

Mapeamento por sonar de varredura lateral das formas de leito do Estuário Potengi

*Eugênio Pires Frazão¹, Helenice Vital¹, Klaus Schwarzer² & Karl Stattegger²

¹ Programa de Pós-Graduação e Pesquisa em Geodinâmica e Geofísica - PPGG - UFRN - Brasil

² Institute of Geosciences Christian-Albrechts - University of Kiel - Germany

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Side-scan sonar, combined with echo-sounding and sediment sampling, has been employed to examine and map the distribution of sediments, bedform types and bedform geometries in the Potengi Estuary. The Potengi river Estuary is located in the eastern coastline of the Rio Grande do Norte State, being inserted in the geological context for the coastal Pernambuco-Paraíba basin and spreading over 20 km with mesotidal regime. Much of this dynamic sector is characterized by mobile, fine to slightly gravelly sands. The most abundant bedforms are small to large dunes (wavelength 2.87 - 95.12m, height up to 4.3m) of varying sinuosity and superposition of asymmetries which are indicative of the dominance of flood currents and marine derivation of sands.

Introdução

O trabalho descrito neste artigo faz parte de um estudo sistemático de sensoriamento remoto acústico da distribuição de sedimentos, tipos de formas de leito de parte do Estuário do Potengi. O principal método acústico usado foi o sonar de varredura lateral, conjuntamente com a eco-sonda de feixe vertical.

No decorrer das últimas décadas, o estudo intensivo das feições sedimentares de fundo nos diferentes ambientes aquosos, marinhos e continentais, promoveram um aumento considerável do conhecimento e compreensão dos tipos e escalas da morfologia sedimentar, principalmente em áreas onde as correntes de fundo são fortes e persistentes (Flood 1983).

Levantamentos realizados com o sonar de varredura lateral, em diferentes ambientes aquáticos e em diferentes partes do globo, revelaram a complexidade da distribuição dos sedimentos superficiais e demonstraram a inadequação da classificação do fundo do mar baseada inteiramente em amostras pontuais de sedimentos (Bennett *et al.* 1992). Ao contrário dos dados obtidos a partir da amostragem pontual de sedimentos, os levantamentos com sonar de varredura lateral produzem dados espacialmente contínuos sobre a natureza da superfície do leito, em termos de níveis acústicos de feixes refletidos, fornecendo um potente meio de avaliar a distribuição das diferentes características subaquáticas, bem como a transição entre elas. Entretanto, a coleta de sedimentos é imprescindível para a interpretação dos sonogramas registrados pelo sonar de varredura lateral.

Em geral, o levantamento com sonar de varredura lateral tem sido utilizado para observar feições de grande escala, como as formas de leito do tipo *duna* (Goedheer & Misdorp 1985; Harris & Collins 1985; Berne *et al.* 1993; Kostaschuk & Villard 1996), mas também pode ser utilizado para mapear elementos menores de rugosidade, tais como os vários tipos de sedimentos (Hobbs 1986).

Na maioria das vezes, uma mudança de padrão do sonograma corresponde tanto a uma mudança no tipo de sedimento, como a efeito de contraste como, por exemplo, ao longo das margens dos canais. Contudo, as várias intensidades de tons registradas num sonograma resultam da força do sinal refletido e do ângulo de incidência da onda acústica. A intensidade dos tons também está relacionada à irregularidade do fundo, que por sua vez depende da densidade, porosidade e tamanho do grão dos sedimentos. Os sonogramas mostram apenas as relações relativas entre as intensidades de tons e as características do sedimento, de modo que, em termos gerais, a rocha aparece mais escura, seguida pelo cascalho, depois a areia, enquanto os sedimentos lamosos de grão fino aparecem em tons mais claros (Hunter *et al.* 1982).

Neste estudo, os sonogramas foram interpretados tanto (1) quanto à variedade e distribuição espacial da intensidade de tons registrados, para escolher os locais de amostragens de acordo com a distribuição espacial, quanto (2) pela distribuição das dimensões das *dunas*.

