

## **Análise comparativa entre modelos rigorosos e empíricos na orientação de imagens orbitais**

José Marcato Junior<sup>1</sup>  
Júlio Kiyoshi Hasegawa<sup>1</sup>  
Antonio Maria Garcia Tommaselli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Ciências e Tecnologia FCT – UNESP/SP  
Caixa Postal 468 - 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil  
jmarcato@gmail.com  
{hasegawa, tomaseli}@fct.unesp.br

**Abstract.** Nowadays, orbital images can be considered the main source of spatial information providing support in several applications such as urban planning, topographic mapping, deforestation management, and so on. However, the quality of the orbital images georeferenced using ephemerides and attitude data is not sufficient in applications that require high metric accuracy. As a consequence, it is necessary to correct these images using ground control points through rigorous or empirical mathematical models. The aim of this work is to compare the results obtained with rigorous and empirical models in the orientation process, which is accomplished before the image geometric correction step. The collinearity model adapted to the pushbroom geometry was used as a rigorous model. The empirical models considered were: the Rational function model, the affine transformation, the polynomial model and the DLT (Direct Linear Transformation) model. The results showed that the rigorous model provided better results when compared to those obtained with the empirical models in the orientation process of ALOS/PRISM images.

**Palavras-chave:** Photogrammetry, geometric correction, ALOS/PRISM images, Fotogrametria, correção geométrica, imagens ALOS/PRISM.

### **1. Introdução**

Os satélites de observação da Terra, em geral, são equipados com Sistemas de Controle de Órbita e Atitude (SCOA) compostos por receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite), sensores de estrelas, dentre outros. No entanto, devido aos erros provenientes dos sensores que compõem os SCOA, nem sempre as imagens, corrigidas a partir das informações de efemérides e atitude do satélite, são adequadas para aplicações que requerem alta acurácia métrica.

Como alternativa a este problema, em geral, são utilizados pontos de apoio para realizar a orientação indireta dessas imagens, que permitirá, em uma etapa subsequente, aplicar o processo de correção geométrica. Para tanto, é necessário estabelecer modelos matemáticos que relacionem o espaço imagem com o espaço objeto (sistema de referência terrestre). Dentro deste contexto surgem os modelos rigorosos e os modelos empíricos (não físicos).

Os modelos rigorosos procuram descrever fisicamente a geometria de aquisição da cena. Neste caso, são consideradas as informações referentes tanto ao modelo do sensor (distância focal, tamanho do sensor, tamanho do pixel, distorção das lentes, dentre outros) quanto ao modelo da plataforma (efemérides e atitude) que descreve a trajetória e a orientação do sensor no intervalo de coleta da cena. Para tanto, em Fotogrametria, geralmente, utiliza-se o modelo de colinearidade com pontos adaptado para a geometria do sensor de varredura linear (RADHADEVI et. al., 1998; TOUTIN, 2004; POLI, 2005; KIM e DOWMAN, 2006). Existem, ainda, modelos rigorosos que utilizam feições lineares para relacionar os espaços objeto e imagem, como o modelo de coplanaridade com retas e o modelo dos planos equivalentes (MEDEIROS e TOMMASELLI, 2009; MARCATO JUNIOR et al., 2010; TOMMASELLI e MEDEIROS, 2010).

Em contraposição, os modelos empíricos relacionam ambos os espaços através de parâmetros sem significado físico direto. Os modelos empíricos, portanto, se apresentam como uma alternativa quando não são conhecidas as informações referentes aos parâmetros de aquisição do sistema (TOUTIN, 2004). No entanto, mesmo em casos onde se conhece a priori os valores desses parâmetros, os modelos rigorosos são evitados em favor dos modelos empíricos devido, provavelmente à facilidade de implementação (CRUZ et al., 2005; DAL POZ e SCALCO, 2006; DEBIASI et al., 2007; RODRIGUES et al., 2009). Como exemplo de modelos empíricos, pode-se mencionar o modelo das funções racionais, a transformação linear direta (DLT), a transformação afim, os modelos polinomiais, dentre outros.

Dentro deste contexto, o objetivo principal deste trabalho consiste em apresentar uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelo modelo rigoroso de colinearidade e pelos modelos empíricos no processo de orientação indireta de imagens ALOS/PRISM.

