

Elaboração de Produtos Interferométricos ERS 1/2 Aplicados nos Ambientes Costeiros da Foz do Amazonas

Ulisses Silva Guimarães^{1,2}
Igor da Silva Narvaes³
Thanan Walesza Pequeno Rodrigues²
Nicola Saverio Holanda Tancredi¹
Carlos Eduardo Pereira Tamasauskas¹

¹ Sistema de Proteção da Amazônia / Centro Regional de Belém (SIPAM/CR-BE)
Caixa Postal 7060 - 66617-420 - Belém, PA - Brasil
{ulisses.silva, nicola.trancredi, carlos.tamasauskas}@sipam.gov.br

² Universidade Estadual Paulista - UNESP
Caixa Postal 215 - 01049-010 - São Paulo, SP
twalesza@gmail.com

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE / Centro Regional da Amazônia (CRA)
CEP 66077-830 - Belém- PA, Brasil
igor.narvaes@inpe.br

Abstract. The ERS 1/2 data are configured in Tandem arrangement, which allows performing interferometric techniques with the revisit up to one day. This initiative acquisition broadens the application of SAR interferometric techniques, specifically in environments that behaves like incoherent and partially coherent. The coastal environments of the Amazon estuary are under tropical conditions and great dynamic, for that it is classify as extremely complex which demands specific solutions to achieve advances in topographic and thematic mapping. This research proposes to perform part of the InSAR processing chain with ERS 1/2 SAR SLC data used in coastal environments of the Amazon estuary. This study contributed with the creation of a preliminary interferometric product for a qualitative indication of the techniques and following the possible InSAR products that may be developed. It was prepared orthoimages with information of backscattering coefficient and conjugates interferograms flat phase and interferometric coherence. The most suitable for the development of InSAR techniques coastal environment is the Coastal Plateau, and, less suitable was the portions of dense forest cover as the most continental environments like the Hills of Amapá and the marine-fluvial plain adjacent to the Amazon estuary.

Palavras-chave: interferometry SAR, coherence, coastal environment of Amazon estuary, interferometria SAR, coerência e ambientes costeiros da Foz do Amazonas

1. Introdução

A Interferometria SAR (InSAR) se refere a técnica de medição acurada baseada em propriedades coerentes da radiação eletromagnética utilizando duas ou mais ondas que se interferem com previsibilidade (Woodhouse, 2006). A técnica InSAR combina imagens complexas de microondas registradas por antenas em uma linha de base consistente definida por diferentes localizações ou diferentes instantes no tempo (Paradella et al., 2013). Esta técnica possui como principais aplicações o mapeamento topográfico, temático e deformações terrestres, os quais o nível de precisão e acurácia dos modelos está primariamente ligado ao: i) sistema sensor como o comprimento de onda, polarização, resolução espacial, geometria de aquisição, relação sinal-ruído, plataforma e processamento; e, ii) as características físicas da paisagem como propriedades eletro-geométricas, umidade, condições atmosféricas, textura e rugosidade (Lewis e Henderson, 1998).

Para se obter Modelos Digitais de Elevação (MDE) um método possível é o InSAR orbital o qual a sensibilidade da técnica está estritamente relacionada a dois parâmetros do sistema sensor: i) a defasagem temporal na aquisição das cenas o que implica no grau de

correlação do sinal complexo de radar; e, ii) a linha de base definida pela localização das observações. Observações com defasagens temporais longas aumentam o ruído em prejuízo da coerência interferométrica, e, linhas de base longas e consistentes permitem maior precisão na medição da diferença de fase (Wegmüller, 2009).

A aplicação da técnica InSAR está atrelada ao compromisso entre o método de tratamento coerente baseado em uma previsibilidade de padrões de interferência e a investigação de ambientes naturais com comportamento variando entre coerente, parcialmente coerente e incoerente (Woodhouse, 2006). Portanto, o delineamento entre o modo de aquisição SAR e o meio físico de interesse é exatamente impactante no processo de mapeamento.

A European Space Agency (ESA) lançou dois satélites de observação terrestre o ERS-1 e ERS-2, estes respectivamente operaram entre anos de 1991 a 2000 e 1995 a 2011. O arranjo entre os satélites ERS foi denominado missão Tandem ERS 1/2 o qual se desenhou a mesma geometria de aquisição propiciando uma revista interferométrica de até 1 dia. Esta iniciativa de aquisição SAR ampliou a aplicação de técnicas interferométricas, especificamente em ambientes de comportamento incoerente e parcialmente coerente (ESA, 2014).

