

ORIENTAÇÃO DE IMAGENS CBERS-2B USANDO O MODELO RIGOROSO DE COLINEARIDADE COM DADOS ORBITAIS

Orientation of CBERS-2B images using the Collinearity rigorous model with orbital data

JOSÉ MARCATO JUNIOR¹
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI^{1,2}
RAQUEL ALVES DE OLIVEIRA¹
NILCILENE DAS GRAÇAS MEDEIROS³
VANESSA JORDÃO MARCATO¹

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

²Faculdade de Ciências e Tecnologia – Departamento de Cartografia
UNESP – Universidade Estadual Paulista

Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP.

³Departamento de Engenharia Civil

UFV – Universidade Federal de Viçosa

Av. PH. Rolfs, s/n, 36570-000 Viçosa, MG

jrmarcato@gmail.com, tomaseli@fct.unesp.br, raquel88@gmail.com,
nilcilene.medeiros@ufv.br, vanessamarcato@yahoo.com.br

RESUMO

Atualmente, o imageamento orbital é uma das principais técnicas de coleta de informações geoespaciais. Embora os sistemas orbitais sejam equipados com sensores de orientação direta (GNSS, giroscópios, sensores de estrelas, dentre outros), nem sempre as imagens corrigidas a partir dos dados (efemérides e atitude) provenientes destes sensores apresentam a acurácia requerida para certas aplicações. Uma das alternativas para solucionar este problema é a orientação dessas imagens considerando as informações de órbita (efemérides e atitude) com o uso adicional de pontos de apoio. O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar experimentalmente o modelo de colinearidade com dados orbitais no processo de orientação de imagens CBERS-2B. Este modelo foi implementado no programa TMS (Triangulação MultiSensor), seguindo a abordagem de triangulação

multissensor. Foram realizados experimentos com imagens do nível 1 (com apenas correção radiométrica) coletadas pelos sensores CCD e HRC. Nos casos estudados verificou-se que a utilização das informações de órbita possibilita a orientação de imagens CBERS-2B com um número reduzido de pontos de apoio.

Palavras-chave: Modelo Físico; Sensor de Varredura Linear; Órbita; Efemérides; Atitude.

ABSTRACT

Nowadays, orbital imaging is one of the main techniques for collecting geospatial information. Orbital imaging systems are equipped with direct orientation sensors. However, the images corrected using the orientation data (ephemeris and attitude) provided by these sensors are not always suitable for applications that require high metric accuracy. An alternative to this problem is the orientation of these images using orbital information (ephemeris and attitude) with ground control points. The aim of this work is to experimentally assess the collinearity model with orbital data in the CBERS-2B images orientation process. The model was implemented in the in-house developed software TMS (Triangulation with Multiple Sensors), considering the multissensor triangulation approach. Experiments with CCD and HRC level 1 images (with only radiometric correction) were accomplished. The results showed the importance of using orbital data in the orientation process, providing solution with few ground control points.

Keywords: Physical model; Pushbroom Sensor; Orbit; Ephemeris; Attitude.

1. INTRODUÇÃO

Desde o surgimento dos programas espaciais civis para fins de sensoriamento remoto houve um grande desenvolvimento de novas tecnologias, que permitiram a criação de múltiplos sensores de imageamento com altas resoluções espaciais, radiométricas, espectrais e temporais. Atualmente, embora os satélites sejam equipados com sensores de orientação direta (GNSS, giroscópios, sensores de estrelas, dentre outros), nem sempre as imagens, corrigidas a partir das informações (efemérides e atitude) provenientes destes sensores, apresentam a acurácia requerida por certas aplicações.

O Brasil e a China, em 1988, implantaram o programa CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite* – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), que se diferencia dos demais sistemas por prover as imagens gratuitamente aos usuários. Os satélites CBERS-1 e 2 possuíam os seguintes sistemas imageadores: CCD (Câmara imageadora de alta resolução, com um elemento de resolução no terreno (GSD – *Ground Sample Distance*) de 20 metros e resolução temporal de 26 dias); IRMSS (Imageador por Varredura de Média Resolução com GSD de 80 metros e resolução temporal de 26 dias) e; WFI (Câmara Imageadora de Amplo Campo de Visada com um GSD de 260 metros e resolução temporal de 5 dias) (INPE, 2010).

O satélite CBERS-1, lançado em outubro de 1999, foi desativado em agosto de 2003, enquanto que o CBERS-2, lançado em outubro de 2003, se manteve em operação até janeiro de 2009.

O satélite CBERS-2B, lançado em setembro de 2007 e desativado em abril de 2010, apresentava características bastante parecidas às dos satélites CBERS-1 e 2, porém o IRMSS foi substituído pela HRC - Câmara Pancromática de Alta Resolução, que apresentava um GSD de 2,5 metros e resolução temporal de 130 dias (MACHADO E SILVA, 2007). Outro aspecto que o diferenciava dos CBERS-1 e 2, foi a instalação de um receptor GPS de simples frequência L1 (KUGA et al., 2009) e de um sensor de estrelas, com o objetivo de proporcionar as efemérides e a atitude do sensor com maiores acurácias, quando comparadas às dos sistemas dos satélites CBERS-1 e 2 (INPE, 2010). No entanto, a falta sistemática de dados de atitude a ser fornecida pelo sensor de estrelas, em parte do território nacional, afetou a qualidade do georreferenciamento das imagens CBERS-2B. A ausência desses dados pode estar relacionada com a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (ARCANJO E FERREIRA, 2009).

