

Radars Imageadores nas Geociências: Status e Perspectivas

Waldir Renato Paradella¹
Athos Ribeiro dos Santos¹
Paulo Veneziani¹
Edson Soares Pereira da Cunha²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP
{waldir, athos, paulo}@ltid.inpe.br

²Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CENPES) - PETROBRAS
CEP 21949-900 - Rio de Janeiro -RJ
ercunha@petrobras.com.br

Abstract. Results from more than a decade of Synthetic Aperture Radar (SAR) applied to Geoscience in the moist tropics have shown that the technology has provided useful information, mainly derived through qualitative approaches. Images of amplitude (monoscopic and stereoscopic analysis, integrated products and textural classification) have been used for terrain mapping. The paper discusses current application trends for cartography and geology based on conventional radar data (one frequency, one polarization) and perspectives driven by a more quantitative approach with the advent of multipolarized, polarimetric and interferometric imaging radars.

Palavras-Chave: SAR, cartografia, geologia, radares convencionais e polarimétricos, região Amazônica
Key-words: SAR, cartography, geology, conventional and polarimetric radars, Amazon region

1.Introdução

O futuro das aplicações com radares imageadores nas Geociências, passa pelo uso de abordagens mais quantitativas. Se for analisada a tendência das aplicações, desde o advento dos imageamentos sistemáticos do planeta com o ERS-1 (1991), é constatada uma ênfase dominante no uso qualitativo da informação (brilho), restrita à amplitude do sinal retroespalhado. Desta forma, as imagens tem sido usadas principalmente através de interpretações visuais similares às utilizadas com fotos aéreas e imagens ópticas. Apesar de efetiva, a abordagem qualitativa subutiliza o conteúdo de informação disponível na onda retroespalhada. Além da amplitude, a polarização e a fase são importantes fontes de informação dos alvos em imagens SAR, que requerem para sua utilização, uma compreensão melhor dos mecanismos de interação energia/alvo e radares mais avançados, i.e, os radares polarimétricos. Tais radares permitem a síntese total dos mecanismos de retroespalhamentos dos alvos, indicativos de propriedades geométricas e elétricas. O artigo explora a tendência atual da utilização de dados SAR e as perspectivas em aplicações cartográficas e geológicas com a iminência da operação dos radares aeroportados multipolarizados, polarimétricos e interferométricos do SIVAM-SIPAM e dos lançamentos orbitais para 2005-2006 (ALOS/PALSAR e RADARSAT-2).

2.Fundamentação

O radar imageador é um sensor de rádio-freqüência que permite derivar informações sobre características físicas (geometria, forma) e elétricas dos alvos. A capacidade de prover imagens de elevada resolução especial, de modo independente de condições atmosféricas e fonte solar, é particularmente importante para regiões como a Amazônia, onde a presença de chuvas, nuvens, bruma e fumaça impõem restrições ao uso de sensores ópticos. Além disso, o

radar imageador é o único sensor remoto com penetrabilidade no dossel vegetal e oferece a capacidade adicional da polarimetria e interferometria.

Os atributos do sinal retroespalhado em um radar são: comprimento de onda (λ), que corresponde à distância que a onda trafega no tempo requerido para gerar um ciclo, a amplitude, que refere-se ao máximo desvio em altura da onda e a fase, que descreve a posição das cristas e vales com relação a um datum ou posição de referência.

Uma outra importante fonte de informação de alvos é a polarização. A energia em microondas tem um componente polarizado definido pelo vetor campo elétrico (E), freqüentemente linear, i. é, horizontal (H) ou vertical (V). Outros possíveis estados de polarização incluem as circulares e elípticas, que descrevem orientações angulares de E e sua variação no tempo. Imageamentos com radares polarizados linearmente são os mais comuns (ERS-1, JERS-1, RADARSAT-1, ERS-2), operando com microondas polarizadas horizontalmente (H) ou verticalmente (V) e registrando somente a amplitude do sinal recebido (componentes V e/ou H). Conseqüentemente, o sinal detectado pode ter quatro diferentes modos: HH (transmite H, recebe H), VV (transmite V, recebe V), HV (transmite H, recebe V) e VH (transmite V, recebe H). Todavia, radares convencionais não têm a capacidade de medir as propriedades totais de polarização dos alvos descritas pelas assinaturas polarimétricas, sintetizadas somente através de radares polarimétricos, que transmitem ondas em ambas polarizações (H e V) e registram a amplitude e a fase do sinal recebido (Figura 2).

