

# **RADARES IMAGEADORES NAS GEOCIÊNCIAS: ESTADO DA ARTE E PERSPECTIVAS**

**Waldir Renato Paradella<sup>1</sup>**

**Athos Ribeiro dos Santos<sup>1</sup>**

**Paulo Veneziani<sup>1</sup>**

**Edson Soares Pereira da Cunha<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**

Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP

{waldir, athos, paulo}@ltid.inpe.br

**<sup>2</sup>Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CENPES) - PETROBRAS**

CEP 21949-900 - Rio de Janeiro -RJ

ercunha@petrobras.com.br

## **RESUMO**

Mais de uma década do uso de radares orbitais de abertura sintética em aplicações nas Geociências, particularmente no trópico úmido, têm demonstrado o valor da informação derivada principalmente através de abordagens qualitativas. Imagens de amplitude têm sido usadas para mapeamento do terreno através de abordagens monoscópicas, estereoscópicas, com produtos digitais integrados e classificação textural. O artigo discute a tendência das aplicações atuais na Cartografia e Geologia baseadas em dados convencionais de radar (uma frequência, uma polarização) e as perspectivas relacionadas com abordagens mais quantitativas com o advento dos radares imageadores multipolarizados, polarimétricos e interferométricos.

**Palavras chaves:** SAR, cartografia, geologia, radares convencionais e polarimétricos, Amazônia.

## **ABSTRACT**

Results from more than a decade of orbital Synthetic Aperture Radars (SARs) applied to Geoscience, mainly 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, digital 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.

**Keywords:** 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 dos lançamento dos radares multipolarizados, polarimétricos e interferométricos orbitais do ALOS/PALSAR (2005) e RADARSAT-2 (2006).

## 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 espacial, 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 ( $\lambda$ ), 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 é um indicador da intensidade do sinal, e a fase, que descreve a posição de um ponto de vibração no senóide e a direção de movimento, em relação a um datum ou posição de referência, variando de 0 a  $2\pi$  (VAN DER SANDEN, 1977).

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. Em síntese, além da informação de amplitude, polarização e fase são importantes fontes de informação em imagens SAR. As discussões a seguir examinam os diversos aspectos ligados à extração de informações com radares para aplicações cartográficas e geológicas em ambientes tropicais.

## 3. DISCUSSÕES

### 3.1. Aplicações Cartográficas

Dois métodos operacionais tem sido utilizados para a extração da altimetria com radares: a estereoscopia e a interferometria. No primeiro, 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 (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 é explicada pela necessidade de 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.

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, em áreas de pouca vegetação, com presença de pontos notáveis bem definidos nas imagens, facilitando o uso de GCPs (*Ground Control Points*) na geração dos DEMs 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 (Tapajós, figura 1) e montanhosos (Carajás,) confirmam o potencial da estereoscopia (PARADELLA et al., 2003, 2004, 2005). DEMs absolutos (com GCPs) atenderam aos requisitos do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) nacional na escala de 1:100.000, classe A (Tapajós) e B (Carajás). Com o advento do RADARSAT-2, com melhor resolução espacial, intervalo de incidência e controle de órbita, serão possíveis DEMs com acurácia entre 5-10 metros (VAN DER SANDEN & ROSS, 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 imagens obtidas de sensores com trajetórias paralelas, e medidas segundo o alcance (*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 descorrelação 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  $\lambda$  (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 florestas 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  $\lambda$  maiores (banda L), menos sensível à decorrelação temporal.