As imagens CBERS, disponibilizadas no *site* do INPE, receberam correção geométrica e radiométrica (nível 2 de processamento). Neste caso a correção geométrica é aplicada a partir dos dados orbitais (efemérides e atitude), das informações sobre a montagem do sensor no satélite, da geometria de visada do sensor e de um modelo representativo da superfície terrestre (MACHADO E SILVA, 2007). Como consequência da qualidade dos dados de órbita (efemérides – proporcionadas pelo GPS de simples frequência; e principalmente atitude – disponibilizada pelo Sistema de Controle de Órbita e Atitude) do CBERS-2B, a qualidade do georreferenciamento das imagens é baixa (SILVA et al., 2009), com erros da ordem de grandeza de mais de um quilômetro, nas cenas analisadas. Outro aspecto apontado por Silva et al. (2009) que afeta significativamente a qualidade da correção geométrica das imagens CBERS-2B HRC é a geometria interna do sensor HRC. O sensor HRC é composto por três matrizes de detectores, mas a matriz central não está alinhada com as matrizes laterais (ver maiores detalhes na Seção 4.2).

A grande maioria dos instrumentos imageadores em órbita são sensores de varredura eletrônica (*pushbroom*), como é o caso também das câmaras CCD e HRC do CBERS-2B. As imagens coletadas por esses sensores podem ser orientadas indiretamente com pontos de controle, sem considerar as informações de órbita, usando o MCP – Modelo de Colinearidade com Pontos, adaptado para a geometria *pushbroom* (MEDEIROS e TOMMASELLI, 2006; KIM e DOWMAN, 2006; MEDEIROS e TOMMASELLI, 2009). Outra possibilidade é orientar as imagens considerando as informações de órbita, como apresentado por: Radhadevi et al. (1998) para o sensor IRS-1C/PAN; Kim e Dowman (2006) para o sensor KOMPSAT-1/EOC; Kocaman e Gruen (2008) para o sensor PRISM/ALOS e;

Weser et al. (2008) para os sensores HRS/SPOT 5, PRISM/ALOS, PAN/Quickbird.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a aplicação do modelo MCPO (Modelo de Colinearidade com Pontos considerando dados de Órbita) na orientação de imagens CBERS-2B do nível 1 (com apenas correção radiométrica) usando pontos como controle de campo. A avaliação dos resultados obtidos com o MCPO será realizada por meio da comparação com o MCP. Assim, é possível avaliar o efeito da inclusão das informações de órbita no processo de orientação de imagens coletadas por sensores *pushbroom* do satélite CBERS-2B.

2. MODELO RIGOROSO DE COLINEARIDADE

O modelo de colinearidade é o modelo matemático mais utilizado em Fotogrametria e relaciona o espaço imagem e o espaço objeto com o uso de entidades do tipo ponto. 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). O modelo de colinearidade, mesmo sendo desenvolvido para imagens de quadro (*frame*), pode ser utilizado em qualquer modelo geométrico de imageamento, desde que adaptado. No MCP - Modelo de Colinearidade com Pontos adaptado para o sensor *pushbroom* - são incorporados polinômios para modelar a geometria de deslocamento do sensor. A seguir, por meio da Equação (1), apresenta-se o MCP (KIM e DOWMAN, 2006):

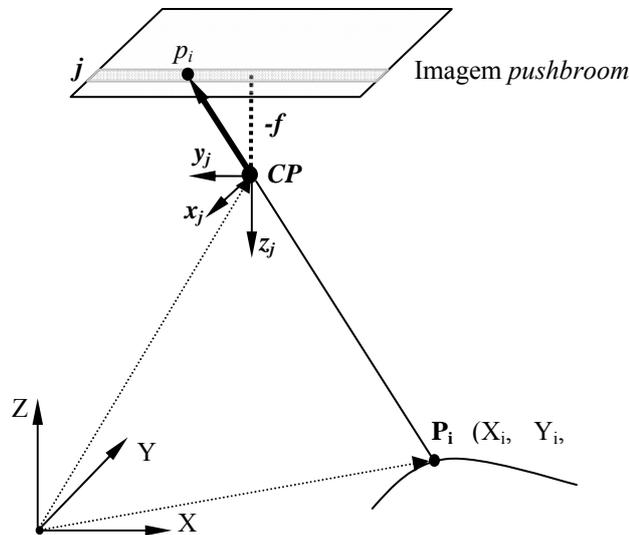
$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_s \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_i R^T \begin{bmatrix} X_i - X_s \\ Y_i - Y_s \\ Z_i - Z_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