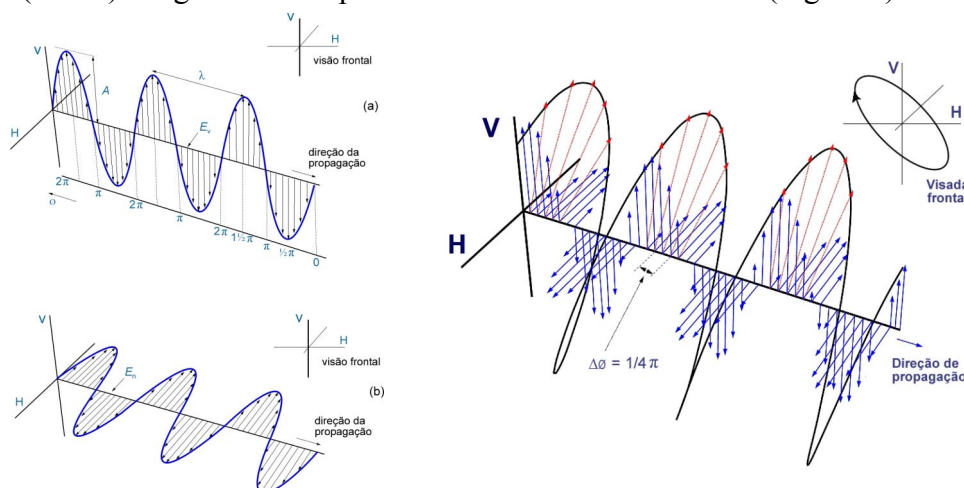


Figura 1. (A) Atributos da onda: comprimento (λ), amplitude (A), fase (ϕ), campo elétrico vertical (E_v) e campo elétrico horizontal (E_h); (B) Polarização da onda: para uma diferença de fase dos dois componentes polarizados ($\Delta\phi$) de $1/4\pi$ resulta em uma onda com uma polarização elíptica (fonte: Van der Sanden 1997).

Em síntese, além da informação de amplitude, a polarização e a fase são importantes fontes de informação dos alvos em imagens SAR. As discussões a seguir examinam os diversos aspectos ligados à extração de informações com radares imageadores para aplicações cartográficas e geológicas no trópico úmido.

3. Discussões

3.1. Aplicações Cartográficas

Dois métodos tem sido utilizados para a extração da altimetria com radares orbitais: a estereoscopia (ou radargrametria) e a interferometria. Na estereoscopia, a elevação é obtida de medidas de discrepâncias no posicionamento de um ponto no terreno em um par de imagens

de amplitude, tomadas sob ângulos de observação distintos. A estereoscopia depende da identificação do quanto um ponto foi deslocado em uma imagem em relação à outra imagem (paralaxe), e utiliza estimativas de correlação para medir o deslocamento com precisão de subpixel. Na interferometria, a elevação é obtida de diferenças da fase do sinal retroespalhado, em tomadas sob geometrias distintas. A escala de sensibilidade das abordagens é, portanto distinta, ligada às formas diferentes de como um SAR mede distâncias sensor/alvo. A interferometria é mais precisa, pois utiliza medidas de frações do comprimento de onda, enquanto que a estereoscopia utiliza medidas de células de resolução espacial (metros). A menor sensibilidade da estereoscopia vem do fato de que é necessária uma mudança maior na topografia para deslocar uma feição em um pixel, enquanto que a mesma mudança no relevo causará uma diferença de fase de muitos radianos na interferometria.

Vários resultados de literatura têm focado o uso da estereoscopia RADARSAT-1 (Toutin 1998). Os experimentos tem sido conduzidos em condições mais favoráveis que no trópico úmido, i.e., áreas com cobertura vegetal não densa, presença de pontos notáveis bem definidos nas imagens, facilitando o uso de GCPs (*Ground Control Points*) na geração de DEMs absolutos e de ICPs (*Independent Check Points*) na estimativa de acurácias de elevação. Os erros altimétricos, expressos por LE90 (Erro Linear com 90% de probabilidade) tem variado de 12m (pares Fine) a 20 m (pares Standard). Investigações com estéreo-pares F2/F5 para relevos planos em Tapajós e montanhosos em Carajás (Figura 2), confirmam o potencial da estereoscopia para mapeamento altimétrico (Paradella et al. 2003, 2004). DEMs relativos (sem GCPs) e absolutos (com uso de GCPs) atenderam aos requisitos de altimetria do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) nacional nas escalas de 1:250.000 (classe A) e 1:100.000, classe A (Tapajós) e B (Carajás). Com o advento do RADARSAT-2, com melhor resolução espacial, maior intervalo de incidência e melhor controle de órbita, serão possíveis DEMs com acurácia de elevação entre 5-10 metros (Van der Sanden & Ross 2004).

