

SISTEMA DE OBSERVAÇÃO COSTEIRA E O PAPEL DOS SENSORES REMOTOS NO MONITORAMENTO DA COSTA NORTE BRASILEIRA, AMAZÔNIA

Coastal observing system and the role of the remote sensors in the Northern Brazilian coast monitoring, Amazon

Pedro Walfir Martins e Souza Filho¹

Fabício Dias Gonçalves¹

Carlos Henrique Beisl²

Fernando Pellon de Miranda³

Edson Faria de Almeida²

Edson Ricardo Cunha³

¹ **Universidade Federal do Pará - UFPA**

Centro de Geociências, Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido

Av. Augusto Correa 1, Caixa Postal 8608, 66075-110, Belém-PA, Brasil

walfir@ufpa.br, fdias@ufpa.br

² **Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE**

Centro Brasileiro de Recursos RADARSAT

Cidade Universitária, Bloco I-114, 21949-900, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

beisl@cbr.roppe.ufjf.br, defaria@coc.ufjf.br

³ **Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobras**

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Melo - CENPES

Cidade Universitária, 21949-900, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

fmiranda@petrobras.com.br, ercunha@petrobras.com.br

RESUMO

Diferentes técnicas e aplicações de sensoriamento remoto têm sido usadas para investigar ambientes costeiros tropicais úmidos na Região Amazônica. Este artigo apresenta as pesquisas prioritárias desenvolvidas nesta região e as técnicas potenciais que devem ser aplicadas na costa amazônica. Além disso, apresenta os desenvolvimentos recentes e pesquisas futuras que usarão os sensores ALOS-PALSAR, RADARSAT-2 e SAR SIPAM, que devem tornar o uso dos radares de abertura sintética (SAR) uma poderosa ferramenta de monitoramento costeiro durante os próximos anos. Portanto, o uso do sensoriamento remoto representa uma chance única para implantação de um sistema de observação costeira na Zona Costeira Amazônica em um futuro próximo.

Palavras chaves: Sensoriamento remoto, gerenciamento costeiro, Amazônia.

ABSTRACT

Different techniques and applications of remote sensing have been used to investigate moist tropical coastal environments in Amazon region. This paper presents priority researches developed in this region and potential techniques that must be applied in the Amazon coast. Furthermore, present the recent development and future researches using ALOS-PALSAR, RADARSAT-2 and SAR SIPAM, which must become the use of the Synthetic Aperture Radar (SAR) a powerful tool of coastal monitoring during the next years. Therefore, the use of remote sensing represents a unique chance to implement coastal observation system in the Amazon coastal zone in the close future.

Keywords: Remote sensing, coastal management, Amazon.

1. INTRODUÇÃO

Dado o interesse internacional e nacional e o reconhecimento da importância da zona costeira, programas de pesquisa têm sido estabelecidos ao longo de todo o mundo, como por exemplo, o LOICZ (Land-Ocean Interactions in Coastal Zones), IGBP (International Geosphere-Biosphere Program) e PNGC (Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro). Além do mais, um módulo para monitoramento dos ambientes da zona costeira e suas variações costeiras são também um componente importante no GOOS (Global Ocean Observing System), estabelecido em 1993 (JOHANNESSEN, 2000). Para muitos aspectos do estudo, diversos trabalhos de revisão sobre a utilização de sensoriamento remoto no estudo da zona costeira têm sido publicados (CRACKNELL, 1999; GREEN et al., 2000; MALTHUS e MUMBY, 2003). Este trabalho tem como objetivo sintetizar as diversas aplicações e perspectivas do sensoriamento remoto na zona costeira amazônica, enfatizando a importância e a necessidade de implantação de um sistema de observação costeira na costa norte do Brasil.

A zona costeira apesar de restrita representa 8% da superfície terrestre, apresenta elevada produtividade e biodiversidade, fornecendo 20% da produção oceânica. Além disso, 60% da humanidade, 3,8 bilhões de pessoas vivem a pelo menos 100 km do mar (VITOUSEK et al. 1997). Portanto, em virtude da importância desta região, tanto para a população quanto para os ecossistemas marinhos e continentais é crucial uma cartografia temática detalhada em especial dos ambientes costeiros, bem como o entendimento dos processos costeiros responsáveis pela sua evolução (TALLEY et al., 2003).

