

Identificação de subambientes de delta a partir de imagem PALSAR/ALOS-1

Fabio Corrêa Alves¹
Dilce de Fátima Rossetti¹
Márcio de Morisson Valeriano¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{alves.fabio@gmail.com; rossetti@dsr.inpe.br; valerian@dsr.inpe.br}

Abstract. Previous analysis of PALSAR image suggests a residual morphology related to a possible wave-dominated delta to the north of the Paraíba River mouth. If confirmed, this feature can contribute with studies aiming the reconstruction of relative sea level fluctuations during the late Quaternary in northeastern Brazil. The PALSAR sensor operates in the L band (23, 6 cm) and has good penetrability in ground targets, being able to unravel morphological features not identifiable using other remote sensing products. Given the relatively recent availability, the application of PALSAR images aiming the recognition of deltaic morphologies has not been tested yet. The goal of this work was to test spatial filtering techniques based on PALSAR images in order to analyze their potential for the recognition of deltaic morphologies, using as an example a residual paleodelta morphology at the Paraíba River mouth. Arithmetic operations and spatial filtering techniques (mean and directional) based on HH and HV polarizations were applied. The results were evaluated by descriptive statistics and target characteristics such as brightness, texture and contrast. The remote sensing techniques used in this work highlighted the residual deltaic morphology of the Paraíba River and helped to characterize its sub-environments. In particular, the HH and HH+HV polarized images processed using spatial filtering techniques were the most efficient products to delineate the paleoshoreline of this deltaic system, and also the sets of beach ridges that prograded during its evolution.

Palavras-chave: SAR image, spatial filtering, deltaic systems, beach ridges, imagem SAR, filtragem espacial, sistemas deltaicos, cordões litorâneos.

1. Introdução

Deltas consistem em ambientes deposicionais costeiros localizados na foz de um rio ou próximos a ela, onde o acúmulo de sedimentos transportados pelo canal fluvial é mais rápido do que a sua remoção por processos erosivos (WRIGHT, 1976). Sua formação depende da ação conjunta de processos fluviais com a dinâmica costeira (i.e., energia das ondas, correntes de marés e correntes litorâneas), bem como da atuação de fatores como nível do mar, clima e tectônica (GALLOWAY, 1975; WRIGHT, 1976; ELLIOT, 1986). O litoral do nordeste brasileiro apresenta um amplo conjunto de sistemas deltaicos do tipo dominado por ondas, cujas morfologias mais representativas incluem os deltas dos rios Doce (Espírito Santo), Jequitinhonha (Bahia) e São Francisco (divisa entre Sergipe e Alagoas). No litoral do Estado da Paraíba, a dinâmica costeira atual não proporciona o desenvolvimento de deltas, mas sim sistemas estuarinos. Porém, análises preliminares de imagem SAR do sensor PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) sugerem morfologia residual de um provável paleodelta de onda localizado ao norte da desembocadura do rio Paraíba. Se confirmado, a caracterização desse delta pode contribuir na reconstituição da curva de variação do nível relativo do mar durante o Quaternário, já que deltas se formam preferencialmente durante fases de queda do nível do mar.

Diversas técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas na análise morfológica de deltas. Entretanto, estudos dessa natureza (p.e., ELSHEIKH et al., 2009; ERNOUL et al., 2012; HO et al., 2010) têm utilizado imagens de multissensores ópticos (p.e., MSS, TM, ETM+) e, secundariamente, modelos digitais de elevação (MDEs), como os derivados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (RABUS et al., 2003). A utilização de dados ópticos para o caso do litoral nordeste do Brasil é desfavorecida pela baixa disponibilidade de imagens livres de nuvens.

