



LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO EM ÁREA DE FUNDO MÓVEL: ESTUDO EM PARANAGUÁ

D. Alves, P. P. Brando, A. G. N. Cunha, T. N. Cunha

Microars Consultoria e Projetos Ltda

Comissão I - Hidroceanografia

RESUMO

O presente estudo aborda o problema da determinação da superfície marinha em zonas onde a morfologia do fundo apresenta padrões de transporte de sedimentos compatíveis com ondas de areia móveis. A dinâmica do piso marinho produz superfícies batimétricas diferentes para diferentes ensonificações, sendo as diferenças tanto mais sensíveis quanto maior for o tempo decorrido entre a cobertura e a recobertura. O estudo foi realizado com o principal objetivo de descrever o comportamento do piso marinho com a preocupação na segurança da navegação em uma área sujeita a dinâmica de fundo no Complexo Estuarino de Paranaguá. A partir desta caracterização é possível contribuir com sugestões para a análise dos levantamentos batimétricos realizados nestas e em áreas similares. Foi delimitada uma área quadrada de 300m de lado, propositadamente reduzida em extensão para que o levantamento possa ser completado num período de tempo que minimize os efeitos do deslocamento das feições do fundo. Sobre esta área foram realizados três levantamentos com ecobatímetro multifeixe em dias diferentes, todos com maré enchente, tendo atingido Ordem Especial pela S-44 da OHI. Análises permitiram avaliar a velocidade de deslocamento das ondas de fundo apontando valores entre 0,17m/dia a 1.29m/dia. Em consequência, demonstrou-se que recoberturas batimétricas produzem registros diferentes por causa da movimentação das feições do fundo e não por inconsistências do processo de aquisição dos dados, e que a variância do fenômeno pode e deve ser destacada da variância da medição.

Palavras-chave: Morfodinâmica de Fundo, Batimetria Multifeixe, Incerteza de Medição.

ABSTRACT

Present study addresses the problem of sea surface determination in areas where seafloor morphology presents sediment transport patterns compatible with moving sand waves. Seafloor dynamics produces different bathymetric surface for different ensonification, and that differences being the more sensitive the longer the time elapsed between subsequent coverages. Main objective is to describe seafloor behavior under navigation safety concern in areas subject to seabed dynamics as in Paranagua Estuary Complex. From this characterization it is possible to contribute with suggestions for the analysis of bathymetric surveys carried out in those and similar areas. A square area with 300m side was chosen small enough as to reduce survey time in order to minimize seafloor features displacement effects. Three surveys were carried out on this area with multi-beam echo-sounder on different days each one on rising tide, having achieved Special Order under IHO S-44. Analysis allowed evaluation sand waves displacement speed between 0.17m / day and 1.29m / day. In consequence, it has been demonstrated that bathymetric surveys over same areas produce different records because of the bottom features displacement and not because of inconsistencies on data acquisition procedures, and that variance due to phenomenon itself must be detached from variance due to measurement.

Keywords: Seabed Morphodynamics, Multibeam Bathymetry, Measurement Uncertainty.

1- INTRODUÇÃO

O leito marinho composto essencialmente de sedimentos arenosos, com feições de formas ondulares, tanto estacionárias como em deslocamento são reportados em diversas publicações ao redor do mundo. A Organização Internacional de Hidrografia, por exemplo, cita na S-44 pg. 4 que “Também deve ser

objeto de consideração o fato de que o solo marítimo é dinâmico (por exemplo, ondas de areia) e que levantamentos conduzidos em qualquer uma das Ordens dentro destas especificações rapidamente tornar-se-ão obsoletos.” (IHO, 2008), além disso, cita em seu Manual suas preocupações com detecção de feições em áreas de fundo com ondas de areia (IHO,

2005, Cap 4, item 2.3.4.13 e 3.1.2.2). De Visser (1997) publicou relatório com foco na formação, tamanho e dinâmica de ondas de areia. Em Becker et al. (2007) encontra-se interessante estudo baseado em observações por vídeo, medindo características ondulares no solo submerso próximo à costa. Idier e Astruc (2004) apresentam estudo sobre formação de ondulações (ripples) e mega ondulações (megaripples) com base em rugosidade.