A Zona Costeira Amazônica (ZCA) está inserida no contexto das regiões tropicais úmidas situadas entre 4° N e 4° S (Fig. 1). Os trópicos úmidos são caracterizados por precipitação alta e constante (> 1.500 mm/ano), altas temperaturas (> 20°) com baixa variação térmica e elevada nebulosidade (NITTROUER et al. 1995). Nesta região destaca-se a influência do Rio Amazonas que despeja um volume de água médio de 6,3 trilhões m³/ano, o que representa aproximadamente 16% de toda a água doce descarregada nos oceanos (OLTMAN, 1968), apresentando uma descarga líquida máxima de 220 mil m³/s (RICHEY et al., 1986) e de sedimentos estimada em 1,2 bilhão de ton/ano (MEADE et al., 1985). É também o maior rio em termos de material dissolvido (solutos) com uma descarga de 290 milhões de ton/ano (DEGENS et al., 1991).

Em função de sua magnitude, o Rio Amazonas é responsável pela formação de um sistema de dispersão que despeja uma enorme quantidade de água, partículas e solutos na plataforma continental (NITTROUER et al., 1995). Estes são transportados por correntes e ondas ao longo da costa, e são

responsáveis pela formação de uma das mais extensas costas lamosas de todo o planeta (ALLISON et al., 2000; KJERFVE et al., 2002). Ao longo da ZCA, diversos ambientes têm sido reconhecidos, como estuários, pântanos, manguezais, planície de marés, dunas, praias, lagos e cheniers (SOUZA FILHO e PARADELLA, 2002).

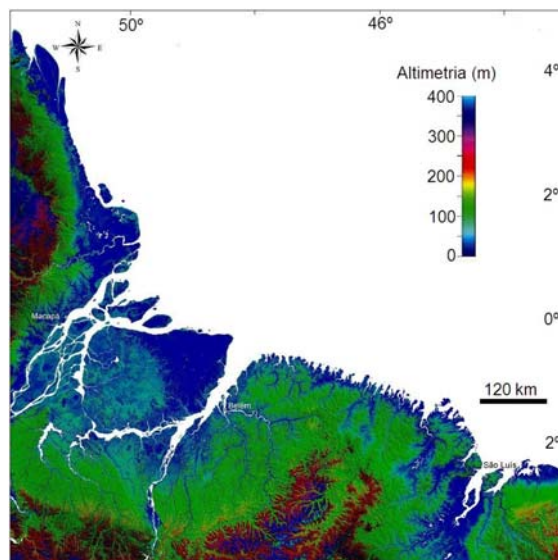


Fig. 1 - Modelo digital de elevação da costa nordeste do Pará e noroeste do Maranhão gerados a partir de dados SRTM.

Uma variedade de técnicas de processamento digital de imagens de sensores remotos têm sido aplicada e avaliada na zona costeira amazônica, variando desde modelos digitais de elevação derivados da missão SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), sensores ópticos (FAURE, 2001; COHEN e LARA, 2003; FROIDEFONDE et al., 2004; FROMARD et al., 2004), radares de abertura sintética (SAR) (PROISY et al. 2000; 2002; SOUZA FILHO e PARADELLA, 2003), até fusão de dados de sensores remotos (SINGHROY, 1996; SOUZA FILHO e PARADELLA, 2002). Técnicas de detecção de navios a partir de imagens SAR estão disponíveis na literatura (VACHON et al., 1997; TOUZI et al., 2004), mas ainda não foram empregadas na zona costeira amazônica.

Muitos destes autores têm enfatizado o desafio relacionado ao sensoriamento remoto de ambientes tropicais, particularmente na zona costeira amazônica, sujeita a prolongado período com cobertura de nuvens, difícil acesso, altas temperaturas e umidade, e elevadas frequências de inundação das áreas costeiras. Entretanto, estes desafios precisam ser encarados a partir do conhecimento das limitações práticas de aquisição e utilização de dados de sensores remotos (GREEN et al., 1996), bem como das limitações dos usuários, no sentido de que eles muitas vezes complicam e/ou dificultam a incorporação do sensoriamento remoto nos planos de gerenciamento costeiro.

Dados orbitais de sensores remotos podem fornecer excelentes informações geomorfológicas e oceanográficas. Imagens do radar de abertura sintética SAR e sensores ópticos representam uma ferramenta poderosa para o estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos, principalmente em costas dominadas por manguezais em condições de macromarés semidiurnas. O uso de imagens SAR, seguido de sua interpretação, pode ser usado no mapeamento de ambientes sedimentares costeiros, na determinação da posição precisa da linha de costa, na localização de áreas sujeitas ao desflorestamento e regeneração das florestas de manguezal (SINGHROY, 1996).

2. TEMÁTICAS PRIORITÁRIAS PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE OBSERVAÇÃO COSTEIRA

2.1 Mapeamento geomorfológico dos ambientes costeiros

Dados orbitais de sensores remotos podem fornecer excelentes informações geomorfológicas das áreas emersas e de águas rasas. Imagens de radar de abertura sintética (SAR) representam uma ferramenta poderosa para o estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos, principalmente em costas dominadas por manguezais em condições de macromaré semidiurnas. Assim, o processamento digital das imagens SAR, seguido de sua interpretação, pode ser usado no mapeamento de ambientes sedimentares costeiros, tendo como base a textura, geometria e conteúdo de umidade dos alvos (SOUZA FILHO e PARADELLA, 2005).