Por outro lado, a utilização de MDEs em áreas com cotas topográficas baixas, como é o caso de uma planície deltaica, é uma abordagem a cujas limitações intrínsecas se somam erros e imprecisões dos dados. Assim, resta o uso de imagem de radar, como as do sensor PALSAR, como alternativa para a detecção e a caracterização morfológica de deltas. Por operar na banda L (i.e., 23,6 cm), este radar de abertura sintética (SAR), tem boa penetrabilidade da onda eletromagnética em alvos terrestres (HENDERSON; LEWIS, 1998), podendo revelar feições morfológicas não identificáveis em outros produtos do sensoriamento remoto.

Grande parte de deltas dominados por onda constituem-se de feições lineares a levemente curvilíneas atribuídas a cordões litorâneos, que apresentam contrastes bem definidos com as áreas adjacentes e, portanto, são concordantes com as informações de contornos das imagens (i.e., alta frequência). Portanto, uma das técnicas promissoras para evidenciar as feições de subambientes de delta a partir dos dados PALSAR consiste na filtragem espacial para realce de padrões direcionais (CROSTA, 1993; RICHARDS, 1995). Porém, a disponibilização relativamente recente desses dados não permitiu, ainda, testar esta abordagem para o reconhecimento de deltas. O objetivo do presente trabalho foi testar técnicas de filtragem espacial em imagem SAR/PALSAR, a fim de testar sua potencialidade para realçar e caracterizar morfologias deltaicas, utilizando como exemplo o suposto paleodelta do rio Paraíba.

2. Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido sobre uma morfologia residual de provável origem deltaica localizada ao norte da desembocadura do rio Paraíba, na região Nordeste do Brasil (Figura 1). Essa feição tem largura máxima de 4 km na direção E-W e comprimento de 12 km na direção N-S. Além disso, apresenta a forma de seu limite marítimo convexa e geometria tipicamente cuspidada (Figura 1). Geologicamente, esta feição se desenvolve predominantemente sobre sedimentos arenosos costeiros dos Sedimentos Pós-Barreiras (Pleistoceno-Holoceno) (ROSSETTI, et al., 2012) no setor que corresponde à porção norte da Bacia sedimentar da Paraíba.

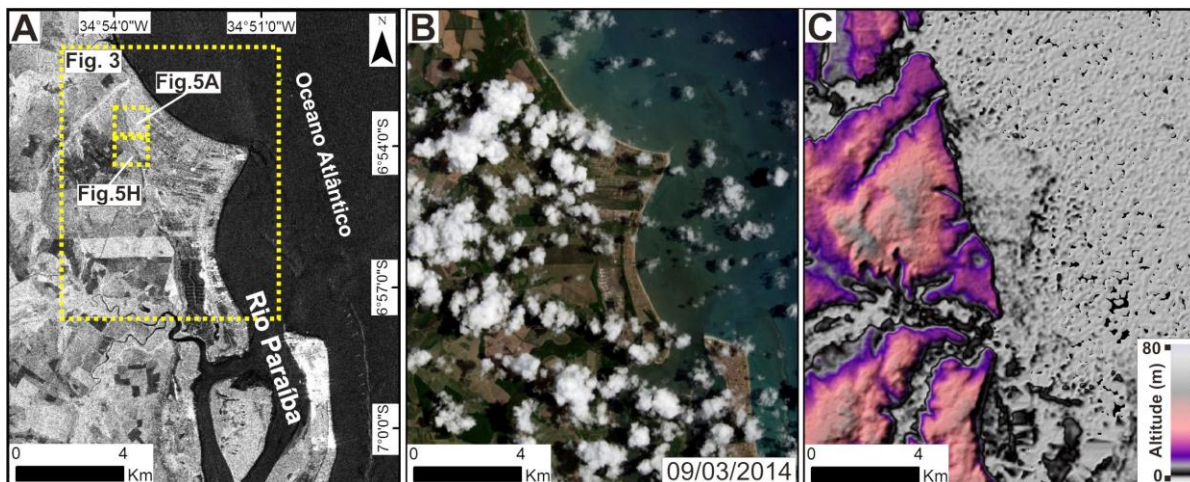


Figura 1. Diferentes produtos de sensoriamento remoto ilustrando a localização do provável paleodelta no norte da desembocadura atual do rio Paraíba. (A) Imagem PALSAR de polarização HH; (B) Imagem OLI-Landsat 8 na composição colorida verdadeira RGB 432; (C) MDE-SRTM do projeto TOPODATA em paleta de cores personalizada. Notar que a imagem de radar do sensor PALSAR foi a que melhor registrou a feição de paleodelta.

