

# MODELOS DE RESTITUIÇÃO ALTIMÉTRICA A PARTIR DA CORRELAÇÃO AUTOMÁTICA DE IMAGENS 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 partir do processo de correlação automática entre as imagens que formam o par estereoscópico HRV-SPOT, tem-se duas grades de pontos homólogos. As coordenadas de imagem destes pontos, os parâmetros do satélite e das imagens permitem a construção de modelos para a restituição dos dados de altimetria destas imagens. Esta restituição pode gerar dados de altitude absoluta ou relativa. Neste último caso são empregados pontos de controle para determinar um valor constante a ser adicionado às diferenças de altitude. Em ambos os casos, porém, pontos de controle devem ser utilizados visando a eliminação das distorções causadas pelas imprecisões das efemérides. O estudo destes modelos de restituição altimétrica faz parte de um projeto de pesquisa desenvolvido em conjunto pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Centro Científico Rio (CCRio) da IBM Brasil. O objetivo geral deste projeto é gerar Modelos Numéricos de Elevação do Terreno (MNET) a partir de pares estereoscópicos de imagens HRV-SPOT.

## ABSTRACT

One of the main results of the automatic correlation between the images of the HRV-SPOT stereoscopic pair is the generation of the two grids of homologue nodes. The coordinates of these nodes, the satellite and image parameters permit the construction of restitution models to allow the altimetric information to be extracted from these images. This restitution may generate absolute or relative altitudes. On the latter case, to obtain the absolute altitude it is used control points for the calculus of a constant value to be added to the differences of altitude. Nevertheless, in both cases, we must use control points in order to eliminate the distortions caused by the ephemeris. The study of these altimetric restitution models is included 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 Elevation Terrain Models (DETM) from HRV-SPOT stereoscopic pair.

## 1. INTRODUÇÃO:

O Centro Científico Rio (CCRio) da IBM Brasil e o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) estão desenvolvendo um projeto de parceria para obtenção de modelos numéricos de elevação do terreno (MNET) a partir de pares estereoscópicos de imagens digitais do sensor 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. A visão geral deste projeto pode ser vista em Machado e Silva et al. (1989), onde são apresentados os objetivos do projeto e a descrição dos diversos módulos que o compõem.

O módulo (5) trata diretamente do objetivo maior do projeto, qual seja, o da restituição altimétrica para obtenção dos dados de elevação dos diversos pontos de uma grade amostral. Este módulo trabalha diretamente com os resultados provenientes do módulo anterior.

Nos tópicos seguintes, serão apresentados o conceito de restituição altimétrica, modelos matemáticos desta restituição, tanto a nível de restituição absoluta quanto relativa. Os resultados encontrados nas aplicações sobre um par estereoscópico servirão como exemplo para a avaliação destes modelos, bem como servirão de base para as considerações finais do trabalho.

## 2. RESTITUIÇÃO ALTIMÉTRICA

A partir do processo de correlação automática entre as imagens HRV-SPOT são geradas duas grades de pontos homólogos, distribuídos ao longo destas imagens. Para cada nó destas grades são conhecidas as coordenadas de imagens bruta (linha L e coluna C) e epipolar (linha U e coluna V) em cada uma das imagens do par. A partir do conhecimento destas coordenadas, dos parâmetros do satélite (ângulos de "boresight", parâmetros do vetor de visada, resolução espacial e período de varredura) e dos parâmetros das imagens (ângulo de inclinação dos espelho, modo de operação, número do instrumento, dados de efemérides e

atitude), pode-se definir modelos de restituição altimétrica. Estes modelos podem gerar dados de altitude absolutos ou relativos.

A restituição absoluta, basicamente, define a altitude de um ponto relativa a uma superfície de referência para a Terra, a partir dos vetores de visada associados à posição deste ponto em cada imagem do par. Neste processo é necessário utilizar pontos de controle para eliminar distorções causadas pelas imprecisões das efemérides.

A restituição relativa faz uso das paralaxes definidas na correlação das grades homólogas. A diferença em colunas entre dois nós da grade, situados sobre uma mesma linha, não é constante para as duas imagens do par. A diferença entre tais diferenças define a paralaxe, que permite a determinação da diferença de altitude entre estes nós (Masson d'Autume, 1984). Ao final, pontos de controle permitirão determinar a constante a ser adicionada aos valores relativos, de modo a torná-los valores absolutos de altitude.