Imagens de sensores ópticos apresentam problemas relacionados à periodicidade de aquisição de imagens com cobertura de nuvens inferior a 60%, sendo isso possível apenas durante o verão. Em função disso, dados de sensores remotos ópticos devem ser usados como dados auxiliares no mapeamento e monitoramento de ambientes costeiros.

Imagens orbitais SAR, combinadas a sensores remotos ópticos devidamente orto-retificados (TOUTIN, 1995) e corrigidos para um sistema de projeção comum, permitem a manipulação e comparação de dados pixel a pixel. Desta forma, os dados orbitais podem ser precisos no mapeamento geomorfológico costeiro em ambientes tropicais úmidos. Produtos integrados a partir de componentes principais seletivos (SPC) das bandas do sensor ETM+ do satélite Landsat 7, são excelentes dados para integração com o RADARSAT-1, apresentando o melhor desempenho na discriminação dos ambientes costeiros (SOUZA FILHO e PARADELLA, 2002). Este aspecto está relacionado à habilidade da análise por SPC tornar possível o uso das seis bandas refletidas do ETM+. Assim, o primeiro auto canal (PC1) obtido a partir das bandas ETM+ 1, 2 e 3 é responsável pelo

realce da linha de costa e das feições costeiras submersas, uma vez que a PC1 contém aproximadamente 95 % da variância do espectro visível do ETM+. Tal produto permite o realce de feições estuarinas submersas, como a morfologia de canais de maré, de barras arenosas emersas e submersas e de zonas de arrebentação de ondas. Além do mais, o primeiro auto canal (PC1) obtido a partir das bandas ETM+ 5 e 7 realça as áreas com solos expostos, permitindo a discriminação espectral entre pântanos salinos internos, pântanos salinos externos, manguezais, crista de chenier, duna-praia barreira, canais estuarinos, barras estuarinas e linhas de arrebentação de ondas. Enquanto a utilização da banda ETM+ 4 permitiu a discriminação da floresta costeira de manguezal da vegetação secundária sobre o planalto costeiro. Portanto, os dados SAR foram responsáveis pelo realce de feições topográficas, diferenças na altura da vegetação, geometria dos corpos e conteúdo de umidade, enquanto os dados ETM+ forneceram mais informações da cobertura vegetal e variações em sua tipologia (Fig. 2).

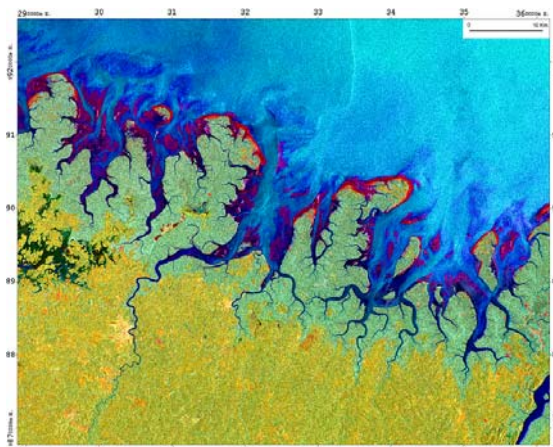


Fig. 2 - Produto RADARSAT-1 Wide 1 e Landsat ETM+7 (principal componente seletivo com radar de abertura sintética (SPC-SAR) para mapeamento de ambientes costeiros da costa nordeste do estado do Pará (UTM Zona 23).

2.2 Detecção e quantificação das mudanças de linha de costa

Imagens de radar de abertura sintética (SAR) vêm sendo bem mais utilizadas do que antes nas aplicações de geociências em regiões tropicais úmidas. Nesta revisão, utilizaremos o exemplo de uma imagem RADARSAT-1, na banda C, polarização HH adquirida em 1998 usada para o mapeamento costeiro e avaliação da cobertura da terra na área de Bragança, norte do Brasil, comparando-a com uma imagem do radar aerotransportado GEMS-1000, na banda X, polarização HH, adquirida em 1972 durante o projeto RADAM, a fim de se avaliar as variações costeiras ocorridas nas últimas três décadas (SOUZA FILHO e PARADELLA, 2003). Tal pesquisa baseada na superposição de vetores

extraídos das diferentes imagens SAR confirmou a utilidade destas na quantificação das mudanças da linha de costa em áreas de manguezal de macro-maré.

