

## **Análise estereoscópica através da combinação de dados SAR e ópticos: Fundamentação e avaliação em estudos geológicos na região de Carajás**

ATHOS RIBEIRO DOS SANTOS  
WALDIR RENATO PARADELLA  
PAULO VENEZIANI  
MARIA CAROLINA DE MORAIS

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515 – 12227-010 – São José dos Campos – SP, Brasil  
{athos,waldir, paulo, morais@ltd.inpe.br}

**Abstract** This paper presents fundamentals of stereo fusion using SAR and optical data to geological applications in the Carajás Mineral Province. To get a better stereo viewability and depth perception it is necessary to reduce the radiometric and geometric disparities from the stereo pair. In the S7D/TM4 stereo pair the SAR data mainly contributes to the terrain relief details (depth perception) while the optical data mainly contributes to the spectral information about surface materials.

**Keywords:** stereo, RADARSATxTM, geological application, Carajás Mineral Province.

### **Introdução**

A estereoscopia busca reconstruir uma paisagem tridimensional, registrada sob diferentes perspectivas em duas imagens planas. O objetivo é permitir que o fotointérprete tenha uma percepção mais realista e natural, da disposição espacial dos elementos que compõem a paisagem. Os dados ópticos e de radar apresentam grandes diferenças de geometria e de radiometria. É importante o entendimento de como essas disparidades geométrica e radiométrica influenciam na paralaxe e na visibilidade estereoscópica, quando se combinam dados SAR e dados ópticos em um par estereoscópico. Além da fundamentação teórica, este trabalho avalia a aplicabilidade, em estudos geológicos, de um par estereoscópico combinando dados ópticos TM-Landsat e dados SAR Standard - RADARSAT, na região da Província Mineral de Carajás.

### **Fundamentação**

A partir do entendimento dos princípios fundamentais da visão tridimensional humana, criou-se a base para estereoscopia através de dois indicadores fotogramétricos: (1) a paralaxe estereoscópica, que pode ser entendida como a aparente mudança de posição de um objeto quando visto de diferentes perspectivas e, (2) o ângulo de interseção estereoscópica, medido entre as linhas de visada do sensor em um determinado ponto do terreno, nas duas cenas do par. A análise desses dois indicadores, nas duas cenas de um par estereoscópico, permite simular a disparidade binocular, que representa as diferenças sutis nas imagens formadas em cada uma das retinas quando se observa uma cena e, a convergência, que representa o ângulo formado entre os eixos visuais quando focaliza-se um objeto.

Há, na estereoscopia, dois importantes indicadores de sua performance, que apresentam comportamentos díspares quando se analisa separadamente os dados ópticos e os dados SAR. A visibilidade estereoscópica determina a maior ou menor facilidade de percepção tridimensional em um par estereoscópico, e é diretamente relacionada à correlação radiométrica entre as cenas do par. A paralaxe, que determina o nível de detalhe na percepção de profundidade, relaciona-se diretamente com a disparidade geométrica entre as cenas do par. É desejável, portanto, que em um par estereoscópico as cenas tenham uma alta correlação radiométrica (boa visibilidade estereoscópica) e grande disparidade geométrica (paralaxes mais elevados). Nos sistemas ópticos, as alterações de geometria que resultem na paralaxe necessária a visão tridimensional, não implicam em mudanças significativas na iluminação das cenas. O radar imageador tem sua própria fonte de iluminação, o que significa que, quanto maiores forem as diferenças geométricas entre as cenas do par (obtidas através de alterações da geometria de visada), maiores serão as diferenças radiométricas entre elas. Ao contrário dos sensores ópticos, no radar imageador a visibilidade estereoscópica depende do equilíbrio entre as diferenças geométricas e as similaridades radiométricas das cenas do par (Toutin & Vester 1997, Santos *et al.* 1999).

