

Contribuição do RADARSAT-1 para estudo do fenômeno da pororoca no estuário do rio Araguari, Amapá

Valdenira Ferreira dos Santos¹
Laurent Polidori²
Odete Fátima Machado da Silveira³
Alberto Garcia Figueiredo Jr.⁴

¹ Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá - IEPA
Rod. JK, km 10, s/n – 68903-280 – Macapá - AP, Brasil
valdenira.ferreira@iepa.ap.gov.br

² Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes - ESGT
1, boulevard Pythagore, Campus Universitaire - 72000 - Le Mans, França
laurent.polidori@esgt.cnam.fr

³ Universidade Federal do Pará - UFPA
Caixa Postal 1611 – 66075-110 - Belém - PA, Brasil
silveira@ufpa.br

⁴ Universidade Federal Fluminense - UFF
Av. Litorânea, s/n, 4º andar - 24210-340, Niterói, RJ, Brasil
alberto@igeo.uff.br

Abstract. This paper describes the first register of the tidal bore in the radar images in the Araguari estuary at Amapá coast for mapping and recognition of natural dynamics. The area is influenced by the Amazon River, by tides (tidal bore) and by the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) that reduce the possibility the analysis of the optical images. The tidal bore is a phenomena that play a very important role in the morphology of the Araguari estuary. For this work were used four RADARSAT-1 images digitally processed in correlation with the environmental information acquired from field observation about the tidal bore: wave forms, propagation speeds, and dispersion characteristics of it in the Araguari estuary. Results demonstrated that the tide bore can be easily studied by the radar images by your high frequency of occurrence and the form and way that occurs in the estuary. Were founded a good correlation between the appearance of the phenomena in the image with information of the field works. Results demonstrate the value of convencional data radar for study of the tide bore in this area, highly dynamic and with difficult access.

Palavras-chave: remote sensing, amazon coast, coastal processes, sensoriamento remoto, processos costeiros, costa amazônica.

1. Introdução

Apesar das microndas associadas aos radares de abertura sintética não penetrarem nos corpos de água, os radares de abertura sintética são sensíveis a rugosidade da superfície das águas o que os torna uma boa ferramenta para estudar fenômenos ligados a rugosidade das águas superficiais. Esta propriedade tem sido utilizada para observações e estudo de ondas oceânicas superficiais e de ondas internas produzidas na plataforma continental (Araújo et al., 2002; Ouchi et al., 1997). Desta forma o fenômeno da pororoca pelo seu comportamento possuiria um forte potencial para ser detectada pelos radares de abertura sintética por produzir

uma elevação na superfície da água, semelhante a passagem de ondas ou frente de ondas e também pela geração de turbulências na superfície da água após a sua passagem. Estas turbulências geram ondulações desordenadas de diversas amplitudes que potencialmente também poderiam ser registradas.

O estuário do rio Araguari (Figura 1) é dos poucos estuários da costa brasileira sob a influência do fenômeno da pororoca. Este fenômeno ocorre na costa amazônica, no estuário do rio Mearim, no Maranhão para então apresentar-se novamente a partir da foz do Amazonas em direção a costa amapaense onde o fenômeno se intensifica. No estuário do rio Araguari o fenômeno possui sua maior expressão, em função da presença de áreas de macromarés, topografia de fundo com suaves declives em direção ao mar, presença de águas rasas e a terminação em forma de funil do estuário quase que perpendicularmente a entrada das águas das marés, além da presença de macromarés em sua foz (Santos et al., 2005). A onda da pororoca propaga-se dentro do estuário do rio Araguari até aproximadamente 50 km rio acima tendo sido registradas velocidades de 10 km/hora até 30 km/hora (Santos & Santos, 2008).