Os resultados mostraram que a linha de costa é extremamente dinâmica, com setores sujeito a erosão costeira (recoo de 32 km²), e outros a acreção (avanço de 20 km²), resultando em uma perda na área de manguezal de quase 12 km² (Fig. 3). Estudos de modificações de linha de costa utilizando dados de sensores ópticos também foram desenvolvidos na costa nos da Guiana Francesa (PROST, 1997; FROMARD et al., 2004), entretanto estes sensores não podem ser utilizados de forma operacional em função da aquisição das imagens dependerem da cobertura de nuvens.

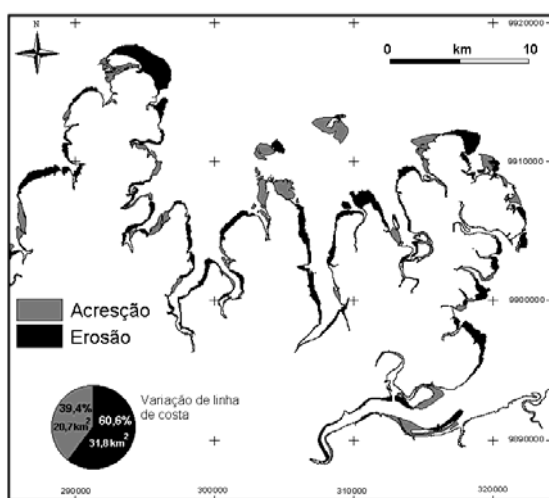


Fig. 3 - Vetores extraídos da imagem GEMS 1000 SAR adquirida em 1972 e da imagem RADARSAT-1 Fine 1 adquirida em 1998 mostrando modificações na linha de costa da planície costeira de Bragança (Souza Filho e Paradella, 2003). UTM Zona 23.

2.3 Observação das plumas de sedimentos em suspensão na zona costeira

A zona costeira amazônica é fortemente influenciada pela descarga de sedimentos do Rio Amazonas (MEADE et al., 1985). Assim, o fluxo do Amazonas em direção ao oceano é responsável pela geração de cinco diferentes zonas oceanográficas na plataforma continental, cada uma com suas características hidrográficas e dinâmicas distintas, formando uma pluma de sedimentos em suspensão sobre a plataforma continental. Ao longo da costa de manguezais do nordeste do Pará e noroeste do Maranhão, uma série de estuários desemboca na costa e uma grande variedade de turbidez associada a processos frontais de maré e suas variações sazonais podem ser observadas a partir de imagens dos sensores MODIS (Fig. 4).

FROIDEFONDE et al. (2004), utilizando

imagens SPOT e medidas de reflectância espectral no oceano costeiro da Guiana Francesa, quantificaram e mapearam a distribuição dos sedimentos em suspensão oriundos do Rio Amazonas. Imagens dos sensores MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA, fornecem imagens diárias, o que permitirá uma melhor compreensão da distribuição de sedimentos em suspensão na superfície do oceano, em especial dos sedimentos gerados na zona costeira amazônica, os quais são transportados em direção à costa da Guiana até o Caribe.



Fig. 4 - Imagem do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA na composição 1R4G3B, adquirida em setembro de 2003 mostrando a distribuição dos sedimentos em suspensão na foz do Rio Amazonas.

2.4 Morfologia de águas rasas a partir de imagens SAR

Bancos arenosos submersos, canais de marés e canais estuarinos vêm sendo mapeados com eficácia a partir de imagens SAR (SOUZA FILHO e PARADELLA, 2002; 2003). Muitas vezes esta morfologia subaquática pode ser inferida a partir das respostas das imagens SAR às correntes oceânicas superficiais e as correspondentes modulações das ondas de menores comprimentos de onda – ondas de capilaridade-gravidade (JOHANNESSEN, 2000). Entretanto, ventos mais intensos produzem ondulações com comprimento de ondas maiores e mais ondulantes na superfície do oceano, apresentando maior intensidade de retro-espalhamento (tons mais claros), que podem causar dificuldades na detecção da morfologia subaquática. Por outro lado, a detecção das zonas de surfe é possível, normalmente devido à rugosidade superficial típica da zona de arrebentação e surfe, com múltiplas reflexões a partir do encrespamento das ondas (LEWIS et al. 1998). Estas características típicas das imagens SAR têm permitido o mapeamento das frentes de onda na zona de surfe, a análise das interações das correntes de marés com as feições de fundo e localização

dos bancos de areia e planícies de marés lamosas e arenosas (Fig. 5).

