variation, directional variation of NE – SW component of current and transportation limiar of sediments per traction on june 28th, 2000.*

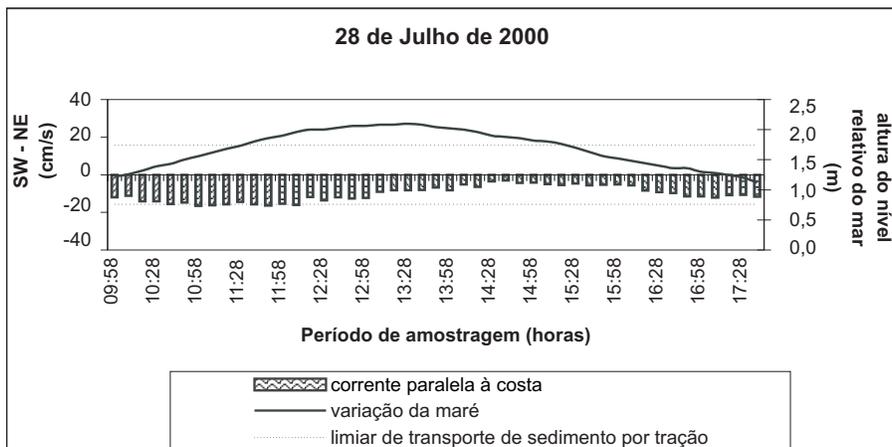


Figura 8: Variação da maré, variação direcional da componente NE – SW da corrente e o limiar de transporte de sedimentos por tração em 28 de julho de 2000. *Tide variation, directional variation of NE – SW component of current and transportation limiar of sediments per traction on july 28th, 2000.*

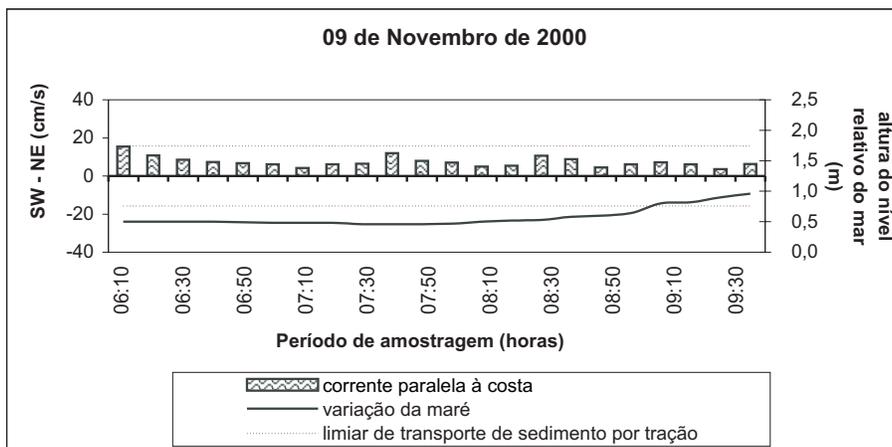


Figura 9: Variação da maré, variação direcional da componente NE – SW da corrente e o limiar de transporte de sedimentos por tração em 9 de novembro de 2000. *Tide variation, directional variation of NE – SW component of current and transportation limiar of sediments per traction on november 8th, 2000.*

Em 23 de março e 27 de abril 2000, a componente paralela à costa (NE – SW) da corrente indica uma inversão acompanhando a variação da maré. No período da maré vazante o sentido da corrente está para norte e no período de maré enchente o sentido está para sul, sendo possível notar um pequeno atraso da inversão da componente em relação à baixa-mar e preamar (figuras 5 e 6).

Para 28 de junho de 2000 (figura 7), a componente paralela da corrente apresentou inversão, exatamente no momento da inversão da maré, sendo que na maré enchente a componente da corrente estava direcionada para NE e com menor intensidade, e na maré vazante, essa assumiu direcionamento SW com considerável aumento de intensidade.

Para 28 de julho de 2000 (figura 8), a componente paralela da corrente apresentou maior intensidade durante a maré enchente do que na maré vazante, não sendo observada inversão no seu sentido.

Na amostragem de 9 de novembro de 2000 não houve variação direcional da componente paralela à costa, sendo que, em função do curto espaço de tempo da amostragem, não foi possível evidenciar para o período uma significativa variação da maré, caracterizando um momento de pico de maré vazante.