Área de Estudo

O Estuário Potengi é um dos estuários maiores do nordeste brasileiro, localizado no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte (Figura 1). Tem um comprimento de 20 km em direção a cidade de Macaíba, com até 5 km de largura e profundidade máxima de 15m no canal principal de navegação. O Estuário do Potengi apresenta um regime de mesomaré, recebendo a descarga fluvial dos rios Potengi e Jundiá.



Figura 1 - Localização da área de estudo.

Materiais e Métodos

Uma levantamento sistemático com sonar de varredura lateral foi realizado utilizando embarcações pertencentes à Marinha do Brasil entre março e junho de 2002 atingindo cobertura total da área de estudo. O sistema de sonar de varredura lateral empregado durante a primeira temporada no campo em março de 2002 foi o modelo 272T da EG&G, operando numa frequência de 500 kHz e registrando num gravador de papel seco, com 16 diferentes tons de cinza, apresentando uma resolução de 0.13m para o range de 50 metros. O sistema de sonar de varredura lateral empregue depois de maio de 2002 foi o sonar HYDROTRAC da Odom Hydrographic Systems, operando numa frequência baixa de 200 kHz, registrando num gravador de papel térmico, com 8 tons diferentes de cinza, dispondo de uma resolução de 0.01m.

Os levantamentos de eco-sondagem foram realizados em áreas onde as formas de leito não podiam ser claramente identificadas ou medidas a partir dos sonogramas. O sonar de ondas verticais usado neste estudo foi o ecobatímetro HYDROTRAC operando numa frequência de 200 kHz. Para o posicionamento dos dados levantados foi utilizado o GPS modelo GP-31 da Furuno, corrigidos com dados do DGPS modelo GR-80 via *link* de rádio.

Uma interpretação preliminar dos sonogramas revelou a variedade e distribuição espacial das intensidades de tons registrados e os locais de amostragem de sedimentos foram escolhidos de acordo com esta distribuição espacial com o propósito de coletar amostras a fim de calibrar cada área de intensidade diferenciada de tons. Assim, foram coletadas 48 amostras de sedimento de fundo com o amostrador do tipo *van veen*. A análise granulométrica das amostras foi realizada no granulômetro a laser modelo 1180L da CILAS, com um range de 2mm a 2 microns. Em seguida, os valores obtidos na análise granulométrica foram plotados em histogramas e curvas acumulativas construídas em escalas aritméticas segundo Folk (1974), que classifica o sedimento de acordo com as proporções de cascalho (>2mm), areia (0.0625 - 2mm) e lama (< 0.0625mm) usando um diagrama ternário que define quinze principais grupos texturais.

Os sonogramas foram também interpretados pela distribuição das dimensões das *dunas*. O comprimento de ondas das *dunas* é geralmente fácil de se medir devido à geometria do deslocamento da pulsação acústica através de água e sua reflexão.

O comprimento das *dunas* registradas foi extraído diretamente dos sonogramas quando as cristas das *dunas* estavam paralelas à linha de levantamento, fazendo-se correções apropriadas da distorção através da linha, com a ajuda de marcas de escala diagramada que neste estudo foram separadas a cada 88 e 214 metros, para os equipamentos de varredura lateral da Odom e EG&G, respectivamente. Para se obter a altura das *dunas* com os registros sonográficos adquiridos com o sensor da EG&G fez-se necessário medir a sombra acústica (L_s) produzida, a altura do peixe rebocado acima do fundo (H_f) e a distância inclinada do peixe rebocado até à duna (R_s), pois ao contrário do comprimento de

onda, a altura das *dunas* (H_i) não pode ser medida diretamente dos sonogramas. Com a ajuda destas medidas, a altura de uma *duna* pode ser calculada como se segue:

$$H_i = \frac{H_f \times L_s}{R_s + L_s}$$

Contudo, isto só é possível se o registro sonográfico mostrar uma zona de grande reflexão com uma zona de sombras acústicas por detrás. Nos sonogramas registrados com o sensor da Odom modelo HYDROTRAC, operando na frequência de 200 kHz, a altura das formas de leito "*dunas*" foi medida diretamente do registro, a partir do primeiro retorno do sinal acústico do fundo, sendo necessárias apenas algumas correções devido ao ângulo de 45° criado entre o feixe acústico e o fundo, o chamado *ângulo de incidência*.