O Complexo Estuarino de Paranaguá – CEP abriga uma ativa região portuária de escoamento da produção agrícola. O canal da Galheta é a principal via de acesso aos terminais do CEP. Regiões de desembocaduras estuarinas são áreas de dinâmica complexa, apresentando variações da linha de costa e do relevo submarino (Lamour, 2000).

As correntes de vazante e enchente das marés de sizígia possuem energia suficiente para iniciar a mobilização de sedimentos arenosos de granulometria fina no leito marinho. A circulação costeira associada ao transporte de sedimentos é relacionada com a erosão praial e o preenchimento do canal de navegação que conduz ao Porto de Paranaguá, (Noernberg et al. 2007) aberto na década de 1980. O fenômeno da movimentação do fundo marinho não se apresenta na mesma magnitude em toda a CEP.

Em especial Paranaguá tem recebido da Universidade Federal do Paraná contribuições acadêmicas de cunho prático importantes para a compreensão do comportamento morfodinâmico do solo submerso do acesso ao porto de Paranaguá e Antonina. Lamour (2000) na sua dissertação de mestrado e (2007) na sua tese de doutorado descreve amplamente a CEP em geral e as ondas de areia no canal da Galheta em particular. Outra tese de doutorado que merece atenção é a de Noernberg (2001) da mesma Universidade, que oferece, entre outras contribuições uma tabela contendo a caracterização dos processos estuarinos e costeiros relacionados a transporte de sedimentos identificados no CEP e região costeira adjacente. Araujo (2001) contribui para o entendimento da dinâmica sedimentar no setor interno da baía de Paranaguá.

Feições subaquáticas arenosas de morfologia ondular no CEP foram relatadas por diferentes autores. Veja-se por exemplo Cattani (2012) referindo-se a “mudanças geomorfológicas associadas aos processos de transporte dos sedimentos”.

A justificativa desta pesquisa decorre da obtenção de resultados de levantamentos batimétricos nos canais de acesso aos terminais do CEP apresentando discordâncias entre recoberturas, as quais não decorrem da incerteza da medição, nem de qualquer tipo de erro de levantamento ou processamento.

O aparecimento de resultados discordantes a cada nova ensonificação de uma mesma área que se

faça suficientemente espaçada no tempo pode decorrer dos seguintes fatores: (1) erros de medição ou processamento, desde erros de montagem, instalação e calibração até operação inadequada dos equipamentos, ver S-44 anexo A.4 (IHO, 2008); (2) modificação morfológica do solo marinho por motivo de intervenção humana entre uma ensonificação e outra, tal como dragagem ou tráfego de navios; (3) modificação morfológica do solo marinho por evento climático severo, tal como ressacas; e (4) transporte intenso de sedimentos segundo padrões derivados da hidrodinâmica local.

Excluindo-se as possibilidades triviais de erro humano, intervenção de dragagem e eventos climáticos severos, resta a hipótese do comportamento morfodinâmico do solo marinho. Este fenômeno pode ser descrito com o auxílio de sucessivas batimetrias da mesma área feitas em momentos adequadamente espaçados, tal que uma mesma feição possa ser identificada em cada batimetria, permitindo determinar o deslocamento do piso marinho, inclusive medindo sua velocidade.

A partir deste estudo é possível contribuir com sugestões para boas práticas em levantamentos batimétricos multifeixe e para procedimentos de análise adequados para levantamentos no CEP e em áreas similares, dentro da estrita conformidade com a S-44 (IHO, 2008). É possível também sugerir critérios de definição da superfície navegável sob a égide da segurança da navegação em áreas sujeitas à dinâmica de fundo.

