

CONTRIBUIÇÃO À GEOLOGIA DA REGIÃO DE CARAJÁS (AMAZÔNIA BRASILEIRA) ATRAVÉS DA ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ESTÉREO – PARES DE RADAR (S5D x S7D) E HÍBRIDO (S7D x TM4)

ATHOS RIBEIRO DOS SANTOS¹
WALDIR RENATO PARADELLA¹
PAULO VENEZIANI¹

¹ INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil
{athos,waldir,paulo}@ltid.inpe.br

Abstract. This paper discusses the theoretical and practical aspects related to SAR and hybrid sensors (VIR x SAR) stereoscopies, and their performance for geological mapping in the Amazon Region. Stereo RADARSAT-1 (S5D x S7D) and hybrid RADARSAT-1/TM-5 (S7D x TM4) were visually evaluated aiming at geological mapping in the Carajás Mineral Province. The stereo SAR pair has shown large differences in radiometric and geometric properties when compared to the VIR x SAR stereo pair. The research has indicated the greater potentiality of the VIR x SAR product when compared to the SAR stereoscopy. The complementary nature of the information provided by both sensors in distinct region of the electromagnetic spectrum was a fundamental cause for this better performance.

Keywords: geologic remote sensing, SAR and VIR x SAR stereoscopies, Carajás Mineral Province.

1. Introdução

Apesar do estabelecimento dos conceitos básicos da radargrametria e dos primeiros experimentos sobre estereoscopia de radar terem ocorrido já na década de 1960, foi somente com o advento do radar de abertura sintética ou SAR (*Synthetic Aperture Radar*) do satélite canadense RADARSAT-1 em 1995, que a estereoscopia de radar passou a ser estudada, entendida e aplicada (Toutin & Vester 1997, Santos *et al.* 1999). Apenas recentemente, devido a maior disponibilidade de dados SAR, foram publicados os primeiros resultados na avaliação da aplicabilidade de pares estereoscópicos híbridos na fusão tridimensional de imagens orbitais SAR e ópticas (Toutin 2000, Santos *et al.* 2001a).

Este trabalho teve como objetivos a interpretação e a comparação de dois pares estereoscópicos, selecionados a partir da análise dos diversos aspectos teóricos que envolvem a estereoscopia de radar e a híbrida, sendo um de radar orbital (Standard-RADARSAT-1) e outro híbrido (Standard-RADARSAT-1 & TM-Landsat-5), para fins de mapeamento geológico na Amazônia. A área de pesquisa, localizada na região central da Província Mineral de Carajás, foi escolhida não só pela sua importância geo-econômica, mas também pela diversidade de ambientes geológicos e de relevos (a geometria superficial é a principal condicionadora no retroespalhamento das imagens SAR); pelo condicionamento geobotânico (Paradella *et al.* 1994), associado à variações topográficas/unidades geológicas (a resposta espectral do sensor óptico é principalmente condicionada pelas características físico-químicas dos materiais superficiais) e; pelo ambiente de floresta tropical úmida, onde as dificuldades de acesso e o profundo intemperismo tornam o sensoriamento remoto uma ferramenta imprescindível na obtenção de informações geológicas.

2. Contexto Geológico

A Província Mineral de Carajás está situada na porção sudeste do Craton Amazônico. A área de estudo engloba partes da Serra dos Carajás e de seu entorno (Fig. 1). A Serra dos Carajás destaca-se na topografia, com o seu relevo montanhoso e dissecado em escarpas, com altitudes de até 800