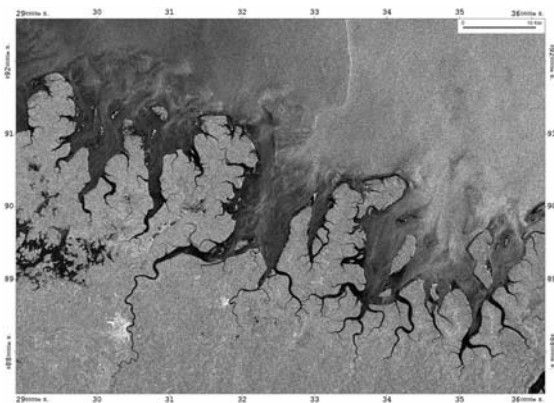


Fig. 5 - Morfologia de águas rasas dos estuários nordeste do nordeste do Pará observadas a partir de imagens RADARSAT-1 wide1 (UTM Zona 23).

2.5 Detecção de óleo e navios usando SAR

O mecanismo físico que permite a detecção de exudações e derrames de óleo no mar é a redução das ondas de capilaridade presente na superfície do oceano (MIRANDA et al., 2004). Estas ondas de capilaridade, que apresentam poucos centímetros, produzem um retroespalhamento do pulso de radar incidente para um mecanismo de espalhamento Bragg (JOHANNESSEN, 2000).

Como resultado, as regiões oceânicas que contêm óleo são escuras em contraste com o sinal de radar padrão. Embora imagens SAR sejam muito úteis para a detecção de óleo no mar, vários outros fenômenos na superfície oceânica podem também produzir regiões de baixo retroespalhamento, que podem conduzir a interpretações errôneas (FINGAS e BROWN, 1997). MIRANDA et al. (1998) a partir da classificação textural de imagens RADARSAT-1 do Cone do Amazonas reconheceram algumas exudações naturais na área, e Miranda et al. (2004) aplicaram a mesma metodologia para mapeamento de uma das maiores exudações naturais de óleo do mundo, observadas no campo de Cantarell, no Golfo do México. Após o sucesso na detecção do óleo nestas áreas, estes autores recomendam a utilização desta metodologia de forma operacional e de baixo custo.

3. DESENVOLVIMENTO RECENTE E PESQUISAS FUTURAS

3.1. Detecção e caracterização de navios usando SAR polarimétrico

A detecção e identificação de navios têm um grande potencial de aplicação nos setores comercial, pesqueiro, de transporte e militar. A detecção e caracterização de navios é um problema complexo,

muito difícil de ser resolvido apenas com os SARs convencionais que usam polarização simples para transmissão e recepção (e.g. HH ou VV). Com o advento do SAR polarimétrico, as imagens fornecerão informações únicas para a caracterização e detecção do retroespalhamento de navios.

Um novo método introduzido por TOUZI e CHARBONNEAU (2002), denominado Método de Caracterização de Espalhamento Simétrico (SSCM), desponta como promissora na detecção e caracterização de embarcações. Novas investigações vêm sendo conduzidas e os resultados encorajam a utilização de dados SAR polarimétricos (TOUZI et al., 2004). Com a proximidade do lançamento dos satélites RADARSAT-2 e ALOS, e a utilização do SAR aerotransportado do Sistema de Proteção da Amazônia (R-99 SAR), os dados polarimétricos tornar-se-ão mais acessíveis, e todo este potencial começará a ser explorado quando os dados forem devidamente calibrados. Tal abordagem é de fundamental importância para implantação de um sistema de observação costeira.

3.2 Dados SRTM (“Shuttle Radar Topography Mission”) - uma nova classe de modelo digital de elevação

Dados SRTM foram adquiridos em fevereiro 2000 e encontram-se disponibilizadas no site da NASA (<http://www.jpl.nasa.gov/srtm.html>). Estes dados foram levantados para 75% da superfície terrestre por interferometria, onde a combinação de duas imagens de radar (banda X e C) foi adquirida em diferentes pontos de visada permitindo a determinação da elevação da superfície (RABUS et al., 2003). As características originais dos modelos digitais de elevação (DEM) do SRTM banda C são: Acurácia horizontal = 20m; acurácia vertical = 4m; Amostragem horizontal = 1”x 1” latitude/longitude (30x30m); Amostragem vertical = 1m; Projeção = coordenadas geográficas; Esferóide = WGS84 e Formato de dados = 16 bits. No entanto, os dados disponibilizados para a América do Sul apresentam resolução espacial de 90m, guardando a coerência dos dados originais. Vale ressaltar que o DEM equivale à superfície terrestre, que quando recoberta por vegetação registrou as informações de elevação das copas das árvores.

O processamento destes dados de elevação tem permitido uma melhor compreensão da distribuição vertical dos ambientes costeiros (Fig. 1), bem como uma visualização 3D privilegiada de várias imagens de sensores remotos quando integradas aos modelos digitais de elevação.