O presente estudo foi realizado com o objetivo geral de descrever o comportamento de solos marinhos dotados de morfodinâmica com variação temporal típica do CEP. Especificamente, este estudo objetiva decompor o desvio padrão resultante de medições batimétricas sucessivas sobre a mesma área, em dois fatores: um atribuível à incerteza do processo de medição e outro atribuível à variância do fenômeno.

2- MATERIAIS E MÉTODOS

Para a descrição da morfodinâmica de fundo na entrada do Canal da Galheta em Paranaguá foi delimitada uma área de 300m por 300m, propositadamente reduzida em extensão para que um levantamento completo de Ordem Especial com recobertura de 100% pudesse ser executado num período de tempo suficientemente curto para garantir a obtenção da superfície sem tempo hábil para que a morfologia mude. Sobre esta área foram realizados levantamentos com ecobatímetro multifeixe operando na faixa de frequência entre 200 e 400kHz. Foram três levantamentos em três dias diferentes, seguindo as mesmas linhas de navegação que foram planejadas paralelas ao eixo do canal, o que implica que os feixes de varredura são transversais ao eixo do canal. Os dias não foram consecutivos devido às condições de mar exigíveis para a qualidade dos resultados. Os três

levantamentos ocorreram na maré enchente. Com estas providências se garante que o resultado do levantamento de cada dia separadamente representa a superfície estável para todos os efeitos práticos e, por conseguinte, a variância obtida é relativa tão somente ao processo de medição, livre da influência do deslocamento do piso marinho. Este deslocamento, por sua vez, produz um aumento da variância quando as batimetrias sucessivas são combinadas para formar uma única medição.

Os levantamentos foram realizados nos dias 03/JUL, 05/JUL e 06/JUL de 2016. Foram executados em conformidade com os padrões estabelecidos pela S-44 da OHI (IHO, 2008) com ensonificação completa. Adicionalmente foi realizada recobertura de 100%. Os dados brutos foram processados sem uso de filtros automáticos, para eliminar quaisquer influências dos algoritmos sobre a determinação da superfície. O programa utilizado foi o CARIS HIPS and SIPS da Teledyne CARIS, Inc, obtendo-se Ordem Especial para cada um dos dias. Cada dia de levantamento produziu um modelo numérico de superfície, todas livres de ambiguidades. Desta forma a análise das três superfícies em sequência expressa o deslocamento das feições do piso marinho.

As análises comparativas foram realizadas sobre as três superfícies batimétricas tomadas como uma sequência temporal, utilizando três técnicas diferentes. A primeira foi a comparação entre as três superfícies utilizando imagens 2D georreferenciadas obtidas dos modelos numéricos de superfície elaborados com o programa Surfer da Golden Software, Inc. As imagens possuem o mesmo enquadramento e a mesma escala cartográfica, permitindo avaliar o deslocamento. A segunda e a terceira técnicas foram aplicadas com o suporte do *Subset Editor* do programa HIPS. Uma das análises fez a comparação entre perfis em cortes verticais paralelos à direção dos feixes de varredura. A outra análise fez a comparação entre perfis em cortes verticais perpendiculares à direção dos feixes de varredura.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo permitiu determinar uma morfologia composta por feições compatíveis com ondas de areia. Constatou-se que as cristas das ondas de areia são aproximadamente paralelas às linhas de varredura do feixe, ou seja, perpendiculares ao eixo do canal. Nas imagens 2D georreferenciadas se podem identificar ocorrências em boa quantidade nas quais uma mesma feição persiste em cada uma das três superfícies, porém reposicionadas indicando deslocamento. O fenômeno do deslocamento do conjunto de todas as feições pode ser descrito por um campo vetorial cuja modelagem matemática de intensidades e direções é tarefa que foge ao escopo deste trabalho. Sobre esse assunto veja-se, por exemplo, Veiga et al. (2005). Entretanto, algumas

determinações de velocidade de deslocamento das ondas de areia, tomadas ao acaso, foram realizadas a partir de comparações sobre as superfícies 2D e sobre os perfis perpendiculares às ondas de areia para permitir avaliar a influência deste comportamento no resultado de levantamentos hidrográficos. Os resultados apontaram deslocamentos entre 0,17m/dia a 1,29m/dia. A direção de propagação das ondas de fundo é paralela ao eixo do canal.