Distribuição dos sedimentos

O mapa de classificação textural dos sedimentos (Figura 3) amostrados na área de estudo assemelha-se à forma do mapa batimétrico (Figura 2). A fácies sedimentar principal encontrada no estuário do rio Potengi, entre a Ponte do Igapó e sua desembocadura, foi a fácies arenosa. As áreas mais profundas do canal estuarino estão capeadas com sedimentos mais grossos, tipicamente seixos e areia com cascalho, juntamente com fragmentos de conchas calcáreas. Estes organismos, que vivem em água salgada e salobra, ocorrem em leitos espessos descendo de um nível médio de maré até uma profundidade de aproximadamente 10m.



Figura 2 - Batimetria simplificada da área de estudo e localização das figuras 5 a 9.

Bancos conchíferos, constituídos de areia com cascalho e fragmentos de conchas calcárias, são observados no canal de navegação próximo à Ponte do Igapó. A presença desses bancos conchíferos havia sido anteriormente identificadas por Salim & Coutinho (1973), que observaram horizontes de conchas com três metros de espessura em furos de sondagem, realizados para a construção da ponte rodó-ferroviária de Igapó.



Figura 3 - Distribuição das principais fácies texturais no Estuário do rio Potengi, segundo a classificação de Folk (1974). Os limites de fácies foram traçados a partir da integração dos dados sedimentológicos com dados sonográficos.

Formas de leito sedimentares

A fácies sedimentar dominante, composta de areia e areia com cascalho esperso capeia a maior parte da área de estudo. Em termos gerais, o leito do estuário Potengi é caracterizado por *dunas* pequenas a grandes, com comprimentos de onda na razão de 2.87 - 95.12m, alturas de até 4.3m e com variada sinuosidade e sobreposição. A classificação de formas de leito aqui utilizada, segue as indicações de Ashley (1990), incluindo as revisões de Dalrymple & Rhodes (1995) baseadas na morfologia. De acordo com esta classificação, todas as formas de leito transversais em larga escala (excluindo os *ripples* e *antidunas*) ocupam uma posição similar na seqüência do regime de fluxo inferior, que posteriormente é modificada por dados tais como granulometria, forma e sobreposição. A ampla variedade de formas reflete as várias condições hidrodinâmicas, assim como o tipo de sedimentos. Na zona do canal principal, as *dunas* registradas foram principalmente de médias a grandes em relação ao comprimento de onda e altura, além de apresentarem outras feições de sobreposição simples.

Segundo Ashley (1990), as grandes formas de leito estão presentes em ambientes recentes arenosos onde as profundidades da água são maiores que 1m, os sedimentos são mais grossos que 0.15 mm (areia muito fina) e as velocidades médias de corrente são maiores que 0.4 m/seg.

Aplicando-se o diagrama log-log da altura (H) versus comprimento de onda (L) proposto por Flemming (1988), tornou-se possível fazer a diferenciação entre as formas de leito tipo *ripples* e *dunas*, ambas de regime de fluxo inferior (Figura 4).