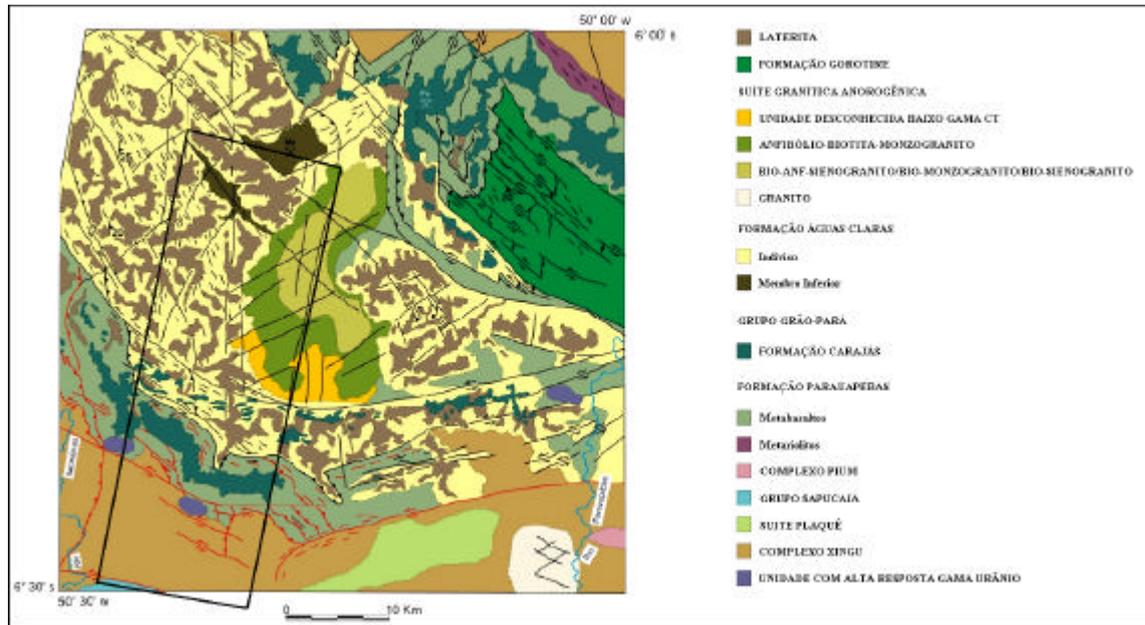


Figura 1 – Mapa Geológico da Folha Serra dos Carajás e localização da área de estudo (fontes: Santos et al. 1997, Paradella et al. 1998).

metros. É constituída por sedimentos (Formação Águas Claras) e rochas vulcano-sedimentares de baixo grau (Grupo Grão-Pará), de idades arqueanas. No centro da Serra ocorre um batólito granítico proterozóico (Granito Central), com um relevo colinoso e altitudes de 450 a 500 metros. No entorno da Serra predominam as rochas gnáissicas arqueanas do Complexo Xingu, em um relevo arrasado, com altitudes de 200 a 300 metros.

3. Fundamentação

As imagens orbitais de radar são uma das mais importantes ferramentas, dentro do sensoriamento remoto, na obtenção de informações geológicas para a Amazônia Brasileira, devido a capacidade do sensor de operar sob condições atmosféricas adversas ao imageamento óptico (bruma, nuvem, chuva e fumaça) e pelo excelente realce topográfico dado pelo imageamento sob visada lateral (Paradella *et al.* 1997, 1998; Santos *et al.* 1999). Por outro lado, as imagens ópticas fornecem informações relacionadas às propriedades físico-químicas dos materiais superficiais. As informações registradas nos dois tipos de imagens são, portanto, distintas e complementares. Especificamente para a região de Carajás, as informações obtidas pelo SAR estão relacionadas à geometria de iluminação (incidência e azimute) e à interação das microondas (banda C-HH, no caso deste trabalho) com a parte superior do dossel vegetal da cobertura de floresta equatorial ombrófila densa. Em se tratando das imagens ópticas (TM-Landsat-5, no caso deste trabalho), a

informação detectada (a radiância) é controlada pelo espectro da floresta equatorial e pela orientação topográfica do terreno em relação à fonte solar (Paradella *et al.* 2000).

A estereoscopia (óptica, de radar e híbrida) utiliza-se de conceitos desenvolvidos a partir do entendimento da visão humana, para permitir que diferentes conjuntos de dados de sensoriamento remoto, representados por duas imagens planas, sejam analisados conjunta e tridimensionalmente. Apesar de uma fundamentação básica única, há importantes aspectos relacionados aos dados ópticos e aos de radar, que diferenciam amplamente esses dois tipos de estereoscopia e que devem ser considerados em uma estereoscopia híbrida SAR x óptico (detalhes em Toutin & Vester 1997, Santos *et al.* 1999, Toutin 2000, Santos *et al.* 2001a).