Portanto, para caracterizar claramente as ondas de areia, o corte vertical feito com o *Subset Editor* deve seguir a direção paralela ao eixo do canal, e portanto na direção de propagação das ondas de areia, no presente caso, perpendicular ao feixe de varredura. A figura 1 ilustra um destes perfis aplicado sobre os três levantamentos, representados por uma cor associada a cada dia. Observa-se prontamente que a superfície relativa a cada um dos dias é perfeitamente determinada.

A característica ondular da superfície não aparece com clareza quando os perfis são tomados segundo um corte vertical orientado na direção paralela aos feixes de varredura da ecossonda, como normalmente é adotado no processamento da medição. Este tipo de análise de batimetrias é adequado a superfícies suaves e de dinâmica lenta. A figura 2 apresenta os perfis comparativos para os três dias de levantamento, cada qual com sua cor. A orientação adotada não expressa a verdadeira morfologia das ondas de areia. Essa orientação também não é capaz de expressar o deslocamento destas ondulações. O efeito de espalhamento registrado nos perfis se deve à reflexão do sinal acústico nos taludes das feições ondulares. Esse efeito de espalhamento é descaracterizado quando o perfil de corte é tomado perpendicular às linhas de crista das ondas.

O item 5.3 da S-44 (IHO, 2008) estabelece que todo dado deve ser atribuído à sua incerteza tanto de posição quanto de, quando relevante, profundidade. Esta recomendação é atendida pelo *Quality Report* do programa HIPS e foi usada neste estudo para expressar matematicamente a interferência da variância intrínseca ao fenômeno sobre a variância da medição. Foram tabulados os desvios-padrão por ângulo do feixe obtidos da superfície de cada um dos três dias como superfícies separadas e também das três superfícies combinadas em uma única medição. A figura 3 mostra o resultado em forma de gráfico, onde a superfície combinada mostra um desvio-padrão consistentemente elevado em relação aos desvios-padrão isolados. Em média os desvios-padrão da superfície combinada estão 0,059m acima dos desvios-padrão das superfícies isoladas. Este comportamento decorre do espalhamento típico da nuvem de profundidades formada por recoberturas separadas por tempo suficiente para captar o movimento do fundo.

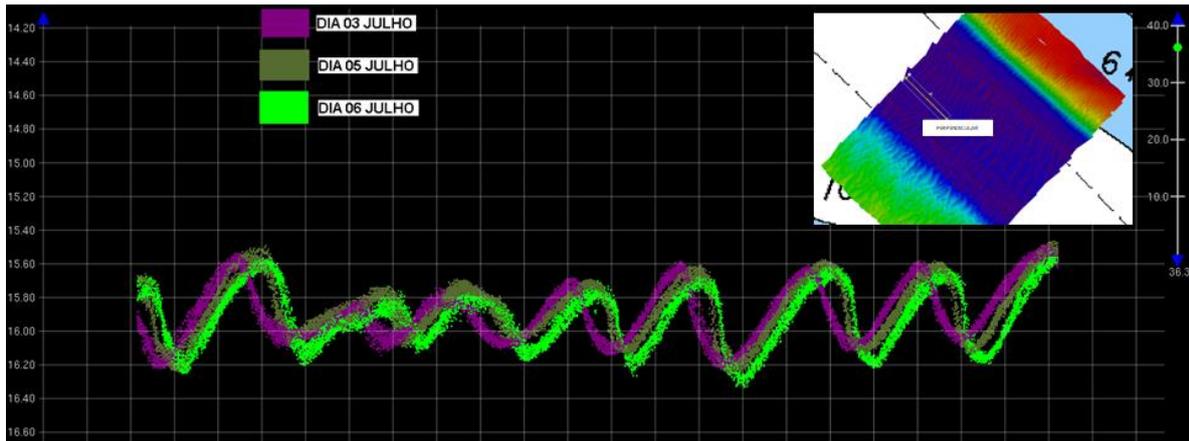


Figura 1. Corte vertical perpendicular à direção do feixe de varredura e portanto perpendicular ao deslocamento das ondas de areia. Cada um dos dias, representados em cor diferente, apresenta uma superfície coerente. Considerados em conjunto o deslocamento das feições tende a misturar a variancia do fenômeno na janela de tempo com a incerteza vertical da medição.