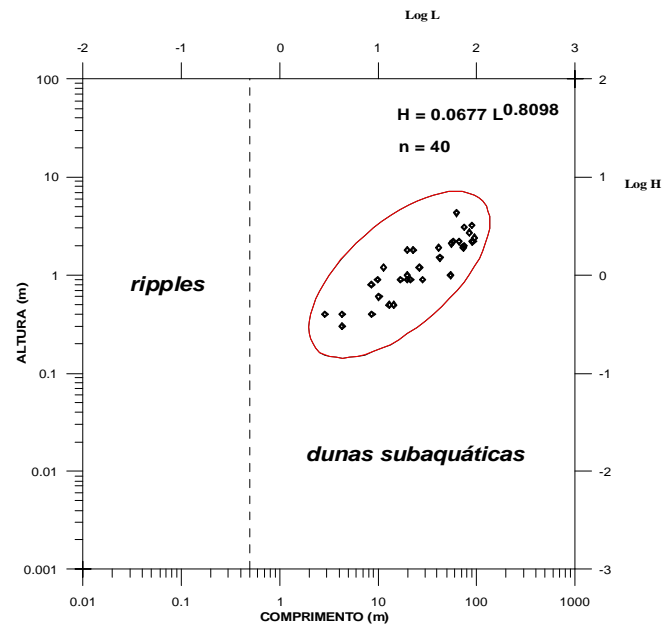


Figura 4 - Diagrama de Flemming (1988) do log-log da altura (H) versus comprimento (L) de 40 formas de leito subaquáticas transversais ao fluxo no Estuário Potengi.

Analisando-se o gráfico acima, observou-se que ao longo do canal estuarino do rio Potengi, as menores formas de leito foram identificadas como *dunas* com pequeno comprimento de onda.

A maioria das *dunas*, registradas pelos dois tipos de sonar de varredura lateral, revelou fortes assimetrias que são indicativas da dominância de correntes de enchente e vazante da maré. A assimetria das formas de leito ao longo do canal estuarino é um forte indicativo da influência marinha no estuário, sendo assim o principal controlador da sedimentação ao longo destes ambientes dominados por maré.

O levantamento com o sonar de varredura lateral revelou mudanças abruptas, até então não identificadas, na morfologia das formas de leito da área de estudo; tanto o comprimento das ondas das *dunas* como a altura especialmente, variaram em tamanho ao longo de distâncias de alguns metros, como também a sinuosidade das *dunas*. Estas mudanças abruptas são melhor ilustradas por meio de sonogramas. A Figura 5 é um sonograma que apresenta a linha de levantamento longitudinalmente ao canal principal (localização mostrada na Figura 2) que mostra claramente mudanças da morfologia da forma de leito revelando *dunas* com pequenos comprimentos de ondas (2-3m), seguidas por *dunas* com médio comprimento de ondas de aproximadamente 5m. As mudanças na morfologia das formas de leito, mostradas na Figura 5, estão relacionadas com mudanças na batimetria.

Mudanças abruptas na morfologia da forma de leito e no tipo de sedimento do fundo relacionadas com a variação na batimetria também foram registradas em outros locais. Por exemplo, o sonograma mostrado na Figura 6, adquirido em frente ao Canal do Baldo com direção para NE, revela a presença de um leito plano, ocorrendo

também *dunas* com pequeno e médio comprimento de ondas (4-10m). Este padrão relativamente plano é caracterizado por sedimentos finos provenientes do Canal do Baldo, típico de assoreamento do canal principal de navegação por partículas de resíduos sólidos lançados no rio Potengi.

Comparando-se os sonogramas da Figura 7 e 8, levantados com o sensor da *Odom* e *EG&G*, respectivamente, observa-se que no sonograma adquirido pela *Odom*, as formas de leito só foram possíveis de serem visualizadas em 2-D, enquanto com o sonar da *EG&G* a crista das *dunas* sinuosas podem ser visualizadas em 3-D. Porém, ambos apresentaram mudanças igualmente abruptas, não só na morfologia das formas de leito mas também no tipo de sedimentos revelada pelas intensidades de tons escuros e claros. Os dois tipos de registros mostraram mudanças abruptas nas intensidades de tons, com tons mais escuros sendo causados por sedimento mais grosseiros e as intensidades de tons mais claros sendo causados por sedimentos mais fino. Por outro lado, a medição da altura das formas de leito é mais precisa e confiável com os registros adquiridos com o sensor da *Odom* do que com o sensor da *EG&G*, no qual altura é medida através da sombra acústica de cada feição (Figura 8).