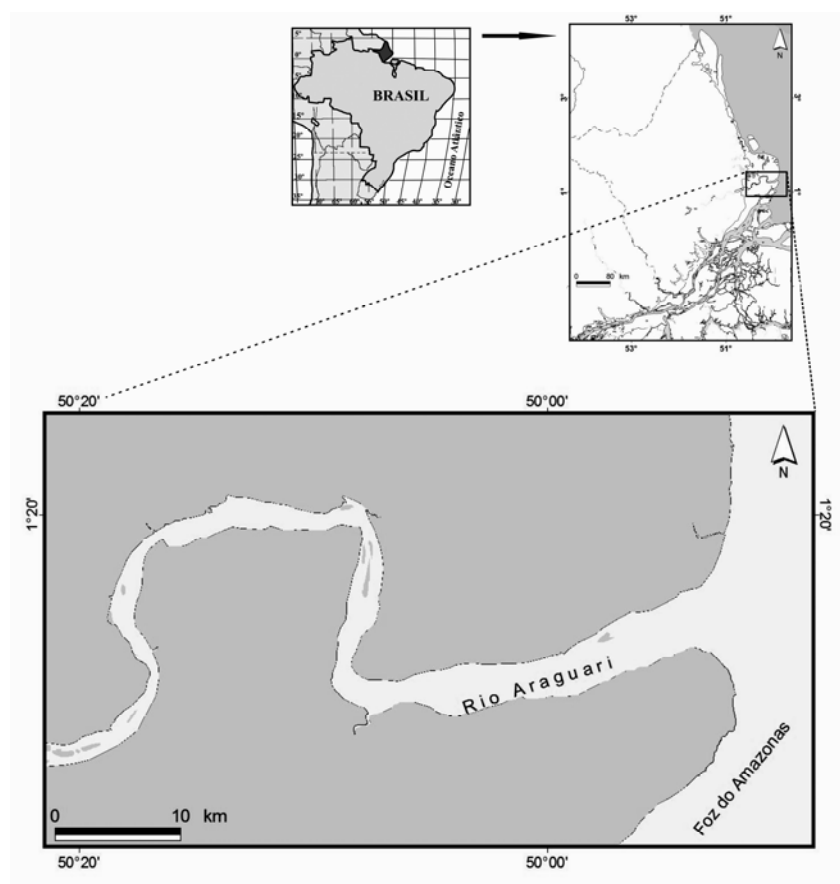


Figura 1. Localização do estuário do rio Araguari.

Recentemente vários estudos sobre a pororoca foram iniciados visando entender o fenômeno e sua propagação no estuário do rio Araguari. As informações obtidas em campo têm permitido o entendimento da distribuição espacial dos processos de erosão, deposição e transporte de sedimentos no estuário, e seus reflexos sobre a formação e modificação dos depósitos sedimentares e conseqüentemente sobre a paisagem (Santos & Santos, 2008; Santos et al, *in press*). Estudos sobre o efeito das marés na presença da pororoca e seus reflexos sobre os parâmetros físicos e químicos sobre as águas do estuário também têm sido realizados (Santos et al., 2003; Santos et al., 2005; Santos, 2006).

Um dos principais desafios nestes trabalhos tem sido acompanhar o fenômeno e seus efeitos sobre o estuário em virtude de tratar-se de um estuário relativamente extenso (6 km de desembocadura) e com os processos estuarinos ocorrendo por mais de 60 km para dentro do estuário. Isto remete a necessidade de uma infra-estrutura ágil em campo para o deslocamento de equipes. Outro fator é a periculosidade que o fenômeno representa para as pessoas e equipamentos durante as coletas de dados de campo. Assim, as imagens de satélite e principalmente de radar podem ser ferramentas úteis para observação desse fenômeno pela sua capacidade de retratar a área independente das condições atmosféricas e fonte solar. Condições estas que geram grandes limitações para os sensores óticos, principalmente na costa amazônica em função da constante da presença de nuvens.

Este trabalho apresenta registros da ocorrência do fenômeno da pororoca no estuário do rio Araguari em imagens RADARSAT-1 e correlaciona estes registros com as observações de campo que têm sido realizadas na área de estudo.