## 2. Modelos matemáticos para a orientação de imagens orbitais

### 2.1 Modelo rigoroso baseado na condição de colinearidade

O modelo de colinearidade é um dos modelos mais utilizados em Fotogrametria para relacionar o espaço imagem e o espaço objeto. O princípio básico deste modelo estabelece que um ponto no espaço objeto, o seu correspondente no espaço imagem e o Centro Perspectivo (CP) são colineares no instante da tomada da imagem (MIKHAIL et al., 2001). Na Equação 1 apresenta-se o modelo de colinearidade adaptado para a geometria do sensor de varredura linear (KIM e DOWMAN, 2006).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda R^T \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

em que:

- (x,y): coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico (imagem);
- f: distância focal;
- λ: fator de escala;
- (X<sub>s</sub>, Y<sub>s</sub>, Z<sub>s</sub>): coordenadas da posição do satélite, referenciadas ao sistema de terreno (espaço objeto), no instante da tomada da linha que contém o ponto com coordenadas (X, Y, Z);
- R: matriz de rotação definida do sistema de referência do espaço imagem para o sistema de referência do espaço objeto, calculada em função dos ângulos de atitude κ<sub>s</sub>, φ<sub>s</sub> e ω<sub>s</sub> (descritos na Equação 4).

Considerando a direção do movimento da plataforma ao longo do eixo x, o valor desta coordenada é igualado a zero, para representar a geometria do sensor de varredura linear. Desenvolvendo a Equação 1 de forma a eliminar o fator de escala (λ), tem-se que:

$$x = 0 = -f \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_s) + r_{12} \cdot (Y - Y_s) + r_{13} \cdot (Z - Z_s)}{r_{31} \cdot (X - X_s) + r_{32} \cdot (Y - Y_s) + r_{33} \cdot (Z - Z_s)} \quad (2)$$

$$y = -f \cdot \frac{r_{21} \cdot (X - X_s) + r_{22} \cdot (Y - Y_s) + r_{23} \cdot (Z - Z_s)}{r_{31} \cdot (X - X_s) + r_{32} \cdot (Y - Y_s) + r_{33} \cdot (Z - Z_s)} \quad (3)$$

Neste modelo, os parâmetros da plataforma variam continuamente e podem ser descritos por um grupo de polinômios. A seguir, apresentam-se os polinômios de segunda ordem (18

parâmetros), que descrevem a trajetória do satélite no intervalo de aquisição da cena (ORUN e NATARAJAN, 1994).

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\
 Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\
 Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\
 \kappa_s &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \\
 \varphi_s &= \varphi_0 + a_5 t + b_5 t^2 \\
 \omega_s &= \omega_0 + a_6 t + b_6 t^2
 \end{aligned} \tag{4}$$

## 2.2 Modelos empíricos

A seguir, apresenta-se a descrição dos modelos matemáticos empíricos utilizados neste trabalho.

### Modelos polinomiais

De acordo com Toutin (2004), os modelos polinomiais 3D são dados por:

$$c_n = \sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k \tag{5}$$

$$l_n = \sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k \tag{6}$$

em que:

- $c_n, l_n$ : coordenadas coluna e linha normalizadas de um determinado ponto;
- $X_n, Y_n, Z_n$ : coordenadas 3D normalizadas do mesmo ponto no espaço objeto;
- $a_{ijk}$  e  $b_{ijk}$  são os coeficientes do modelo.

### Modelo das funções racionais

O modelo das funções racionais relaciona as coordenadas do espaço objeto (X, Y, Z) com as coordenadas no sistema imagem (c,l) através da razão entre duas funções polinomiais, como apresentado nas Equações 7 e 8 (GRODECKI, 2001; TOUTIN, 2004).

$$c_n = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{q_1(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \tag{7}$$

$$l_n = \frac{p_2(X_n, Y_n, Z_n)}{q_2(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} c_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} d_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \tag{8}$$

Existem duas formas para estimar os coeficientes das funções racionais: (1) estimação dos coeficientes utilizando pontos de apoio (*terrain dependent*); (2) estimação dos coeficientes a partir de uma grade 3D de pontos gerada com o uso do modelo físico da câmara considerando um número de planos de elevação constante, como apresentado por Grodecki (2001). Os coeficientes distribuídos pelas empresas ou agências são gerados através dessa segunda alternativa, com o uso, portanto, de modelos rigorosos, como aquele baseado na condição de colinearidade. É importante mencionar que neste trabalho utilizou-se o modelo das funções racionais, determinado indiretamente com base em pontos de apoio (*terrain dependent*).