Nos dois sonogramas podemos observar com clareza a depressão escavada no leito pelo vórtice criado pelo espigão do 17º G.A.C. Na Figura 8, na zona da depressão, podemos visualizar a morfologia do fundo influenciada e controlada pela movimentação circular do fluxo turbulento. As Figuras 7 e 8 apresentam as maiores *dunas* identificadas ao longo do estuário entre Ponte do Igapó e a foz. Nesta região existem *dunas* com grande comprimento de ondas variando de 66 - 92m e altura de 2.2 - 2.7m.

Finalmente, a Figura 9 revela uma feição típica de assinatura acústica dos arenitos (*beachrocks*) tendo como características os tons escuros no registro e a sombra acústica gerada em tons mais claros. Na foz do Estuário Potengi, além dos *beachrocks* ocorrem sedimentos grossos com fragmentos de conchas calcárias.

Conclusões

As aplicações das imagens do sonar de varredura lateral confirmaram sua utilidade no mapeamento do leito do estuário, não só pelas variações da morfologia das formas do leito como distribuição dos sedimentos. A ecosondagem de alta resolução também desempenhou um papel importante na interpretação da assinatura acústica das formas de leito do tipo *duna*.

As causas das mudanças fortemente definidas na morfologia das formas de leito e tipos de sedimentos, quer sejam ou não controladas pela batimetria, devem ser causadas pela separação do fluxo da água próximo ao fundo nesta parte do Estuário Potengi. Isto reflete claramente variações da energia na coluna da água e os mecanismos dos processos envolvidos devem ser submetidos a um monitoramento contínuo.

Os tipos de formas de fundo encontradas são resultado da ação das correntes direcionadas das marés no

transporte dos sedimentos do fundo estuarino bem como do controle exercido pelo rio no padrão desse transporte. Os sedimentos arenosos respondem ao regime de fundo do Estuário Potengi formando vários tipos de formas de leito, cada uma delas em equilíbrio com diferentes profundidades, variação na velocidade do fluxo da corrente e no tamanho das partículas transportadas. As *dunas* localizadas na porção mais profunda do canal principal mostram pequenas diferenças entre suas cristas em função de discretas variações nas profundidades ali ocorridas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a ANP (Agência Nacional do Petróleo), pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor, através do programa de Recursos Humanos - PRH-22; aos Projetos (TRANSPETRO-CENPES/PETROBRAS) e PETRORISCO (FINEP/REDE 05/CTPETRO/CNPq) pelo suporte financeiro; a Marinha do Brasil - CPRN por ter cedido os meios flutuantes para elaboração deste trabalho; ao Institute of Geosciences Christian-Albrechts da Universidade de Kiel por ter cedido o sonar de varredura lateral da *EG&G* e ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - PPGG, pela disponibilização da infra-estrutura básica a execução desta pesquisa.