Os desafios do mapeamento de ambientes costeiros tropicais estão na utilização de fontes de dados multifrequência e na extração de informação completa do sinal em amplitude e fase. A aplicação de técnicas InSAR tem restrições de precisão e acurácia quando aplicados a ambientes costeiros por haver muita dinâmica e diversidade o que altera a coerência em longos períodos de revisita, entretanto há potencial para equacionar carências de mapeamentos topográficos e geomorfométricos o que indicaria parâmetros do imageamento SAR mais adequados a cada ambiente (Wang, 2009).

Há diversos estudos voltados para costa amazônica envolvendo mapeamento de ambientes costeiros por meio de dados SAR (Santos, 2006; Souza Filho et al., 2011, Teixeira, 2011). Estas contribuições focam na identificação geomorfológica e na quantificação dos ambientes que tem sofrido mudanças em uma escala local a regional por meio de informações de radar em amplitude e multipolarização, mostrando resultados promissores com a utilização desta técnica.

Neste contexto, esta pesquisa se propõe a executar parte da cadeia de processamento InSAR para os dados ERS 1/2 SAR SLC aplicados nos ambientes costeiros da foz do Amazonas, por meio da obtenção de produtos interferométricos preliminares para obtenção de um indicativo qualitativo das técnicas empregadas e por seguinte os possíveis produtos InSAR que possam ser elaborados em ambientes costeiros com informações de coeficiente de retroespalhamento e produtos conjugados de interferogramas de fase plana e coerência interferométrica.

2. Área de Estudo

A foz do Amazonas é um ambiente costeiro singular caracterizado como um complexo deltaico-estuarino de comportamento híbrido delineado por forçantes de um vale afogado com gigantesca descarga hídrica e sedimentar (Nittrouer et al., 1986). A zona costeira amazônica se caracteriza por uma plataforma continental extremamente larga, planícies extensas que são periodicamente inundáveis e platôs mais elevados formados em rochas sedimentares mais antigas. A foz do Amazonas é dominada por macromarés semi-diurnas tornando a paisagem suscetível a mudanças, além disso, as condições tropicais úmidas são severas, marcadas por elevadas temperaturas, intensas precipitações e permanente cobertura de nuvens que intensifica a denudação do relevo (El-Robrini et al., 2006).

A área de estudo foi delineada por duas faixas de imageamento (*tracks*) executados na órbita dos satélites ERS 1/2 (órbita descendente) que cobrem a foz do Amazonas entre a costa do Amapá e a Ilha de Marajó (Figura 1).