Um importante aspecto que diferencia diametralmente o radar do sensor óptico, refere-se aos efeitos de deslocamento de relevo produzidos em suas imagens. Nas imagens SAR, as estruturas verticais no terreno são deslocadas em direção ao sensor, enquanto que nas imagens ópticas, o deslocamento se dá inversamente. Além disso, o imageamento de radar produz os efeitos de deslocamento das feições de relevo mais alçadas (macro-rugosidades), denominados de foreshortening e layover, que ocorrem apenas neste tipo de sensor. A intensidade desses efeitos é inversamente proporcional ao ângulo de incidência. A sombra de radar também é um efeito de relevo distinto do óptico, pois representa, sempre, áreas oclusas (sem nenhuma informação), enquanto no sensor óptico representa, na maioria das vezes, áreas sombreadas (não iluminadas). Típicos do radar, também, são os efeitos da micro-topografia (micro e meso-rugosidades) no retroespalhamento de radar. Em áreas planas, a intensidade do sinal de retorno de radar é influenciada, principalmente, pela micro-topografia, cujo efeito é inversamente proporcional ao ângulo de incidência (Lewis *et al.* 1998, Santos *et al.* 2000, Toutin & Gray 2000).

O radar, devido a sua geometria de observação lateral, permite que se componha, de acordo com o azimute de iluminação, pares de cenas com dois tipos de estereoscopia: de mesmo sentido e de sentidos opostos. O primeiro tipo privilegia a correlação radiométrica (boa visibilidade estereoscópica) e o segundo realça a disparidade geométrica entre as cenas do par (grandes paralaxes) ( Toutin 1998, Vester & Toutin 1997, Santos *et al.* 1999).

### **Estéreo SAR x óptico**

A aplicabilidade de pares estereoscópicos conjugando dados SAR e ópticos, principalmente para fins cartográficos, vem sendo estudada desde a década de 60. Apesar disso, não são muitos os trabalhos publicados sobre o assunto. Uma das primeiras experiências neste sentido foi desenvolvida por Moore (1969), através da combinação de radar e scanner infravermelho aeroportados, ambos com a mesma geometria de observação lateral. Segundo o autor, o efeito visual estéreo só é perfeito próximo de um ângulo de depressão de 45°. As diferenças radiométricas e a posição das sombras nas cenas podem dificultar a fusão binocular.

Bloom *et al.* (1988) combinaram estereoscopicamente imagens de radar do SIR-B e imagens ópticas do TM-Landsat com objetivos fotogramétricos. De acordo com os autores, o efeito estereoscópico é possível se as geometrias de iluminação forem compatíveis e alguns

pontos entre as duas cenas forem co-registrados. No caso, o ângulo de incidência das imagens SIR-B e o ângulo de elevação solar das cenas TM-Landsat são compatíveis, porém em sentidos opostos. Os autores aplicaram uma inversão na escala de níveis de cinza das imagens SIR-B para melhorar a correlação radiométrica entre as cenas do par e, assim, tornar mais fácil a fusão estereoscópica.

Mais recentemente, Toutin (2000) combinou dados SAR do ERS-1 com dados ópticos do SPOT Pancromático, para gerar pares estereoscópicos de mesmo sentido e de sentidos opostos. Para que haja uma boa percepção de profundidade é necessário, segundo o autor, que se busque reduzir as disparidades geométrica e radiométrica entre as cenas do par. Os resultados mostraram uma precisão de 30m. para a planimetria e 20m. para a altimetria. Segundo o trabalho, a radiometria das imagens SPOT-P contribuiu, principalmente, para a melhor identificação das feições planimétricas, devido a melhor qualidade e resolução espacial das cenas. Por outro lado, a geometria das imagens SAR do ERS-1 contribuiu, principalmente, para determinar a altimetria, devido a sua alta sensibilidade às variações morfológicas do relevo.

A partir dessa fundamentação teórica buscou-se a aplicação desses conceitos na composição e na avaliação da potencialidade de um par estereoscópico SAR x óptico, com a finalidade de aplicações geológicas, na região da Província Mineral de Carajás.