Apesar da publicação de alguns trabalhos pioneiros, já a partir da década de 1960, não são muitas as citações encontradas na literatura sobre a estereoscopia híbrida SAR x óptico. Só mais recentemente este tipo de análise voltou a ganhar evidência, principalmente devido a grande disponibilidade e diversidade de dados SAR orbitais. Em uma estereoscopia híbrida, os aspectos mais importantes que devem ser considerados estão relacionados à radiometria e à geometria das cenas do par. Por serem dados totalmente distintos e obtidos por sistemas sensores com operações diferenciadas, é necessário uma avaliação cuidadosa desses dois aspectos na composição do par estereoscópico, para que a percepção de profundidade (clareza e detalhes) não seja fortemente prejudicada (detalhes em Toutin 2000, Santos *et al.* 2001a).

4. Dados de Sensoriamento Remoto

A tabela 1 especifica as principais características das imagens TM-Landsat-5 e Standard Radarsat-1, a partir das quais foram compostos dois pares estereoscópicos, S5D x S7D (Fig. 2) e S7D x TM4 (Fig. 3), cujas análises constituem a base desta pesquisa.

Plataforma/ Sensor	Banda/ Posição	Data	Escala	Resolução Espacial (m)	Elev. Solar** / Incidência	Az. Solar/ Az. de Iluminação
Landsat-5/ TM 226/064	TM4	22/06/86	1:250.000	30	43°	50°(230°)
RADARSAT-1/ SAR-C Standard	S5D*	31/05/96	1:250.000	24,2 x 27,0	36/42°	282°
	S7D*	11/09/96	1:250.000	22,09 x 27,0	45/48°	282°

*D = órbita descendente **no centro da imagem

Tabela 1 – Principais características dos dados de sensoriamento remoto utilizados na pesquisa.

A escolha do conjunto de dados de sensoriamento remoto utilizado na investigação foi baseada na análise de alguns parâmetros, com o intuito de se maximizar o conteúdo de informações geológicas a serem extraídas dos pares estereoscópicos de radar e híbrido, da área de estudo (Fig. 1). Santos *et al.* (1999) concluíram em seu estudo, na mesma região de Carajás, após avaliarem diversos pares estereoscópicos formados por imagens Standard RADARSAT-1, que o par S5D x S7D (Fig. 2) apresentou a performance mais equilibrada em termos de interpretação geológica, nas diversas situações de relevo e de ambiente geológico analisadas. Os autores citam, entre outros, os seguintes aspectos positivos: (1) o pequeno ângulo de interseção estereoscópica do par (8,0°), associado ao mesmo azimute de iluminação das cenas descendentes (282°), tornam a visibilidade estereoscópica ótima e confortável ao observador, sob as diversas condições de relevo analisadas; (2) a Razão de Paralaxe Vertical (RPV= 0,30), razoável para uma configuração

de mesmo sentido, permitiu um nível de detalhe muito bom na percepção de profundidade, principalmente nas áreas com relevo mais movimentado e; (3) os ângulos de incidência das cenas ($S5= 36/42^\circ$, $S7= 45/48^\circ$) mostraram-se adequados para as variações de relevo da área, não provocando efeitos fortes de deslocamento de relevo (*layover*), nem áreas sombreadas (occlusas) muito extensas.