3.3 Utilização de imagens SAR polarimétrica no reconhecimento de ambientes costeiros

No âmbito da pesquisa e desenvolvimento, pode-se afirmar que o mapeamento de ambientes

costeiros utilizando dados polarimétricos de média (10 m) e alta resolução (3 m) consiste na nova vanguarda de utilização de dados SAR. Tal aplicação permitirá o reconhecimento, avaliação e quantificação precisa das áreas úmidas da Zona Costeira Amazônica, que aliada a análises multi-temporais em diferentes escalas de tempo (baixa-mar e preamar, equinócio e solstício e variações anuais) através de imagens de SAR polarimétrico, consistirá em uma prática inovadora. Tal abordagem aliada às pesquisas em desenvolvimento com RADARSAT-1 (SOUZA FILHO e PARADELLA, 2003; 2005) e pesquisas futuras com os satélites ALOS-PALSAR (PARADELLA et al., 2004), RADARSAT-2 (VAN DER SANDEN, 2004), e SAR aerotransportado do SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia) no âmbito do projeto “SAR polarimétrico para mapeamento geomorfológico em ambientes costeiros dominados por manguezais de macro-maré, Bragança, Norte do Brasil” serão fundamentais para a implantação de um sistema de observação costeira. Tais pesquisas serão de suma importância para o desenvolvimento tecnológico do país e no que diz respeito às aplicações de imagens SAR em estudos ambientais.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Significativos avanços têm sido alcançados recentemente no sensoriamento remoto de ambientes costeiros como visto acima. Entretanto, ainda existem limitações práticas de utilização de sensores remotos para determinadas aplicações, assim como limitações de usuários para adaptação e desenvolvimento de técnicas de processamento de imagens e implantação destas em sistemas de observação costeira.

Imagens de sensores ópticos devem ser utilizadas para integração com imagens SAR, sendo extremamente útil para a cartografia dos ambientes costeiros, porém a aquisição destas imagens dependerá das condições atmosféricas. Assim, imagens SAR devem ser utilizadas de forma operacional, pois seu imageamento independe das condições atmosféricas, fornecendo importantes informações sobre os cenários dinâmicos associados aos ciclos das marés e descarga fluvial.

O desafio hoje é adotar as diferentes técnicas de sensoriamento remoto como ferramenta de rotinas na avaliação de mudanças na zona costeira, assim como formar e treinar profissionais capazes de utilizar as técnicas de sensoriamento remoto. Entretanto, é incumbência dos gestores costeiros e dos usuários reconhecerem a necessidade de utilização da visão sinóptica fornecida pelas imagens na solução de muitos problemas costeiros. O sensoriamento remoto pode ser considerado a única fonte de dados que fornece informações em múltiplas escalas de tempo e espaço. Portanto, acredita-se que a melhor forma de implantação de um sistema de observação costeira na Amazônia perpassa pelo desenvolvimento de uma rede

de instituições governamentais e não-governamentais, aliadas as instituições responsáveis pelo gerenciamento do espaço costeiro e ao setor produtivo que atuam na zona costeira amazônica, como as empresas de petróleo e companhias portuárias.

5. RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foram apresentadas algumas das aplicações da tecnologia de sensoriamento remoto para o monitoramento ambiental de regiões tropicais úmidas, notadamente a utilização do radar de abertura sintética (SAR), como uma alternativa operacional de imageamento para a região Amazônica, em função das limitações do imageamento através de sensores remotos óticos. Contudo, somente um modo de imageamento do satélite SAR RADARSAT-1 foi usado nesse trabalho, uma vez que as especificações desse sensor apontam para até 35 modos de imageamento diferentes, assim, outros modos de imageamento devem ser examinados (e.g. Fine e Standard mode) para a região, tentando-se identificar os ambientes com maior acurácia.

Ademais, outras técnicas de integração digital devem ser testadas buscando se identificar o método apropriado para esse tipo de estudo na Região Amazônica, mantendo as propriedades originais das imagens, visando uma melhor interpretação e conseqüente extração de informações da imagem híbrida gerada. De outra forma, desenvolvimentos recentes apontam para o uso do SAR polarimétrico, como o SAR polarimétrico aerotransportado do SIPAM e o lançamento previsto para 2005 do RADARSAT-2 e do ALOS/PALSAR, como uma tecnologia de vanguarda que possibilitará um salto qualitativo na utilização de imagens de SAR para o monitoramento ambiental em zonas costeiras, devendo essa tecnologia ser examinada para área costeira amazônica em diferentes ambientes geomorfológicos e distintas condições de marés, o que possibilitará melhor identificação dos ambientes e o entendimento da dinâmica ambiental dessas áreas, usando para isso, a interação do pulso polarizado de microondas com os alvos, bem como, o retroespalhamento desses alvos que será medido pelo sensor SAR polarimétrico quanto sua intensidade e fase do sinal.