Referências

- Ashley G. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, **60**:160-172
- Bennett R.H., Li H., Richardson M.D., Fleischer P., Lambert D.N., Walter D.J., Briggs K.B., Rein C.R., Sawyer W.B., Carnaggio F.S., Young D.C. & Tooma S.G. 1992. Geoacoustic and geological characterization of surficial marine sediments by in situ probe and remote sensing techniques. In: R.A. Geyer (ed) *CRC Handbook of Geophysical Explora. at Sea*. Florida, CRC Press, 295-350
- Berne S., Castaing P., Ledrezen E. & Lericolais G. 1993. Morphology, internal structure, and reversal of asymmetry of large subtidal dunes in the entrance of the Gironde Estuary (France). *Journal of Sedimentary Petrology*, **63**:780-793
- Dalrymple R.W. & Rhodes R.N. 1995. Estuarine dunes and bars. In: *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*, edited by G.M.E. Perillo (Amsterdam Elsevier), 359-422 p.
- Flemming B.W. 1988. Zur Klassifikation subaquatischer, stromungstrans versaler Transportkorper: Boch. Geol. u. geotechn. Arb., v 29, 44-47 p.
- Flood R.D. 1983. Classification of sedimentary furrows and a model for furrow initiation and evolution. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **94**:630-639.
- Folk R.L. 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, Texas, Hemphill Publishing Company, 181 p.
- Goedheer G.J. & Misdorp R. 1985. Spatial variability and variations in bedload transport direction in a subtidal channel as indicated by sonographs. *Earth Surface Processes and Landforms*, **10**:375-386
- Harris P.T. & Collins M.B. 1985. Bedform distributions and sediment transport paths in the Bristol Channel and Severn Estuary, UK. *Marine Geology*, **62**:153-166
- Hobbs C.H. 1986. Side scan sonar as a tool for mapping spatial variations in sediment type. *Geo. Marine Letters*, **5**:241-245
- Hunter R.E., Thor D.R. & Swisher M.L. 1982. Depositional and erosional features on the inner shelf, Northeastern Bering Sea. *Geologie en Mijnbouw*, **61**:49-62

Kostaschuk R. & Villard P. 1996. Flow and sediment transport over large subaqueous dunes: Fraser River, Canada. *Sedimentology*, 43:849-863

Salim J. & Coutinho. 1973. Aspectos sedimentológicos do estuário do Rio Potengi, Natal, Rio Grande do Norte. *Estudos Sedimentológicos*, Natal, 3(4): 141-153

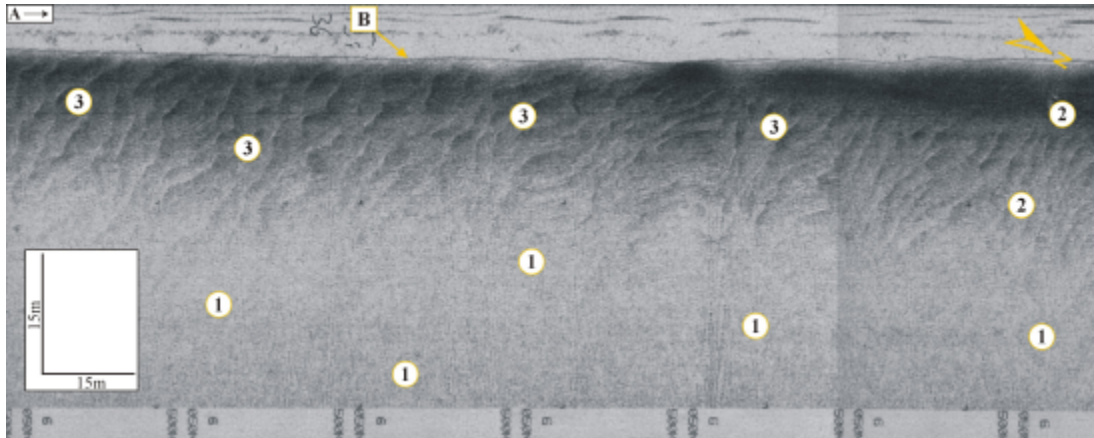


Figura 5 - Sonograma registrado com o sonar de varredura lateral da EG&G, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com a batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) leito plano / sedimento fino, (2) dunas com pequeno comprimento de ondas e (3) dunas com médio comprimento de ondas, para localização ver figura 2.