3. Material

A imagem PALSAR utilizada na presente análise deriva do banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), onde ela foi disponibilizada no modo de imageamento *Fine Beam Dual Polarization* (FBD), em polarizações HH e HV, e com ângulo de incidência médio (i.e., *near-far range*) padronizado em 34,3°. Apenas uma cena, datada de 01/08/2007, foi necessária para o recobrimento da área desse estudo. A escolha dessa data, que corresponde à estação seca, deveu-se à análise de dados pluviométricos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) acumulados de dez dias anteriores à passagem do satélite nessa região, a fim de minimizar os efeitos da umidade sobre a constante dielétrica dos alvos na cena (HENDERSON; LEWIS, 1998). Uma síntese dos detalhes técnicos dessa imagem é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Características técnicas da imagem SAR utilizada no presente trabalho.

Data:	01/08/2007	Polarização:	HH e HV
Cena:	ALPSRP080807040	Resolução (m) (<i>range x azimuth</i>):	20 x 10
Banda (cm):	L (23,6)	Resolução radiométrica:	16 bits
Órbita:	Ascendente	Tamanho do <i>pixel</i> (m):	12,5
Azimute de visada:	78°	Ângulo de incidência:	34,3°
Modo de imageamento:	FBD	Nível de processamento:	4 looks

Também foi utilizada, de maneira subsidiária, imagem ótica do sensor RapidEye, de resolução espacial mais fina (i.e., 5 m) datada de 23/06/2012, proveniente do banco de dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA). A imagem foi fonte de referência para validação dos resultados do processamento desenvolvido sobre as imagens PALSAR.

4. Métodos

O pré-processamento da imagem PALSAR, já realizado em trabalho prévio, incluiu sua ortorretificação a partir do MDE-SRTM-3” (ANDRADES FILHO; ROSSETTI, 2012), além de sua correção geométrica para o sistema de referência de coordenadas planas e *datum* WGS84, com processamento no nível 1.5. Na presente análise, foram aplicadas inicialmente diversas operações aritméticas entre as polarizações HH e HV (p.e., soma, subtração), com auxílio do aplicativo ENVI 4.7, para a geração de maior variedade de imagens para a análise da morfologia de interesse. Esses dados foram avaliados qualitativamente a partir das características de brilho, textura e contraste dos alvos. Foi ainda realizada análise quantitativa com base em estatística descritiva, com utilização de um conjunto de 1.000 amostras aleatoriamente distribuídas sobre a feição estudada.

Outra técnica utilizada nas imagens multipolarizadas consistiu no uso de filtragem espacial. Inicialmente, foi aplicado filtro de média, em janela de dimensão 3x3, a partir do aplicativo Spring 5.2.3, a fim de agrupar melhor os *pixels* representativos de feições curvilineares da imagem. Isto possibilitou, ainda, uma diminuição do ruído *speckle* nesses dados. Em seguida, com o intuito de amplificar o contraste dos alvos, foi utilizada operação de realce de contraste linear, com auxílio do aplicativo Spring 5.2.3. A imagem resultante de tal operação foi representada por *pixels* com valores de níveis de cinza (ND) inteiros e positivos, variando de 0 a 65.535.