### Província Mineral de Carajás

A Província Mineral de Carajás constitui uma das mais importantes reservas minerais do Brasil, com os maiores depósitos de ferro do mundo, além de importantes mineralizações em ouro, cobre, manganês e níquel. A região de Carajás faz parte do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, de idade arqueana. A Serra de Carajás destaca-se na topografia, com o seu relevo montanhoso e dissecado em escarpas, com altitudes de até 850 metros. É constituída por sedimentos (Formação Águas Claras) e rochas vulcano-sedimentares de baixo grau (Grupo Grão-Pará) de idade arqueana. Em sua parte central ocorre um batólito granítico proterozóico (Granito Central), com um relevo predominantemente colinoso e altitudes de 450 a 500 metros. No entorno da Serra, predominam as rochas gnáissicas do Complexo Xingu, em um relevo arrasado com altitudes de 200 a 300 metros (detalhes em Santos *et al.* 1999).

### Par estereoscópico S7D x TM4

Tabela 1: Principais características do conjunto de dados de sensoriamento remoto utilizados neste trabalho.

Satélite/ Imagem	Banda/ Posição*	Data	Escala	Resolução Espacial (m)	Elev.Solar** / Incidência	Az. Solar/ Az. de Iluminação
Landsat TM 226/064	4	22/06/86	1:250.000	30	43°	50°
RADARSAT SAR-C Standard	S7D	11/09/96	1:250.000	22,09x27	45-48°	282°

\*D= órbita descendente \*\*no centro da imagem

A definição do conjunto de dados de sensoriamento remoto (tab. 1) na composição do par estereoscópico foi baseada nos conceitos discutidos nos itens anteriores. O primeiro e importante aspecto a ser considerado refere-se a radiometria das cenas do par (fig. 1A). A visibilidade estereoscópica depende da correlação radiométrica entre as cenas do par. Neste sentido, a banda 4 do TM-Landsat é a que mostra mais semelhança (aspecto visual) com a imagem de radar. Com o objetivo, também, de melhorar a correlação radiométrica optou-se por uma passagem descendente para o Standard RADARSAT, com ângulos de incidência equivalentes aos de elevação solar da cena do TM-Landsat ( $43^\circ$  de elevação solar equivale a um ângulo de incidência de  $47^\circ$ ). Com isso, as áreas iluminadas e sombreadas são, aproximadamente, equivalentes nas duas cenas do par, estando as diferenças relacionadas à variação entre os azimutes de iluminação e o solar ( $52^\circ$ ), o que provoca um certo deslocamento, principalmente, das sombras.

A figura 1B esquematiza a geometria dos efeitos de deslocamento de relevo acima de um determinado datum, das imagens da figura 1A. As diferenças geométricas, como já discutido, são bastante amplas, devido as diferenças entre os dois sistemas. A melhor forma de minimizar essas diferenças é através da diminuição dos efeitos de relevo nos dados SAR (que são muito mais intensos do que no sistema óptico), que é obtida pelo aumento do ângulo de incidência, ou seja, pela visão mais oblíqua do radar. A adoção da imagem Standard S7 teve, também, esse objetivo. Na figura 1B são delimitadas duas regiões (1 e 2) nas cenas do par estereoscópico que apresentam comportamentos distintos em termos de geometria e, portanto, de paralaxe, como detalhado na figura 1C. Na situação 1, os efeitos de deslocamento de relevo, acima de um determinado datum, se dão em um mesmo sentido. Como a magnitude dos efeitos de deslocamento de relevo é maior nos dados SAR do que no TM, a posição correta das cenas no par estereoscópico é a esquematizada na figura 1C. A posição da imagem RADARSAT S7 à esquerda é necessária, para que a distância entre pontos homólogos seja menor para as maiores elevações. A figura 1D demonstra esquematicamente que, nesta situação, a paralaxe (P) é dada pela diferença entre os deslocamentos de relevo nas duas cenas do par ( $P_R - P_{TM}$ ).

Na situação 2, os efeitos de deslocamento de relevo se dão em sentidos contrários, como esquematizado na figura 1C. Neste caso, também, a imagem SAR deve estar posicionada à esquerda na composição do par estereoscópico, para que a percepção tridimensional seja normal. Neste caso, a paralaxe (P), como pode ser observado na figura 1D, é dada pela somatória dos deslocamentos de relevo nas duas cenas do par ( $P_R + P_{TM}$ ). A análise dessas duas regiões dentro de um mesmo par estereoscópico SAR x óptico, mostra que a sua geometria, e portanto a paralaxe, é variável, havendo situações mais ou menos favoráveis ao detalhamento na percepção de profundidade, de acordo com os efeitos de relevo em cada uma das cenas.