Na Equação (1), X_s , Y_s e Z_s representam as coordenadas da posição do CP, referenciadas ao sistema de terreno (espaço objeto), no instante da tomada da linha da imagem que contém o ponto com coordenadas X_i , Y_i e Z_i ; x_s e y_s são as coordenadas de um ponto no sistema do sensor com origem no CP; f é a distância focal da câmara; λ_i é o fator de escala para cada ponto e; R^T é a matriz de rotação passiva transposta, definida pela sequência $R(\kappa).R(\phi).R(\omega)$ (MIKHAIL et al., 2001). Como a direção do movimento da plataforma é ao longo do eixo x (ver Figura 1), o valor desta coordenada é igualado a zero, para representar a geometria do sensor *pushbroom*. A Equação (1) proporciona três equações. Dividindo as duas primeiras equações pela terceira, elimina-se o fator de escala para cada ponto (λ_i), resultando nas equações de colinearidade adaptadas para o sensor *pushbroom* (Equações (2) e (3)):

$$x_s = 0 = -f \cdot \frac{m_{11} \cdot (X_i - X_S) + m_{21} \cdot (Y_i - Y_S) + m_{31} \cdot (Z_i - Z_S)}{m_{13} \cdot (X_i - X_S) + m_{23} \cdot (Y_i - Y_S) + m_{33} \cdot (Z_i - Z_S)} \quad (2)$$

$$y_s = -f \cdot \frac{m_{12} \cdot (X_i - X_S) + m_{22} \cdot (Y_i - Y_S) + m_{32} \cdot (Z_i - Z_S)}{m_{13} \cdot (X_i - X_S) + m_{23} \cdot (Y_i - Y_S) + m_{33} \cdot (Z_i - Z_S)} \quad (3)$$

Figura 1- Geometria do Sensor pushbroom.



Os parâmetros da plataforma (Parâmetros de Orientação Exterior - POE) variam continuamente e podem ser descritos por um grupo de polinômios (RADHADEVI et al. 1998; ORUN e NATARAJAN, 1994; POLI, 2005; KIM e DOWMAN, 2006). A seguir, apresentam-se os polinômios de segunda ordem (18 parâmetros), que descrevem a trajetória e a atitude do sensor no intervalo de aquisição da imagem (ORUN e NATARAJAN, 1994; KIM e DOWMAN, 2006).

$$\begin{aligned} X_S &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_S &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_S &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ \kappa &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \\ \varphi &= \varphi_0 + a_5 t + b_5 t^2 \\ \omega &= \omega_0 + a_6 t + b_6 t^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Orun e Natarajan (1994) apontam para a existência de correlação entre alguns dos POE. Uma pequena variação em ω tem o mesmo efeito que uma pequena mudança em Y_S , assim como uma pequena mudança em ϕ apresenta efeito similar a uma pequena mudança em X_S . Como os efeitos destes movimentos são similares, há uma alta correlação entre esses parâmetros, o que torna a determinação indireta instável. Por esta razão, pode ser vantajoso eliminar do conjunto de parâmetros ω ou Y_S e ϕ ou X_S . Nesse sentido, Orun e Natarajan (1994) apresentaram o seguinte modelo de plataforma, considerando apenas 12 POE:

$$\begin{aligned} X_S &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_S &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_S &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ \kappa &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \end{aligned} \quad (5)$$

O MCP foi desenvolvido pela comunidade fotogramétrica, e tem sido adotado em estações de trabalho fotogramétricas digitais (LPS – *Leica Photogrammetry Suite*, PCI *Geomatics*, dentre outras), mas apresentam uma limitação: os ângulos de rotação utilizados não são físicos (KIM e DOWMAN, 2006). Nesse caso, apenas dois sistemas de referência (sistema de referência do espaço imagem e sistema de referência do espaço objeto) são considerados. Para utilizar dados de órbita, além desses sistemas, devem ser considerados outros sistemas, tais como: o sistema de referência da plataforma e o sistema de referência da órbita. Maiores detalhes sobre os sistemas de referência envolvidos na correção geométrica de imagens orbitais podem ser vistos em (JOVANOVIC et al., 1999; MACHADO E SILVA, 2007; MARCATO JUNIOR, 2011). Apresenta-se, a seguir, o Modelo de Colinearidade com Pontos considerando dados de Órbita (MCPO) para a geometria *pushbroom*.

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_s \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} R_S^P \\ R_P^O \\ R_O^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{bmatrix} \quad (6)$$

Na Equação (6), R_S^P (Equação (7)) representa a matriz de rotação dos ângulos de *boresight* (b_x, b_y, b_z), que transforma do sistema do sensor para o sistema da plataforma; R_S^O (Equação (8)) representa a matriz de rotação do sistema de referência do sensor para o sistema de referência orbital, dada em função dos ângulos de atitude *Roll* (R), *Pitch* (P) e *Yaw* (ψ) (JOVANOVIC et al., 1999; KIM e

DOWMAN, 2006) e; R_O^T (Equação (9)) representa a matriz de rotação do sistema de referência orbital para o sistema de referência terrestre, dada em função da posição (X_s, Y_s, Z_s) e velocidade (V_x, V_y, V_z) do satélite, referenciados a um sistema terrestre (WGS-84 ou sistema geodésico cartesiano local) (JOVANOVIC et al., 1999).