### Transformação afim

A transformação afim 3D é derivada do modelo das funções polinomiais, considerando apenas os elementos de 1ª ordem (TOUTIN, 2004). Portanto:

$$c_n = a_1 + a_2 Y_n + a_3 X_n + a_4 Z_n \quad (9)$$

$$l_n = b_1 + b_2 Y_n + b_3 X_n + b_4 Z_n \quad (10)$$

### Transformação Linear Direta (DLT)

A transformação linear direta é derivada da equação de colinearidade, e é dada por:

$$c_n = \frac{L_1 X_n + L_2 Y_n + L_3 Z_n + L_4}{L_9 X_n + L_{10} Y_n + L_{11} Z_n + 1} \quad (11)$$

$$l_n = \frac{L_5 X_n + L_6 Y_n + L_7 Z_n + L_8}{L_9 X_n + L_{10} Y_n + L_{11} Z_n + 1} \quad (12)$$

Reescrevendo as Equações 11 e 12 de forma a permitir algumas simplificações para que possam ser consideradas lineares e também inserindo o primeiro termo da distorção radial, obtém-se:

$$c_n = L_1 X_n + L_2 Y_n + L_3 Z_n + L_4 - c_n L_9 X_n - c_n L_{10} Y_n - c_n L_{11} Z_n - c_n r^2 L_{12} \quad (13)$$

$$l_n = L_5 X_n + L_6 Y_n + L_7 Z_n + L_8 - l_n L_9 X_n - l_n L_{10} Y_n - l_n L_{11} Z_n - l_n r^2 L_{12} \quad (14)$$

em que:  $L_1$  até  $L_{12}$  são os parâmetros da transformação linear direta e;  $r^2 = c_n^2 + l_n^2$ .

### 3. Materiais e Métodos

Para atingir o objetivo proposto neste trabalho foi utilizado um par de imagens no nível de processamento 1B1 (apenas com correção radiométrica) coletadas pelo sensor PRISM do satélite ALOS nas direções nadir e ré (*backward*). Os parâmetros físicos utilizados no modelo rigoroso de colinearidade são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Características técnicas do sensor PRISM (CHEN et al., 2004).

Distância focal	1939 mm
Número de colunas	14496 pixels
GSD (m)	2,5 m
Inclinação ré ( <i>backward</i> )	-23,8°
Altitude da órbita	691 km

Os pontos de apoio foram levantados em campo com o GNSS de dupla frequência Hipper GGD. O processamento dos dados GNSS foi realizado no software TGO (*Trimble Geomatics Office*) utilizando a técnica de posicionamento relativo estático considerando a estação PPTE da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo).

Os modelos matemáticos descritos na seção 2 foram implementados em linguagem C++. O modelo rigoroso de colinearidade foi implementado no programa TMS (Triangulação MultiSensor) (Marcato Junior et. al., 2010) que utiliza o método combinado de ajustamento. Para os modelos empíricos utilizou-se o método paramétrico de ajustamento na estimação dos parâmetros (coeficientes das equações) (GEMAEL, 1994). Na Tabela 2, apresenta-se o número de parâmetros considerados por modelo matemático e para cada imagem.

Tabela 2: Número de parâmetros por modelo matemático.

Modelos matemáticos	Parâmetros por imagem
Modelo de Colinearidade (rigoroso)	14
Modelo polinomial (2ª ordem)	20
Modelo das funções racionais (1ª ordem)	16
Transformação afim	8
Transformação Linear Direta	12

Ao observar a Tabela 2, nota-se que no modelo de colinearidade foram considerados 14 parâmetros:  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ,  $\kappa_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $\omega_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  e  $b_4$ , como apresentado na Equação 13. Embora exista alta correlação de  $X_0$ ,  $Y_0$ , respectivamente, com os ângulos  $\varphi_0$ ,  $\omega_0$ , (ORUN e NATARAJAN, 1994), estes ângulos foram considerados como parâmetros para absorver a inclinação do sensor, que para o caso do sensor a ré (*backward*) é de aproximadamente  $-23,8^\circ$ , como apresentado na Tabela 1.

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\
 Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\
 Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\
 \kappa_s &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \\
 \varphi_s &= \varphi_0 \\
 \omega_s &= \omega_0
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

#### 4. Experimentos e Resultados

Foram realizados experimentos com os modelos descritos na seção 2, variando a quantidade de pontos de apoio (18 e 11 pontos de apoio), como apresentado na Figura 1 e na Tabela 3.