Em ambos os casos, porém, pontos de controle devem ser utilizados para eliminação das distorções provocadas pelas imprecisões das efemérides.

## 3. MODELOS DE RESTITUIÇÃO ABSOLUTA

Estes modelos trabalham com equacionamento geométrico semelhante ao processo de correção geométrica. Fazem uso dos vetores de visada para definir a posição do ponto observado simultaneamente por estes vetores. O equacionamento mais completo permite determinar as coordenadas geodésicas latitude, longitude e altitude, enquanto que modelos mais simplificados permitem, apenas, o cálculo da altitude. Independente da complexidade do modelo, a imprecisão dos dados de efemérides (posição e velocidade) obriga a adoção de pontos de controle para corrigir os desvios causados em função destas imprecisões.

### 3.1 MODELO ALGÉBRICO

O modelo algébrico deriva do modelo fotogramétrico para correção geométrica, baseado nas equações de colinearidade. No processo de correção geométrica procura-se relacionar cada ponto da imagem bruta com um ponto na superfície da Terra. Geralmente a Terra é representada por uma superfície de referência de revolução (esfera ou elipsóide), pela dificuldade de se representar matematicamente o relevo. As distorções causadas pelo relevo só são significativas para imagens em visada oblíqua. No entanto, a utilização de modelos que representam o relevo permitem adotar modelos de correção mais precisos.

No processo de correção geométrica a partir do modelo fotogramétrico, o ponto observado na superfície da Terra é definido pela interseção da reta suporte do vetor de visada, com o elipsóide (ou esfera). Imprecisões nos dados de efemérides não impedem a determinação das coordenadas do ponto, uma vez que o satélite está sempre voltado para o centro da Terra, o que garante que o vetor de visada interceptará a Terra. É claro, no entanto, que a imprecisão das efemérides provoca imprecisão na determinação do ponto observado.

No modelo algébrico um ponto é observado alternadamente em duas posições distintas do satélite. A partir do conhecimento dos pares de coordenadas (U, V) das imagens epipolares, resultantes da correlação automática, recupera-se os pares de coordenadas (L, C) das imagens brutas. Os parâmetros necessários para definição das retas de visada, relativas a cada observação, (efemérides, atitude, vetor de visada) estão diretamente associados às coordenadas brutas. Uma vez definidas as retas de visada, o ponto observado deveria ser obtido pela interseção destas retas. No entanto, as imprecisões das efemérides faz com que estas retas sejam reversas, independente do emprego de pontos de controle (Figura 1).

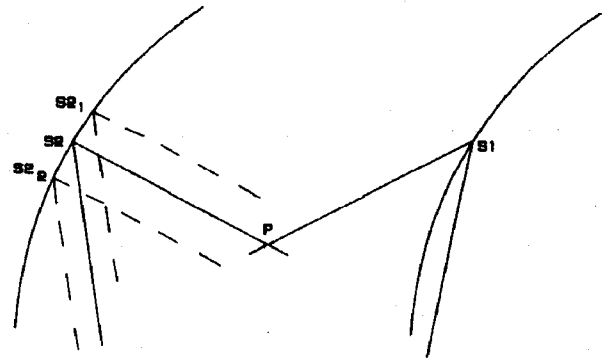


Fig. 1 - Modelo absoluto algébrico.

A solução adotada foi determinar os parâmetros da reta de visada (posição do satélite  $(X_1, Y_1, Z_1)$  e direção do vetor de visada  $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ ) para uma das imagens. Para outra imagem, determinou-se tais parâmetros para dois instantes ( $t_1$  e  $t_2$ ) cujo intervalo é função da precisão das efemérides. Neste intervalo deve-se encontrar os parâmetros da segunda reta de visada que garanta a interseção com a primeira reta. Considera-se ainda, que neste intervalo tais parâmetros variem linearmente (Equação 1).

$$R_2 = R_{2_1} \cdot r + R_{2_2} \cdot (1 - r) \quad (1)$$

onde  $R \in \{X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma\}$ .