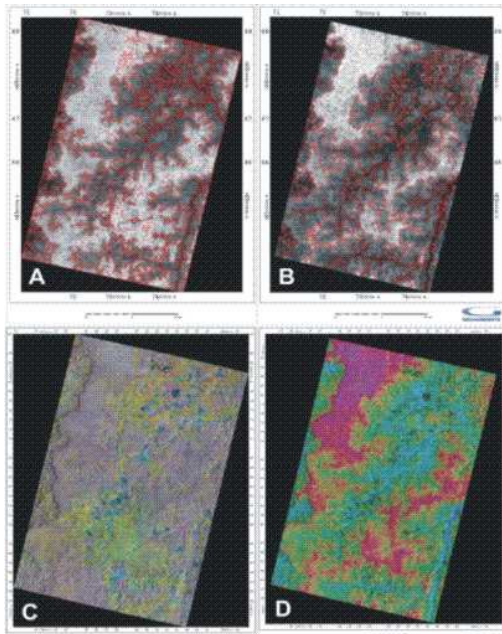


Fig. 1. DEMs relativos (A), absolutos (B), integração RADARSAT/Landsat (C) e RADARSAT/DEM (D) na geração de cartas topográficas em Tapajós. Fonte: PARADELLA et al (2003).

Este é um tópico importante de pesquisa a ser explorado com o advento do PALSAR previsto para 2005. Exemplos de DEMs interferométricos, de missão suborbital (duas antenas, uma passagem), foram os gerados pelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de 11 de fevereiro de 2000 através do ônibus espacial Endeavour (NASA), com interferometria de elevada resolução (bandas C e X) de grande parte do planeta

### 3.2. Aplicações Geológicas

Uma experiência considerável em aplicações geológicas na Amazônia tem sido consolidada com dados SAR. As aplicações têm adaptado técnicas de fotointerpretação às características do imageamento SAR (imagens de amplitude) e enfocado estudos estruturais e tectônicos (VENEZIANI et al., 2004, figura 2), estereoscopia (SANTOS et al, 1999, 2004), integração SAR com dados ópticos e aerogeofísica (PARADELLA et al, 1997, 1998; 2000; PEDROSO et

al., 2001; CUNHA 2002, figura 3), geomorfologia costeira (SOUZA FILHO & PARADELLA, 2002) e classificações texturais em pesquisa mineral (MORAIS et al., 2002).

Dois fatores que controlam a detectabilidade de estruturas em imagens SAR são o azimute de visada e a incidência. Sob latitudes equatoriais, o azimute de visada para sistemas como os do ERS-1 e 2, JERS-1 e RADARSAT-1, é quase constante em  $80^\circ$  para órbitas ascendentes e em  $280^\circ$  para órbitas descendentes. Para um dado azimute de visada, estruturas 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).

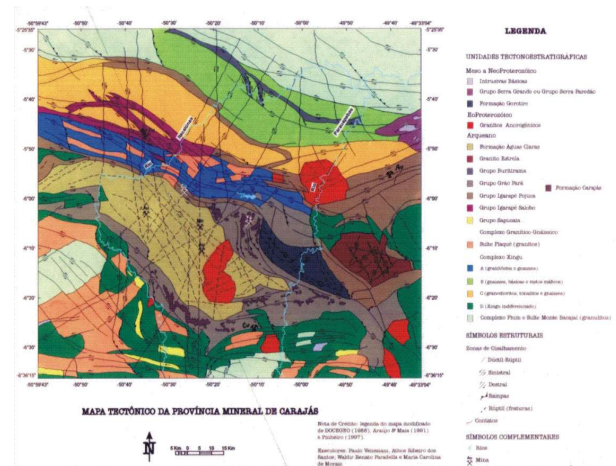
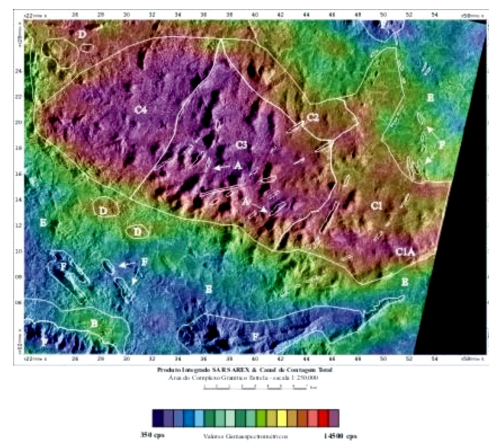


Fig. 2. Mapa tectônico da Província de Carajás com base em dados RADARSAT-1, TM Landsat 5, aerogeofísica e dados de campo. (Fonte: VENEZIANI et al, 2004).