## **Avaliação**

O par estereoscópico S7D x TM4 foi analisado com o objetivo de avaliar a sua potencialidade para estudos geológicos, tendo como área teste a região de Carajás. Buscou-se analisar aspectos tais como: visibilidade estereoscópica, percepção de profundidade, contribuição de cada sensor, etc. Esta avaliação foi feita em duas regiões da imagem, de acordo com o esquema ilustrado na figura 1B. A primeira constatação é que a visibilidade estereoscópica é boa e confortável ao observador, sob quaisquer condições de relevo. Isso comprova o acerto e a importância da escolha criteriosa das cenas para a composição do par, em termos de correlação radiométrica. As dificuldades ocorrem apenas quando há intensa atividade antrópica, normalmente registrada em tons de cinza escuros no S7D e claros no TM4.

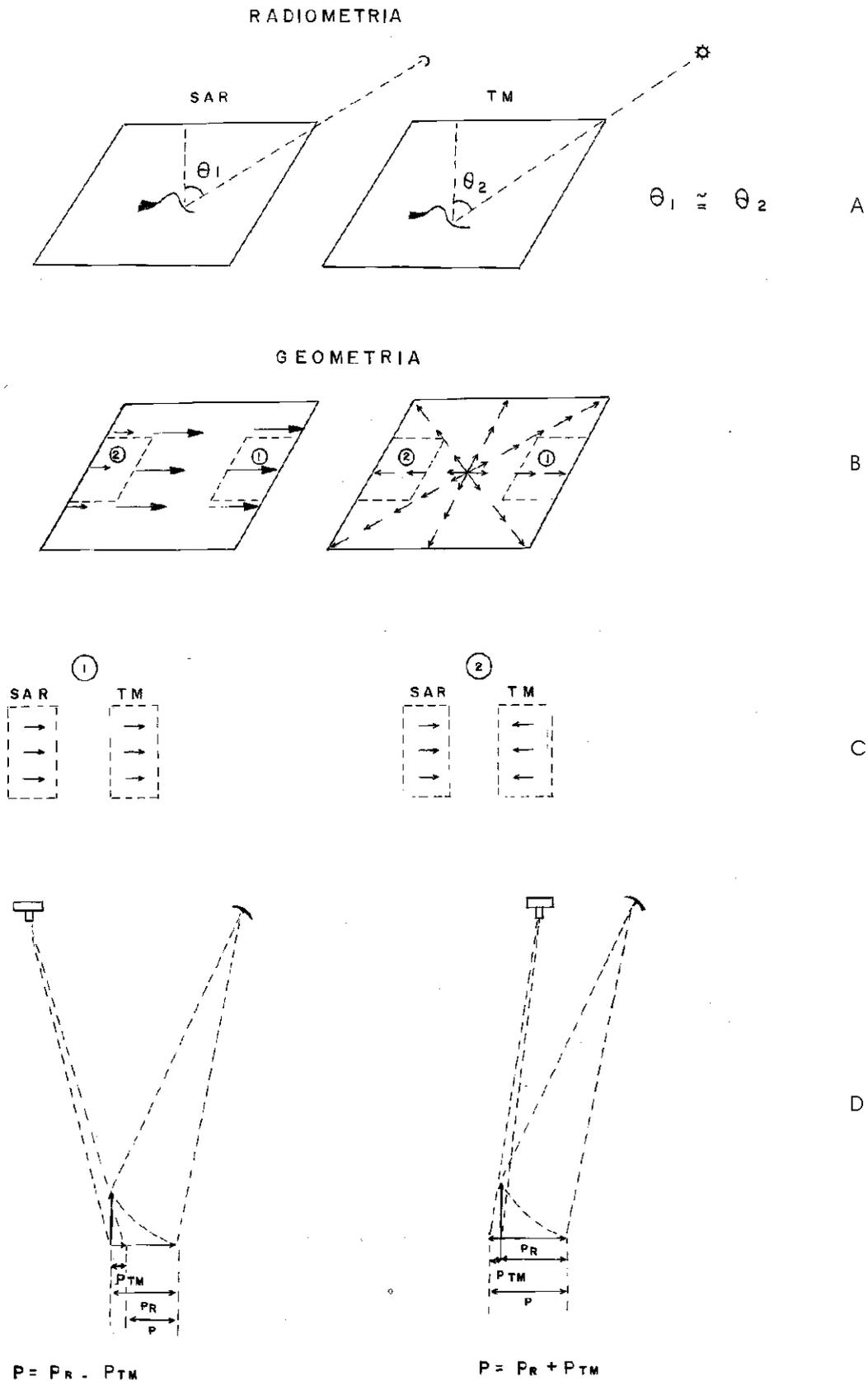


Figura 1: Aspectos da radiometria e geometria de um par estereoscópico SAR-C/TM

A percepção de profundidade é muito boa nas regiões de relevo mais acidentado na Serra dos Carajás. É grande o número de detalhes (cristas, vales, ravinas) perceptíveis, principalmente nas regiões de maior paralaxe (2 na fig. 1B). É possível identificar com clareza e precisão os elementos texturais de relevo e de drenagem, assim como a caracterização de suas propriedades (quebras positiva e negativa, assimetrias, etc.). Já para as áreas mais planas a contribuição da visão tridimensional é pequena, sem diferenças notáveis entre as diversas regiões.

Observa-se na área estudada que há uma contribuição principal de cada um dos sensores quando da análise tridimensional. As variações altimétricas, os detalhes de relevo, vêm, principalmente, dos dados SAR, já que a geometria superficial é a principal condicionadora no retroespalhamento do sinal de radar. Já o TM4, contribui, principalmente, com o mapeamento das respostas espectrais superficiais da vegetação. Esse comportamento espectral da vegetação permite que haja um realce entre as áreas iluminadas e sombreadas, favorecendo a percepção do relevo. Um outro aspecto importante de complementação de informações relaciona-se ao realce das estruturas planares. As estruturas com direção NE-SW, que são atenuadas ou mesmo suprimidas na imagem TM4, apresentam um bom realce nas imagem S7D, o que contribui para a sua boa caracterização na percepção tridimensional. O mesmo acontece com as estruturas WNW-ESE, que são atenuadas no radar e realçadas no sensor óptico.