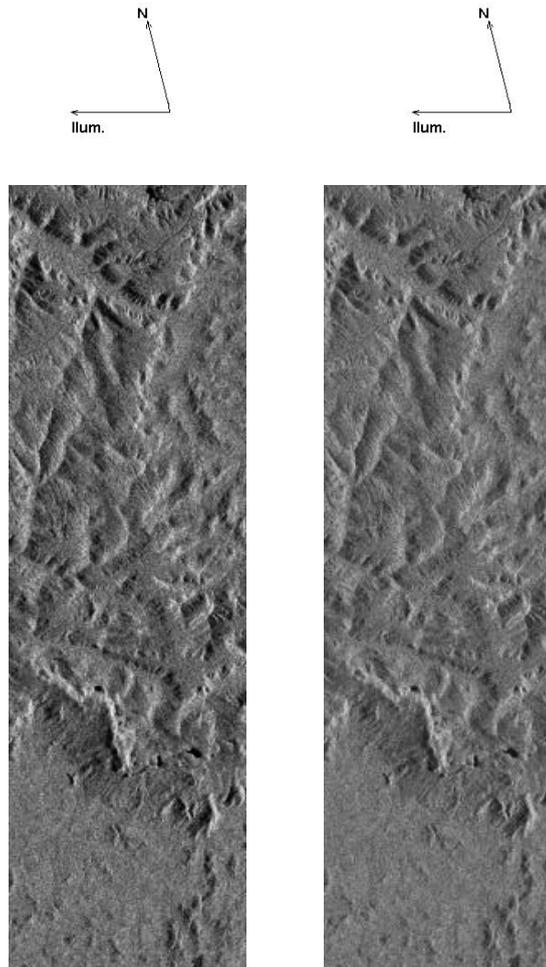


Figura 2 – Par estereoscópico de radar S5D x S7D.

Santos *et al.* (2001a) discutiram os aspectos teóricos da estereoscopia híbrida SAR x óptico e a sua aplicabilidade em estudos geológicos, em área teste na região da Província Mineral de Carajás. Utilizando-se de imagens TM-Landsat-5 e Standard RADARSAT-1, os autores, avaliando os conceitos teóricos e as características da área teste, concluíram pelo par S7D x TM4 (Fig. 3) como o mais efetivo entre os dados disponíveis, pelos seguintes aspectos (Fig. 4): (1) a semelhança visual da banda 4 do TM com a imagem SAR, pelo conteúdo temático (tonalidade e textura) e pelo realce da topografia do relevo (o alto patamar de reflectância da vegetação na banda 4 do TM realça as áreas iluminadas e favorece o contraste com as encostas sombreadas), contribui para uma boa correlação radiométrica entre as cenas do par; (2) a geometria de

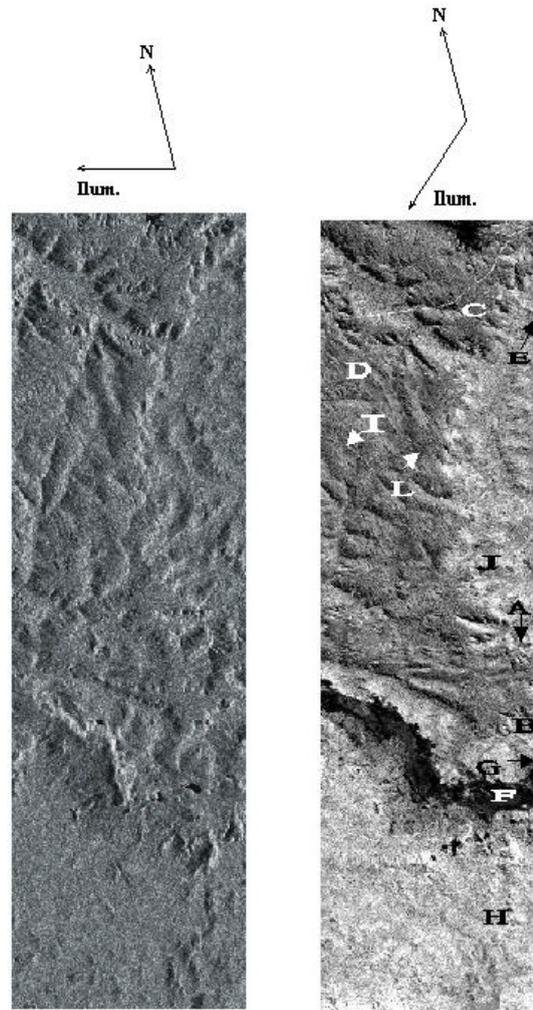


Figura 3 – Par estereoscópico híbrido S7D x TM4. As letras são discutidas no texto.