No segundo momento, foi utilizada operação de filtragem passa-alta do tipo direcional em todos os produtos processados previamente. Neste caso, aplicou-se filtro de direção NE com pesos distribuídos assimetricamente em torno de janela móvel de dimensão 3x3 (Figura 2A), dada

a sua melhor eficiência no realce de feições curvilíneas relacionadas a cordões litorâneos e à paleolinha de costa, sugeridas em análises prévias. Finalmente, a fim de combinar as informações de detalhe dos alvos da imagem com as provenientes da imagem submetida à filtragem de média, esses dois produtos foram somados. O resultado dessa adição foi comparado com imagem SAR/PALSAR original não somada, submetida apenas à operação de filtro adaptativo (i.e., Lee, 3x3) e validado com imagem do RapidEye. Uma síntese das operações de filtragem espacial utilizadas em cada imagem até a geração do produto final é ilustrada na Figura 2B.

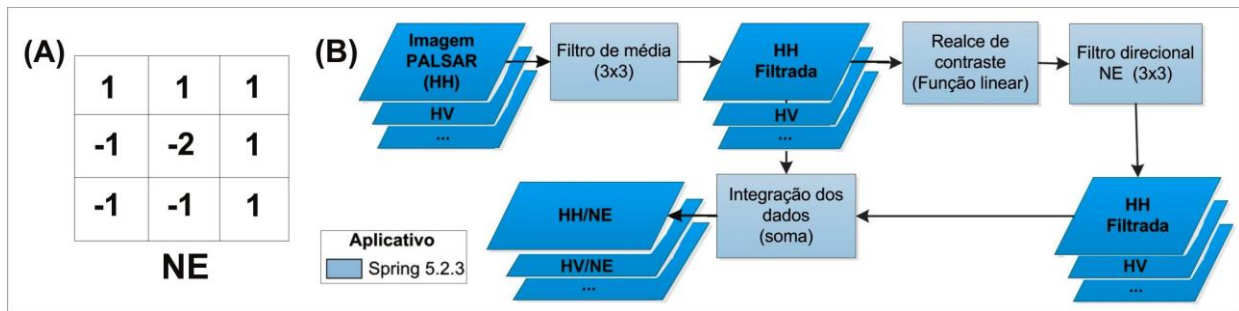


Figura 2. (A) Filtro direcional de orientação NE. (B) Síntese das operações de filtragem espacial aplicadas às imagens PALSAR originais e subprodutos, visando o realce de detalhes de subambientes de paleodelta do rio Paraíba.

5. Resultados e Discussão

Os produtos de sensoriamento remoto e os processamentos testados foram eficientes para revelar a morfologia deltaica e realçar seus subambientes. Das operações aritméticas testadas, os subprodutos resultantes da soma, subtração e diferença normalizada (i.e., $HH+HV$, $HH-HV$ e $HV-HH/HV+HH$) foram os mais adequados no registro de alvos na cena (Figura 3D-F). Na análise exploratória das estatísticas descritivas, observou-se uma distribuição assimétrica dos níveis de cinza com viés para valores baixos em todas as imagens testadas (Figura 4).

O subproduto $HH+HV$ foi o que apresentou o valor mais alto de ND médio (5.617) e de dispersão dos dados, enquanto o subproduto $HV-HH/HV+HH$ exibiu os menores valores de todas as estatísticas computadas (Figura 4). Isto sugere alvos com maior brilho e contraste na cena da primeira imagem (Figura 3E). As imagens HH e HV apresentaram dados que mais se diferenciaram entre si, enquanto as imagens HV e $HH-HV$ foram as que causaram mais confusões (Figura 4). No primeiro caso, isto já era esperado, levando em consideração que o uso de diferentes polarizações pelo sistema sensor gera diferentes respostas de retroespalhamento dos alvos (HENDERSON; LEWIS, 1998).