$$R_S^P = \begin{bmatrix} cb_Z cb_Y & cb_Z sb_Y sb_X + sb_Z cb_X & -cb_Z sb_Y cb_X + sb_Z sb_X \\ -sb_Z cb_Y & -sb_Z sb_Y sb_X + cb_Z cb_X & sb_Z sb_Y cb_X + cb_Z sb_X \\ sb_Y & -cb_Y sb_X & cb_Y cb_X \end{bmatrix} \quad (7)$$

Na Equação (7), sb e cb representam, respectivamente, seno e cosseno dos ângulos de *boresight*.

$$R_P^O = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos P & \cos \psi \sin P \sin R + \sin \psi \cos R & -\cos \psi \sin P \cos R + \sin \psi \sin R \\ -\sin \psi \cos P & -\sin \psi \sin P \sin R + \cos \psi \cos R & \sin \psi \sin P \cos R + \cos \psi \sin R \\ \sin P & -\cos P \sin R & \cos P \cos R \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_O^T = \begin{bmatrix} \frac{V_z \cdot X_s \cdot Z_s - Z_s^2 \cdot V_x - V_x \cdot Y_s^2 + X_s \cdot Y_s \cdot V_y}{L_p^2 \cdot L_V} & \frac{V_y \cdot Z_s - Y_s \cdot V_z}{L_p \cdot L_V} & \frac{-X_s}{L_p} \\ \frac{V_x \cdot Y_s \cdot X_s - X_s^2 \cdot V_y - V_y \cdot Z_s^2 + Y_s \cdot Z_s \cdot V_z}{L_p^2 \cdot L_V} & \frac{V_z \cdot X_s - Z_s \cdot V_x}{L_p \cdot L_V} & \frac{-Y_s}{L_p} \\ \frac{V_y \cdot Z_s \cdot Y_s - Y_s^2 \cdot V_z - V_z \cdot X_s^2 + X_s \cdot Z_s \cdot V_x}{L_p^2 \cdot L_V} & \frac{V_x \cdot Y_s - X_s \cdot V_y}{L_p \cdot L_V} & \frac{-Z_s}{L_p} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Na Equação (9): $L_p = \sqrt{(X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2)}$ e $L_V = \sqrt{(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)}$.

A Equação (10) apresenta o modelo de plataforma utilizado por Kim e Dowman (2006).

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ V_x &= V_{x0} + a_4 t + b_4 t^2 \\ V_y &= V_{y0} + a_5 t + b_5 t^2 \\ V_z &= V_{z0} + a_6 t + b_6 t^2 \\ R &= R_0 + a_7 t + b_7 t^2 \\ P &= P_0 + a_8 t + b_8 t^2 \\ \psi &= \psi_0 + a_9 t + b_9 t^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Na Equação (10), os parâmetros de velocidade apresentam correlação com os parâmetros de posição, pois a velocidade é calculada por meio da diferença de

posição em um determinado intervalo de tempo. Portanto, neste modelo de plataforma são considerados, conforme a Equação (11), 14 POE: $X_0, Y_0, Z_0, R_0, P_0, \psi_0, a_1, a_2, a_3, a_9, b_1, b_2, b_3, b_9$. Os ângulos R_0 e P_0 foram considerados constantes para toda a imagem, por apresentarem pequenas variações no intervalo de coleta da imagem CBERS-2B, que poderão ser absorvidas por outros parâmetros. Já para o ângulo de atitude Yaw (ψ) considerou-se uma variação (representada pelos parâmetros a_9 e b_9), pois, no satélite CBERS-2B é aplicado o movimento em Yaw (*crab movement*) no processo de coleta das imagens.

$$\begin{aligned}
 X_S &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\
 Y_S &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\
 Z_S &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\
 R &= R_0 \\
 P &= P_0 \\
 \psi &= \psi_0 + a_9 t + b_9 t^2
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

3. MÉTODO

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar experimentalmente o modelo MCPO na orientação de imagens CBERS-2B (sensores CCD e HRC) usando pontos como controle de campo, levantados com um receptor GNSS de dupla frequência Hipper GGD. Os resultados obtidos com o MCPO serão comparados com o MCP, possibilitando quantificar o efeito da incorporação das informações de órbita no processo de orientação de imagens CBERS-2B.

Os modelos matemáticos MCPO e MCP, descritos na Seção 2, foram implementados no programa TMS (Triangulação MultiSensor) (MARCATO JUNIOR et al., 2009; MARCATO JUNIOR, 2011). Este programa utiliza o método combinado com inunções de peso (MIKHAIL e ACKERMAN, 1976) para a estimação dos parâmetros. Neste método de ajustamento os parâmetros recebem inunções relativas, com pesos inversamente proporcionais às suas variâncias. O MCPO utiliza as informações de órbita (efemérides e atitude), obtidas no arquivo de metadados que acompanham as imagens, como inunções (relativas ou absolutas). A Tabela 1 apresenta os desvios-padrão de cada parâmetro de orientação exterior, utilizados para aplicar as inunções. Para estimar a magnitude destes desvios-padrão, inicialmente, os POE foram calculados com o TMS, usando o número máximo de pontos de apoio disponível. Comparando o valor estimado dos POE com os valores ajustados a partir do arquivo de metadados (OLIVEIRA et al., 2010) calculou-se a discrepância em cada parâmetro, permitindo, assim, estimar o desvio-padrão relacionado a cada parâmetro de orientação exterior.