Já ficou claro que quanto menor for o intervalo adotado, maior é a precisão do modelo. É importante, então, utilizar pontos de controle para melhorar a precisão das efemérides, e permitir a adoção de intervalos menores.

O ponto observado é resultado da interseção das retas de visada. Da Equação 2, observa-se um sistema com três equações e duas incógnitas ( $p$  e  $q$ ), representativa desta interseção (retas na forma paramétrica).

$$\begin{aligned} X_1 + \alpha_1 \cdot p &= X_2 + \alpha_2 \cdot q \\ Y_1 + \beta_1 \cdot p &= Y_2 + \beta_2 \cdot q \\ Z_1 + \gamma_1 \cdot p &= Z_2 + \gamma_2 \cdot q \end{aligned} \quad (2)$$

Este sistema só tem solução única quando as retas não forem reversas. Substituindo a Equação 1 na Equação 2, obtém-se um sistema com três equações e três incógnitas ( $p$ ,  $q$  e  $r$ ), e com solução única (Equação 3). A solução deste novo sistema fornece os parâmetros necessários para a determinação das coordenadas retangulares tridimensionais do ponto observado ( $XP$ ,  $YP$ ,  $ZP$ ).

$$\begin{aligned} A_{11} \cdot p + A_{12} \cdot q + A_{13} \cdot r + A_{14} \cdot q \cdot r &= B_1 \\ A_{21} \cdot p + A_{22} \cdot q + A_{23} \cdot r + A_{24} \cdot q \cdot r &= B_2 \quad (3) \\ A_{31} \cdot p + A_{32} \cdot q + A_{33} \cdot r + A_{34} \cdot q \cdot r &= B_3 \end{aligned}$$

Este ponto não se encontra mais sobre a superfície de referência para a Terra. Convertendo as coordenadas retangulares espaciais em geodésicas ( $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $H$ ) obtém-se a altitude do ponto em relação a esta superfície. Pode-se, ainda, converter as coordenadas geodésicas, latitude  $\phi$  e longitude  $\lambda$ , em coordenadas plana-retangulares, numa determinada projeção cartográfica. Ou seja, este modelo de restituição engloba o modelo de correção geométrica referente ao nível 3.

A imprecisão das efemérides tem três componentes: tangente (ao longo da órbita), normal e radial à órbita. Apenas a componente tangente à órbita faz com que as retas sejam reversas. As componentes normal e radial à órbita têm influência sobre a posição da interseção das retas de visada. De todo modo, a imprecisão causada por estas componentes, tanto em relação à altitude quanto às coordenadas planas de projeção, é sistemática e pode ser praticamente eliminada através do emprego de pontos de controle.

### 3.2 MODELO GEOMÉTRICO

O modelo geométrico é mais simples que o algébrico e de fácil implementação computacional. No entanto, este modelo só permite a determinação da altitude do ponto observado. Esta altitude pode ser utilizada no modelo de correção geométrica referente ao nível 3, que fornecerá as coordenadas planas de projeção do referido ponto. Alguns recursos algébricos possibilitam a determinação das coordenadas geodésicas do ponto.

No modelo geométrico, as retas suportes das visadas são projetadas sobre um plano, independente de serem reversas (Figura 2). Os ângulos  $\theta$ ,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  e os lados dos triângulos  $R_1$  e  $R_2$  são calculados em função dos dados de efemérides, atitude e dos parâmetros de visada para cada uma das cenas. Os lados  $R_1$  e  $R_2$  são determinados pelos módulos dos vetores de posição do satélite.  $\theta$  é o ângulo definido por estes vetores de posição.  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são definidos pelos vetores de posição e seus respectivos vetores de visada.