iluminação, com uma incidência da imagem SAR equivalente à elevação solar do TM e um mesmo sentido de iluminação nas duas cenas (órbita descendente para a cena Standard), apesar de uma diferença de 52° nos azimutes, contribui, também, para melhorar a correlação radiométrica entre as cenas ; (3) a escolha da maior incidência entre as posições disponíveis no modo Standard ($S7 = 45-48^\circ$), diminui os fortes efeitos de deslocamento de relevo na imagem SAR e, portanto, também, as grandes diferenças geométricas entre as cenas, facilitando o processo de fusão tridimensional e; (4) o alto ângulo de interseção estereoscópica (acima de 45° , dependendo da posição na imagem) garante bom detalhe de percepção de profundidade, principalmente nos relevos mais movimentados.

5. Resultados e Discussões

Os pares estereoscópicos S5D x S7D e S7D x TM4 foram analisados segundo critérios de interpretação geológica desenvolvidos para imagens ópticas orbitais (Veneziani & Anjos 1982) e, também, aqueles adaptados às características dos dados SAR orbitais (Santos *et al.* 2001b).

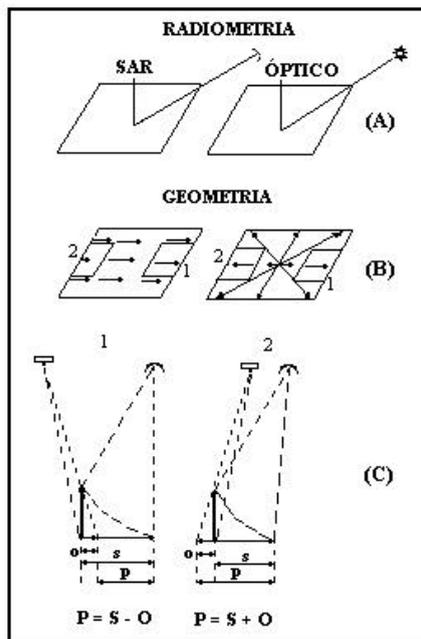


Figura 4 – Aspectos radiométricos e geométricos de um estéreo-par híbrido (SAR x óptico). Modificado de Santos *et al.* (2001a).

A interpretação geológica do par estereoscópico híbrido S7D x TM4 (Fig. 3), quando comparada com os resultados obtidos com o estéreo-par de radar S5D x S7D (Fig. 2), permitiu as seguintes observações: (1) Os contatos da Formação Águas Claras com o Granito Central apresentaram ótima definição neste par estereoscópico, por constituírem proeminentes quebras negativas, em um relevo fortemente assimétrico, com rios encaixados em vales escarpados. O caráter fortemente assimétrico do relevo reflete a atitude sub-horizontal destas litologias. As deficiências na definição dos contatos desta unidade observadas no estéreo-par SAR, foram sanadas neste par pela adição de uma nova perspectiva à iluminação SAR, dada pela iluminação solar do TM-Landsat-5 (Fig. 3, letras A, B). Além disso, o contato da Formação Águas Claras com o Granito Central marca, no TM4, o limite de uma significativa variação radiométrica entre as duas unidades (diferentes tons de cinza), o que não ocorre na imagem S7D. Na análise estereoscópica, esta diferença de tonalidade ajuda a realçar o limite entre as duas unidades, sem causar uma perda expressiva de visibilidade estereoscópica; (2) Houve um evidente ganho de definição nos limites das ocorrências de laterita neste par estereoscópico híbrido, em relação ao estéreo-par SAR. Isso se dá tanto nas ocorrências mais a norte (Fig. 3, letra C), como na parte sul (Fig. 3, letra D). Este ganho deve-se as diferentes contribuições de cada um dos sensores: a geometria superficial (relevo plano) pelo S7D e o mapeamento das respostas espectrais superficiais da vegetação (tons de cinza) pelo TM4; (3) Com relação as subdivisões internas do Granito Central, como cartografado na figura 1, a contribuição do par estereoscópico híbrido foi pequena, como ocorreu também com o estéreo-par de radar, devido ao fato de que o realce dos detalhes da topografia no TM-Landsat-5 é normalmente, bem menor que o do SAR. A única contribuição notável, em relação ao par SAR, ocorreu na porção norte do contato entre as unidades Anfibólio-biotita-monzogranito e Biotita-anfibólio-sienogranito/biotita-sienogranito (Fig. 3, letra E). A identificação deste limite deve-se mais aos tons claros de cinza (alta reflectância) no Granito Central, que realçam as variações topográficas, do que ao azimute solar do TM4, que é quase paralelo a este contato; (4) Os contatos do Grupo Grão-Pará são bem definidos, principalmente à norte, com algum ganho em relação ao par de radar, obtido pelos diferentes azimutes de iluminação das duas cenas do par híbrido. O principal diferencial, no