2. Metodologia

Foram utilizadas quatro imagens do sistema RADARSAT-1 com órbita descendente, polarização HH e correspondentes ao modo *Wide 1*, com ângulo de incidência de aproximadamente 25° (Tabela 1, Figura 2) As imagens foram adquiridas no formato CEOS (*Committee on Earth Observation Satellites*), com nível de processamento 1, SGF (*Georeferenced Fine Resolution Product*) e dados em 16 bits.

Estas imagens já vieram com a calibração radiométrica do padrão de antena. Para atenuar o *speckle* (ruído inerente aos dados de radar) foi aplicado um algoritmo de filtragem adaptativa (filtro Frost) (Lopes et al., 1990), com kernel de 3 x 3 pixels. A fim de melhorar a qualidade visual das imagens foi aplicado um realce linear para melhorar o contraste.

Tabela 1. Imagens de radar utilizadas no trabalho.

Plataforma/ Sensor	Modo/ bandas utilizadas	Data de Aquisição	Hora Local	Ângulo de Incidência	Tamanho de pixel (m)	Situação das Marés (*)	Cessão das Imagens
RADARSAT-1 M0324302 M0324303	Wide 1, C	15 jan 2003	06:10	20° – 31°	12,5 m x 12,5 m	2 horas após a baixamar	PETROBRÁS Projeto PIATAM Mar
RADARSAT-1 P9389371 P9389372	Wide 1, C	30 set 2004	06:09	20° – 31°	12,5 m x 12,5 m	baixamar	PETROBRÁS Projeto PIATAM Mar

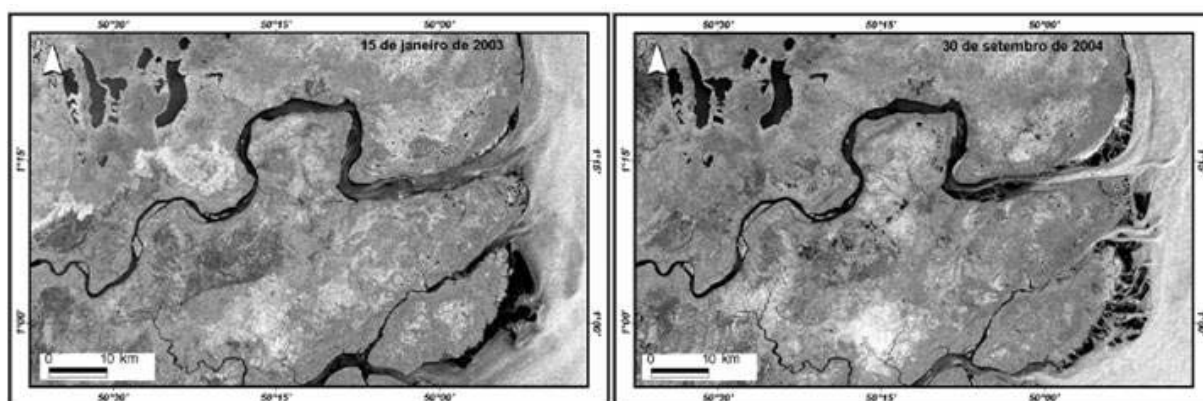


Figura 2. Imagens RADARSAT-1 utilizadas neste trabalho datadas de 15 de janeiro de 2003 (esquerda) e 30 de setembro de 2004 (direita).

As imagens foram ortoretificadas com o objetivo de fazer a superposição das informações das imagens e fazer correlação das mesmas com os pontos de observações e informações de campo (situação das marés e locais de ocorrência do fenômeno da pororoca). A ortoretificação foi realizada utilizando pontos de controle adquiridos sobre a imagem do satélite Landsat 7, sensor ETM+ ortoretificada, proveniente do *Global Land Cover Facility* (GLCF) e os dados de efemérides para as imagens de radar disponíveis no cabeçalho dos dados do CD-SAR. A ortoretificação foi realizada utilizando o DEM do SRTM, tendo o espaçamento do pixel reamostrado para 30 metros. Para isso foi utilizado o pacote denominado *Ortho & DEM* disponível no *software* PCI Geomática 9.1.