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

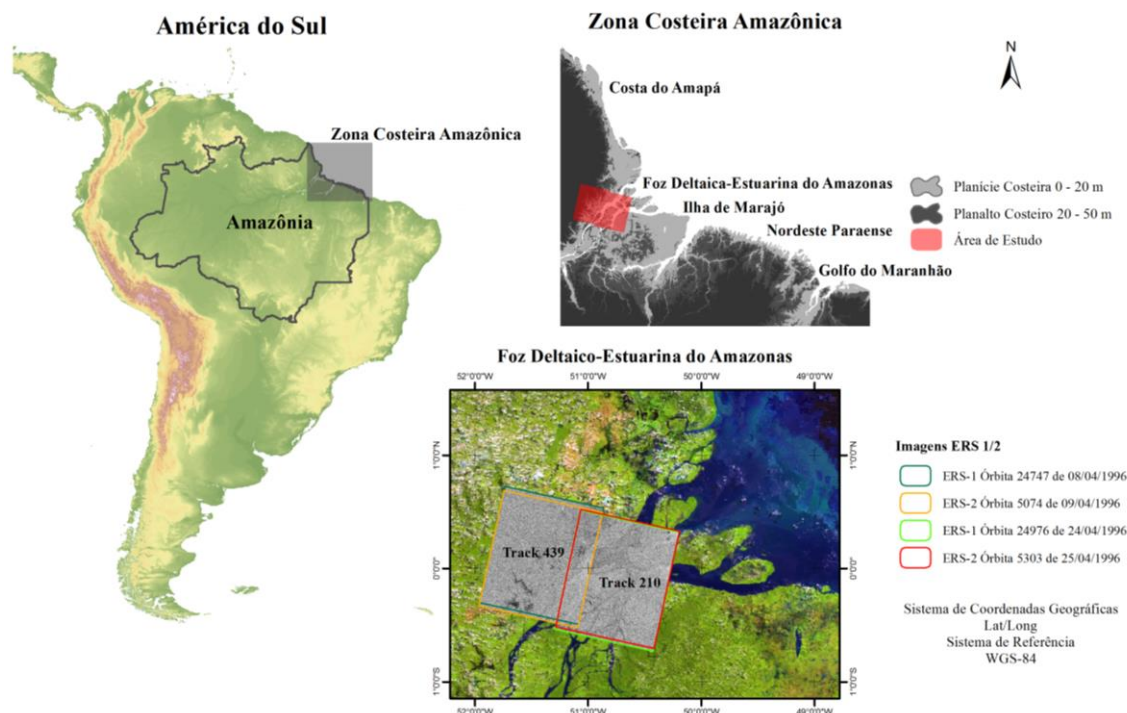


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo com a localização dos tracks ERS 1/2.

3. Material e Métodos

Os dados primários para elaboração dos produtos interferométricos foram imagens ERS 1/2 produzidas pelo instrumento *Active Microwave Instrument* (AMI) que opera na banda C do espectro de microondas com célula de resolução amostrada no terreno em torno de 30 m. As principais características do instrumento AMI a bordo das plataformas ERS1/2 constam na Tabela 1:

Tabela 1 – Principais características das plataformas ERS 1/2 no sistema AMI modo imageador.

Programa	ESA's Earth Observation	
Plataforma	ERS-1	ERS-2
Operação	17/07/1991-10/03/2000	21/04/1995-05/09/2011
Órbita	Ascendente ($\pm 1:30$ GMT) e Descendente ($\pm 13:30$ GMT)	
	Sol-Síncrona	
	782-785 km	
Faixa Imageada	100 km/cruzado ao trajeto	
Ângulo de Incidência	Alcance Próximo 20,1°	
	Centro 23°	
	Alcance Distante 25,9°	
Sensor/Produto	<i>Active Microwave Instrument</i> (AMI)	
Banda C	5,6 cm / 5,3 GHz	
Polarização	VV	
Resolução Espacial	Range $\leq 26,3$ m / Azimute ≤ 30 m	
Resolução Radiométrica	$\leq 2,5$ dB no sigma zero = -18 dB	
Revisita	35 dias	

Fonte: ESA (2014)

Esta pesquisa utilizou 2 pares de imagens ERS 1/2 em órbita descendente para cobrir a área de interesse na foz do Amazonas. Para esta aplicação foram definidas imagens em

formato primário de processamento *Single Look Complex* (SLC) com seus respectivos arquivos de órbita precisa em uma defasagem temporal de 1 dia (Tabela 2).

Tabela 2 – Principais características das plataformas ERS 1/2 no sistema AMI modo imageador.

Imagens ERS 1/2	Data	Produto	Orbit/Track	Linha de Base (m)	Revisita Interferométrica (dias)
ERS-1 SAR SLC	08/04/1996	SAR_IMS_1P	24747/439	108	1
ERS-2 SAR SLC	09/04/1996	SAR_IMS_1P	5074/439		
ERS-1 SAR SLC	24/04/1996	SAR_IMS_1P	24976/210	97	1
ERS-2 SAR SLC	25/04/1996	SAR_IMS_1P	5303/210		

Para análise em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) foi necessário utilizar dados auxiliares como: i) base de dados vetorial temática de geomorfologia SIPAM-IBGE em escala de 1:250.000; e, ii) o MDE proveniente do *Shuttle Radar Topography Mission* filtrado de vórtices em resolução planimétrica de 3 arco-segundos.