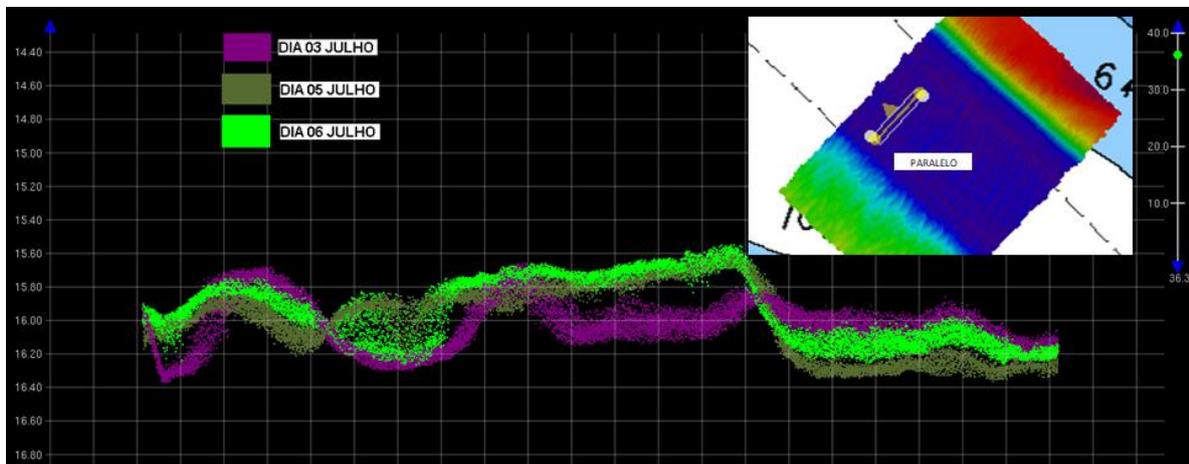


Figura 2. Corte vertical paralelo à direção do feixe de varredura. Os perfis relativos a cada dia isolado, representados cada qual com sua cor, não conseguem exprimir a morfologia do piso submerso, assim como seu conjunto inibe a ideia de deslocamento.

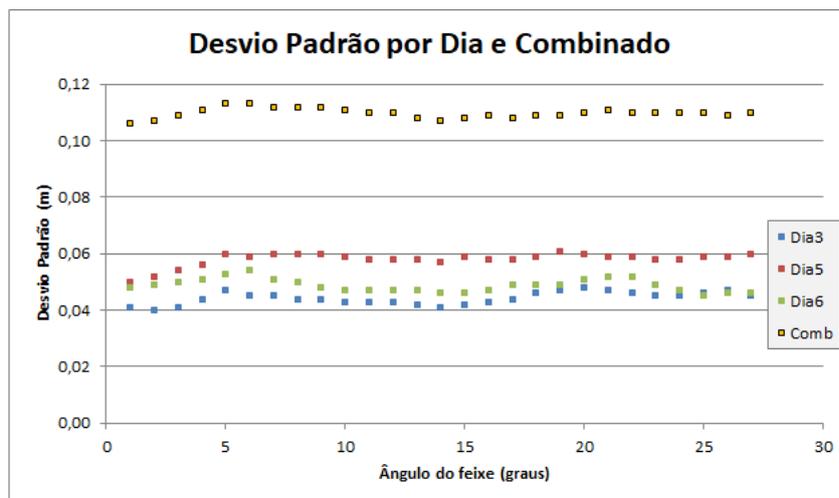


Figura 3. Gráfico do desvio padrão por ângulo de abertura do feixe, para cada dia de levantamento e para a superfície combinada dos três dias.

4- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo descreveu o comportamento dinâmico de um trecho ondular do fundo marinho do CEP, tendo obtido valores da velocidade de deslocamento das ondas de areia na área batimetrada. Adicionalmente foi possível reconhecer a interferência da variância deste fenômeno sobre a incerteza da medição em levantamentos hidrográficos multifeixe e mostrar que é possível decompor ambos os fatores através de procedimentos analíticos apropriados.

Em decorrência da aplicação da recobertura de 100% nos levantamentos batimétricos multifeixe executados sobre pisos marinhos ondulados que se movimentam sob ação de correntes e ondas, se obtém uma incerteza vertical não relacionada exclusivamente com o sistema de medição, não podendo assim servir de base analítica para a qualidade do levantamento.

Em presença de ondas de areia móveis a prática da recobertura completa e das linhas de verificação introduz na medição um componente de incerteza derivado da dinâmica do solo, com maior ou menor intensidade dependendo do intervalo de tempo entre reensonificações.

A caracterização morfológica de superfícies com ondas de areia móveis, deve ser elaborada em cortes verticais segundo a direção de deslocamento das ondas de fundo, para permitir a determinação de suas amplitudes e períodos, e velocidade de deslocamento.

A questão central da segurança da navegação é atendida sempre com a adoção da superfície mínima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IHO, 2008, Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication No. 44. International Hydrographic Organization. 5th Edition, February 2008. Disponível em: https://www.iho.int/iho_pubs/standard/S-44_5E.pdf [Ago 2017].

IHO, 2005, 2011, Manual On Hydrography. International Hydrographic Organization. 1st Edition May 2005, Corrections 2011.

Araujo, 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. Boletim Paranaense de Geociências, n. 51, p. 91-114, 2002. Editora UFPR

Becker, Y. L.; Firing, J. Aucan, R. Holman, M. Merrifield, e G. Pawlak, 2007, Video-based observations of nearshore sand ripples and ripple migration. J. Geophys. Res., 112, C01007, doi:10.1029/2005JC003451.

Carmo. J.S.A., 2016, Processos físicos e modelos computacionais em engenharia costeira. Imprensa da Universidade de Coimbra. Coimbra, 454 páginas.

Cattani. P.E. 2012, Caracterização Geomorfológica E Sedimentológica do Eixo E-W do Complexo Estuarino de Paranaguá. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos da Universidade Federal do Paraná, 45 páginas.

De Visser, A. 1997, Sand Wave Study. Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California. 52 páginas.

Idier, D. e D. Astruc, 2004, Mechanisms of megaripple generation: from dunes to megaripples. Marine Sandwave and River Dune Dynamics – 1 & 2 April 2004 - Enschede, the Netherlands

Lamour. M.R. 2000, Dinâmica Sedimentar do Canal da Galheta, Via de Acesso ao Porto de Paranaguá - PR. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná. 115 páginas.

Noernberg, M.A. 2001. Processos Morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá – Paraná - Brasil: Um Estudo a Partir de Dados in situ e Landsat-TM. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná. 142 páginas.

Noernberg, M.A. , M.; Marone, E. e Angulo, R. 2007. Coastal Currents and Sediment Transport in Paranaguá Estuary Complex Navigation Channel. Boletim Paranaense de Geociências, n. 60-61, p. 45-54, 2007. Editora UFPR.

Veiga, F.A.; Rodolfo J.A.; Marone, E.; Brandini, F.P. e Soares, C.R. 2005. Padrões de Transporte de Sedimentos Baseado em Três Programas Geradores de Vetores de Tendências de Transporte a Partir de Parâmetros Granulométricos na Porção Sul do Delta de Desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá - Sul Do Brasil. Boletim Paranaense de Geociências, n. 57, p. 75-87, 2005. Editora UFPR.