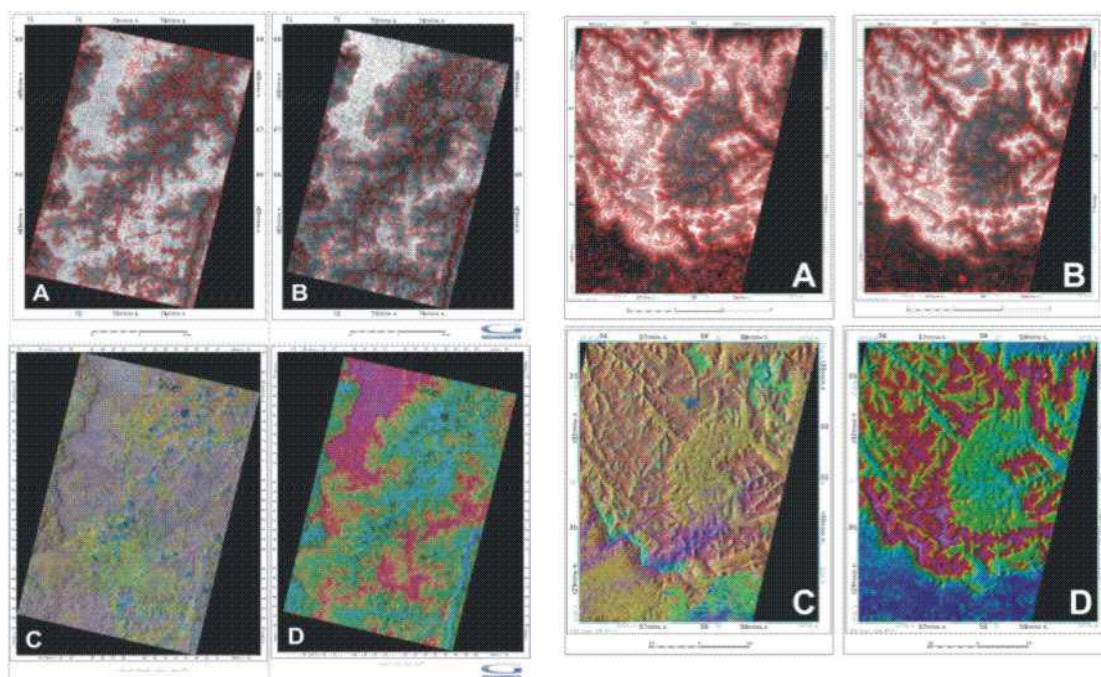


Figura 2. DEMs relativos (A), absolutos (B) e integração SAR/Ópticos (C) e SAR/DEM (D) usados na geração de cartas topográficas em Tapajós (esquerda) e Carajás (direita). (Fonte: Paradella et al. 2003, 2004).

A interferometria (*InSAR*) orbital é outra alternativa na extração de elevação com dados SAR. A *InSAR* combina imagens complexas adquiridas ou por dois satélites observando a

mesma superfície ou com um satélite adquirindo duas imagens defasadas no tempo (*repeat-pass*). As diferenças em fase entre as duas trajetórias (em *range*) são usadas para derivar a elevação do terreno. Enquanto na estereoscopia a distância de separação entre as visadas (*perpendicular baseline*) é de poucas centenas de quilômetros, na interferometria é de dezenas a poucas centenas de metros. Também o ângulo de interseção (diferença entre as incidências) é muito menor na interferometria que na estereoscopia. Atualmente, a decorrelação temporal tem sido um dos limitantes do maior uso da interferometria orbital nos trópicos usando-se satélites com repetições de passagem e bandas com pequenos λ (banda C). Além disso, sob condições de relevo acidentado, efeitos de sombreamento e *layover* contribuem para a perda de coerência nos dados que interferem nos resultados. Estes fatores explicam os resultados pobres na geração de DEMs interferométricos em banda C para floresta úmidas nas Filipinas, com imagens ERS-1 e ERS-2 com 24 horas de intervalo entre aquisições (Kervyn 2001). Uma alternativa com repetições de passagens seria usar comprimentos de ondas maiores (banda L), menos sensível à decorrelação temporal. Este é um tópico importante de pesquisa a ser explorado com o lançamento do ALOS/PALSAR. Exemplos de DEMs interferométricos de missão suborbital (duas antenas e uma passagem) foram os gerados pelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de 11 de fevereiro de 2000 com o ônibus espacial Endeavour da NASA, com interferometria de elevada resolução (bandas C e X) de grande parte do planeta.