Tabela 1 - Desvio-padrão para cada parâmetro de orientação exterior.

Parâmetros de Orientação Exterior (POE)	Desvio-padrão
X_0, Y_0 e Z_0	100 m
roll ₀ , pitch ₀ e yaw ₀	4°
a_1, a_2 e a_3	0,3 (m/Linha)
b_1, b_2, b_3	0,000001 (m/Linha ²)

4. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Foram realizados experimentos com imagens coletadas pelos sensores CCD e HRC. A Tabela 2 apresenta as características técnicas de ambos os sensores.

Tabela 2 - Características técnicas dos sensores HRC e CCD.

		HRC	CCD
Distância focal (mm)		3398	400
Tamanho do detector (mm)		0,010	0,010
Número de linhas (pixels)		12246	5812
Ângulos de boresight	bx°	-0,00277172	-0,366005
	by°	-0,00641415	-0,187
	bz°	0,00874818	0,0

Fonte: INPE (2010); Machado e Silva (2009).

4.1 Experimento 1 - Imagem Coletada pelo Sensor CCD

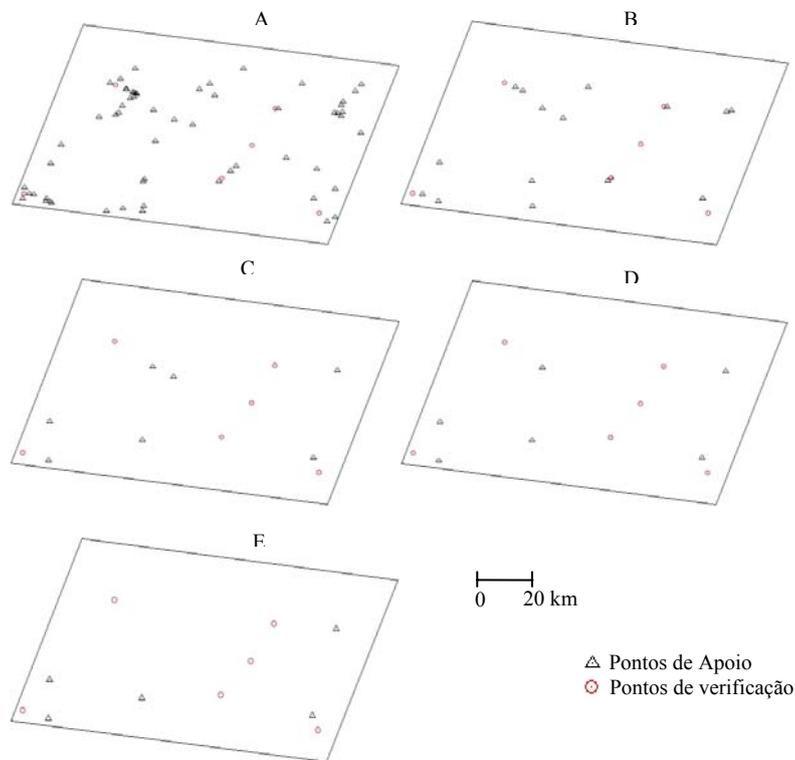
A imagem CBERS-2B CCD foi coletada no dia 28 de novembro de 2008 e corresponde à órbita 159 e ponto 125 (Latitude norte: -21°45'34,20'', Longitude oeste: -51°34'5,52'' e Latitude sul: -22°59'15,72'', Longitude leste: -50°44'12,12''). A Tabela 3 apresenta a configuração dos experimentos realizados com a imagem CBERS-2B CCD.

Tabela 3 - Configuração dos experimentos: sensor CCD.

Experimentos	Modelo matemático	Pontos de apoio (PA's)	Dados de Órbita
A1	MCPO	60	S
A2	MCP	60	N
B1	MCPO	17	S
B2	MCP	17	N
C1	MCPO	07	S
C2	MCP	07	N
D1	MCPO	06	S
D2	MCP	06	N
E1	MCPO	05	S
E2	MCP	05	N

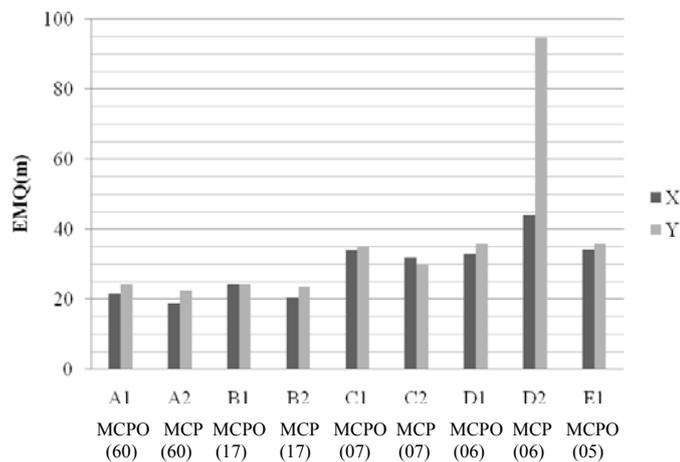
A configuração dos experimentos permite avaliar o efeito da incorporação das informações de órbita, à medida que é reduzida a quantidade de Pontos de Apoio (PAs). Para tanto, basta comparar o MCPO com o modelo MCP (sem dados orbitais). Na Figura 2 apresenta-se a configuração dos pontos de apoio e de verificação.