entanto, refere-se à área de ocorrência da Formação Carajás. Aqui, dois aspectos devem ser considerados. Em primeiro lugar, observa-se que monoscopicamente a área de ocorrência da Formação Carajás, principalmente na Serra Sul (Fig. 3, letra F), é facilmente identificável pelo seu contrastante tom negro na imagem TM4. Esta tonalidade característica deve-se a uma quase total ausência de vegetação nessas áreas e a forte absorção da radiação eletromagnética pelo ferro, nessa banda do espectro eletromagnético. O segundo aspecto com relação a área de ocorrência da Formação Carajás, refere-se a grande disparidade radiométrica entre as cenas do par estereoscópico híbrido (cinza claro no S7D e negro no TM4), resultando em uma visibilidade estereoscópica ruim. As dificuldades de fusão tridimensional são, inicialmente, muito grandes, requerendo treino e experiência neste tipo de análise para que se possa alcançá-la (ainda assim com visibilidade estereoscópica ruim); (5) O Complexo Xingu apresentou boa caracterização no estéreo-par híbrido, pelo seu característico relevo plano e pela quebra negativa que marca o seu limite com a Serra dos Carajás. A alta elevação solar da cena do TM e a elevada incidência na imagem SAR prejudicaram a percepção de detalhes na área de ocorrência do Complexo Xingu; (6) A utilização de dois azimutes de iluminação (282° e 230°) pelas duas cenas do par estereoscópico híbrido, resultou em algum ganho no realce do *trend* estrutural regional (NW-SE a WNW-ESE), em relação ao par de radar. Esse ganho é mais notável na região da Serra, na área de ocorrência do Grupo Grão-Pará, onde o *trend* estrutural WNW-ESE é sub-paralelo à iluminação do radar (Fig. 3, letra G). Na área de planície no entorno da Serra, por outro lado, houve alguma perda na definição do *trend* regional (Fig. 3, letra H). Nesse sentido, alguns aspectos devem ser considerados. Por ser a área bastante plana e os ângulos de incidência e de elevação solar relativamente altos (respectivamente, $45-48^\circ$ e 43°), os efeitos de micro-topografia no caso dos dados SAR e os de sombreamento nos dados ópticos, foram insignificantes, não resultando em qualquer ganho de realce, apesar do papel complementar dos dois azimutes de iluminação das cenas do par. O aspecto negativo, que resultou na perda de realce do *trend* em relação ao par de radar, está relacionado à intensa atividade antrópica nesta região. A atividade antrópica, normalmente registrada em tonalidades (tons escuros no S7D e claros no TM4) e tamanhos e formas diferentes (diferentes datas de aquisição) nas duas cenas do par, prejudicou significativamente a visibilidade estereoscópica; (7) O intenso sistema de fraturas NNW-SSE presente na área de ocorrência da Formação Águas Claras, a exemplo do par estereoscópico de radar, apresentou ótima definição neste par híbrido (Fig. 3, letra I); (8) A boa definição do sistema de fraturas NE-SW no par estereoscópico híbrido, é dada, basicamente, pelo azimute de iluminação quase perpendicular a esta direção da imagem SAR. Estas estruturas estão bastante atenuadas na imagem óptica devido ao pequeno ângulo que formam com o azimute solar da cena (Fig. 3, letra J) e; (9) As extensas fraturas N-S apresentam boa definição no par estereoscópico híbrido devido aos azimutes de iluminação favoráveis, tanto da imagem S7D quanto da cena TM4 (Fig. 3, letra L).