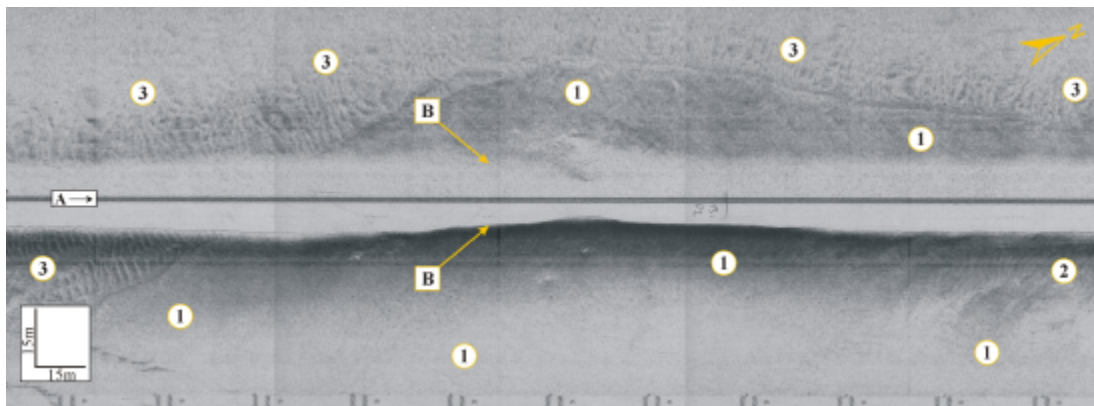


Figura 6 - Sonograma mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com a batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) leito plano / sedimento fino proveniente dos dejetos sólidos lançados "in natura" no rio Potengi, (2) dunas com pequeno comprimento de ondas e (3) dunas com médio comprimento de ondas, para localização ver figura 2.

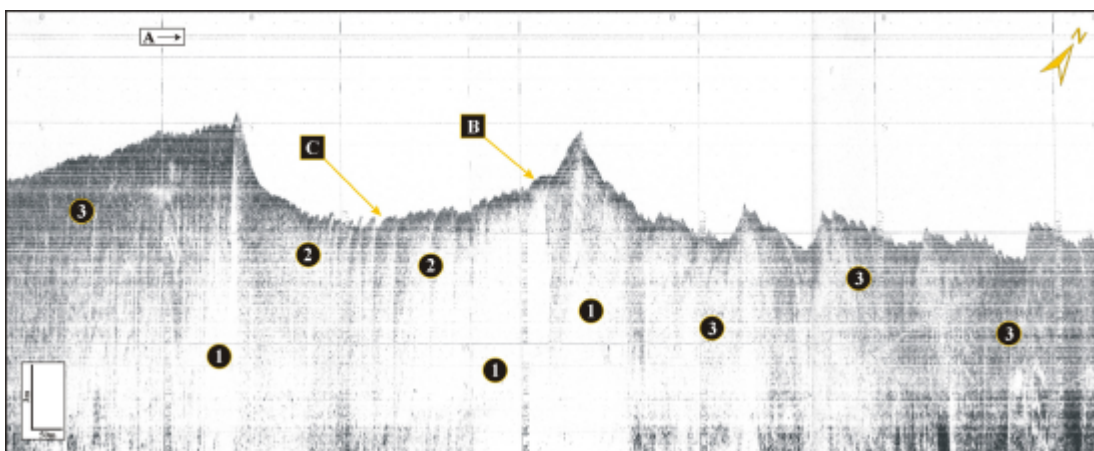


Figura 7 - Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da Odom, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (C) Depressão criada pelo fluxo turbulento originado pelo espigão do 17º G.A.C, formando um vórtice, (1) Leito plano / sedimento fino, (2) Dunas com médio comprimento de ondas e (3) Dunas com grande comprimento de ondas, apresentando outras morfologias de pequeno porte sobrepostas, para localização ver figura 2.