Para analisar a qualidade do processo de orientação foram utilizados seis pontos de verificação bem distribuídos no par de imagens (ver Figura 1). As coordenadas dos pontos de verificação foram estimadas posteriormente ao processo de orientação, aplicando o processo de intersecção fotogramétrica (MIKHAIL et al., 2001). Na Figura 2, apresenta-se o EMQ (Erro Médio Quadrático) nos pontos de verificação para cada experimento.

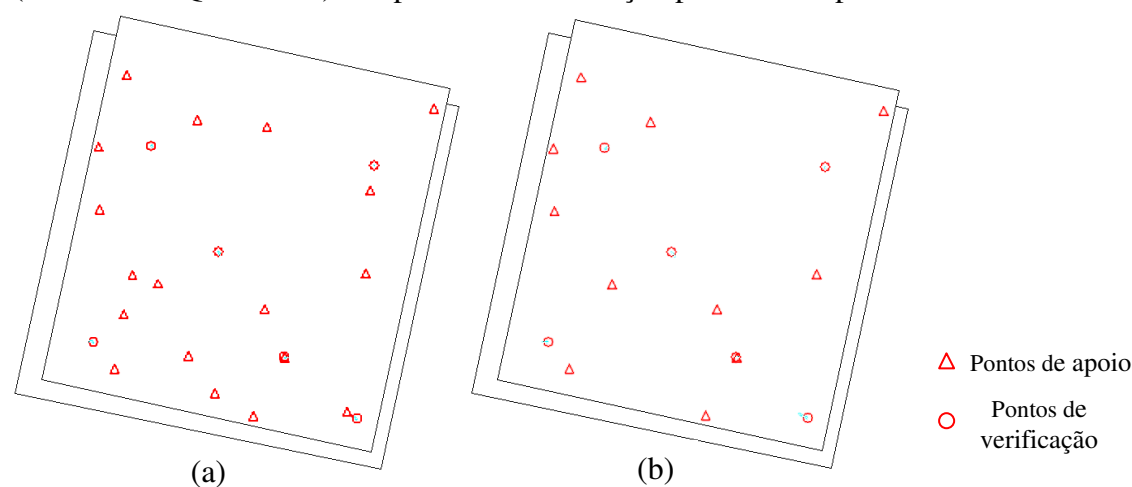


Figura 1: Distribuição dos pontos de apoio e verificação: (a) 18 pontos de apoio; (b) 11 pontos de apoio.

Tabela 3: Descrição dos experimentos.

Experimentos	Modelo matemático	Pontos de apoio
A	Modelo de Colinearidade – MC	18
B	Modelo Polinomial (2ª ordem) – MP	18
C	Modelo das Funções Racionais (1ª ordem) – MFR	18
D	Transformação afim – TA	18
E	Transformação Linear Direta – DLT	18
F	Modelo de Colinearidade – MC	11
G	Modelo Polinomial (2ª ordem) – MP	11
H	Modelo das Funções Racionais (1ª ordem) – MRF	11
I	Transformação Afim – TA	11
J	Transformação Linear Direta – DLT	11