- A - diques básicos
- B - Formação Gorotire
- C1 - monzogranito - fácies hornblenda
- C1A - monzogranito - fácies hornblenda (alta resposta radiométrica)
- C2 - monzogranito - fácies biotita-hornblenda
- C3 - monzogranito - fácies biotita
- C4 - granitos e vulcânicas ácidas
- D - Complexo Xingu
- E - Grupo Igarapé Pojuca
- F - formações ferríferas - Grupo Igarapé Pojuca

Fig. 3. Produto SAR /Gama CT com respostas tonais-texturais indicativas de unidades lito-estruturais, Granito Estrela, Carajás. (Fonte: CUNHA, 2002).

Assim, duas imagens tomadas com direções opostas de visadas (órbitas ascendente e descendente) frequentemente 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).

No que se refere 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).

A utilização da estereoscopia SAR é uma alternativa valiosa na extração de informações geológicas, propiciando resultados 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 complementaridade das informações dos sensores em regiões distintas do espectro foi a causa principal da melhor performance do par híbrido.

Deve ser enfatizado, que tratamentos específicos necessitam ser aplicados no processamento digital com imagens SAR devido às distorções geométricas severas e a presença de speckle. A orto-retificação (correção geométrica com DEM) é geralmente necessária. Além disso, várias metodologias tem sido usadas para a fusão de dados SAR com dados ópticos e aerogeofísicos em geologia. Resultados na Amazônia indicam que as transformações IHS e aritmética (multiplicação) são bastante efetivas (PARADELLA et al, 2001).

#### 4. PERSPECTIVAS: DADOS MULTIPOLARIZADOS, POLARIMÉTRICOS E INTERFEROMÉTRICOS

Vários autores 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 as polarizações HH e VV são mais sensíveis à rugosidade para componentes de superfície que satisfaçam à ressonância Bragg (rugosidade igual ao  $\lambda$  do SAR), enquanto que imagens HV e VH são mais sensíveis à rugosidade superficial média do terreno.

Sob pequena incidência, a razão HH/VV é dependente da 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 declividade na direção perpendicular ao plano de incidência, enquanto que, na polarização cruzada, é mais sensível. Finalmente, 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 sub-superfície e densidade de vegetação, permitindo o mapeamento de características únicas de superfícies (EVANS et al., 1986). Para ambientes de 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, gerando interferogramas, um antes e outro após a deformação do 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 (um DEM). É então obtida a interferometria diferencial, permitindo medidas de deformações ocorridas no intervalo das aquisições, com precisão de milímetros a centímetros (bandas C, L). Esta abordagem é promissora no monitoramento de deformações crustais induzidas por atividades de exploração mineral (água, gás e hidrocarbonetos), vulcanismos, sismicidade, neotectônica, etc. Um exemplo do uso de *Differential InSAR* em desastre natural pode ser visto em SINGHROY & MOLCH (2004).

## 5. CONCLUSÕES

A utilização de dados SAR orbitais na produção de cartas topográficas para regiões desprovidas de informações planialtimétricas, como a Amazônia, deverá sofrer um grande impulso com o advento de dados do PALSAR, e particularmente, do RADARSAT-2.

Teoricamente, tanto o PALSAR como o RADARSAT-2 terão capacidade estereoscópica e de derivar informação altimétrica. Todavia, a melhor resolução espacial, a maior versatilidade de incidência e o melhor controle de órbita favorecem o SAR canadense, pelos resultados em escalas planialtimétrica de maior detalhe (1: 50.000 ou maior).

O potencial de utilização da interferometria *repeat-pass* para mapeamento altimétrico generalizado apresenta limitações. São antecipados dois grandes problemas com a abordagem: perda de coerência de respostas dos alvos e mudanças na propagação atmosférica entre as duas aquisições, particularmente para imageamentos com o RADARSAT-2. Neste contexto, as perspectivas favorecem imageamentos com maior  $\lambda$  como os do PALSAR, mas persistem dúvidas sobre a decorrelação temporal para ambientes tropicais.