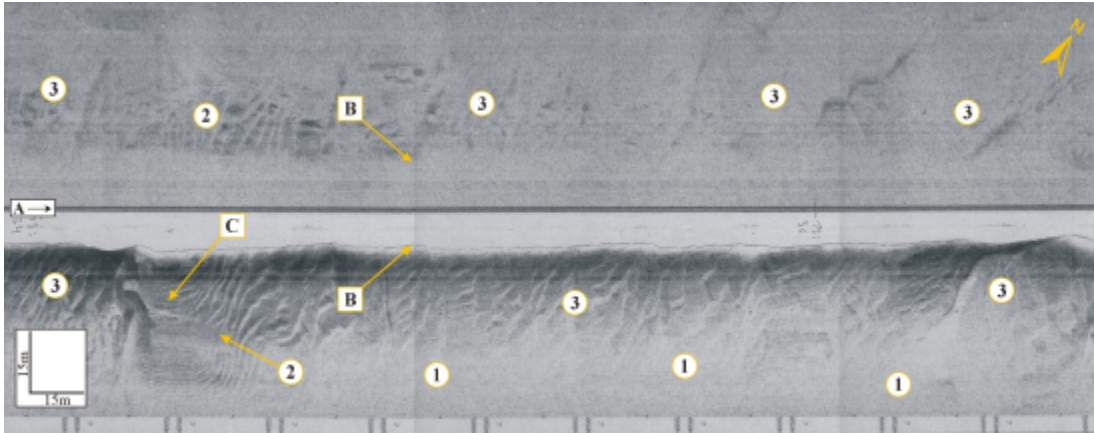


Figura 8 - Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da EG&G, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (C) Assimetria irregularmente descontínua com forma circular originada pelo vórtice do 17º G.A.C, (1) Leito plano / sedimento fino, (2) Dunas com médio comprimento de ondas e (3) Dunas com grande comprimento de ondas, apresentando outras feições de fundo de pequeno porte sobrepostas, para localização ver figura 2.

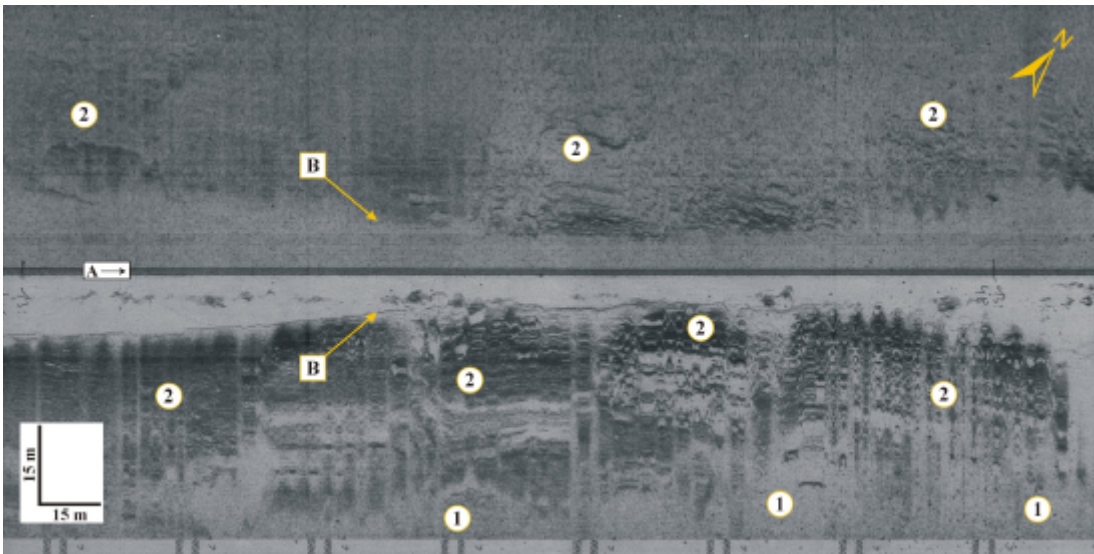


Figura 9 - Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da EG&G, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) Leito plano / sedimento grosseiro e (2) Arenitos praias (*beachrocks*) na foz do rio Potengi, reforçando a hipótese de que o rio não desaguava no local atual, para localização ver figura 2.