Após a ortoretificação, visando a continuidade geométrica da zona de estudo, foram elaborados dois mosaicos, um para cada data das imagens adquiridas. Os mosaicos foram realizados de forma automática no módulo *OrthoEngine* do *software* PCI Geomática 9.1. Foi realizado o reescalonamento das imagens de 16 para 8 bits.

Dados de campo foram utilizados para entender melhor a observação do fenômeno na imagem. Os dados são provenientes de observações do fenômeno em vários períodos de campo em março de 2004 e setembro de 2004, março de 2005 e maio e setembro de 2007. As observações referem-se a registros visuais do fenômeno com informações sobre o formato da onda, seu deslocamento no estuário, locais e forma de ocorrência. As observações foram realizadas de dentro do canal estuarino utilizando-se um barco de alumínio (“voadeira”) com motor de popa e também a partir das margens do estuário em locais seguros. Fotografias aéreas horizontais tomadas *in situ*. Todas as informações utilizadas estavam devidamente georeferenciadas a um *Global Positioning System* (GPS) com arquivos disponibilizados em formato do *software* *Trackmaker* (*.gmt). Estes arquivos foram transferidos para um Sistema de Informações Geográficas (*software* ArcView, versão 3.2) e sobrepostos as imagens de radar para cálculos de distância e aferição das observações com as imagens de radar.

Dados de marés foram utilizados para correlação das informações obtidas nas imagens de satélite com as informações de campo. Foram utilizados dados de previsões de maré fornecidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para o período das imagens de RADARSAT-1 analisadas. Os dados de previsão são referentes a estação de ponta do Guará que localizava-se na foz do estuário do Araguari que encontra-se atualmente desativada.

3. Resultados e Discussão

A imagem de radar do dia 15 de janeiro de 2003 duas ondas (Figura 3) associadas ao fenômeno da pororoca, distante aproximadamente 20 km da foz do estuário do rio Araguari.

A presença das ondas nessa posição do estuário indica que a velocidade média das ondas da pororoca seria aproximadamente de 10 km/h, uma vez que a imagem foi adquirida aproximadamente 2 horas após a baixa-mar. Isto corrobora com informações obtidas em campo durante o período de setembro de 2004, onde se obteve velocidades médias de deslocamento das ondas de aproximadamente 12 km/h.

As duas ondas possuem extensão de aproximadamente 4 km atravessando o estuário de uma margem a outra, com pequenas mudanças no padrão de retroespalhamento. As observações de campo revelam que este fenômeno costuma apresentar-se no estuário como uma onda ou na forma de frente de várias ondas (já foram observadas até 6 ondas consecutivas) que cruzam o estuário de uma margem a outra (Figura 4) (Santos, 2006). Nas porções rasas, geralmente nas áreas de intermarés elas tendem a espriar-se devido a perda de sua estabilidade em função da ausência de profundidade para mantê-las em formato ondular quando o canal é mais profundo.