A análise conjunta dos dados indicou que imagens multipolarizadas originais ou as produzidas por operações aritméticas não foram eficientes para visualizar detalhes da superfície do delta. Isto se deve, sobretudo, à textura rugosa dos alvos da cena devido à influência do ruído *speckle*. No caso do subproduto $HH-HV$, a textura rugosa dos alvos pode ter sido influenciada, ainda, pela operação matemática aplicada (Figura 3D). Portanto, as técnicas de filtragem espacial foram aplicadas apenas para as imagens HH , HV e $HH+HV$. As imagens $HH-HV$ e $HV-HH/HV+HH$, por terem revelado condições visuais insatisfatórias e valores mais baixos nas estatísticas computadas previamente, foram desconsideradas dessa análise.

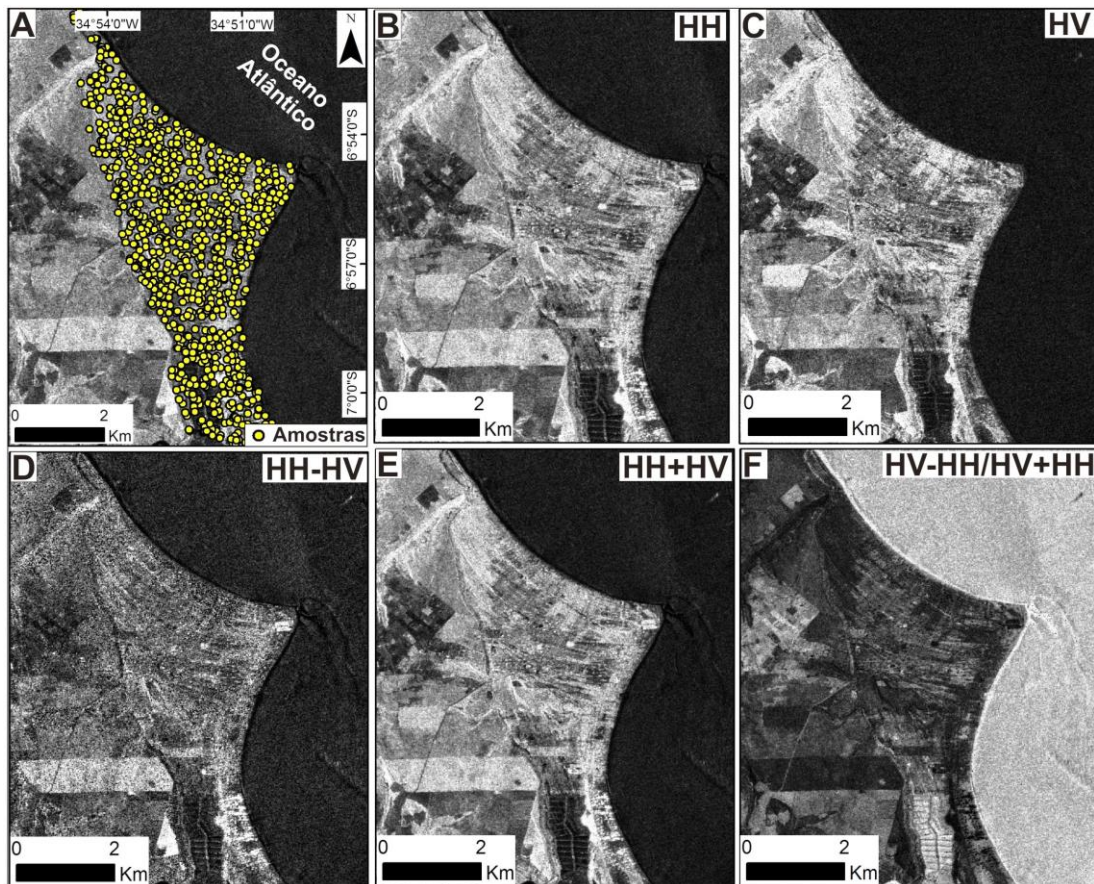


Figura 3. (A) Localização das amostras aleatórias utilizadas para análise estatística descritiva das imagens. Detalhes de imagem SAR/PALSAR na polarização HH (B), HV (C), HH-HV (D), HH+HV (E) e HV-HH/HV+HH (F) (ver localização da área na Figura 1).