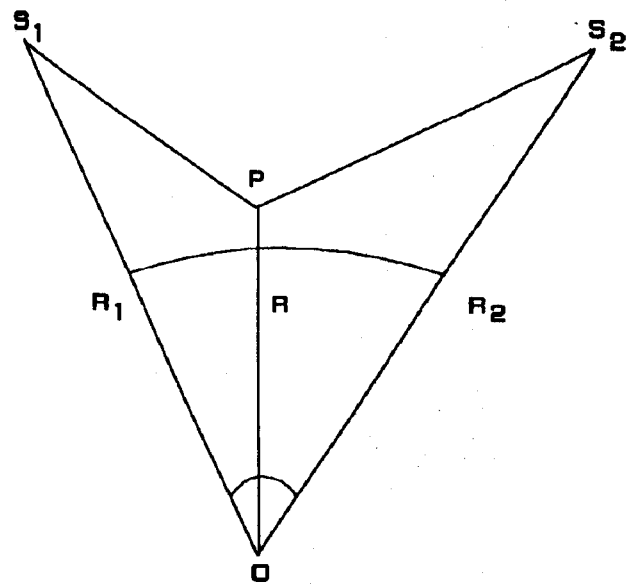


Fig. 2 - Modelo absoluto geométrico.

Aplicando, então, a lei dos senos aos triângulos  $S_1OP$  e  $S_2OP$ , tem-se:

$$\frac{R}{\text{sen}\theta_1} = \frac{R_1}{\text{sen}(\theta_1 + \alpha)} \quad (4)$$

$$\frac{R}{\text{sen}\theta_2} = \frac{R_2}{\text{sen}(\theta_2 + \theta - \alpha)} \quad (5)$$

Eliminando  $R$  das Equações 4 e 5, recai-se numa equação cuja única incógnita é  $\alpha$ , do tipo:

$$A \cdot \text{sen}\alpha + B \cdot \text{cos}\alpha = C \cdot \text{sen}\alpha + D \cdot \text{cos}\alpha \quad (6)$$

Da Equação 6, tem-se:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{D-B}{C-A}\right) \quad (7)$$

Uma vez obtido  $\alpha$ , através das Equações 4 ou 5 pode-se obter o valor de  $R$ . A altitude  $H$  do ponto é dada pela diferença entre  $R$  e o raio médio da Terra para a cena em questão ( $H = R - \text{Raio}$ ).

Neste caso, a altitude é calculada em relação a uma esfera, e não mais em relação a um elipsóide. No entanto, pode-se calcular as coordenadas retangulares espaciais do ponto  $P$ , em função das coordenadas de  $S_1$  e  $S_2$  (Equação 8).

$$\vec{R}_P = a \cdot \vec{R}_1 + b \cdot \vec{R}_2 \quad (8)$$

Para determinar os valores dos parâmetros  $a$  e  $b$ , utiliza-se um artifício de mudança da base do sistema de coordenadas espaciais, de tal forma que as coordenadas de  $\vec{R}_P$ ,  $\vec{R}_1$  e  $\vec{R}_2$  sejam conhecidas. Neste novo sistema, o eixo  $\vec{X}$  passa por  $S_2$ ; o eixo  $\vec{Y}$  está sobre o plano definido por  $\vec{R}_1$  e  $\vec{R}_2$ , de tal forma que o produto escalar entre  $\vec{R}_2$  e  $\vec{Y}$  seja positivo; e o eixo  $\vec{Z}$  completa o triedro direto. Neste sistema tem-se:

$$\begin{aligned} \vec{R}_P &= (R \cdot \cos(\theta - \alpha), R \cdot \sin(\theta - \alpha), 0) \\ \vec{R}_1 &= (R_1 \cdot \cos\theta, R_1 \cdot \sin\theta, 0) \\ \vec{R}_2 &= (R_2, 0, 0) \end{aligned} \quad (9)$$

Das Equações 8 e 9 é possível determinar os parâmetros  $a$  e  $b$  e, voltando ao Sistema Geocêntrico de Greenwich, pode-se determinar as coordenadas espaciais do ponto  $P$ . A partir deste ponto, procede-se como no modelo algébrico.

Este modelo, além de obrigar que as retas de visada não sejam reversas, considera que os vetores posição e os vetores de visada são coplanares ( $O, S_1, S_2$  e  $P$  estão no mesmo plano). Ocorre que isto geralmente não é verdade. De qualquer forma, as distorções daí decorrentes podem ser eliminadas com a adoção de pontos de controle.