Os principais procedimentos para tratar dados ERS-1/2 foram executados na ferramenta livre Next ESA SAR Toolbox (NEST). A organização destas etapas da pesquisa consta na Figura 2:

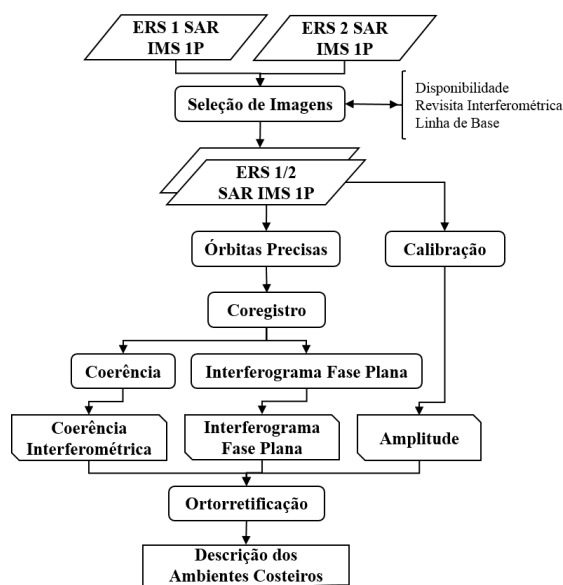


Figura 2. Principais procedimentos aplicados aos dados ERS 1/2

A seleção de imagens é determinante no tratamento dos dados pelo fato de se admitir a revisita interferométrica com a menor defasagem temporal possível para uma mesma geometria de aquisição entre as plataformas ERS-1/2. Além disto, o nível de processamento *SLC* é pré-requisito por possibilitar acesso as informações reais e imaginárias em plena performance de resolução espacial em range e azimuth. Em adição, os dados *SLC* contemplam informações auxiliares nos metadados que permitem o cálculo das efemérides precisas, e estes por sua vez são parâmetros fundamentais para a geocodificação das imagens.

A aplicação de órbitas precisas é o processamento para refinar o cálculo do vetor de estado das plataformas satelitais o que retorna efemérides acuradas de posição e velocidade, e, no caso dos dados ERS 1/2 foi utilizado o algoritmo Delft. Para haver comparabilidade entre os dados de amplitude optou-se pela calibração das imagens com geração sigma zero (σ^0).

O coregistro é um tratamento crítico dentro das técnicas InSAR por relacionar células de resolução de uma mesma feição entre um conjugado de imagens mestre e escravas, de modo a satisfazer um nível de acurácia à nível de subpixel (Mura, 2000). O coregistro das cenas foi

realizado de forma automática com seleção de pontos de controle (*Ground Control Points - GCP's*) baseado na sobreposição do sinal em amplitude e fase.

A partir de um conjunto de imagens complexas coregistradas, estas se apresentado com ou sem uma referência de fase, pode-se fazer a estimativa da coerência interferométrica, o qual é baseado na média móvel de um conjunto amostral. A coerência interferométrica é dada pelo módulo do coeficiente de correlação complexo γ com valores entre 0 a 1 o que conduz a um grau de qualidade para aplicações InSAR, onde valores mais próximos de 1 indicam que o padrão de valores complexos de todos os N pixels são completamente correlacionados, ao passo que no outro extremo ($|\gamma| = 0$) são descorrelacionados e considerados incoerentes (Woodhouse, 2006).

O interferograma é obtido posteriormente ao coregistro e representam a diferença de fase entre pixels de um sinal complexo de radar, estes são apresentados em um padrão de interferências formando franjas de valores de fase em um ciclo de 2π . O interferograma de fase plana dobrado é considerado a disposição cíclica das diferenças de fase em franjas os quais podem ter ou não a remoção da contribuição de diferença de fase exercida pela curvatura da superfície terrestre de referência (Hassen, 2001). O interferograma de fase plana com franjas delineadas e sem ruído permitem aos dados de entrada as estimativas contínuas e absolutas do valor altimétrico nas fases posteriores do processamento InSAR.

Para realizar a extração de informações espaciais em SIG fez-se a correção geométrica por ortorretificação baseada no computo de órbitas precisas, obtidos para os dados ERS 1/2 e os dados auxiliares provenientes do modelo digital de elevação (MDE) do SRTM.

4. Resultados e Discussões

A seleção de imagens ERS 1/2 foi definida por meio de critérios como disponibilidade, linha de base e revisita interferométrica. Foi possível estimar um valor de coerência modelado a priori o qual considera a linha de base, a revisita interferométrica e a frequência Doppler centroide, o qual ficou em torno de 0,74 para ambas as cenas. As seleções de dados ERS 1/2 indicaram um grau de coerência moderado a forte para a área de interesse.