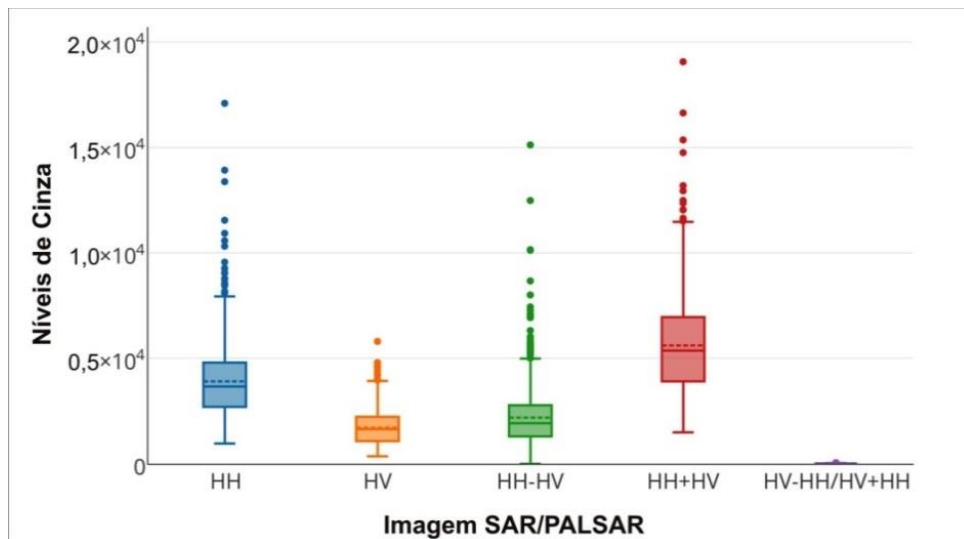


Figura 4. Síntese das estatísticas descritivas, computadas a partir de um conjunto de 1.000 amostras aleatoriamente distribuídas sobre as imagens SAR/PALSAR multipolarizadas originais e subprodutos.

De modo geral, a combinação das imagens filtradas, i.e., imagem submetida à operação de filtragem de média com filtragem direcional, levou não somente à redução do ruído *speckle*, mas também contribuiu para o realce de informações complementares que favorecem a análise do delta (Figura 5). Em particular, esse produto enfatizou detalhes de alvos dispostos na cena em orientação perpendicular ou quase perpendicular à direção de filtragem utilizada (i.e., NE). Isto incluiu o realce de feições atribuídas a cordões litorâneos e à paleolinha de costa (Figura 5 B-D-F-I-K-M), contrariamente às imagens originais, onde tais feições não estavam evidentes (Figura 5 A-C-E-H-J-L). Levando em consideração que filtros direcionais realçam, em geral, feições na imagem dispostas perpendicularmente à direção pré-determinada (CROSTA, 1993; RICHARDS, 1995), a escolha do filtro de direção NE foi a mais adequada no caso da área desse estudo, dada a orientação dos cordões litorâneos de direção NW-SE e à paleolinha de costa de direção NNW-SSE (Figura 5).