#### 4. MODELOS DE RESTITUIÇÃO RELATIVA

Os modelos de restituição relativa procuram definir a diferença de altitude entre dois pontos a partir da paralaxe destes pontos. A conceituação destes modelos é semelhante ao modelo

geométrico, para restituição absoluta. Eles procuram apresentar como vantagem, maior rapidez em relação aos anteriores. Estes modelos trabalham em cima das paralaxes provocadas pelo relevo (COLLINS, 1981).

A diferença de altitude  $\Delta h$ , entre os pontos  $P_1$  e  $P_2$  (Figura 3) é função da diferença entre  $dp_1$  e  $dp_2$  (Equação 10), onde  $dp$  representa a diferença em "pixels" entre dois pontos de uma imagem. ( $dp = p_i - p_j$ ). Os parâmetros  $a$  e  $b$ , por sua vez, variam em função de  $H_1, H_2, h_1, \Delta h, \theta_{11}, d\theta_1$  e  $\alpha$  (Equação 11).

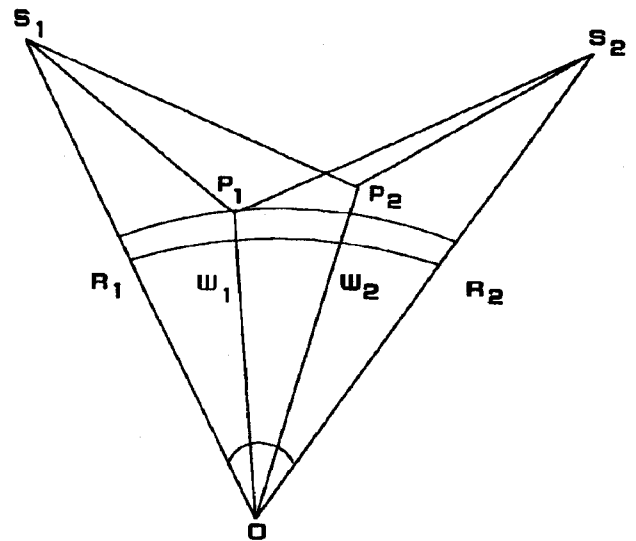


Fig. 3 - Modelo relativo.

$$\Delta h = a \cdot (dp_1 - dp_2) + b \quad (10)$$

$$(a, b) = f(H_1, H_2, h_1, \Delta h, \theta_{11}, d\theta_1, \alpha) \quad (11)$$

Analisando estas variáveis, no espaço de tempo referente a uma cena SPOT (aproximadamente 9 segundos), concluiu-se que:

O comportamento da altitude do satélite SPOT varia de órbita para órbita, em função dos dados de efemérides. No entanto, o intervalo de variação, referente a uma cena SPOT, não excede 200 metros, e as altitudes tendem a ser próximas quando o satélite cruza o mesmo paralelo.

O ângulo de visada  $\theta_{11}$  tem uma variação de  $4,13^\circ$ , relativa ao campo de visada total do sensor, enquanto que o ângulo  $\alpha$  é função da base **B** do par estereoscópico.

A altitude de um ponto ( $h_1$ ) e a variação em relação ao seu vizinho ( $\Delta h$ ) variam em função do relevo da região representada na imagem. A diferença angular  $d\theta_1$  é função do passo definido para o MNET ( $dp_1$ ), que por sua vez depende do tipo de relevo. Ou seja, se o relevo for muito acidentado, e  $h_1$  tiver um grande intervalo de variação então,  $d\theta_1$  deverá ser pequeno.

Os parâmetros **a** e **b** são, então, calculados para os valores médios das citadas variáveis (Figura 3).

$$\alpha_{11} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{R + H_1}{R + h_1} \cdot \text{sen}\theta_{11}\right) - \theta_{11} \quad (12)$$

$$\alpha_{21} = \alpha - \alpha_{11} \quad (13)$$

$$\theta_{21} = \tan^{-1}\left(\frac{(R + h_1) \cdot \text{sen}\alpha_{21}}{R + H_2 - (R + h_1) \cdot \cos\alpha_{21}}\right) \quad (14)$$

$$\theta_{12} = \theta_{11} + d\theta_1 \quad (15)$$

Uma vez definido  $\theta_{12}$ , calcula-se  $\theta_{22}$  de forma análoga à utilizada para a determinação de  $\theta_{21}$ , substituindo-se  $h_1$  por  $h_1 + \Delta h$ , nas Equações 12 e 14. Verificando a equação relativa ao ângulo de visada pode-se relacionar a diferença entre estes ângulos com a diferença entre as paralaxes (Equação 16).