Figura 2 – Configuração dos pontos de apoio e de verificação (CCD).



A análise dos resultados foi realizada por meio da Raiz quadrada do Erro Médio Quadrático (REM_Q) nas coordenadas X e Y (referenciadas ao sistema de referência local) dos seis pontos de verificação (ver Figura 2). As coordenadas dos pontos de verificação foram calculadas após a orientação da imagem usando a equação de colinearidade inversa. Como foi usada apenas uma imagem, a componente altimétrica (Z) dos pontos de verificação foi considerada conhecida. A Figura 3 apresenta a REM_Q nos pontos de verificação.

Figura 3 - REMQ (m) nos pontos de verificação: Sensor CCD.



Ao analisar a Figura 3, nota-se que nos experimentos com a quantidade máxima de pontos de apoio (60 PAs), ambos os modelos proporcionaram resultados em torno de 20 m (1 GSD). Já nos experimentos com 17 PAs (Experimentos B1 e B2) nota-se que há um pequeno aumento na REMQ. No entanto, esses valores não são maiores que 25 m (1,25 GSDs).

No Experimento D (6 PAs) fica evidente a importância de incorporar as informações orbitais. Com seis PAs, o MCP (Experimento D2) apresentou a REMQ na componente Y próximo a 5 GSDs (95 m). Já com o MCPO (Experimento D1) a REMQ na componente Y ficou em torno de 35 m (1,75 GSDs).

É importante ressaltar que não é possível ter solução com o MCP ao considerar apenas cinco PAs. O MCP possui 12 POE, portanto, necessita de pelo menos seis PAs por imagem. No Experimento E1 (5 PAs), com o MCPO, obtiveram-se resultados bastante próximos quando comparado aos obtidos nos Experimentos C1 (07 PAs) e D1 (6 PAs), o que ressalta ainda mais a importância de incorporar as informações de órbita na orientação de imagens coletadas por sensores *pushbroom*.

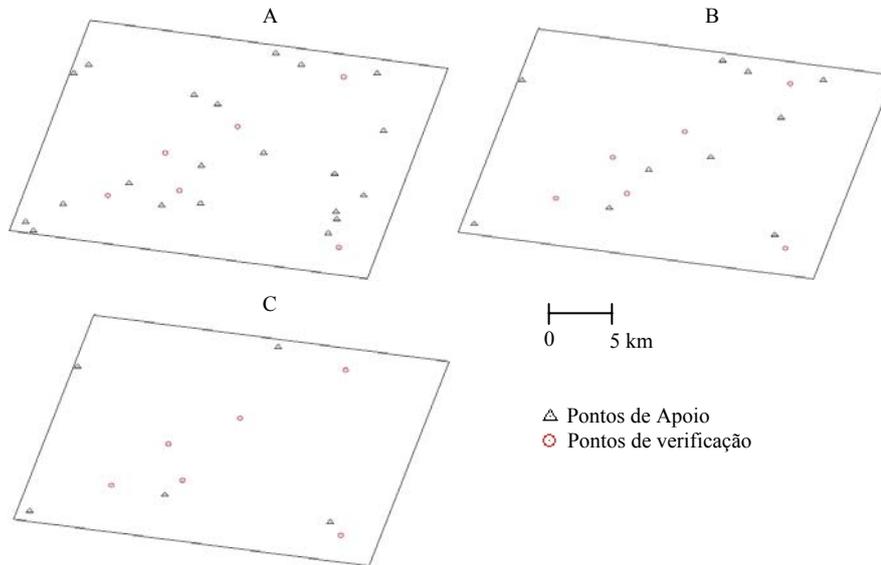
4.2 Experimento 2 - Imagem Coletada pelo Sensor HRC

A imagem CBERS-2B HRC foi coletada no dia 11 de setembro de 2008 e corresponde à órbita 159_E e ponto 125_2 (Latitude norte: -22°02'27,60'', Longitude oeste: -50°50'7,44'' e Latitude sul: -22°20'50,28'', Longitude leste: -50°37'12,72''). Na Tabela 4 é apresentada a configuração dos experimentos realizados com a imagem CBERS-2B HRC. E na Figura 4 apresenta-se a configuração dos pontos de apoio e verificação.

Tabela 4 - Configuração dos experimentos: sensor HRC.