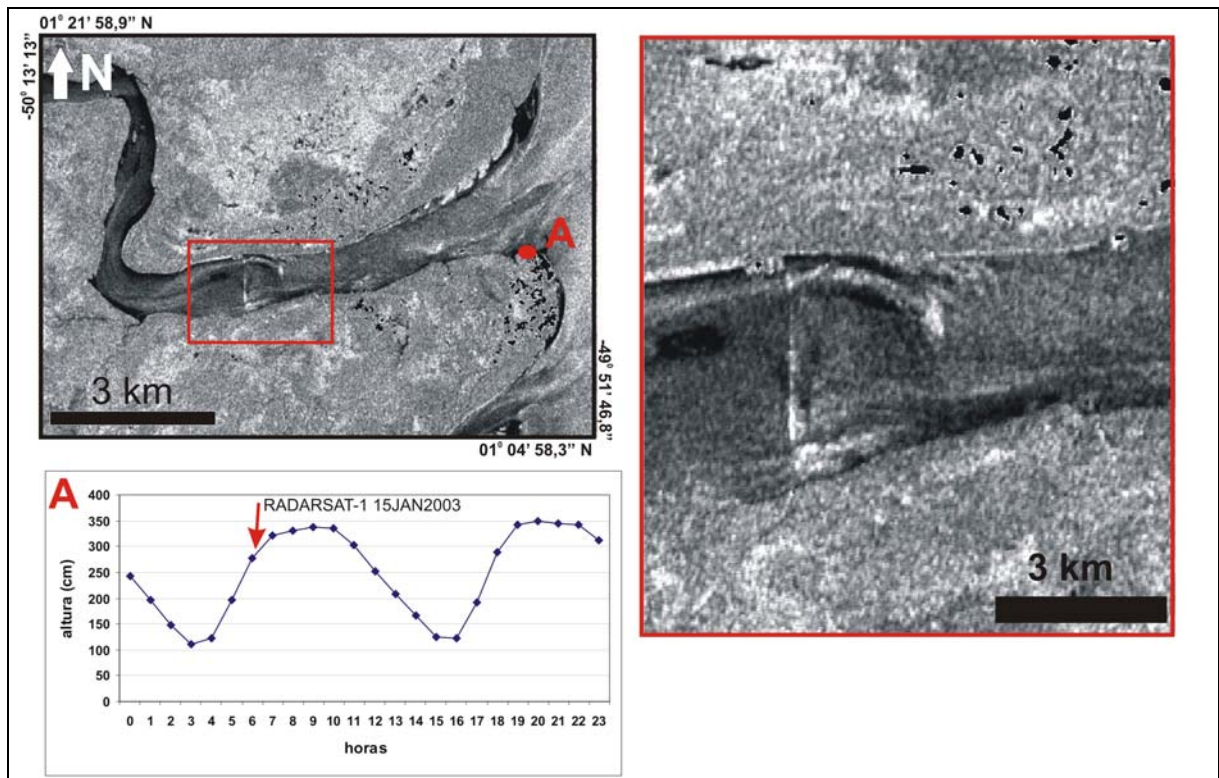


Figura 3. Imagem RADARSAT-1 mostrando o fenômeno da pororoca. A) Previsão de maré para a estação na foz do estuário (Dados DHN).



Figura 4. A) Vista aérea do fenômeno da pororoca registrado por Lynch (1982) no estuário do rio Araguari; B) vista frontal, 28/09/2004, maré de sizígia. C) Vista lateral em março de 2005. Observar a existência de mais de uma onda.

Próximo a margem esquerda observa-se que o fenômeno diminui sua nitidez a medida que afasta-se desta margem. Isto pode ser explicado pelo formato da onda que tende a ser ondular nas porções mais profundas do estuário e, portanto apresentaria um retroespalhamento menor do sinal em relação a situação de formato da onda em macaréu que ocorre nas porções mais rasas. Comparando-se as imagens dos dois períodos estudados, a imagem RADARSAT-1 de 30 de setembro de 2004, tomada em situação de baixamar (Figura 2), mostra o canal estuarino bem definido e na posição onde é observado o menor retroespalhamento da onda na imagem de 2003.

Próximo a margem direita do canal ocorre um alto retroespalhamento do sinal que é explicado pela presença de barras, áreas mais rasas, que na imagem de setembro de 2004 estão emersas. A reflexão especular nessas áreas é evidente pela presença de sedimentos finos (argilosos) que foram observados nas situações de campo.

As informações sobre o fenômeno da pororoca aqui apresentadas foram possíveis de serem tomadas em função do retroespalhamento do radar ser dominado pelos efeitos de variações na rugosidade superficial para ângulos de moderada incidência (30-70°) JPL (1980) apud Paradella et al. (2005), apesar da banda utilizada (banda C) possuir limitações em função da cobertura vegetal na região tem um potencial para estudo do fenômeno apresentado que deve ser melhor explorado.