$$\begin{aligned} dp_1 &= k \cdot (\tan\theta_{11} - \tan\theta_{12}) \\ dp_2 &= k \cdot (\tan\theta_{21} - \tan\theta_{22}) \end{aligned} \quad (16)$$

O parâmetro  $dp_1$  é constante e representa o espaço, em "pixels", da grade regular da imagem 1. O parâmetro  $dp_2$ , por sua vez, representa a distância entre dois nós consecutivos da grade homóloga, irregularmente distribuída sobre a imagem 2. O valor de  $dp_2$  varia dinamicamente em função dos desníveis  $\Delta h$  entre os nós da grade da imagem 1. O parâmetro  $dp_1$  é definido em função da relação base-altura do par estereoscópico, da

precisão desejada para o MNET e do tipo do relevo representado na imagem.

## 5. AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Para entender o processo necessário à avaliação dos modelos de restituição altimétrica, recomenda-se a leitura do mesmo tópico no trabalho de Machado e Silva (1990), sobre **reamostragem epipolar**. Foram utilizadas as mesmas imagens, com os mesmos pontos de controle e suas respectivas coordenadas de imagem ( $L_1, C_1$ ) e ( $L_2, C_2$ ).

Para extração dos dados de altitude destes pontos, optou-se pela observação e interpolação simplificada a partir das curvas de nível.

A Tabela 1 apresenta as altitudes extraídas de cartas topográficas, seguida das altitudes obtidas a partir dos modelos de restituição: absoluto algébrico, absoluto geométrico e relativo. Para o modelo relativo elegeu-se os pontos 1, 13 e 16 para calcular o valor constante para adição às diferenças de altitude.

## 6. CONCLUSÃO

Voltando ao trabalho de reamostragem epipolar de Machado e Silva (1990), encontrou-se neste trabalho todas as dificuldades encontradas naquele. Além disso, acrescenta-se o erro inerente ao processo de extração de altitude dos pontos de controle, a partir de cartas topográficas.

**TABELA 1**  
**ALTITUDE DOS**  
**PONTOS DE CONTROLE**

ID	CARTA	ALG	GEO	REL
1+	275	283	286	289
2±	405	436	437	440
3 -	420	---	---	---
4+	350	333	336	335
5+	375	391	393	397
6 -	720	---	---	---
7+	500	492	489	487
8±	525	493	492	490
9 -	300	---	---	---
10+	320	328	327	331
11+	575	593	596	594
12±	555	518	514	517
13+	335	339	339	340
14+	335	311	309	307
15±	630	648	649	653
16+	625	634	635	639
17±	840	856	853	854

Conforme observado na Tabela 1, o modelo que apresentou melhor desempenho foi o absoluto algébrico, que encerra maiores cuidados na sua formulação. O modelo relativo, que segue valores padronizados para otimização de cálculo, apresentou os piores resultados, sem que isso tire a validade deste modelo. O erro da restituição ficou, em geral, em torno de um "pixel", resultado plenamente satisfatório para o modelo utilizado. É importante destacar que o modelo apresentou uma relação base-altura próxima a 0,6.

Os três modelos já estão bem consolidados e deverão entrar numa fase de avaliação de relação precisão x Custo computacional. Todos os modelos apresentaram um desempenho plenamente satisfatório. Já era esperado que os modelos de restituição absoluta, em particular o algébrico, apresentassem melhores resultados que o modelo de restituição relativa, principalmente pelo conceito matemático envolvido em cada um destes modelos.

Em seqüência, procurar-se-á otimizar a implementação computacional destes modelos, e avaliá-los em relação a novos pares estereoscópicos.

## BIBLIOGRAFIA

**COLLINS, S.H.** Stereoscopic Depth Perception. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 47(1), Jan. 1981.

**MACHADO E SILVA, A.J.F.** Reamostragem Epipolar como Base para Correlação Automática de Imagens Oblíquas HRV-SPOT. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 6., Manaus, Brasil, jun. 1990.

**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 Perception 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.