Somente com uma amostragem contínua seria possível evidenciar corretamente qualquer correlação entre os dias imediatamente anteriores e o ocorrido no dia das medições, o que seria uma caracterização de eventos de baixa frequência. Pela sua complexidade e necessidade de dados, deve ser motivo de outro trabalho, mas não objetivo deste.

PONTO AMOSTRAL COMPARATIVO NA ILHA DO MEL

Analisando os dados referentes à estação oceanográfica localizada na Ponta do Caraguatá, na Ilha do Mel (figura 2), a aproximadamente seis quilômetros do Balneário Atami, a variabilidade da direção de incidência das ondas para esse ponto apresentou como direção preferencial ondas vindas de NE e SE. A maior altura significativa (0,30 m) foi decorrente de ondas vindas de NE e a altura máxima registrada (0,38 m) coincidiu com ondas desse quadrante. O maior período significativo observado (9,8 segundos) foi para ondulações provenientes de SE (tabela 3).

As pequenas alturas de onda registradas para essa estação em relação ao ponto amostral localizado no Balneário Atami provaram que a estação Ilha do Mel não era representativa para a realização de correlações como as esperadas, na medida em que ficou localizada, mesmo estando a uma profundidade de 12 metros, num “cone de sombra” para as ondas incidentes de mar aberto.

Como consequência, a estação foi desativada para reinstalação em local mais apropriado.

DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em Atami a direção de incidência do trem de ondas variou significativamente durante o período monitorado, mas foi possível evidenciar uma maior incidência de ondas vindas de S e SE, sendo que em algu-

Tabela 3: Direção predominante das ondas, altura significativa (Hs), altura máxima (Hmáx) e período significativo (Ts) na estação Ilha do Mel no período de julho de 2001 a janeiro de 2002. *Predominant wave direction, highest height, significant period at “Ilha do Mel” station from July 2001 to January 2002.*

Mês	Direção	Hs (m)	Hmáx (m)	Ts (s)
Julho 2001	NE	0,30	0,38	9,6
Agosto 2001	NE	0,23	0,29	8,9
Setembro 2001	NE	0,17	0,32	9,6
Outubro 2001	SE	0,14	0,18	7,8
Novembro 2001	SE	0,15	0,24	9
Dezembro 2001	SE	0,23	0,29	9
Janeiro 2002	SE	0,27	0,35	9,8

mas amostragens houve o predomínio de ondas de SSW.

As ondas vindas de SW foram interpretadas como sendo resultado da refração que as ondas sofrem em decorrência da interferência com as feições de fundo, cujo efeito é tornar a propagação perpendicular à costa.

Neste estudo não foi observada variação nítida no regime de ondas no decorrer do ano que permitisse separar variações sazonais de características comuns, o que deve estar relacionado, pelo menos em parte, ao fato das amostragens serem possíveis somente em períodos de bom tempo e calmaria ao longo do ano. Os valores obtidos para altura significativa (Hs) 0,75 m, altura máxima (Hmáx) 1,23 m e período significativo (Ts) de 5,7 segundos apresentam-se semelhante ao obtido por Bandeira (1974). O mesmo aconteceu com as amostragens realizadas por Soares et al. (1996), quando a altura das ondas na zona de arrebentação variou de 0,35 até 0,95 m, com períodos entre 4,2 e 13 segundos, demonstrado uma grande semelhança com este estudo, em que os valores variaram de 0,64 até 0,90 m para altura significativa e 5,5 a 6,3 segundos para o período Ts. Em ambos os trabalhos houve um predomínio de ondas SE.

Da mesma forma, o relatório Portobras (1983) mostrou que a direção de incidência predominante de ondas é de SE, semelhante ao padrão encontrado neste trabalho. No entanto, para período médio, altura significativa e altura máxima, os valores encontrados foram mais elevados do que os observados neste trabalho. Esse fato deve estar associado à localização das amostragens, que foi próxima à zona de arrebentação, onde os valores se apresentaram menores já que boa parte da energia das ondas é perdida por atrito antes de atingir a arrebentação.

De acordo com Marone et al. (1997), estudos realizados entre a Ilha da Galheta e o balneário Pontal do Sul, evidenciaram direção preferencial de ondas vindas de SE, alturas significativas de 0,40 m e períodos entre 5 a 12 segundos. Esses valores diferentes estariam relacionados ao local de amostragem que tem como proteção natural o Banco da Galheta, o qual serve como anteparo natural da ação das ondas o que justificaria o menor valor de altura significativa em relação aos demais estudos citados neste trabalho.