Experimentos	Modelo matemático	Pontos de apoio(PAs)	Dados de órbita
A1	MCPO	21	S
A2	MCP	21	N
B1	MCPO	10	S
B2	MCP	10	N
C1	MCPO	05	S
C2	MCP	05	N

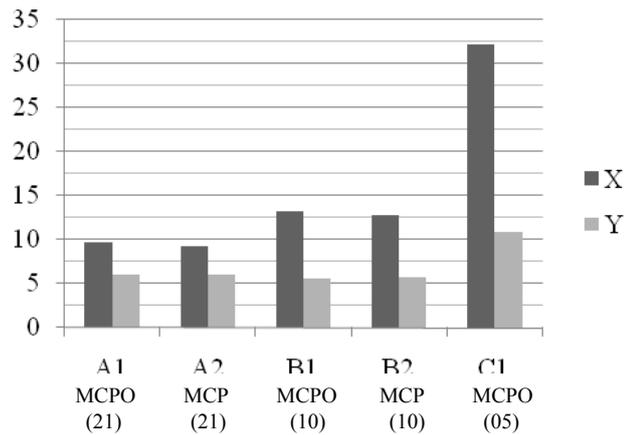
Figura 4 – Configuração dos pontos de apoio e de verificação (HRC).



Para analisar os resultados, a Figura 5 apresenta a REMQ nos pontos de verificação.

Ao analisar a Figura 5, nota-se que, à medida que é reduzida a quantidade de pontos de apoio, há um aumento na REMQ nos pontos de verificação. Verifica-se que nos Experimentos A e B não ficou evidente a importância das informações de órbita. Já o Experimento C mostra a importância de se incorporar as informações de órbita no ajustamento, pois com essa quantidade de pontos por imagem não é possível se ter uma solução com o MCP.

Figura 5 - REMQ (m) nos pontos de verificação: Sensor HRC.

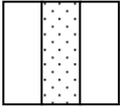
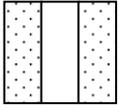
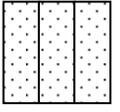


Verifica-se também que a REMQ é maior na componente X (com valores maiores que 3 GSDs – 7,5 m). No experimento C (5 PAs) a REMQ em X é de aproximadamente 32,5 m (13 GSDs). Esses resultados apontam para a presença de um erro sistemático não modelado na geometria interna do sensor HRC, que afeta a estimação da componente X.

O sensor HRC é composto por três matrizes de detectores, de forma que as matrizes 1 e 3, alinhadas entre si, distam no sentido de voo de 26 mm da matriz 2 (MACHADO E SILVA, 2009; EPHIPANIO, 2009). A área de sobreposição entre as imagens coletadas por cada matriz de detectores, embora pequena (8,5 pixels) (MACHADO e SILVA, 2009), permite a aplicação de técnicas de correspondência entre as áreas comuns e, assim, gerar a imagem com 12.246 colunas, disponibilizada aos usuários. Isto, entretanto, causa um erro na geometria interna da imagem, pois há uma diferença de aproximadamente 0,89 segundos no instante de aquisição para linhas correspondentes.

Para avaliar a qualidade do procedimento de geração da imagem completa (12.246 colunas), foram realizados processamentos com três conjuntos de dados: (1) Processamento considerando apenas os pontos de apoio observados pela matriz 2 (colunas 4082 à 8164); (2) Processamento com apenas os pontos de apoio observados pelas matrizes 1 e 3 (colunas: 0 à 4082; e 8164 à 12246). As observações referentes às matrizes 1 e 3 foram processadas em conjunto, pelo fato de que essas matrizes de detectores estão alinhadas e; (3) Processamento com os pontos de apoio observados em toda a imagem. A Tabela 5 apresenta a REMQ nos 21 pontos de apoio considerando os diferentes conjuntos de dados.

Tabela 5 - REMQ nos pontos de apoio considerando diferentes configurações de dados.

Configuração (1)		Configuração (2)		Configuração (3)	
					
REMQ (m)		REMQ (m)		REMQ(m)	
X	Y	X	Y	X	Y
1,84	2,65	3,50	4,68	9,59	3,97

Ao analisar a Tabela 5, verifica-se que ao considerar os pontos de apoio observados em toda a imagem (configuração 3) há uma tendência na componente X, como já havia sido observado nos pontos de verificação (ver Figura 5). Esta tendência não ocorre nas configurações 1 e 2, o que aponta para problemas no procedimento de fusão das imagens coletadas pelas matrizes de detectores do sensor HRC.

5. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho consistiu em avaliar experimentalmente o MCPO - Modelo rigoroso de Colinearidade com Pontos, adaptado para a geometria *pushbroom*, com dados de Órbita. O uso do MCPO possibilita avaliar a importância das informações de órbita no processo de orientação de imagens CBERS-2B. Para avaliar o MCPO foram utilizados como referência os resultados obtidos com o MCP - Modelo de Colinearidade com Pontos, adaptado para a geometria do sensor *pushbroom*.

Os modelos foram implementados no programa TMS, seguindo a abordagem de triangulação multissensor. Foram realizados experimentos com imagens coletadas pelos sensores CCD e HRC, embarcados no satélite CBERS-2B.

A partir dos resultados verificou-se a importância de utilizar as informações de órbita no processo de orientação de imagens CBERS-2B. Neste contexto, um dos aspectos a serem destacados é que o MCPO (principalmente para o sensor CCD) proporciona melhores resultados, quando comparado ao MCP, na medida em que é reduzida a quantidade de pontos de apoio. Considerando seis pontos de apoio para o sensor CCD, o MCPO apresentou uma REMQ na componente Y de aproximadamente 35 m (1,75 GSDs), ao passo que o MCP apresentou um valor próximo a 95 m (4,75 GSDs). Portanto, uma diferença de 60 m, o que equivale a 3 GSDs.