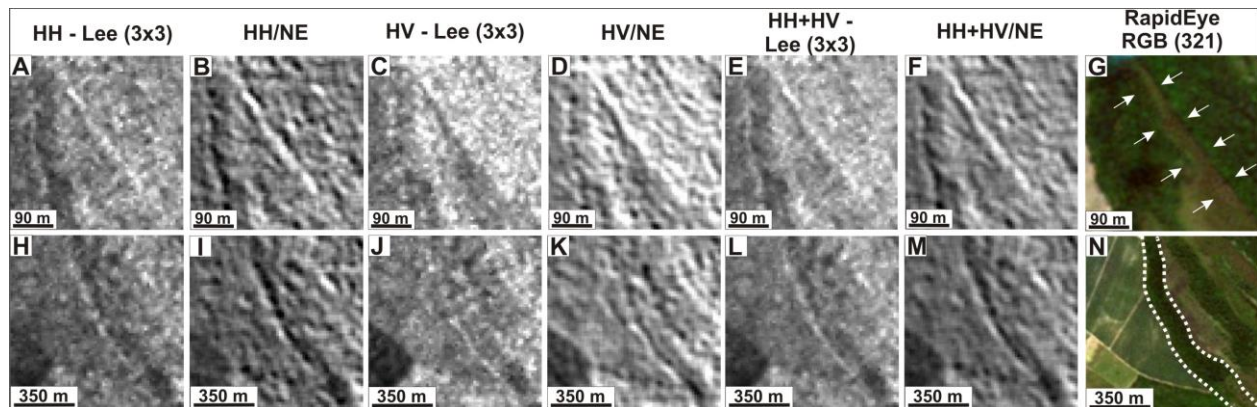


Figura 5. (A-C-E-H-J-L) Imagem SAR/PALSAR original na polarização HH, HV e HH+HV com uso de filtro Lee de janela 3x3 (ver localização da área na Figura 1). (B-D-F-I-K-M) Imagem combinada HH/NE, HV/NE e HH+HV/NE. (G-N) Imagem óptica do sensor RapidEye de resolução espacial de 5 m na composição colorida verdadeira RGB 321 (setas brancas = cordão litorâneo; linhas tracejadas na cor branca = paleolinha de costa).

A análise geral dos produtos combinados leva a propor o uso de imagens PALSAR HH/NE e HH+HV/NE para a caracterização do paleodelta do rio Paraíba. Dessas, a primeira é a mais recomendada, já que a imagem de polarização HH+HV/NE apontou limites com tons de brilho elevados, o que dificulta a análise (Figura 5F). Entretanto, ambas são úteis para revelar a morfologia deltaica com precisão, além de serem também as mais eficientes no realce de detalhes de feições relacionadas a cordões litorâneos e à paleolinha de costa (Figura 5B-F-I-M). Os alvos identificados nessas imagens foram validados em imagem óptica de resolução espacial de 5 m, em composição colorida verdadeira (ver linhas e setas brancas na Figura 5G-N).

A feição de paleolinha de costa mostrou-se mais evidente nos produtos HH/NE e HH+HV/NE (Figura 5I-M). Por outro lado, o traçado dessa feição no terreno foi reduzido na imagem HV/NE (Figura 5K). Apesar de sutil, o registro da feição de paleolinha de costa nos produtos HH/NE e HH+HV/NE também apresentou boa concordância com imagem óptica de resolução espacial mais fina em composição colorida verdadeira. Nessa imagem, a paleolinha de costa ocorre sob extenso cinturão de vegetação arbórea (ver linhas tracejadas na Figura 5N).

Além destas observações, os resultados obtidos com os produtos combinados também variaram de acordo com as polarizações das imagens de radar, levando em consideração que todas elas foram geradas nas mesmas condições de imageamento (i.e., órbita ascendente, azimute

de visada de 78° e ângulo de incidência de 34,3°). O fato da imagem de polarização HV não ter apresentado mesma eficiência que a HH na identificação de cordões litorâneos e paleolinha de costa deve-se ao alto sinal de retorno captado pelo sensor, devido ao espalhamento do tipo volumétrico que interage com dosséis arbóreos (HENDERSON; LEWIS, 1998). Isto justifica, portanto, os elevados tons de brilhos encontrados nessa imagem (ver Figura 5D-K). Interpretações similares a esta, no que diz respeito ao mecanismo de retroespalhamento volumétrico, já foram constatadas em dosséis amazônicos (p.e., HAYAKAWA et al., 2010) e, mais recentemente, no delta do rio Doce (p.e., POLIZEL; ROSSETTI, 2014). No caso das áreas vegetadas, a polarização HH pode ter penetrado mais e interagido melhor com as feições de interesse, possivelmente em função do espalhamento superficial menos afetado por espalhamento volumétrico pelo dossel.