Na estação Ilha do Mel, onde se tem em média cinco registros diários, houve uma melhor possibilidade de interpretação dos dados. Esses evidenciaram ondas predominantes de NE nos meses de julho, agosto e setembro de 2001. Enquanto ondas predominantes de SE foram observadas nos meses de outubro, novembro, dezembro de 2001 e janeiro de 2002. Nesse local, sob

influência da desembocadura do complexo estuarino de Paranaguá e dos bancos costeiros a ela relacionados, ficou evidente a variação sazonal do trem de ondas.

Dessa forma, a altura significativa (Hs) foi de 0,30 m em média, e altura máxima (Hmáx), de 0,38 m. O período máximo (Tmáx) variou de 10 a 11 segundos e o período significativo (Ts) foi de 9 segundos.

Analisando os valores obtidos na estação Ilha do Mel e os do Balneário Atami, a direção de propagação predominante de ondas foi de NE e SE respectivamente, e os valores de altura significativa foram relativamente menores para a Ilha do Mel, porém apresentando maior período significativo (Ts). Essas variações estão provavelmente relacionadas ao local das amostragens e à metodologia amostral e instrumental diferente em cada local.

Ao relacionar os parâmetros de ondas com os parâmetros calculados para as correntes e o transporte de material particulado em suspensão paralelo à costa obtidos para cada campanha, observa-se que em alguns casos as correntes paralelas e, conseqüentemente, os transportes, apresentaram orientação inversa às direções preferenciais de incidência dos trens de ondas.

As correntes de deriva criadas por ondas incidentes dos quadrantes SSW somente poderiam induzir trajetória inversa às observadas (NE - SW) em alguns casos, o que demonstra que, na área de estudo, as correntes paralelas à costa tem mais relação com a circulação estuarina do que com o clima de ondas, como sugerido por outros estudos (por exemplo, Angulo & Araújo 1996). Nesse caso, ficou provado que as correntes de maré atuantes na desembocadura da baía e outros fatores predominam sobre a ação das ondas na geração das correntes litorâneas.

Além do transporte por correntes paralelo à costa, evidenciou-se um transporte transversal, o qual em duas amostragens possuiu sentido de noroeste para sudeste (21 de janeiro e 09 de novembro de 2000). Nas demais amostragens o sentido foi de sudeste para noroeste (23 de março, 27 de abril, 28 de junho e 28 de julho de 2000). Nesses casos, correntes de retorno (*rip currents*) podem ter ocorrido na área dos fundeios, tendo sido registradas pelo correntômetro. Correntes de retorno e de convergência são fatores freqüentemente observados e relatados para a região (Noernberg 2001).

Em cinco amostragens, a intensidade da corrente transversal (NW - SE) supera a intensidade da corrente paralela à costa e em apenas um caso ocorre o inverso. Esse transporte mostrou-se dependente da variação da maré, sendo esse movimento representado nos vetores progressivos (figura 3), quando ocorre a inversão do sentido das correntes no momento da inversão da maré.

A análise dos processos que podem provocar o transporte de MPS próximo à zona de arrebenção destaca que as correntes paralelas à costa no Balneário Atami são reguladas pela ação das ondas e, em alguns momentos, pelas correntes de marés atuantes na desembocadura sul do complexo estuarino de Paranaguá. As ondas ressuspendem os sedimentos nessa área, e o transporte será resultado da ação das correntes.

Contudo, não se estabeleceu um padrão de variação comum entre as marés enchentes e as vazantes e as inversões das componentes paralelas, sendo observadas direções das componentes para ambos os lados para condições da maré enchente e também direções para ambos os lados para condições da maré vazante.

O relativamente curto período do monitoramento e o fato das amostragens terem sido realizadas de forma pontual, somando-se a complexidade que envolve setores costeiros como esse, tornam difíceis obter respostas conclusivas a respeito desses processos.

Provavelmente condições de elevada energia das ondas incidentes comandem o sentido das correntes, principalmente em dias de marés de quadratura, em que a energia das marés se demonstra menor, ficando as variações do direcionamento das correntes diretamente relacionadas ao balanço entre as intensidades das ondas incidentes e as intensidades das marés. Já em situações não tão simples, quando as forças de maré e as devidas à ação das ondas sejam comparáveis, os resultados podem ser dos mais diversos, como foi aqui verificado.