AGRADECIMENTOS

Este estudo é resultado do Projeto PIATAM mar (Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de Petróleo e Derivados na Zona Costeira Amazônica) financiado pela Petróleo Brasileiro S.A. (Convênios UFPA/COPPETEC/ FAPESP 953) e CNPq (Proc. # 502450/2003-7), bem como do Projeto da Rede CT-Petro PETRORISCO (FINEP/MCT). Esta contribuição representa o artigo n.º 1 do projeto PIATAM mar.

O primeiro autor agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa durante esta investigação

(processo CNPq # 303238/2002-0) e a Academia Brasileira de Ciências pela permissão para publicação da Figura 3 deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLINSON, M.A.; LEE, M.T.; OGSTON, A.S.; ALLER, R.C. Origin of Amazon banks along the northeastern coast of South America. **Marine Geology**, v. 163, p. 241-256. 2000.

CRACKNELL, A.P. Remote sensing techniques in estuaries and coastal zones - an update. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, p. 485-496. 1999.

COHEN, M. C. L.; LARA R. L. Temporal changes of mangrove vegetation boundaries in Amazônia: Application of GIS and remote sensing techniques. **Wetlands Ecology and Management**, v.11, p.223-231. 2003.

DEGENS, E.T.; KEMPE, S.; RICHEY, J.E. Summary: biogeochemistry of major world river. In: Degens, E.T.; Kempe, S.; Richey, J.E. [Eds.], **Biogeochemistry of Major World Rivers**. New York, John Willey & Sons, 1991. p. 323-347.

FAURE, J-F. Structure architecturales des palétuviers *Avicennia germinans* et *Rhizophora mangle*: éléments diagnostics de la dynamique des mangroves sur les rives du rio Marapanim (Etat du Pará, Brésil). In: PROST, M. T. R. C.; MENDES, A. C. [Eds.], **Ecossistemas Costeiros: Impactos Ambientais**. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 51-64.

FINGAS, M.; BROWN, C. Remote sensing of oil spills. **Sea Technology**, v. 38, p. 37-46. 1997.

FROIDEFONDE, J.M.; LAHET, F.; HU, C.; DOXARAN, D.; GUIRAL, D.; PROST, M.T.; TERNON, J-F. Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana. **Marine Geology**, v. 208, p. 153-168. 2004.

FROMARD, F.; VEGA, C.; PROISY, C. Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analysis and field surveys. **Marine Geology**, v. 208, p. 265-280. 2004.

GREEN, E.; MUMBY, P.J.; EDWARDS, A.J.; CLARCK, C.D. A review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources. **Coastal Management**, v. 24, p. 1-40. 1996.

GREEN, E.; MUMBY, P.J.; EDWARDS, A.J.; CLARCK, C.D. **Remote sensing handbook for tropical coastal management**. Coastal Management Sourcebooks 3. Paris, UNESCO, 2000. 316 p.

JOHANNESSEN, J.A. Coastal observing systems: the role of synthetic aperture radar. **Johns Hopkins APL Technical Digest**, v. 21, p. 7-14. 2000.

KJERFVE, B., PERILLO, G. M. E., GARDNER, L. R., RINE, J. M., DIAS, G. T. M., AND MOCHEL, F. R. Morphodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America. In: HEALY, T. R.; WANG, Y.; HEALY, J-A. [Eds.], **Muddy Coasts of the World: Processes, Deposits and Functions**. Amsterdam, Elsevier, 2002. p. 479-532.

LEWIS, A.J., HENDERSON, F.M., HOLCOMB, D.W. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. [eds], **Principles & Applications of Imaging Radar**. New York, John Willey & Sons, 1998. p. 131-180.

MALTHUS, T.J.; MUMBY, P.J. Remote sensing of the coastal zone: an overview and priority for future research. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, p. 2805-2815. 2003.

MEADE, R.H.; DUNNE, T.; RICHEY, J.E.; SANTOS, U.M.; SALATI, E. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. **Science**, v. 228, p. 488-490. 1985.

MIRANDA, F.P.; BENTZ, C.M.; BEISL, C.H.; LORENZZETTI, J.A.; ARAÚJO, C.E.S. Application of unsupervised semivariogram textural classification of RADARSAT-1 data for the detection of natural oil seeps offshore the Amazon River mouth. In: RADARSAT ADRO Symposium, Montreal, 1998. **Proceedings**. CD-ROM. 1998.

MIRANDA, F.P.; MARMOL, A.M.Q.; PEDROSO, E.C.; BEISL, C.H.; WELGAN, P.; MORALES, L.M. Analysis of RADARSAT-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of Mexico, using the unsupervised semivariogram textural classifier (STC). **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 424-436. 2004.

