

## REAMOSTRAGEM EPIPOLAR COMO BASE PARA CORRELAÇÃO AUTOMÁTICA DE IMAGENS OBLÍQUAS HRV-SPOT

**Antonio José Ferreira Machado e Silva**  
Centro Científico Rio - IBM Brasil  
Caixa Postal 4624, 20.001, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

### RESUMO

A distorção devida ao relevo atua ao longo das varreduras. A variação dinâmica sofrida pelo satélite, ao longo da tomada de uma cena, contribui para que estas varreduras não sejam paralelas. Para as imagens que formam o par estereoscópico HRV-SPOT a direção média das varreduras de uma imagem geralmente é diferente da direção média das varreduras da outra imagem. Dessa forma, os pontos de uma determinada linha de uma cena terão seus homólogos distribuídos em diversas linhas da outra imagem. Assim sendo, a pesquisa de pontos homólogos relativa ao processo de correlação automática teria que ser feita em duas direções. Visando otimizar este processo, as imagens passam por um pré-processamento, que consiste na reamostragem das imagens segundo as linhas quase-epipolares. Neste trabalho apresenta-se o modelo de reamostragem epipolar empregado no processo de restituição altimétrica de imagens digitais HRV-SPOT, desenvolvido no âmbito de um projeto em parceria entre o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Centro Científico Rio (CCRio) da IBM Brasil.

### ABSTRACT

The relief's distortions are concentrated along the scan lines. Due to the dynamic variation inherent to the satellite moving, these scan lines are not parallel. In relation to the images of the HRV-SPOT stereoscopic pair, the mean direction of the scan lines of one image is always different from the mean direction of an other image. For these reasons, the search of homologue pixels, inherent to the automatic correlation process, should be done in two directions. In order to optimize this process, the images receive a pre-processing, which consist in a resampling according to quasi-epipolar lines. In this paper, we will present the epipolar resampling model used for the altimetric restitution of SPOT digital images. This model was been developed in a partnership project between the Institute for Space Research (INPE) and the Rio Scientific Center (CCRio) of IBM Brazil. The general objective of this project is to generate Digital Terrain Elevation Models from HRV-SPOT stereoscopic pair.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das limitações do emprego das imagens de satélite como base para o recobrimento cartográfico é a ausência de informações altimétricas. O lançamento do satélite francês SPOT trouxe como uma das suas principais inovações a possibilidade de visada lateral ("off-nadir"). Este recurso possibilita, então, a formação de pares estereoscópicos, que, por sua vez, possibilitam a extração de informações altimétricas.

O Centro Científico Rio (CCRio) da IBM Brasil e o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) se uniram para, em parceria, desenvolver um projeto de pesquisa que visa a geração de modelos numéricos de elevação do terreno (MNET) a partir de pares estereoscópicos de imagens digitais HRV-SPOT.

O projeto se divide em nove módulos: (1) aquisição de imagens, (2) correção radiométrica, (3) **reamostragem epipolar**, (4) correlação automática, (5) restituição altimétrica, (6) interpolação do MNET, (7) avaliação do MNET, (8) correção geométrica e (9) visualização do MNET. Este projeto é apresentado por Machado e Silva et al. (1989) a nível de objetivos e descrição dos diversos módulos.

Este trabalho concentrará seu enfoque no módulo (3), responsável pela reamostragem epipolar das imagens que compõem o par estereoscópico. Esta reamostragem é, na realidade, um pré-processamento necessário para facilitar o processo de correlação automática (módulo 4).

Os próximos tópicos abordarão o conceito de reamostragem epipolar, os modelos matemáticos de reamostragem, a avaliação destes modelos e as considerações finais do trabalho.

## 2. REAMOSTRAGEM EPIPOLAR

As distorções devidas ao relevo se concentram ao longo das varreduras, e a magnitude destas distorções está diretamente associada à altitude do relevo e ao ângulo de visada (Guichard, 1983).

No caso de um par estereoscópico, em que as imagens são tomadas em visadas oblíquas opostas, as distorções associadas ao relevo aparecem de forma diferenciada em cada imagem. Para a imagem observada pelo satélite à leste, o deslocamento devido ao relevo atua na direção da varredura, com sentido dado pelo vetor de visada, ou seja, o deslocamento está voltado para oeste. O inverso ocorre para a imagem observada à oeste, quando o deslocamento estará voltado para leste (Figura 1).

