

UM MODELO PARA ORIENTAÇÃO DE IMAGENS ORBITAIS BASEADO EM FEIÇÕES RETAS

A Model for Orientation of Pushbroom Images using Straight Lines

NILCILENE DAS GRAÇAS MEDEIROS¹
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI²
Universidade Estadual Paulista

²Faculdade de Ciências e Tecnologia - Depto de Cartografia

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP
ngmedeiros@gmail.com; tomaseli@fct.unesp.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo para a orientação exterior de sensores *pushbroom* que permita calcular os coeficientes que descrevem a trajetória da plataforma usando feições retas como controle de campo. Considerando que a aquisição da imagem de varredura linear (*pushbroom*) não é instantânea, devem ser calculados seis Parâmetros de Orientação Exterior (POE) para cada linha adquirida. A posição e atitude do sensor são modeladas a partir de um polinômio dependente do tempo. A relação entre o espaço imagem e objeto é estabelecida a partir do modelo matemático baseado na equivalência entre o vetor normal ao plano de projeção no espaço imagem e o vetor normal ao plano de projeção no espaço objeto rotacionado. A propriedade de equivalência entre planos foi adaptada para considerar a geometria da imagem de varredura linear. Experimentos com dados simulados correspondentes a uma cena do satélite CBERS (China-Brazil Earth Resource Satellite) foram realizados para testar o modelo desenvolvido. Além disso, para fins de comparação, também foram realizados experimentos usando pontos de controle com o modelo de colinearidade adaptado ao sensor de varredura linear. Os resultados mostraram que o modelo proposto pode ser usado para calcular os POE de imagens de varredura linear.

Palavras Chaves: Orientação de imagens, Sensor *Pushbroom*, Feições Lineares.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present a model for orientation of *pushbroom* sensors that allows estimating the polynomial coefficients describing the trajectory of the platform, using linear features as ground control. Considering that *pushbroom* image acquisition is not instantaneous, six EOP (Exterior Orientation Parameters) for each scanned line must be estimated. The sensor position and attitude parameters are modeled with a time dependent polynomial. The relationship between object and image space is established through a mathematical model based on the equivalence between the vector normal to the projection plane in the image space and to the vector normal to the rotated projection plane in the object space. The equivalence property between planes was adapted to consider the *pushbroom* geometry. Some experiments with simulated data corresponding to CBERS scene (China-Brazil Earth Resource Satellite) were accomplished in order to test the developed model using straight lines. Moreover, experiments with points ground with the model based on collinearity equations adapted to the *pushbroom* geometry were also accomplished. The obtained results showed that the proposed model can be used to estimate the EOP of *pushbroom* images with suitable accuracy.

Key Words: Image Orientation, *Pushbroom*, Linear Features.

1. INTRODUÇÃO

A correção geométrica de imagens orbitais é uma prática bastante comum para diversas aplicações nas quais se pretenda utilizar essa fonte de informação, como classificação de imagens, mapas temáticos, monitoramento e expansão agrícola e ambiental, dentre outras. Um procedimento comum é a correção geométrica por meio de transformações planas entre o referencial imagem e o de terreno. Entretanto, quando se quer dispor de informações com melhor rigor geométrico, é imprescindível utilizar modelos que considerem a geometria de aquisição dessas imagens.

Tendo em vista que produtos derivados de imagens orbitais com melhor exatidão geométrica, como orto-imagens, por exemplo, possuem custos elevados, uma alternativa plausível é realizar esta correção da cena usando dados de campo. Vários modelos matemáticos são utilizados para esse propósito e, dentre eles, se destacam os modelos rigorosos e modelos paramétricos (POLI, 2004).

Muitos modelos geométricos foram propostos para a correção geométrica de imagens de varredura linear, como descritos em Gugan (1987), Kratky (1989), Orun e Natarajan (1994), Wang (1999), Fritsch et al. (2000), Habib et al. (2000), Lee et al. (2000), Armston, et al. (2002), Gonçalves e Dowman (2002), Lee e Habib (2002), Dowman et al. (2003), Poli, (2003), Tonolo e Poli (2003), Morgan et al. (2004), Poli (2004), Feng et al. (2005), dentre outros.

A idéia principal dos modelos rigorosos é tentar determinar indiretamente as propriedades físicas do processo de aquisição da cena, considerando-se assim, os parâmetros de órbita da plataforma.