O coregistro das imagens ERS 1/2 obteve o nível esperado para tratamentos InSAR com erro médio padrão (*Root Mean Square Error – RMS*) menor que 0,05 *pixel*. O conjugado ERS 1/2 track 439 obteve 69 GCP's e RMS de 0,013 *pixel*, e, o conjugado ERS 1/2 track 210 obteve 18 GCP's e RMS de 0,018 *pixel*. É perceptível a boa performance de ajuste entre os pares observando os RMS, entretanto, o número de pontos não contemplou a maior parte das cenas conjugadas. Os GCP's ficaram concentrados em áreas com comportamento mais coerente (Figura 3).

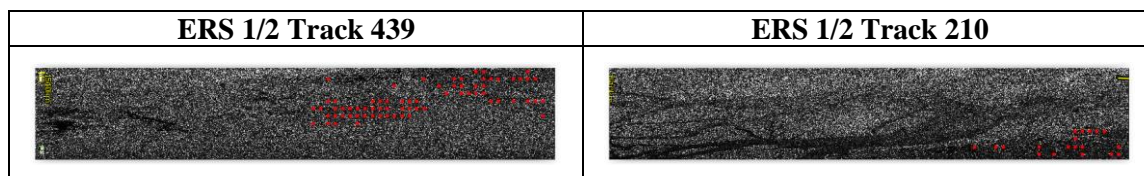


Figura 3. Imagens SLC conjugadas no processo de coregistro com os GCP's plotados em vermelho.

A estimativa de coerência interferométrica das imagens ERS 1/2 foi considerada de moderada a fraca. Nas cenas dos *tracks* 439 e 210 apresentaram respectivamente as médias da coerência interferométrica com 0,33 e 0,29, e, desvio padrão de 0,20 e 0,16. As franjas dos interferogramas em fase plana foram delineadas apenas em superfícies que se comportaram com moderada a forte coerência interferométrica. A espacialização da coerência interferométrica e interferogramas em fase plana estão relacionados com as superfícies de comportamento coerente, porém é perceptível que as maiores porções das cenas desempenham comportamento incoerente (Figura 4).

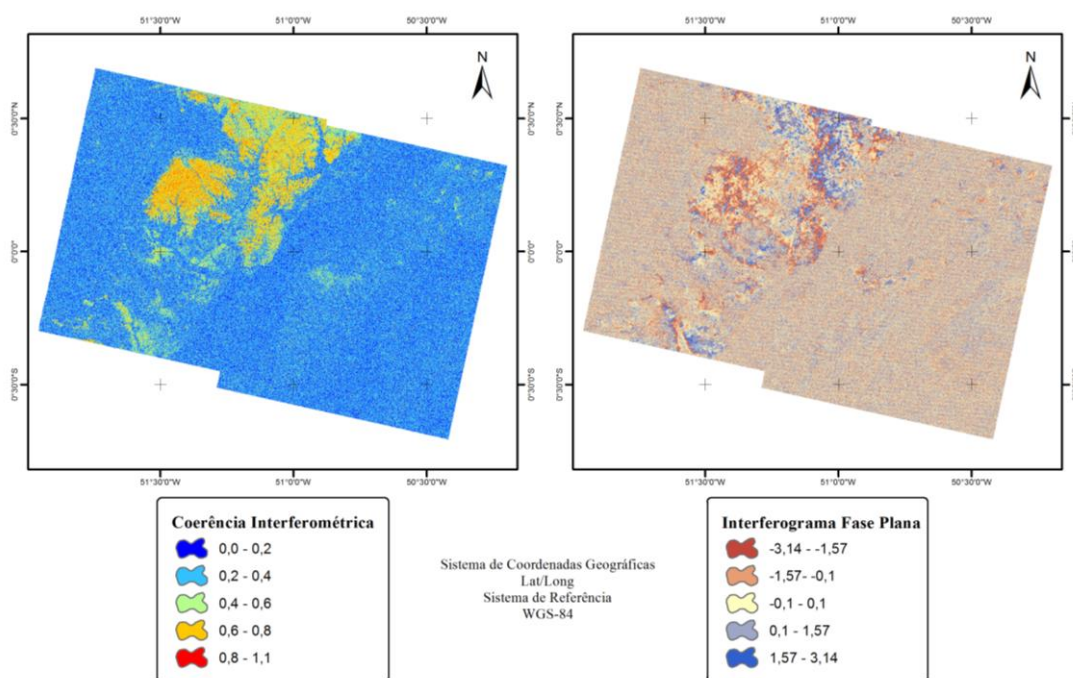


Figura 4. Espacialização da coerência interferométrica e interferograma fase plana.