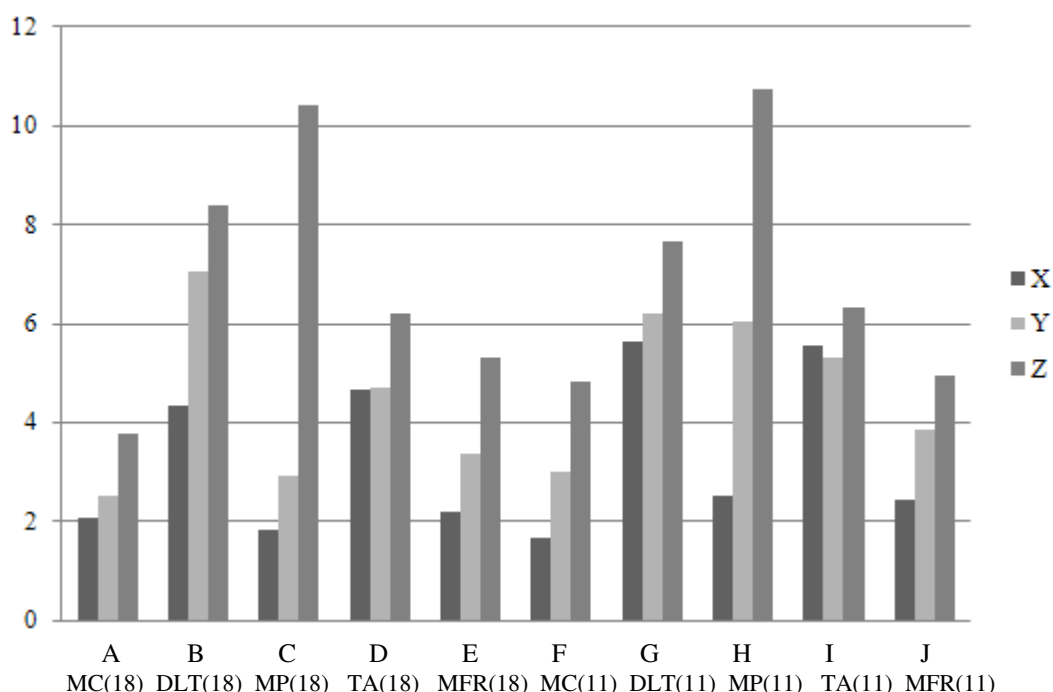


Figura 2: EMQ(m) nos pontos de verificação.

Ao analisar a Figura 2 nota-se que:

- O MC (Modelo rigoroso de Colinearidade) apresentou melhores resultados com relação aos modelos empíricos, exceto na componente X quando comparado ao MP (Modelo Polinomial) para os experimentos com 18 pontos de apoio. No entanto, o EMQ em Z para o MP foi o que apresentou o maior valor, superior a 10 metros (m);
- O MFR (Modelo das Funções Racionais) apresentou o melhor resultado na estimação da componente altimétrica (Z) quando comparado aos demais modelos empíricos;
- Para o MC a redução na quantidade de pontos de controle implicou em um aumento no EMQ na componente Z, de 3,7 m para 4,8 m. No entanto, mesmo considerando apenas 11 pontos de controle, o MC foi o modelo que apresentou melhores resultados na estimação da componente altimétrica (Z).

## 5. Considerações finais

Embora sejam uma alternativa viável, quando não se conhece o modelo do sensor e seus parâmetros, os modelos empíricos têm sido utilizados, mesmo em casos em que essas informações são conhecidas. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho consistiu em apresentar uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelo modelo rigoroso de colinearidade e pelos modelos empíricos no processo de orientação indireta de imagens orbitais.

Para tanto, foram realizados experimentos utilizando duas cenas coletadas pelo sensor PRISM (ALOS). Ao analisar os resultados obtidos nos experimentos nota-se que, para este caso estudado, o modelo rigoroso de colinearidade apresentou melhores resultados quando comparado aos modelos empíricos.

Entre os modelos empíricos, o modelo das funções racionais foi o que apresentou melhores resultados, principalmente na estimação da componente altimétrica (Z). No entanto, Jacobsen (2007) realizou experimentos com imagens IKONOS utilizando o modelo das funções racionais, determinado indiretamente com base em pontos de apoio (como apresentado neste trabalho) e verificou que este modelo não pode ser controlado e deve ser evitado. Através da análise dos resultados, Jacobsen (2007) notou que, em pontos de verificação localizados fora da variação de altitude dos pontos de apoio as discrepâncias podem atingir 500 metros.

Nos experimentos realizados, este problema não foi observado, devido à pequena variação de relevo e porque todos os pontos de verificação estavam dentro do intervalo de variação dos pontos de apoio e, portanto, estas conclusões não podem ser generalizadas. Em trabalhos futuros, serão realizados mais experimentos com outras cenas ALOS/PRISM e outros satélites (CBERS/HRC) para verificar o comportamento destes modelos.

Outro tópico a ser investigado em trabalhos futuros é o impacto dos dados de orientação interior na acurácia dos resultados finais, pois os valores utilizados são aqueles nominais, fornecidos pela JAXA, podendo mudar devidos a vários fatores, como as variações térmicas.