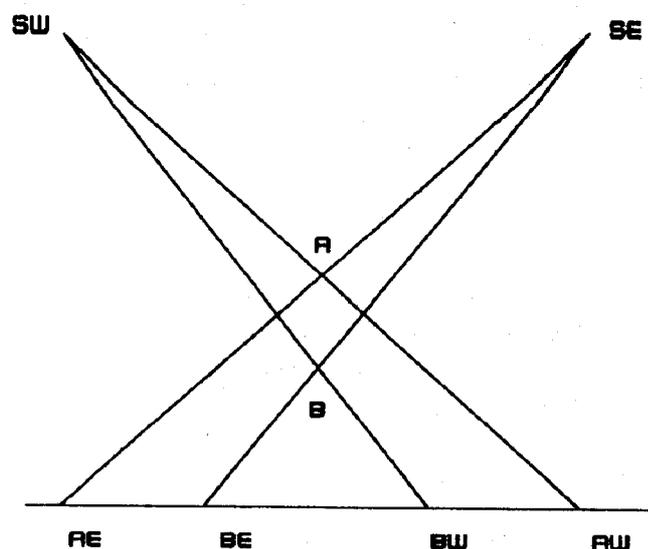


Fig. 1 - Paralaxe devido ao relevo.

Esta diferença nada mais é que a paralaxe provocada por visadas laterais opostas, e é a base para o processo de extração das informações altimétricas destas imagens. Pode-se notar na Figura 1 que quanto mais elevado é o ponto observado, maior é a paralaxe.

No processo de restituição altimétrica de pares estereoscópicos SPOT, procura-se determinar a altitude para os nós de uma grade regularmente distribuída sobre uma das imagens do par. A densidade desta grade é função do relevo representado na imagem (pouco ou muito acidentado), dos ângulos de incidência (definem a relação base-altura) e da precisão desejada para o MNET. Guichard (1983) apresenta um gráfico que relaciona o passo necessário para o MNET em função dos fatores citados.

A partir de um ângulo de incidência de 15° o intervalo da grade é de dois ou um "pixel". Considerando uma taxa de superposição de 60%, a grade da restituição não terá menos que 1.000.000 de nós. Para determinar a paralaxe de cada um destes nós, é necessário que se conheça suas coordenadas em cada imagem do par:  $(L_1, C_1)$  e  $(L_2, C_2)$ .

A determinação das coordenadas numa das imagens é simples, pois a grade está regularmente distribuída sobre ela. Uma vez definido o canto superior esquerdo desta grade, através de suas coordenadas  $(L(0)_1, C(0)_1)$ , e o intervalo da grade ( $\Delta L_1$  e  $\Delta C_1$ ), as coordenadas dos demais podem ser obtidas a partir da Equação 1.

$$\begin{aligned} L(i) &= L(0) + i \cdot \Delta L \\ C(j) &= C(0) + j \cdot \Delta C \end{aligned} \quad (1)$$

As coordenadas dos nós homólogos da outra imagem devem ser obtidas automaticamente, da forma mais otimizada possível, pelo grande volume de dados envolvido. O processo natural de obtenção destas coordenadas é através da correlação automática entre estas imagens.

No processo de correlação, define-se uma janela de  $K \times L$  pontos numa das imagens e uma área de busca de  $M \times N$  pontos na outra imagem. Em seguida, procura-se uma janela de  $K \times L$  pontos da área de busca que mais se assemelha a janela de igual tamanho da primeira imagem. Como pode ser visto, a procura dos pontos homólogos se dá em duas direções. Quando realizado milhões de vezes, este processo passa a ser inviável.

Masson d'Autume (1984) propõe, então, um pré-processamento, que consiste na reamostragem das imagens segundo as linhas quase-epipolares. Estas linhas são definidas de forma semelhante à linha epipolar da aerofotogrametria (Wolf, 1983). As adaptações se devem ao fato das imagens do sensor HRV-SPOT serem adquiridas em projeção cilíndrica, com diversos centros perspectivo (um para cada varredura). Estas reamostragens vão otimizar, sobremaneira, a etapa de correlação automática das imagens. A busca do ponto homólogo se dará, praticamente, na direção das varreduras, com ligeira liberdade na direção normal a estas.

Uma vez definida a direção das linhas quase-epipolares, determina-se as matrizes de reamostragem, que mapeiam as imagens epipolares nas imagens brutas. Estas matrizes são fundamentais nos passos seguintes, pois todo o modelamento geométrico tem seus parâmetros associados aos "pixels" nas imagens brutas. Dessa forma, para referenciar as imagens epipolares a um referencial cartográfico, é necessário, num passo intermediário, passar pelas imagens brutas. As matrizes de reamostragem epipolar vão permitir esse passo.

### 3. MODELO DA REAMOSTRAGEM

Conforme citado anteriormente, o erro devido ao relevo se concentra ao longo das varreduras, e com sentido contrário nas imagens que formam o par.

No entanto, variações dinâmicas sofridas pelo satélite, ao longo da tomada de uma cena, contribui para que estas varreduras não sejam paralelas. As variações principais ocorrem na atitude e na inclinação da órbita. Considerando-se uma direção média para as varreduras, tem-se que as distorções provocadas pelo relevo tem maior presença nesta direção, mas com resíduos na direção normal.