A coerência interferométrica foi mais elevada para as unidades de Tabuleiros Costeiros com média de 0,45, a passo que os valores mais baixos encontrados são referentes a unidade das colinas do Amapá com 0,27. As planícies de modo geral variam sua coerência entre as médias de 0,28 e 0,31. Estas características de coerência estão relacionadas aos tipos de cobertura associadas majoritariamente nas unidades observadas o qual ambientes de solo exposto tem delineado mais franjas interferométricas e indicam maior chance de obter produtos InSAR com precisão. Percebe-se que na escala observada não foi constatado grande variabilidade capaz de separar as classes utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento e isto pode estar relacionado as características da imagem (resoluções, polarização e geometria de aquisição), características ambientais da cena (período chuvoso, condições de maré e/ou condições atmosféricas) e os processamentos até o momento utilizados (por exemplo, não foi utilizado técnicas *multilook*, filtragem do efeito *speckle*, ou extração de índices específicos de solo e vegetação). As observações das imagens para com os ambientes costeiros estão na Tabela 3 e Figura 5.

Tabela 3. Características dos ambientes costeiros da foz do Amazonas para com a coerência interferométrica, interferograma em fase plana e coeficiente de retroespalhamento.

Ambientes Costeiros	Coerência Interferométrica		Interferograma Fase Plana	Coeficiente de Retroespalhamento	
	Média	Desvio	Franjas/Ruído	Média	Desvio
Colinas do Amapá	0,27	0,12	-Franjas/ +Ruído	-9,90	4,67
Planaltos Setentrionais	0,29	0,14	-Franjas/ +Ruído	-10,01	4,61
Tabuleiros Costeiros	0,45	0,20	±Franjas/ -Ruído	-10,70	4,70
Depressão Setentrional	0,28	0,12	-Franja/ +Ruído	-9,91	4,63
Planície Fluvioacustre	0,31	0,15	-Franjas/ -Ruído	-11,44	5,41
Planície Fluviomarinha	0,29	0,13	-Franjas/ +Ruído	-9,66	4,74
Planícies Fluviais	0,28	0,12	-Franjas/ +Ruído	-10,81	5,54

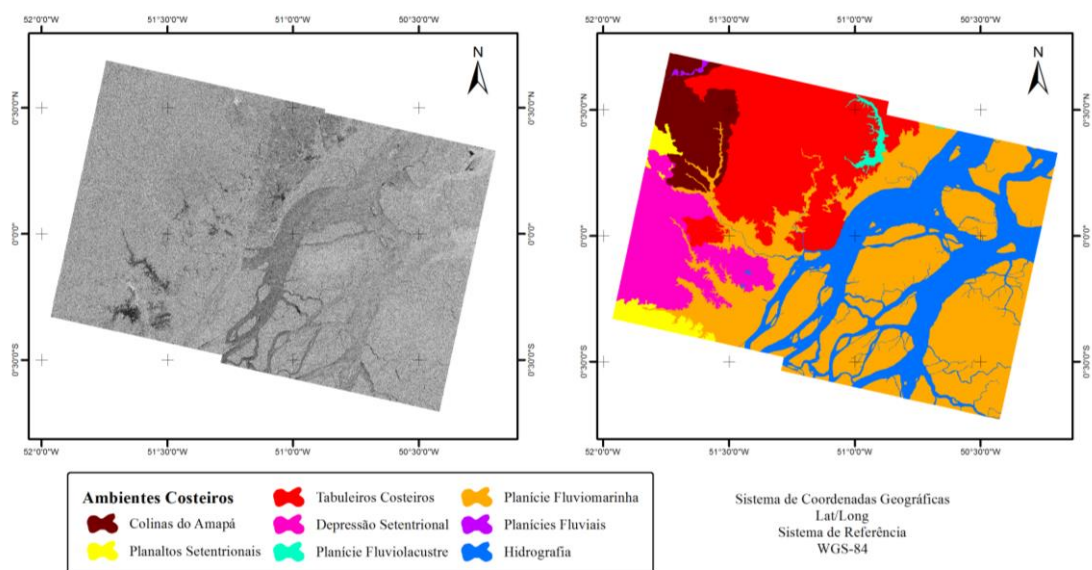


Figura 5. Espacialização da imagem de coeficiente de retroespalhamento em correspondência aos ambientes costeiros da foz do Amazonas.