6. Conclusões

As técnicas de sensoriamento remoto utilizadas na presente análise foram favoráveis como métodos auxiliares na identificação de subambientes do paleodelta do rio Paraíba. Em particular, a imagem SAR/PALSAR na polarização HH e o subproduto HH+HV, combinados com técnicas de filtragem espacial, foram os mais eficientes no registro de feições sutis relacionadas com cordões litorâneos e paleolinha de costa. Embora preliminares, os resultados obtidos na presente análise leva a propor que os produtos analisados têm bom potencial para o mapeamento de subambientes deltaicos. Estudos futuros são necessários em diferentes paisagens terrestres, a fim de melhor avaliar o potencial desta técnica objetivando a caracterização de sistemas deltaicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor, e à FAPESP, pelo financiamento desta pesquisa (# 2012/06010-5).

Referências bibliográficas

- Andrades filho, C.O.; Rossetti, D.F. Effectiveness of SRTM and ALOS-PALSAR data for identifying morphostructural lineaments in northeastern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 4, p. 1058–1077, 2012.
- Crosta, A.P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Editora da Unicamp. Campinas, SP: IG/Unicamp. 1993. 170p.
- Elliot, T. Deltas. In: READING, H.G. (ed.) **Sedimentary environments and facies**. Oxford, Blackwell, 1986. p.113-154.
- Elsheikh, A.E.M.; Babikir, I.A.A.; Zeinelabdein, K.A.E.; Elobeid, S.A. The evolution of the river Gash basin eastern Sudan. **Journal of environmental hidrology**, v. 16, n. 6, p. 1-9, 2009.
- Ernoul, L.; Sandoz, A.; Fellague, A. The evolution of two great Mediterranean Deltas: remote sensing to visualize the evolution of habitats and land use in the Gediz and Rhone Deltas. **Ocean and coastal management**, v. 69, p. 111-117, 2012.
- Galloway, W.E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In: BROUSSARD, M. L. (ed.) **Deltas, Models of Exploration**. Houston Geological Society, Houston, 1975. p. 87-98.

Hayakawa, E.H.; Zani, H.; Andrades filho, C.O.; Bertani, T.C.; Rossetti, D.F. Identificação de paleocanais na bacia amazônica a partir de dados de sensoriamento remoto. **Revista de Geografia** (Recife), v. especial, n.1, 2010, p. 20-32.

Henderson, F. M.; Lewis, A. J. **Principles and applications of imaging radar: manual of remote sensing**. New York: John Wiley & Sons, 1998, 896 p.

Ho, L.T.K.; Umitsu, M.; Yamaguchi, Y. Flood hazard mapping by satellite images and SRTM-DEM in the Vu Gia - Thu Bon alluvial plain, central Vietnam. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volume XXXVIII. **Anais...** (Kyoto), 2010. p. 275-280.

Polizel, S. P.; Rossetti, D. F. Caracterização morfológica do delta do rio Doce (ES) com base em análise multissensor. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.15, n.2, 2014. p.311-326.

Rabus, B.; Eineder, M.; Roty, A.; Bamler, R. The Shuttle Radar Topographic Mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 241-262, 2003.

Richards, J.A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 2.ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 340p.

Rossetti, D.F.; Góes, A.M.; Bezerra, F.H.; Valeriano, M.M.; Brito Neves, B.B.; Ochoa, F.L. Contribution to the stratigraphy of the onshore Paraíba Basin, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, v. 84, n. 2, p. 313-334, 2012.

Wright, L.D. Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis. **Bulletin of the American Geological Society**, v. 88, p. 857-868, 1976.