4. Conclusões

As informações apresentadas neste trabalho mostram que imagem de RADARSAT podem ser utilizadas para análise de fenômenos associados as marés, no caso da pororoca. O registro do fenômeno na imagem permitiu corroborar informações que estão sendo coletadas em campo sobre o comportamento da pororoca e sua atuação no estuário do rio Araguari. As imagens em banda C-HH e situação de ângulo de incidência moderado possuem um potencial de exploração para estudo do fenômeno da pororoca na região por serem sensíveis as variações na rugosidade das águas superficiais. No entanto, um dos fatores que podem ser limitantes é a passagem do satélite não coincidente com as situações de marés. No entanto, as observações e medições de dados de marés em campo têm registrado a existência de pelo menos uma das entradas da maré semidiurna no horário da manhã o que diminuiria esta limitação.

Agradecimentos

Agradecemos a Petrobrás, através do projeto PIATAM Mar I, pela cessão das imagens de RADARSAT-1. Ao MMA através do projeto PROBIO e do IBAMA pelo apoio na logística e trabalhos de campo. Ao financiamento do MCT/CNPq e da Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia do Estado do Amapá-SETEC/AP através do projeto “Avaliação de Processos Dinâmicos no Estuário do rio Araguari”, Convênio 610093/03-7. Ao projeto AMASIS-Integração de Dados Geofísicos, Geológicos e Geoquímicos na Reconstituição da Paleogeografia da Costa Amazônica do Neógeno ao Recente, e ao Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá. Parte deste trabalho é resultante da tese de doutorado da autora desenvolvida no Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha – LAGEMAR/UFF no âmbito da rede de cooperação ECOLAB-Ecosistemas Costeiros Amazônicos com o apoio do Institut de Recherche pour le Développement-IRD na formação em sensoriamento remoto.

Referências

- Araújo, I. B.; Silva, J. C. B. da; Ermakov, S. A.; Robinson, I. S. On the role of wind direction in ERS SAR signatures of internal waves on the Iberian Shelf. **Global Atmosphere and Ocean Systems**, v. 8, n. 4, p. 269-281. 2002.
- Lopes, A.; Touzi, R. E; Nezry, E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. **IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 992-1000, 1990.
- Lynch, D. K. Tidal bore. **Scientific American**, v. 247, n. 4, p. 134-143. 1982.
- Ouchi, K., N. R. Stapleton, N. R.; Barber, B. C. Multi-frequency SAR images of ship-generated internal waves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 18, p. 3709-3718. 1997.
- Paradella, W. R., A. R. D. Santos, A. R.; Veneziani, P.; Cunha, E. S. P. da. Radars imageadores nas Geociências: Estado da Arte e Perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 01, p. 56-62. 2005.
- Santos, V. F. dos. **Ambientes Costeiros Amazônicos: Avaliação de Modificações por Sensoriamento Remoto**. 2006. 306 p. (S237- CDD 526.982098115). Tese (Doutorado em Geologia e Geofísica Marinha) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2006.
- Santos, V. F. dos; Figueiredo JR., A. G.; Silveira, O. F. M.; Polidori, L. 2003. Mecanismos de Modificações de Curto Período na Planície Costeira do Amapá. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA), 9., 2003, Recife. **Anais...** Recife: ABEQUA, 2003. Artigos, 5p.. CD-ROM.
- Santos, V. F.; Figueiredo JR., A. G.; Silveira, O. F. M.; Polidori, L.; Oliveira, D. M.; Dias, M. B.; Santana, L. O. Processos Sedimentares em áreas de macro-marés influenciados pela pororoca - estuário do rio Araguari-Amapá-Brasil. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA), 10., 2005, Guarapari. **Anais...** Guarapari: ABEQUA, 2005. Artigos, 6p. CD-ROM
- Santos, V. F. dos; Polidori, L.; Silveira, O. F. M.; Figueiredo Jr., A. G. Aplicação de Dados Multisensor (SAR e ETM+) no Reconhecimento de Padrões de Uso e Ocupação do Solo em Costas Tropicais - Costa Amazônica, Amapá, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, *in press*.
- Santos, V. F. dos; Santos, E. J. F. dos. **Relatório Temático de Geologia e Sensoriamento Remoto. II** Expedição Científica do Projeto AMASIS. Macapá: Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá, 2008. (AMASIS-02/2008-Geol-SR).