5. Conclusões

Os dados ERS 1/2 AMI SAR SLC tem potencial para aplicações InSAR de mapeamento topográfico, monitoramento de deformações e detecções de mudanças nos ambientes costeiros da foz do Amazonas, mesmo em superfície de baixa variação altimétrica e sujeitas a mudanças constantes decorrentes sobretudo da maré.

A coerência interferométrica moderada a forte a priori para os ambientes costeiros da foz do Amazonas não foi suficiente para manter informação dos produtos interferométricos alheios as condições de ruído, mesmo com a melhor diferença temporal de aquisição em 1 dia. Neste teste inicial, a utilização InSAR dos dados ERS 1/2 aplicados na foz do Amazonas forneceu indícios de que um MDE derivado deste processo pode vir a ter uma precisão inferior a capacidade do sistema sensor. De mesma forma, a investigação deve prosseguir esgotando as possibilidades de tratamento com o uso de *multilook* e redução do efeito *speckle*, além de ampliar o número de passagens em mesma geometria possibilitando formar um *stack* (compilação de imagens de características semelhantes a nível de subpixel) para executar técnicas como o DInSAR também com outros sistemas sensores que fazem continuidade nas missões de observação da Terra realizadas pela ESA como as plataformas ENVISAT e o Sentinel.

Esta abordagem preliminar mostrou que o ambiente costeiro mais adequado para o desenvolvimento de técnicas InSAR é o Tabuleiro Costeiro, em detrimento de porções de densa cobertura florestal como foi o caso dos ambientes mais continentais como as Colinas do Amapá e a própria Planície Fluviomarinha adjacente a foz do Amazonas. Esta relação entre o coeficiente de correlação complexa e os elementos presentes nos ambientes costeiros deve ser investigado nos próximos estudos.

Agradecimentos

Esta pesquisa faz menção ao uso de dados ERS 1/2 os quais foram fornecidos pela European Space Agency – ESA, esta instituição possibilita acesso amplo por meio do Programa ESA's Earth Observation.

Referências

El-Robrini, M. et al. Atlas de erosão e progradação da zona costeira do Estado do Pará-Região Amazônica: Áreas oceânica e estuarina. **Atlas de Erosão e Progradação da Zona Costeira Brasileira. São Paulo**, p. 1-34, 2006.

European Space Agency. 2014. ESA Earth Observation Missions. Disponível em <<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions>>. Acessado em 05 de Agosto de 2014.

Hanssen, R. F. **Radar interferometry: data interpretation and error analysis**. Springer, 2001

Henderson, F. M. et al. **Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing, volume 2**. John Wiley and sons, 1998.

Mura, J. C. Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-Insar. **J C Mura.– São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 2000.

Nittrouer, C. A. et al. The deltaic nature of Amazon shelf sedimentation. **Geological Society of America Bulletin**, v. 97, n. 4, p. 444-458, 1986.

Paradella, W. R. et al. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 64/4, 2013.

Santos, V. F. **Ambientes Costeiros Amazônicos: Avaliação de Modificações Ambientais por Sensoriamento Remoto**. Tese de Doutorado. 2006. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE.

Souza-Filho, P. W. M. et al. Discrimination of coastal wetland environments in the Amazon region based on multi-polarized L-band airborne Synthetic Aperture Radar imagery. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 95, n. 1, p. 88-98, 2011.

Teixeira, S. G. **Radar de abertura sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento de zonas úmidas costeiras**. 2011. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Wang, Y. (Ed.). **Remote sensing of coastal environments**. CRC Press, 2009.

Wegmüller, U. et al. DEM generation using ERS–ENVISAT interferometry. **Journal of Applied Geophysics**, v. 69, n. 1, p. 51-58, 2009.

Woodhouse, I. H. **Introduction to microwave remote sensing**. Crc Press, 2005.