Como as imagens de varredura linear não são instantâneas, cada linha da imagem é tomada a partir de uma posição e orientação diferentes, ao contrário de sensores de quadro que possuem um único grupo de parâmetros de orientação exterior (POE) para cada imagem (POLI, 2004). No caso de imagens de varredura linear, existem seis incógnitas para cada linha da imagem. Essas seis incógnitas podem ser determinadas diretamente durante a aquisição da imagem usando sensores embarcados como GPS, sistema inercial, sensor solar, câmaras estelares, etc., ou indiretamente, a partir de dados de campo (pontos ou feições de apoio).

Geralmente os metadados (informações oriundas dos sensores embarcados) não são disponibilizados pelas companhias que controlam esses sistemas ou, ao invés disso, são disponibilizados coeficientes polinomiais determinados a partir dos dados orbitais. No entanto, dependendo da aplicação das imagens, esses coeficientes não atendem à exatidão requerida.

Quando os POE não estão disponíveis ou quando sua qualidade é inferior à exatidão requerida, os processos de orientação indireta tornam-se necessários, usando dados de campo. Mesmo quando esses metadados são disponibilizados, dados de campo podem ser necessários para refiná-los.

Geralmente o tipo de informação de campo mais utilizada nos processos fotogramétricos é a entidade do tipo ponto. Pontos de controle normalmente fornecem resultados bastante satisfatórios, no entanto, é necessário que esses pontos sejam bem identificados e distribuídos na cena. Encontrar pontos de controle em imagens de média resolução (por exemplo, com elemento de resolução de 20m) é uma tarefa difícil e, em alguns casos, é improvável encontrar uma quantidade de pontos suficientes para fornecer uma exatidão aceitável.

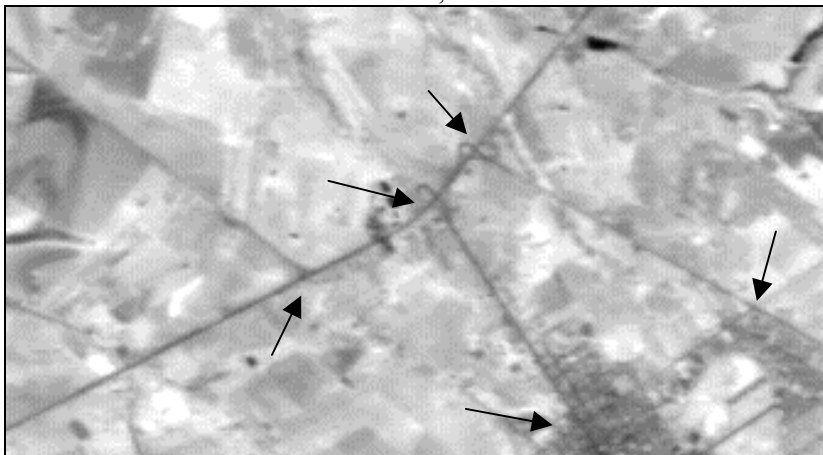
Um método alternativo para correção geométrica é o uso de feições retas como controle de campo. Exemplos desse tipo de entidade são, bordas de construções, rodovias, limites de propriedades, dentre outras feições. Tais feições são mais fáceis de serem reconhecidas e extraídas automaticamente em imagens digitais, enquanto que a detecção e a medição automática de pontos são mais complexas, sendo algumas vezes, realizadas de forma interativa, ou seja, com intervenção humana.

Alguns problemas podem ser mencionados ao usar de feições retas, como as variações de altitude ao longo de uma rodovia, que exigiria a fragmentação em pequenos segmentos lineares. Outro problema de caráter geométrico é a perda de qualidade na determinação dos vetores normais quando as retas forem muito pequenas. No caso de sensores *pushbroom*, pode-se mencionar, ainda, a rotação do vetor normal na imagem, causado pela variação de posição da câmara.

A figura 1 ilustra uma região da imagem CBERS, com resolução espacial de 20 m, contendo os dois tipos de feições. Nesta região pode-se notar a facilidade para

encontrar linhas retas, como rodovias e limites de propriedades e os problemas com a definição precisa de pontos (indicados pelas setas).

Figura 1-Detalhe de uma cena CBERS contendo linhas retas, cruzamento de rodovias, etc.



O objetivo principal deste trabalho é apresentar um modelo matemático que relacione os espaços imagem-objeto de imagens orbitais usando linhas retas, permitindo a orientação indireta da imagem.