Outro aspecto relevante do MCPO é o fato de possibilitar a solução com uma quantidade reduzida de pontos de apoio por imagem (menos de seis pontos de apoio), o que não é possível com o modelo MCP, que não utiliza informações de órbita.

Em trabalhos futuros pretende-se apresentar estudos com a combinação do modelo de colinearidade com pontos e coplanaridade com retas (TOMMASELLI e MEDEIROS, 2010) no processo de orientação de imagens CBERS-2B, considerando também as informações de órbita.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de externar seus agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio concedido por meio de uma bolsa de mestrado (processo: 2009_03917-7) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio cedido a esta pesquisa (processos: 307243/2007-9 e 477738/2009-5).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCANJO, J. S.; FERREIRA, N. C. R. Comportamento do sensor de estrelas a bordo do satélite CBERS-2B na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, 2009, Natal. *Anais...* Natal, 2009. p. 1935–1941.
- EPIPHANIO, J. C. N. CBERS: estado atual e futuro. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, 2009, Natal. *Anais...* Natal, 2009. p. 2001–2008.
- INPE. CBERS – China-Brazil Earth Resources Satellite. Disponível em: <<http://www.cbers.inpe.br/?hl=en&content=orbital%e2e2b>>. Acesso em 05 Abr. 2010.
- JOVANOVIC, V. M., SMYTH, M. M., ZONG, J. *MISR Level 1 In-flight Geometric Calibration Algorithm Theoretical Basis*. JPL report, code JPL D-13399, Rev. B, 1999.
- 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.
- KOCAMAN S.; GRUEN A. Rigorous Sensor Modeling of ALOS/PRISM Imagery. In: Conference on Optical 3D Measurement Techniques, 8, 2007, Zurich, Switzerland. *Proceedings...* Zurich, 2007.
- KUGA, H. K.; SILVA, A. R.; LOPES, R. V. F. Análise da precisão das efemérides orbitais do GPS a bordo do satélite CBERS-2B. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, 2009, Natal. *Anais...* Natal, 2009. p. 2057–2064.
- MACHADO E SILVA, A. J. F. *Geometria de imagens: do projeto do satélite à geração dos produtos*. 2007. 224 f. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- MACHADO E SILVA, A. J. F. *Dados técnicos da câmara HRC*. Mensagem recebida por Antonio Maria Garcia Tommaselli em 26. Ago. 2009.
- MARCATO JUNIOR, J.; TOMMASELLI, A. M. G.; MEDEIROS, N. G.; OLIVEIRA, R. A. Fototriangulação de imagens orbitais: resultados com dados simulados para o sensor CCD CBERS. In: VI Colóquio Brasileiro de Ciências

- Geodésicas, 2009, Curitiba. *Anais...* Curitiba, 2009.
- MARCATO JUNIOR, J. *Fototriangulação em bloco de imagens orbitais com modelos rigorosos baseados em pontos e retas*. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- MEDEIROS, N. G.; TOMMASELLI, A. M. G. Um modelo para a orientação de imagens orbitais baseado em feições retas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.12, n. 2, p. 175-194, 2006.
- MEDEIROS, N. G.; TOMMASELLI, A. M. G. Orientação indireta de imagens CBERS: Avaliação de técnicas que usam linhas retas e sua combinação com pontos. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.15, n. 1, p. 33-57, 2009.
- MIKAHIL, E. M.; ACKERMAN, F. *Observations and Least Squares*. IEP, New York. 497p.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S. MCGLONE, J. C. *Introduction to Modern Photogrammetry*. Inc. New York : John Wiley & Sons, 2001, 479p.
- OLIVEIRA, R. A.; TOMMASELLI, A. M. G. ; MARCATO JUNIOR, J. . ORIENTAÇÃO DE IMAGENS CBERS-2B HRC UTILIZANDO DADOS DE ÓRBITA. In: XXII Congresso de Iniciação Científica da Unesp, 2010, Presidente Prudente. *Anais...* Presidente Prudente, 2010.
- ORUN, A. B.; NATARAJAN, K. A. Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.60, n. 12, p. 1431-1437, 1994.
- POLI D. *Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors*. Diss., Technische Wissenschaften ETH Zurich, Nr. 15894, 2005, IGP Mitteilung N. 85.
- 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.
- SILVA, W. B.; D'ALGE, J. C. L; FONSECA, L. M. G. Avaliação da qualidade geométrica de imagens da Câmera HR do CBERS 2B. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, 2009, Natal. *Anais...* Natal, 2009. p. 2193–2200.
- TOMMASELLI, A. M. G.; MEDEIROS, N. G. Determination of the Indirect Orientation of Orbital PUSHBROOM Images Using Control Straight Lines. *The Photogrammetric Record*, v.25, n. 130, p. 159-179, 2010.
- WESER, T.; ROTTENSTEINER, F.; WILLNEFF, J.; POON, J.; FRASER, C. S. Development and testing of a generic sensor model of a generic sensor model for pushbroom satellite imagery. *The Photogrammetric Record*, v.23, n. 123, p. 255-274, 2008.

(Recebido em março de 2011. Aceito em setembro de 2011.)