3.2. Aplicações Geológicas

Uma experiência razoável em aplicações geológicas na Amazônia com dados SAR foi consolidada na última década. As aplicações têm adaptado técnicas de fotointerpretação às características do imageamento SAR (imagens de amplitude) e focado temas como estudos estruturais e tectônicos (Veneziani et al. 2004, Figura 3), estereoscopia (Santos et al. 1999, 2004), integração digital de dados SAR com dados ópticos e aerogeofísica (Paradella et al. 1997, 1998, 2000, Pedroso et al. 2001, Cunha 2002), geomorfologia costeira (Souza Filho & Paradella 2002) e classificações texturais em pesquisa mineral (Morais et al. 2002).

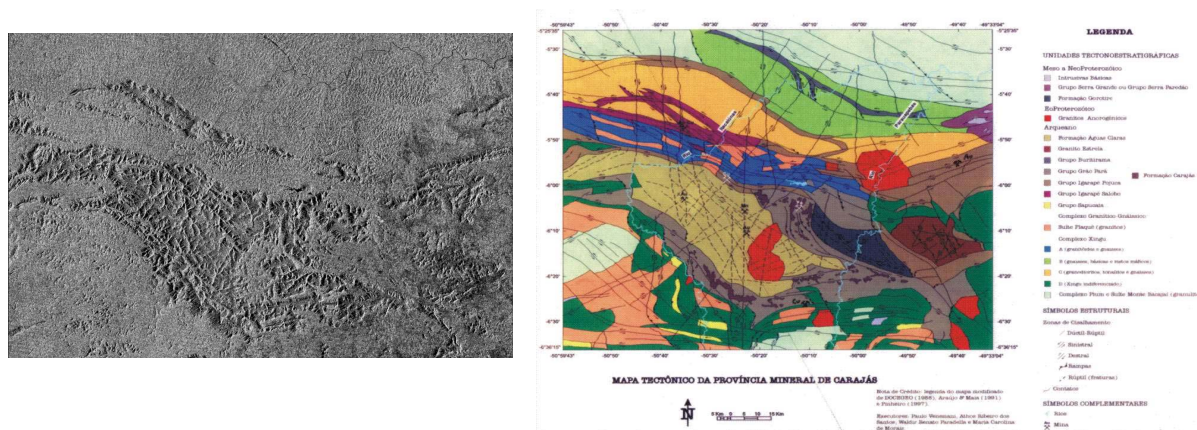


Figura 3. Imagem RADARSAT-1 (ScanSAR Narrow B) e mapa tectônico produzido para a Província Mineral de Carajás com base em dados RADARSAT-1, TM Landsat 5, aerogeofísica (PGBC) e dados de campo (Fonte: Veneziani et al. 2004).

Dois dos mais importantes fatores que afetam o conteúdo de informação geológica com imagens SAR são o azimute de visada e o ângulo de incidência. Sob latitudes equatoriais, o azimute de visada para sistemas convencionais (ERS-1, ERS-2, JERS-1, RADARSAT-1) é quase constante em 80° para órbitas ascendentes e 280° para órbitas descendentes. Para um dado azimute de visada, estruturas geológicas com orientação normal à iluminação do SAR

serão realçadas e estruturas orientadas $\pm 20^\circ$ em relação à visada podem não ser detectadas (Lowman Jr. 1987). Duas imagens tomadas com direções opostas de visadas (órbitas ascendente e descendente) freqüentemente contêm informações complementares, com maior realce da morfologia do terreno ocorrendo no *far-range* das imagens (D'Iorio et al 1997). Os resultados das investigações com vários tipos de dados SAR em Carajás confirmam estas conclusões (Paradella et al. 1997, 1998, 2000). Neste sentido, a capacidade do RADARSAT-2 de imageamentos à direita ou à esquerda da trajetória possibilitará um maior realce de sistemas estruturais (quatro azimutes distintos de visadas).