## **Conclusão**

Este trabalho demonstra a aplicabilidade da análise estereoscópica de pares que combinem dados ópticos e de radar, desde que se busque uma diminuição nas disparidades radiométrica e geométrica entre as cenas do par, para que não haja um comprometimento na visibilidade estereoscópica. Há algumas vantagens na utilização deste tipo de análise para a geologia, que podem ser resumidas na complementação de informações, dada pelos dois tipos de sensores e pelas diferentes perspectivas de iluminação, além da diminuição dos custos em relação a um par estereoscópico formado apenas com cenas de radar.

## **Referências**

- Bloom A.L., Fielding E.J., Fu X.Y. 1988. A demonstration of stereophotogrammetry with Combined SIR-B and Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, **9** (5): 1023-1038.
- Lewis A.J., Henderson F.M., Holcomb D.W. (Contributing Author) 1998. Radar fundamentals: The Geoscience Perspective. In: F.M. Henderson & A.J. Lewis (eds) *Principles Applications of image Radar*, Manual of Remote Sensing. New York, Am. Soc. Phot. and Rem. Sens., 131-181.
- Moore R.K. 1969. Heights from simultaneous radar and infrared. *Photogrammetric Engineering*, **5** (7): 649-651.
- Toutin T. 1998. Stereo RADARSAT for mapping applications. In: ADRO, Final Symposium. Montreal, Canada, *ADRO 453*.
- 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*.
- Toutin T. & Gray L. 2000. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **34**: 13-33.
- 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): 623-628.
- Santos A.R., Veneziani, P, Paradella W.R., Morais M.C. 2000. Radar aplicado ao Mapeamento Geológico e Prospecção Mineral: Aplicações. Apostila de Curso, INPE/ADIMB, São José dos Campos, 21-26/09/00, 103p.
- Vester C. & Toutin T. 1997. A training package on: How to use RADARSAT data in stereo. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada. *CD-ROM*.