Dentre os modelos rigorosos existentes, Tommaselli e Tozzi (1996), apresentaram o modelo de planos equivalentes, desenvolvido para resseção espacial de imagens tomadas com câmaras de quadro, e que usa feições retas como apoio de campo. Tal modelo foi modificado neste estudo para considerar a geometria de varredura linear das imagens orbitais.

Este modelo foi implementado e testado com dados simulados correspondentes às imagens orbitais CBERS.

Também foram realizados experimentos com pontos de controle usando as equações de colinearidade adaptadas a geometria de varredura linear, com a finalidade de comparar a metodologia proposta.

2. MODELO MATEMÁTICO

A orientação de imagens de varredura linear pode ser realizada usando diferentes modelos geométricos, por exemplo, modelos rigorosos, polinômios racionais, Transformação Linear Direta (DLT – Direct Linear Transformation) e projeção afim (POLI, 2004). O desenvolvimento de modelos rigorosos requer o conhecimento prévio dos parâmetros de orientação interior e algumas informações sobre a órbita e atitude do satélite.

Os modelos rigorosos são normalmente baseados nas equações de colinearidade e descrevem a geometria de aquisição do sensor de varredura linear.

As equações de colinearidade são estendidas para descrever a geometria dinâmica específica do sensor de varredura linear usando um polinômio dependente do tempo (POLI, 2004).

Gugan (1987) e Kratky (1989), usaram polinômios de segunda ordem para determinar os POE, com um grupo de 18 parâmetros a serem estimados. Porém, de acordo com Orun e Natarajan (1994), essas equações com 18 parâmetros não são um grupo prático para sensores de varredura linear, devido à alta correlação entre alguns dos parâmetros (por exemplo, ω_s com Y_s e ϕ_s com X_s) causando uma solução muito instável. Assim, há a necessidade de eliminar ou agrupar alguns dos parâmetros (ORUN e NATARAJAN, 1994) reduzindo as equações para 12 incógnitas em cada linha da imagem (Equação 1).

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ \kappa_s &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \end{aligned} \quad (1)$$

onde:

X_0, Y_0, Z_0 são as coordenadas do centro perspectivo da câmara *pushbroom* para a primeira linha da imagem;

κ_0 é o ângulo de rotação para a primeira linha da imagem;

a_i e b_i são os coeficientes polinomiais;

t é o parâmetro dependente do tempo para cada linha na imagem;

X_s, Y_s, Z_s, κ_s são os valores interpolados com a equação (1) que correspondem aos POE de cada linha.

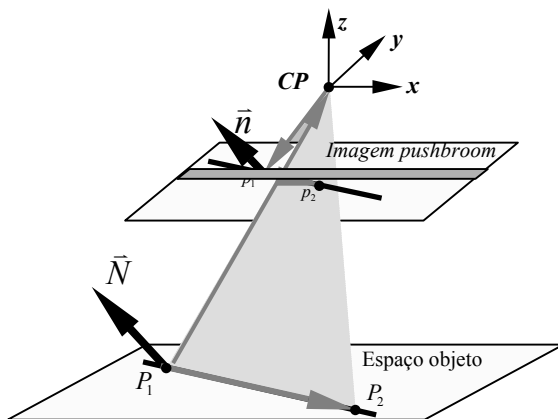
Na equação (1) os ângulos ω_s e ϕ_s foram considerados como constantes e qualquer mudança que ocorra nestes ângulos são absorvidas pelos coeficientes relativos a Y_s e X_s . Como esclarecido anteriormente, esta suposição não corresponde a um fenômeno físico, mas a impossibilidade de estimar independentemente o grupo completo de 18 parâmetros.

Além da característica dinâmica de sensores de varredura linear, outro aspecto a ser considerado no desenvolvimento do modelo proposto é o uso de feições retas como controle de campo para relacionar os espaços imagem-objeto. Para incorporar as propriedades geométricas de uma feição reta no modelo matemático foi estudado o modelo de planos equivalentes (TOMMASELLI e TOZZI, 1996) o qual foi adaptado, introduzindo-se a equação (1) para considerar a geometria de varredura linear.

O modelo de planos equivalentes é baseado na equivalência entre o vetor normal ao plano de projeção no espaço imagem e o vetor normal ao plano de projeção rotacionado no espaço objeto.

A figura 2 ilustra os planos de projeção e seus respectivos vetores normais.