Em relação à incidência, é importante mencionar que o retroespalhamento de radar é dominado pelos efeitos de variações de declives topográficos sob incidência pequena (0 a 30°), pela rugosidade superficial sob moderada incidência (30 a 70°) e por sombreamentos para incidências elevadas de 70 a 90° (JPL 1980). Isto significa que pequenas variações de declividade do terreno modulam o retroespalhamento de radar sob baixa incidência e realçam a topografia de um modo similar ao sombreamento, a qual salienta o relevo somente sob incidências elevadas (Ford et al. 1978). Os dosséis da cobertura vegetal são os principais espalhadores volumétricos que modulam a rugosidade superficial expressa através de diferentes texturas nas imagens. Assim, uma grande variabilidade em incidência torna-se necessária para a efetividade nas aplicações geológicas (Singhroy & Saint-Jean 1999).

Em relação à extração de informações geológicas, a estereoscopia SAR é uma poderosa técnica, propiciando um resultado de melhor qualidade, pela menor subjetividade, quando comparada com a interpretação monoscópica. Dependendo da natureza da aplicação, o custo adicional de imagens do estéreo-par é compensado pelo maior e melhor conteúdo de informação extraído. Os melhores resultados em aplicação geológica são geralmente obtidos com estéreo-pares de mesmo sentido (ascendente/ascendente ou descendente/descendente) e grandes ângulos de intersecção (D'Iorio et al. 1997).

Estudos em Carajás enfocaram o desempenho da estereoscopia SAR (modos Standard RADARSAT-1) e híbrida (Standard 5 x TM-Landsat 5 banda 4) em mapeamento geológico (Santos et al. 1999, 2004). As investigações mostraram que a estereoscopia SAR aumentou a interpretabilidade geológica, quando comparada com a abordagem monoscópica, particularmente na definição de seqüências com mergulhos de baixos ângulos, contatos litológicos e estruturas gerais, e na maior confiabilidade de detecção de estruturas alinhadas paralelamente ao azimute de visada do radar. De modo geral, a percepção em 3D de pares com geometria de mesmo lado é facilitada quando comparada com pares de visadas opostas. Contudo, para relevo moderado, os melhores resultados foram obtidos com estéreo-pares de lados opostos, devido à maior razão de paralaxe vertical. No caso de relevos planos, estéreo-pares com visadas opostas também apresentaram um desempenho superior devido ao realce de mergulhos topográficos locais. Em relação à estereoscopia híbrida, foi constatada uma potencialidade maior do produto SARxVIR (S5/TM4) em relação ao estéreo SAR (S5/S7). A natureza complementar das informações dos sensores em regiões distintas do espectro, foi a causa principal da melhor performance do par híbrido.

Deve ser mencionado, que esquemas específicos necessitam ser aplicados no tratamento digital com imagens SAR devido às distorções geométricas mais severas que as imagens ópticas e a presença de ruído speckle. Geralmente o uso de correção geométrica com DEM (orto-retificação) é necessário. Além disso, várias metodologias tem sido publicadas para a fusão de dados SAR com outros dados (ópticos, aerogeofísicos, etc.) em aplicação geológica. Resultados das pesquisas na Amazônia indicam que as transformações IHS (Figura 4) e aritmética (multiplicação) são bastante efetivas (Paradella et al. 2001).