NITTROUER, C.A.; BRUNSKILL, G.J.; FIGUEIREDO, A.G. Importance of tropical coastal environments. **Geo-Marine Letters**, v. 15, p. 121-126. 1995.

OLTMAN, R.E. **Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon River**. Washington DC, U.S. Geological Survey. 1968. 16p.

PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; VENEZIANI, P.; SOUZA FILHO, P.W.M.; FREITAS, C.C.; SANT'ANNA, S.J.S. Geoscience applications with L-band PALSAR data in the tropical environments of Brazil. In: 2nd ALOS Principal Investigators Workshop, Hyogo, 2004. **Proceedings**. CD ROM. 2004.

- PROISY, C.; MOUGIN, E.; FROMARD, F.; KARAM, M.A. Interpretation of polarimetric radar signatures of mangroves forest. *Remote Sensing of Environment*, v. 71, p. 56-66. 2000.
- PROISY, C.; MOUGIN, E.; FROMARD, F.; KARAM, M.A.; TRICHON, V. On the influence of canopy structure on the polarimetric radar response from mangrove forest. *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, p. 4197-4210. 2002.
- PROST, M. T. La mangrove de front de mer en Guyane: ses transformations sous l'influence du système de dispersion Amazonien et son suivi par télédétection. In: Kjerfve, B.; Lacerda, L.D.; Diop, E.H.S. [Eds.], *Mangrove ecosystem studies in Latin America and Africa*. Paris, UNESCO, 1997. p. 111-126.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. 2003. The shuttle radar topography mission - A new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 57, p. 241- 262. 2003.
- RICHEY, J.E.; MEADE, R.H.; SALATI, E.; DEVOL, C A.H.; NORDIN, F.; SANTOS, U. Water discharge and suspended sediment concentrations in the Amazon River, 1982-1984. *Water Resources Research*, v.22, p. 756-764. 1986.
- SINGHROY, V. Interpretation of SAR images for coastal zone mapping in Guyana. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, p. 317-328. 1996.
- SOUZA FILHO, P. W. M.; PARADELLA, W. R. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and Radarsat-1 data. *Wetlands Ecology and Management*. v. 10. p. 123-132. 2002.
- SOUZA FILHO, P. W. M.; PARADELLA, W. R. Use of synthetic aperture radar for recognition of Coastal Geomorphological Features, land-use assessment and shoreline changes in Bragança coast, Pará, Northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.75, p.341-356. 2003.
- SOUZA FILHO, P. W. M.; PARADELLA, W. R. Use of RADARSAT-1 Fine Mode and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast in the Amazon Region. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 31, p. 214-224. 2005.
- SOUZA FILHO, P. W. M.; PARADELLA, W. R. SILVEIRA, O.F.M. Synthetic Aperture Radar for Recognition of Coastal Features in the Wet Tropics: Applications in the Brazilian Amazon Coast. *Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi, Série Ciências Naturais*, v. 1, p. 149-154. 2005.
- TALLEY, D.M.; NORTH, E.W.; JUHL, A.R.; TIMOTHY, D.A.; BROWER, J.F.C.; BROWN, C.A.; CHASAR, L.C.; HALL, C. J.; MEYSMAN, F. JR.; NEMERSON, D.M.; SOUZA FILHO, P.W.M.; WOOD, R.J. Challenges at the land/water interface. *Estuarine Coastal And Shelf Science*, v. 58, p. 699-702. 2003.
- TOUTIN, T. Multisource data integration with an integrated and unified geometric modeling. In: ASKNE, J. (Ed.). *Sensors and environmental applications of remote sensing*. Rotterdam, Balkema, 1995. p. 163-174.
- TOUZI, R.; CHARBONNEAU, F.J. Characterization of target symmetric scattering using polarimetric SARs. *IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing*. v. 40, p. 2507-2516. 2002.
- TOUZI, R.; CHARBONNEAU, F.J.; HAWKINS, R.K.; VACHON, P.W. Ship detection and characterization using polarimetric SAR. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 30, p. 552-559. 2004.
- VACHON, P.W.; CAMPBELL, J.W.M.; BJERKELUND, C.; DOBSON, F.W.; REY, M.T. Ship detection by the RADARSAT SAR: validation of detection model predictions. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 23, p. 48-59. 1997.
- VAN DER SANDEN, J.J. Anticipated applications potential of RADARSAT-2 data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 30, p. 369-379. 2004.
- VITOUSEK, P.M., MOONEY, H.A., LUBCHENCO, J., MELILLO, J.M. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, v. 277, p. 494-499. 1997.

Recebido em 20 de fevereiro de 2005 – Aceito para publicação em 23 de maio de 2005.