AGRADECIMENTOS

Ao convênio Appa/CEM (Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina e Centro de Estudos do Mar – UFPR) pela concessão de bolsa de estudos e pelo suporte durante a realização deste trabalho. Ao CNPq pelas bolsas Produtividade em Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALFREDINI, P. 1999. Estimativa do transporte de sedimentos longitudinal à praia em local selecionados ao longo da costa brasileira. *Boletim Paranaense de Geociências*, Curitiba, UFPR, (47):9-18.
- ANGULO, R.J. 1993. Variações na linha de costa no Paraná nas últimas quatro décadas. *Boletim Paranaense de Geociências*, Curitiba, UFPR, (41):52-72.
- ANGULO, R.J. 1996. Problemas na terminologia de ambiente e subambientes litorâneos clásticos dominados por ondas. *Boletim Paranaense de Geociências*, Curitiba, UFPR, (44):51-57.
- ANGULO, R.J. & ARAÚJO, A.D. 1996. Classificação da costa paranaense com base na sua dinâmica, como subsídio à ocupação da orla litorânea. *Boletim Paranaense de Geociências*, Curitiba, UFPR, (44):7-17.
- ARAÚJO, A. D. 2001. *Dinâmica sedimentar e evolução paleogeográfica do saco do limoeiro na Ilha do Mel, e sua relação com o canal de acesso ao Porto de Paranaguá*. Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Dissertação de Mestrado em Geologia Ambiental.
- BANDEIRA, J.V. 1974. *Estudo estatístico das ondas ao Largo da Baía de Paranaguá*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Dissertação de Mestrado.
- BIGARELLA, J.J. & BECKER, R.D. & MATOS, D.J. & WERNER, A. (ed.) 1978. *A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná...um problema de segurança ambiental e nacional*. Curitiba, Secretaria de Estado de Planejamento/ADEA, 249 p.
- BORZONE, C.A. & TAVARES, Y.A.G. & BARROS Jr., F.C.R. 1998. *Beach morphodynamics and distribution of Mellita quinquesperforata (Leske, 1778) on sandy beaches of southern Brazil*. Echinoderms, San Francisco, Mooi & Telford (eds.). Balkema, Rotterdam, ISBN. 90:581-586.
- GOBBI, E.F. 1997. *Gerenciamento costeiro: análise de caso do litoral do Paraná sob a perspectiva da engenharia costeira*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dissertação de Doutorado em Ciências em Engenharia Oceânica.
- KAMPHUIS, J. W. 1991. Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 117(6):624-641.
- MACHADO, E.C. & DANIEL, C.B. & BRANDINI, N. & QUEIROZ, R.L.V. 1997. Temporal and spatial dynamics of nutrients and particulate matter in Paranaguá Bay, PR, Brazil. *Nerítica*, Curitiba: UFPR, 11(1-2):17-36.
- MARONE, E. & MANTOVANELLI, A. & NOERNBERG, M.A. & KLINGENFUSS, M.S. & LAUTERT, L.F.C. & PRATA JUNIOR, V.P. 1997. *Caracterização física do Complexo Estuarino da Baía de Paranaguá*. Pontal do Sul, UFPR v.2., Relatório consolidado do convênio Appa/CEM.
- NOERNBERG, M.A. 2001. *Processos morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá – Paraná – Brasil: um estudo a partir de dados in situ e landsat – Tm*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Dissertação de Doutorado em Geologia Ambiental, 180 f.
- PORTOBRAS. 1983. *Campanha de medições de ondas em Paranaguá – PR, período 21.08.1982 a 21.01.1983*. Rio de

Janeiro, Inst. Psq. Hidrog. (INPH), Div. Lev. (DIDELE), 23 p.

SOARES, C.R. & BORZONE, C.A. & SOUZA, J.R.B. 1996. *Variações morfológicas e sedimentológicas ao longo de um ciclo anual numa praia arenosa no sul do Brasil*. Oecologia Brasiliensis, Rio de Janeiro, 3:245-258.

WRIGHT, L.D. & SHORT, A.D. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.*, Amsterdam, 56:93-118.

YALIN, M.S. 1972. *Mechanics of sediment transport*. Oxford, Pergamon, 290 p.

Recebido em 30 out. 2002

Aceito em 04 jun. 2004