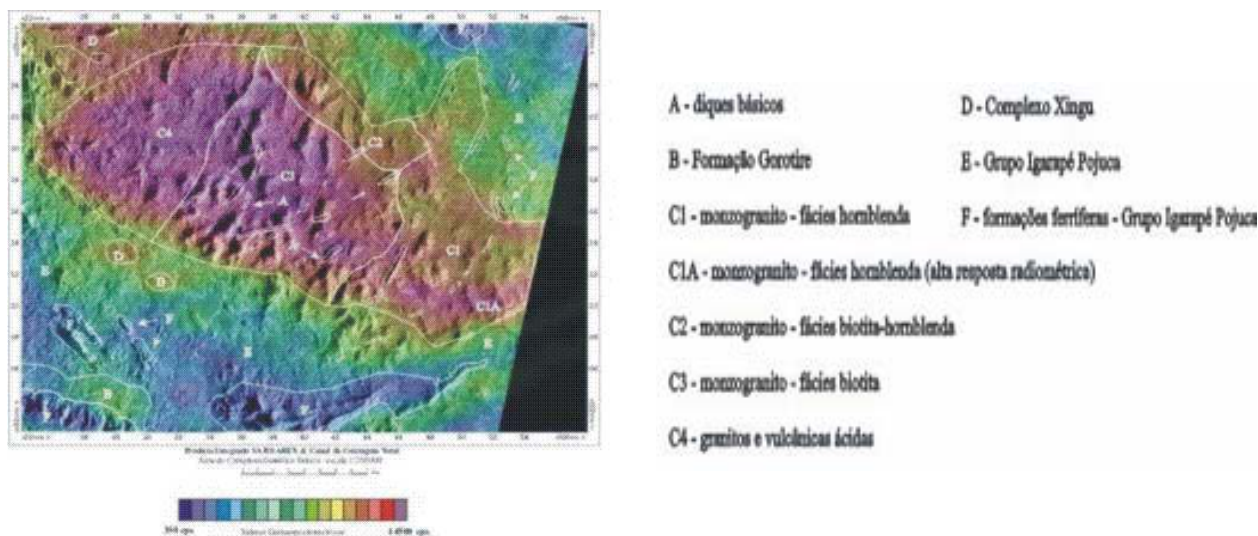


Figura 4. Produto Integrado IHS SAR/Aerogeofísica (C-HH SAREX'92/CT Gama PGBC) com realce de padrões de respostas de unidades lito-estruturais do Complexo Granítico Estrela, Carajás (Fonte: Cunha 2002).

4.Perspectivas: Radares Multipolarizados, Polarimétricos e Interferométricos

Estudos em literatura têm focado a influência da multipolarização na discriminação de rochas e produtos de alteração (Daily et al. 1978; Schaber & Berlin 1980). Os resultados indicam que imagens em polarização paralela (HH, VV) são sensíveis à rugosidade para componentes de superfície que satisfaçam a ressonância Bragg (rugosidade aproximadamente igual ao λ do SAR) enquanto que imagens de polarização cruzada (HV, VH) são controladas pela rugosidade superficial média do terreno. Sob pequena incidência, a razão de polarizações paralelas (HH/VV) é dependente da geometria de observação, da declividade e das propriedades dielétricas e menos sensível à rugosidade superficial. Para incidências entre 20 e 65°, o brilho na polarização paralela é menos sensível à variação da declividade na direção perpendicular ao plano de incidência, enquanto que, na polarização cruzada, é mais sensível a esta variação. A polarização HH é a menos sensível à constante dielétrica, sendo inverso para as polarizações VV, HV e VH.

Investigações com dados multipolarizados (banda L) mostraram correlações significativas entre retroespalhamento e alteração de superfície, idades de rochas, umidade, descontinuidades de subsuperfície e densidade de vegetação, permitindo o mapeamento de características únicas de superfícies (Evans et al. 1986). Para ambientes de vegetação densa (floresta boreal), resultados reforçaram a importância da multipolarização (banda C) na detecção de estruturas geológicas. Imagens C-VH mostraram realces únicos de lineamentos em certas direções, causados pela despolarização do sinal pela cobertura vegetal e efeitos geométricos da topografia (Saint-Jean et al. 1999).

A polarimetria é um campo de inovação recente na tecnologia SAR que explora a natureza polarizada das ondas eletromagnéticas para extrair informação dos alvos. A partir da amplitude e da fase entre polarizações, parâmetros estatísticos e imagens transformadas podem ser extraídos (coeficiente de variação, heterogeneidades dos dispersores, pureza da polarização, etc.), permitindo a caracterização quantitativa das propriedades de espalhamento de alvos geológicos (assinatura polarimétrica). Um exemplo de aplicação em estudos costeiros (banda C polarimétrica) pode ser visto em Hugenholtz & Sanden (2001). Finalmente, o uso da interferometria diferencial (*Differential InSAR*) para medir deformações da superfície também deve ser enfatizado. A técnica é baseada na diferença de