## Agradecimentos

Os autores desejam externar os sinceros agradecimentos aos alunos Ana Claudia de Lima Toledo, Aziz Alfredo da Costa Pereira, Giovana Araujo Alberti, Larissa de Souza Correia e Vanessa Jordão Marcato por disponibilizarem as informações referentes ao levantamento de campo, à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio a essa pesquisa através de uma bolsa de mestrado (Processo: 2009/03917-7) e ao CNPq pelo financiamento ao projeto Fototriangulação Multisensor com controle Multifeições (Processo: 307243/2007-9).

## Referências

Chen, T.; Shibasaki, R.; Tsuno, K; Morita, K. Triplet-Matching for Dem Generation with Prism, Alos . In: ISPRS Congress Istanbul 2004, 2004, Istanbul. **Proceedings of Commission III**. Istanbul: ISPRS, 2004. Artigos, On-line. Disponível em: < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/comm3.aspx>>. Acesso em: 11 nov. 2010.

Cruz, C. B. M., Barros, R. S.; Reis, R. B. Orto-retificação de imagens CBERS2 usando DEM do SRTM – Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 899-906. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: < [http://www.obt.inpe.br/cbers/cbers\\_XIISBSR/478\\_Ortorretificacao\\_CBERS2.pdf](http://www.obt.inpe.br/cbers/cbers_XIISBSR/478_Ortorretificacao_CBERS2.pdf) >. Acesso em: 10 nov. 2010.

Dal Poz, A. P., Scalco, J. C. Orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo. **Boletim em Ciências Geodésicas**, v. 12, n. 2, p. 295 – 313, 2006.

Debiasi, P. D.; Souza, S. F., Mitishita, E. A. Ortorretificação de imagens CBERS através da transformação DLT. In: XXIII Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2007. On-line. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/13763>>. Acesso em: 09 nov. 2010.

Gemael, C. **Ajustamento de observações: aplicações à Geodésia**. Curitiba: UFPR, 1994. 319p.

Grodecki, J. IKONOS Stereo Feature Extraction – RPC Approach. In: ASPRS annual conference. **ASPRS 2001 Proceedings**, St. Louis, 2001. On-line. Disponível em:< [http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/technical-papers/2001/C\\_GrodeckiJacek\\_2001.pdf](http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/technical-papers/2001/C_GrodeckiJacek_2001.pdf)>. Acesso em 10 abr. 2010.

Jacobsen, K. Orientation of high resolution optical space images. In: ASPRS 2007 Annual Conference, **ASPRS 2007 Proceedings**, Tampa, Florida, 2007. On-line. Disponível em: < <http://www.asprs.org/publications/proceedings/tampa2007/0029.pdf>>. Acesso em 04 fev. 2010.

Kim, T.; Dowman, I. Comparison of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude model. **The Photogrammetric Record**, v.21, n. 114, p. 110-123, 2006.

Marcato Junior, J.; Tommaselli, A. M. G.; Medeiros, N. G.; Oliveira, R. A. BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT OF CBERS 2B HRC IMAGES USING CONTROL LINES In: Canadian Geomatics Conference 2010 and the International Symposium of Photogrammetry and Remote Sensing Commission I, 2010, Calgary. **Proceedings of...** ISPRS, 2010. CD-ROM.

Medeiros, N. G.; Tommaselli, A. M. G. Orientação de imagens CBERS: avaliação de técnicas que usam linhas retas combinadas com pontos. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.15, p.33 - 57, 2009.

Mikhail, E. M.; Bethel, J. S.; Mcglone, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. New York : John Wiley & Sons, 2001. 479p.

Orun, A. B.; Natarajan, K. A. Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, p. 1431-1437, 1994.

Poli, D. Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors. 2005. 204 p. (ETH Zurich -Nr. 15894). Diss. (Technische Wissenschaften) – Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich. 2005.

Radhadevi, P.V.; Ramachandran, R.; Murali Mohan, A.S.R.K.V. Restitution of IRS-1C PAN data using an orbit attitude model and minimum control. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p. 262-271, 1998.

Rodrigues, T. L.; Antunes, M. A. H.; Fosse, J. M. Avaliação da ortorretificação da imagem do sensor HRC do CBERS 2B utilizando modelo de funções racionais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 2139-2146. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: < <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.22.35/doc/2139-2146.pdf> >. Acesso em: 10 nov. 2010.

Tommaselli, A. M. G.; Medeiros, N. G. Determination of the Indirect Orientation of Orbital PUSHBROOM Images Using Control Straight Lines. **Photogrammetric Record**, v.25, p.159 - 179, 2010.

Toutin, T. Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, p. 1893–1924, 2004.