Para imagens que formam o par estereoscópico, não existe a garantia que a direção média das varreduras de uma imagem seja paralela à direção média das varreduras da outra imagem (Figura 2). Assim sendo, os pontos de uma determinada linha da imagem 1 terão seus homólogos distribuídos em diversas linhas da imagem 2.

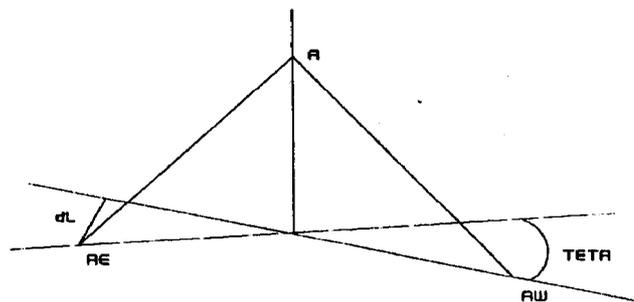


Fig. 2 - Paralaxe vertical.

A consequência disso, é que a paralaxe provocada pelo relevo tem componentes em duas direções perpendiculares, e a busca dos pontos homólogos deve ser feita em duas direções. Para contornar este problema, define-se uma direção de orientação das imagens, de tal forma que reamostrando as imagens segundo esta direção a paralaxe na direção normal às varreduras ( $PL = L_2 - L_1$ ) será de segunda ordem quando comparada com a paralaxe na direção das varreduras ( $PC = C_2 - C_1$ ).

O modelo proposto para reamostragem prescinde da adoção de pontos de controle. Observando-se o relevo na região de superposição das imagens do par, define-se uma altitude média  $H_{med}$ . Em função dessa altitude determina-se os parâmetros de um elipsóide auxiliar (Machado e Silva e Barbosa, 1988). Em seguida, determina-se duas grades regularmente espaçadas sobre a região de superposição, referentes ao mapeamento direto nível 2 das imagens HRV-SPOT (Machado e Silva, 1988).

Estas grades devem ser determinadas até o nível de conhecimento das coordenadas plana-retangulares de projeção. Em função destas grades define-se as matrizes de reamostragem, que funciona semelhante a um processo de rotação dinâmico, onde o ângulo fosse variável. Para os nós da primeira linha da grade da imagem 1, procura-se os pontos correspondentes na imagem 2. Estes pontos estarão sobre diversas linhas, definindo uma orientação média em relação a direção da primeira varredura da imagem 1. Esse procedimento é realizado para todas as linhas da grade da imagem 1, gerando um processo semelhante a uma rotação dinâmica.

Este processo de reamostragem deve ser otimizado, pois trata-se apenas de um pré-processamento que visa facilitar a tarefa de correlação automática. Propõe-se utilizar modelos de reamostragem monodimensionais, semelhantes ao proposto por Friedmann (1981).

Dentro do processo de reamostragem epipolar define-se um área de "recorte" nas imagens, de tal sorte que um ponto pertença a linhas de mesmo número em ambas imagens.

#### 4. AVALIAÇÃO DO MODELO

Para avaliação do modelo recorreu-se ao emprego de pontos de controle sobre as imagens de um par estereoscópico. As imagens se localizam numa região de fronteira, no Estado do Paraná. A identificação das imagens é: SIX1-11824[703-402], de 31/05/88 e ângulo de incidência de  $-20,4^\circ$ ; e SIX1-11909[703-402], de 06/06/88 e ângulo de incidência de  $+9,5^\circ$ . As coordenadas do centro da região de trabalho é latitude  $26^\circ 00'S$  e longitude  $53^\circ 41'W$ .

Inicialmente foram levantados dezessete pontos de controle na imagem de 06/06/88, comparando-se esta imagem com cartas topográficas na escala de 1:50.000 da região. Em seguida, num monitor de vídeo, procurou-se definir os dezessete pontos de controle na imagem de 06/06/88. Problemas de nuvem impediram a identificação de um ponto. Os dezesseis pontos que sobraram foram classificados em bons, ruins e duvidosos. Ficou-se com nove pontos bons, dois ruins e cinco duvidosos.

No monitor de vídeo, do sistema de processamento de imagens 7350 da IBM, extraiu-se as coordenadas de imagem destes pontos. As cartas foram levadas para uma mesa digitalizadora para interpolação das coordenadas de projeção. As Tabelas 1 e 2 apresentam as coordenadas de projeção e de imagem dos pontos de controle.