fase em duas imagens relacionadas com as trajetórias duplas dos sinais em relação a um ponto no terreno. São cinco as causas da diferença de fase: (1) diferenças nas órbitas nas duas passagens, (2) topografia, (3) deformações no terreno (4) efeitos atmosféricos e (5) ruídos do sistema e ambientais (Lu et al. 2001). A posição precisa e o conhecimento da altitude do SAR permitem remover os efeitos das diferenças nas órbitas. A influência topográfica pode ser removida com a subtração do interferograma original de um interferograma sintético via um DEM. É então obtida a interferometria diferencial, permitindo medidas de deformações ocorridas no intervalo das duas aquisições, com precisão de milímetros a centímetros (bandas C, L). Esta abordagem é promissora no monitoramento de deformações crustais (subsidiências) induzidas por atividades de exploração mineral (água, gás e hidrocarbonetos), vulcanismos, sismicidade, neotectônica, movimentos em áreas de riscos naturais, etc.

5. Conclusões

Radares convencionais têm sido usados nas Geociências, com o uso da amplitude do sinal retroespalhado. Radares multipolarizados, polarimétricos e interferométricos irão expandir o uso da tecnologia, com abordagens cada vez mais quantitativas. Até onde estas inovações ampliarão os limites conhecidos da tecnologia necessita ser demonstrado ambientes tropicais.

Referências

- Cunha, E.S.P. Integração Digital de Dados de Radar, Geológicos, TM Landsat e Geofísicos Aerogamaespectrométricos no Mapeamento Geológico da Região do Complexo Granítico Estrela (PA). Dissertação de Mestrado em SR (INPE), 2002, 132p.
- Daily, M., Elachi, C., Farr, T., Stromberg, W., Williams, S., Schaber, G. Application of Multispectral Radar and Landsat Imagery to Geologic Mapping in Death Valley, NASA-JPL, 1978, 47 p. (JPL pub. 78-19).
- D'Iorio, M., Budkewitsch, P., Mahmood, N.N. Practical Considerations for Geological Investigations Using RADARSAT-1 Stereo Images Pairs in Tropical Environments. In: Geomatics in the Era of RADARSAT-1 Symposium, Ottawa, Canada, 1997 (CD-ROM).
- Evans, D. L.; Farr, T. G.; Ford, J. P.; Thompson, T. W., Werner, C. L. Multipolarization radar images for geologic mapping and vegetation discrimination. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 24 (2), 1986, pp: 246-257.
- Ford, J.P., Blom, R. G., Coleman Jr., J. L., Farr, T. G., Plaut, J. J., Pohn, H. A., Sabins Jr., F. F. Radar Geology, In: **Principles & Applications of Imaging Radar**, Manual of R. S., 3rd Ed., Editors F. Henderson & A. Lewis, Cap. 10, Amer. Soc. Phot. and R.S., John Wiley & Sons Inc. N. Y., 1998, pp: 511-565.
- Hughenoltz, C., Sanden, J.J. V. Polarimetric SAR for Geomorphic Mapping in the Intertidal Zone, Minas Basin, Bay of Fundy, Nova Scotia. Canada Centre for Remote Sensing Internal Rept, Ottawa, Canada, 2001, 23 pp.
- JPL. Radar Geology: An Assessment, NASA-JPL, 1980, pp: 512 (JPL pub. 80-61).
- Kervyn, F.. Modelling topography with SAR interferometry: illustrations of a favourable and less favourable environment. **Computer & Geoscience**, 27, 2001, pp:1039-1050.
- Lowman Jr., P. Radar Geology of the Canadian Shield: a 10-Year Review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 20 (3): 1994, pp: 198-209.
- Lu, Z., Wicks Jr., C., Dzurisin, D., Power, J., Thatcher, W. Studying Deformation of Volcanoes in the Aleutian Islands and the Kamchatka Peninsula Using L-Band ALOS PALSAR Interferometry. First ALOS PI Workshop, **Proceedings**, Tóquio, Japão, 2001, Pp: 199-204
- Morais, M. C., Paradella, W.R., Freitas, C.C. An assessment of the discrimination of iron-mineralized laterites in the Amazon Region (Carajás Province) based on textural attributes from C-band airborne SAR data. **Asian Journal of Geoinformatics**, 2 (3), 2002, pp: 11-20.