O potencial para análise estrutural será ampliado, particularmente pelas inovações do RADARSAT-2 (melhor resolução espacial, maior versatilidade em incidência e de azimute de visada). Da mesma forma como na cartografia, o potencial da interferometria para caracterização de deslocamentos na superfície (*Differential InSAR*) apresenta limitações, com maior probabilidade de sucesso em ambiente semi-árido (p.ex: exploração de óleo e gás).

Finalmente, em relação à multipolarização e polarimetria, as perspectivas são favoráveis, quer na análise estrutural quer em discriminação litológica. A tendência é que os dados multipolarizados e polarimétricos expandam o uso da tecnologia, com abordagens cada vez mais quantitativas. Até onde estas inovações ampliarão os limites conhecidos da tecnologia necessita ser demonstrado em ambientes tropicais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, 132 p.
- DAILY, M.; ELACHI, C.; FARR, T.; STROMBERG, W.; WILLHAMS, 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, **Proceedings**, 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), p: 246-257, 1986.
- 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., 3<sup>rd</sup> Ed., Editors F. Henderson & A. Lewis, Cap. 10, Amer. Soc. Phot. and R.S., John Wiley & Sons Inc. ,N. Y., p: 511-565, 1998.

- HUGENHOLTZ, 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, 23 p. 2001.
- JPL. **Radar Geology: An Assessment**, NASA-JPL, 512 p. (JPL pub. 80-61), 1980.
- KERVYN, F. Modeling topography with SAR interferometry: illustrations of a favourable and less favourable environment. **Computer & Geoscience**, 27, p:1039-1050, 2001.
- LOWMAN Jr. P. Radar Geology of the Canadian Shield: a 10-Year Review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 20 (3), p: 198-209, 1994.
- 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, p: 199-204, 2001.
- 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), p: 11-20, 2002.
- 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. **Internat. Journal of Remote Sensing**, 18 (7), p: 1483-1501, 1997.
- 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), p: 376-392, 1998.
- 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), p: 82-90, 2000.
- 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, Foz do Iguaçu. **Anais**, INPE, 2001. Disponível: <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), p: 99-110, 2003.
- 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), p: 669-678, 2001.
- SANTOS, A. R.; PARADELLA, W. R.; VENEZIANI, P.; MORAIS, M. C. A Estereoscopia com Imagens RADARSAT-1: Uma Avaliação na Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, 17 (2), p: 185-190, 1999.
- SANTOS A. R., PARADELLA, W. R.; VENEZIANI, P. 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), p: 153-160, 2003.
- SAINT-JEAN, R.; SINGHROY, V.; RHEAULT, M. Multi-polarized airborne C-SAR images for geological mapping at Lac Volant, Québec. In: **Proceedings of the 13<sup>th</sup> Int. Conf. and Workshop Applied to Geologic Remote Sensing**, Vancouver, p. 411-418, 1999.

- SCHABER, G. G.; BERLIN, G. L. Terrain-Analysis Procedures for Modeling Radar Backscatter. In: **Radar Geology: An Assessment**, NASA-JPL, p: 168-199 (JPL pub. 80-61), 1980.
- 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); p: 211-217, 1999.
- SINGHROY, V.; MOLCH, K. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. **Advances in Space Research**, 33(3), p:290-295, 2004.
- 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), p: 123-132, 2002.
- TOUTIN, T. Stereo RADARSAT for Mapping Applications. In: **Proceedings**, ADRO Final Symposium, Montreal, Canadá, CD-ROM, 1998.
- VAN DER SANDEN, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management**. Doctoral Thesis, Tropenbos-Guyana Series, 330 p., 1997.
- VAN DER SANDEN, J. J.; ROSS, S. G.. **Applications Potential of RADARSAT-2: A Preview**. Canada Centre for Remote Sensing - Report for Canadian Space Agency, CCRS, Ottawa, Canada, 80 p., 2001.
- 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), p: 67-78, 2004.