**TABELA 1**  
**COORDENADAS DE PROJEÇÃO DOS**  
**PONTOS DE CONTROLE**

ID	EUTM	NUTM
1+	217.381	7.142.098
2±	222.320	7.142.739
3 -	223.838	7.133.320
4+	247.897	7.115.977
5+	246.361	7.111.642
6 -	236.056	7.099.452
7+	225.644	7.142.187
8±	230.004	7.141.150
9 -	242.365	7.139.537
10+	240.599	7.133.590
11+	226.613	7.128.308
12±	227.578	7.126.122
13+	244.890	7.126.573
14+	245.899	7.125.135
15±	255.729	7.132.361
16+	256.392	7.131.907
17±	240.583	7.093.179

**TABELA 2**  
**COORDENADAS DE IMAGEM DOS**  
**PONTOS DE CONTROLE**

ID	L1	C1	L2	C2
1+	292	979	401	389
2±	219	1204	339	604
3 -	673	1376	---	---
4+	1336	2712	1506	1950
5+	1565	2685	1733	1920
6 -	2245	2319	---	---
7+	224	1375	347	765
8±	237	1586	370	963
9 -	219	2192	---	---
10+	526	2171	677	1484
11+	878	1553	1006	916
12±	992	1618	1131	982
13+	834	2450	993	1728
14+	903	2518	1065	1788
15±	464	2904	639	2151
16+	487	2952	663	2192
17±	2522	2604	2687	1833

Em seguida, as imagens sofreram um processo de reamostragem, e a coordenada linha foi observada, para avaliação do grau de epipolaridade. A Tabela 3 apresenta o resultado da reamostragem, confirmando que as linhas dessas imagens passam a ser praticamente homólogas.

**TABELA 3**  
**COORDENADAS DE IMAGEM**  
**REAMOSTRADA**  
**DOS PONTOS DE CONTROLE**

ID	L1	L2
1 +	314	314
2 ±	229	231
3 -	---	---
4 +	1311	1312
5 +	1542	1541
6 -	---	---
7 +	229	228
8 ±	235	232
9 -	---	---
10 +	504	505
11 +	876	876
12 ±	984	988
13 +	817	819
14 +	886	887
15 ±	440	438
16 +	461	460
17 ±	2501	2504

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho as maiores dificuldades ficaram por conta do levantamento de pontos de controle. As cartas da região são antigas, não apresentando de forma atualizada as melhores feições que serviriam para o controle, como estradas, pontes, etc.

O trabalho de identificação do ponto exato no monitor de vídeo não é trivial, muitas vezes deixando dúvidas sobre as coordenadas escolhidas. Este processo deve ser feito através de registro de imagens.

O modelo apresentado ainda não é o definitivo, mas ainda assim mostrou resultados plenamente satisfatórios. O erro encontrado fica dentro dos limites especificados, principalmente se for levado em consideração a imprecisão da determinação das coordenadas de imagem.

Como continuação deste trabalho, pretende-se contornar os problemas aqui expostos, estudar novos modelos de reamostragem, e implementar a determinação do desvio da epipolaridade, um parâmetro importante quando se fala em avaliar o processo de reamostragem epipolar.

## BIBLIOGRAFIA

**GUICHARD, H.** Utilization photogrammetrique et cartographique de SPOT. In: SEMAINES INTERNATIONALES DE PHOTOGRAMMETRIE, Stuttgart, R.F.A., Sep. 1983.

**MACHADO E SILVA, A.J.F.** Modelos de correção geométrica para imagens HRV-SPOT. Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE - São José dos Campos, Dissertação de Mestrado, Out. 1988.

**MACHADO E SILVA, A.J.F.; BARBOSA, O.C.** Correção geométrica com uso de um modelo digital de elevação, das imagens SPOT obtidas em visada lateral (nível 3). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., Natal, RN, 11-15 out. 1988. Anais. São José dos Campos, INPE, 1988, v 1., p.225-231.

**MACHADO E SILVA, A.J.F.; BRAGA, R.E.G;**  
**VIEIRA DIAS, L.A.** Restituição Altimétrica  
de Pares Estereoscópicos de Imagens Digitais  
HRV-SPOT. In: SIMPÓSIO  
LATINOAMERICANO DE PERCEPCION  
REMOTA, 4., Proceedings (2):291-300, San  
Carlos de Bariloche, Argentina, nov. 1989.

**MASSON D'AUTUME, G.** Correlation  
Numerique d'images quelconques selon les  
lignes quasi-épipolaires, par approximations  
sucessives. In: CONGRESS OF THE  
INTERNATIONAL SOCIETY FOR  
PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE  
SENSING, 15., Rio de Janeiro, Brazil, Jun.  
1984. Proceedings. Rio de Janeiro, ISPRS, 1984.

**WOLF, P.R.** Elements of Photogrammetry.  
McGraw-Hill Book Company. Second Edition,  
Singapore, 1983.