- Paradella, W. R.; Bignelli, P. A.; Veneziani, P.; Pietsch, R. W.; Toutin, T. Airborne and Spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) Integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, 18 (7), 1997, pp: 1483-1501.
- Paradella, W. R., Santos, A. R., Dall'Agnol, R., Pietsch, R. W., Sant'Anna, M. V. A geological investigation based on airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated products in the Central Serra dos Carajás Granite area, Brazil. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 24 (4), 1998, pp: 376-392.
- Paradella, W. R., Santos, A. R., Veneziani, P., Sant'Anna, M. V., Morais, M. C. Geological investigation using RADARSAT-1 images in the tropical rain forest environment of Brazil. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 26 (2), 2000, pp: 82-90.
- Paradella, W.R.; Santos, A.R.; Veneziani, P.; Morais, M.C. O sinergismo de imagens standard descendente do RADARSAT-1 e Thematic Mapper do LANDSAT-5 em aplicação geológica na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: <<http://iris.sid.inpe.br:1908/rep/dpi.inpe.br/lise/2001/09.14.11.53>>. Acesso em: 12 jun. 2002.
- Paradella, W. R., Cecarelli, I. C. F., Luiz, S., Oliveira, C. G., Cottini, C., Okida, R. Produção de Carta Topográfica através da Estereoscopia de Alta Resolução do RADARSAT-1 Integrada com Dados TM-Landsat 5: Uma Avaliação para Terrenos Planos da Floresta Nacional de Tapajós, **Revista Brasileira de Geociências**, 33 (2-Suplemento), 2003, pp: 99-110.
- Paradella, W. R., Cecarelli, I. C. F., Luiz, S., Oliveira, C. G., Okida, R. Geração de Carta Topográfica com Estéreo-Pares Fine do RADARSAT-1 e Dados ETM+ Landsat 7 em Ambiente de Relevo Montanhoso na Região Amazônica (Serra dos Carajás, Pará). **Revista Brasileira de Geociências**, 2004 (submetido)
- Pedroso, E.C., Rivard, B., Crosta, A. P., Souza Filho, C.R., Miranda, F.P. Reconnaissance Geologic Mapping in the Tapajós Mineral Province, Brazilian Amazon, using Spaceborne SAR Imagery and Airborne Geophysics. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 27 (6), 2001, pp: 669-678.
- Santos, A. R., Paradella, W. R., Veneziani, Morais, M. C. A Estereoscopia com Imagens RADARSAT-1: Uma Avaliação na Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, 17 (2), 1999, pp: 185-190.
- Santos, A. R., Paradella, W. R., Veneziani. Avaliação da Estereoscopia SAR (Standard-RADARSAT-1) e Híbrida (Standard-RADARSAT-1 & TM-Landsat 5) em Mapeamento Geológico na Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, 33 (2-Suplemento), 2003, pp: 153-160.
- Saint-Jean, R.; Singhroy, V.; Rheault, M. Multi-polarized airborne C-SAR images for geological mapping at Lac Volant, Québec. In: **Proceedings** of the 13th International Conference and Workshop Applied to Geologic Remote Sensing, Vancouver, 1999, p. 411-418.
- Schaber, G. G., Berlin, G. L. Terrain-Analysis Procedures for Modeling Radar Backscatter. In: **Radar Geology: An Assessment**, NASA-JPL, 1980, pp: 168-199 (JPL pub. 80-61).
- Singhroy, V.H., Saint-Jean, R. Effects of Relief on the Selection of RADARSAT-1 Incidence Angle for Geological Applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 25 (3); 1999, pp: 211-217.
- 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**, 10 (2), 2002, pp: 123-132.
- Toutin, T. Stereo RADARSAT for Mapping Applications. In: **Proceedings**, ADRO Final Symposium, Montreal, Canadá, 1998, CD-ROM.
- Van der Sanden, J. J. Radar remote sensing to support tropical forest management. Doctoral Thesis, Tropenbos-Guyana Series, 1997, 330 p.
- Van der Sanden, J. J., Ross, S. G.. **Applications** Potential of RADARSAT-2: A Preview. Canada Centre for Remote Sensing, Rept. for Canadian Space Agency, Ottawa, Canada, 2001, 80 p.
- Veneziani, P.; Santos, A. R.; Paradella, W. R. A Evolução tectono-estratigráfica da Província Mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM-Landsat 5), aerogeofísica e dados de campo. **Revista Brasileira de Geociências**, 34 (1), 2004, pp: 67-78.