6. Conclusões

A pesquisa evidenciou a importância da estereoscopia, de radar e híbrida, na análise de dados de sensoriamento remoto orbital, como forma de melhorar a sua performance em termos de interpretação geológica. A investigação demonstrou a aplicabilidade, a praticidade e, principalmente, a utilidade deste tipo de análise, devido a crescente disponibilidade e variedade de dados de sensoriamento remoto orbital. Para que se obtenha bons resultados, no entanto, é fundamental que se considere as características de cada uma das cenas do par, principalmente as

de geometria e radiometria, que estão relacionadas ao tipo de sensor, região do espectro eletromagnético, geometria de visada/iluminação, etc. O balanço final indicou uma maior potencialidade da estereoscopia híbrida em relação à de radar, dada, basicamente, pela possibilidade de utilização de conjuntos de dados diferentes que se complementam na interpretação geológica. Por outro lado, a estereoscopia híbrida requer maiores cuidados na composição de seus pares, buscando diminuir as amplas diferenças (radiométricas e geométricas) entre os dois conjuntos de dados, que são inerentes aos próprios sistemas sensores, para que a percepção tridimensional não seja comprometida significativamente.

Referências

- Paradella W.R., Silva M.F.F., Rosa N.A., Kushigbor C.A. 1994. A Geobotanical Approach to the Tropical Rain Forest Environment of the Carajás Mineral Province (Amazon Region, Brazil), Based on Digital TM-Landsat and DEM Data. *International Journal of Remote Sensing*, **15** (8): 1633-1648.
- Paradella W.R., Bignelli P.A., Veneziani P., Pietsch R.W., Toutin T. 1997. 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): 1483-1501.
- Paradella W.R., Santos A.R., Dall'Agnol R., Pietsch R.W., Sant'Anna M.V. 1998. 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): 376-392.
- Paradella W.R., Santos A.R., Veneziani P., Morais M.C. 2000. Synthetic Aperture Radar for Geological Applications in the Moist Tropics: Experiences from the Brazilian Amazon Region. *Revista Brasileira de Geociências*, **30** (3): 538-543.
- Santos A.R., Paradella W.R., Veneziani P., Liu C.C., Sant'Anna M.V. 1997. Integração de dados SAR-TM e SAR-GAMA em estudos geológicos na Província Mineral de Carajás (Brasil). In: SELPER, Simposio Latinoamericano de Percepcion Remota, 8, Mérida, Venezuela, *CD-ROM*.
- Santos A.R., Paradella W.R., Veneziani P., Morais M.C. 1999. A estereoscopia com imagens RADARSAT-1: uma avaliação geológica na Província Mineral de Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, **29** (4): 627-632.
- Santos A.R., Paradella W.R., Veneziani P., Morais M.C. 2001a. Análise estereoscópica através da combinação de dados SAR e ópticos: Fundamentação e avaliação em estudos geológicos na região de Carajás. In: SELPER/INPE, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Foz de Iguaçu. Sessão Técnica Oral, Workshops, p. 331-337. Repositório da URLib: <dpi.inpe.br/lise/2001/09.14.11.55>.
- Santos A.R., Veneziani P., Paradella W.R., Morais M.C. 2001b. *Radar Aplicado ao Mapeamento Geológico e Prospecção Mineral: Aplicações*. São José dos Campos, INPE, 103p. (INPE-8117-PUD/45).
- Toutin T. 1997. Évaluation de la géométrie des images RADARSAT: Premiers résultats. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.
- Toutin T. 2000. Stereo mapping with SPOT-P and ERS-1 SAR images. *International Journal of Remote Sensing*, **21** (8): 1657-1674.
- Toutin T. & Vester C. 1997. Understanding RADARSAT data in stereo. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.
- Veneziani P. & Anjos C.E. 1982. *Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia*. São José dos Campos, INPE, 54p. (INPE-2227-MD/14).