Figura 2 - Planos de projeção e respectivos vetores normais.
 Fonte: Adaptado de Tommaselli e Telles (2006)



Duas linhas retas podem ser relacionadas nos espaços imagem-objeto se seus vetores normais (\vec{n} e \vec{N}) forem paralelos. Entretanto, para assumir esta condição, um fator de escala e uma matriz de rotação devem ser usados, devido à diferentes normas dos vetores, e aos espaços imagem-objeto estarem em sistemas de referência diferentes.

A relação entre os vetores normais nos espaços imagem e objeto é então descrita pela equação (2).

$$\vec{n} = \lambda R \vec{N} \quad (2)$$

onde: λ : é o fator de escala;

R : é a matriz de rotação.

O vetor \vec{n} (normal ao plano de projeção no espaço imagem) pode ser então escrito como o seguinte produto vetorial:

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} \Delta x_{12} \\ \Delta y_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c \Delta y_{12} \\ c \Delta x_{12} \\ x_2 y_1 - x_1 y_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde:

$$\Delta x_{12} = x_2 - x_1;$$

$$\Delta y_{12} = y_2 - y_1$$

c : é a distância focal.

O vetor normal \vec{N} (normal ao plano de projeção no espaço objeto) é definido pelo produto vetorial do vetor direção ($P_2 - P_1$) da linha reta e o vetor ($CP - P_1$).

$$\vec{N} = \begin{bmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} \Delta X_{01} \\ \Delta Y_{01} \\ \Delta Z_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Y_{12} \Delta Z_{01} - \Delta Y_{01} \Delta Z_{12} \\ \Delta X_{01} \Delta Z_{12} - \Delta X_{12} \Delta Z_{01} \\ \Delta X_{12} \Delta Y_{01} - \Delta X_{01} \Delta Y_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:

$$\Delta X_{12} = X_2 - X_1;$$

$$\Delta Y_{12} = Y_2 - Y_1;$$

$$\Delta Z_{12} = Z_2 - Z_1;$$

$$\Delta X_{01} = X_1 - X_S;$$

$$\Delta Y_{01} = Y_1 - Y_S;$$

$$\Delta Z_{01} = Z_1 - Z_S;$$

X_S, Y_S, Z_S são as coordenadas do Centro Perspectivo (CP) da câmara, relacionadas ao sistema de referência do espaço objeto;

X_1, Y_1, Z_1 e X_2, Y_2, Z_2 são as coordenadas 3D de dois vértices da linha no espaço objeto.

Expandindo (2) tem-se que:

$$\begin{aligned} r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3 &= -\lambda c \Delta y_{12} \\ r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3 &= \lambda c \Delta x_{12} \\ r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3 &= \lambda (x_2 y_1 - x_1 y_2) \end{aligned} \quad (5)$$

A fim de eliminar o elemento λ a primeira e terceira equações da (5) são divididas pela segunda, resultando:

$$\begin{aligned} \frac{r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3}{r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3} &= \frac{-\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}} \\ c \frac{r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3}{r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3} &= \frac{(x_2 y_1 - x_1 y_2)}{\Delta x_{12}} \end{aligned} \quad (6)$$

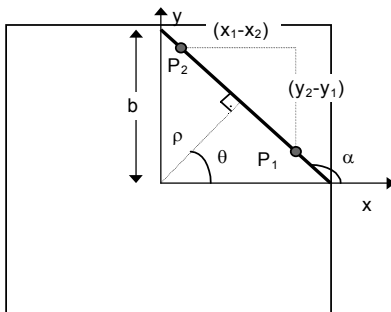
Os elementos do lado direito da expressão (6) podem ser substituídos pelos parâmetros angular a e linear b da reta. No entanto, ao usar estas expressões pode

ocorrer uma indeterminação quando as retas forem verticais ($\Delta x = 0$). Assim dois grupos de parâmetros são utilizados para evitar tal problema.

A figura 3 ilustra um exemplo de uma linha reta e sua representação normal e paramétrica.

Figura 3 - Elementos das representações normal e paramétrica da linha reta.

Fonte: Tommaselli e Tozzi (1996)



Para retas no intervalo do ângulo θ (figura 3): $45^\circ < \theta < 135^\circ$ ou $225^\circ < \theta < 315^\circ$, que compreende as retas aproximadamente horizontais, utilizam-se os seguintes parâmetros:

$$a = \frac{\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}} \quad e \quad b = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{\Delta x_{12}} \quad (7)$$

De forma análoga, no intervalo do ângulo θ de $315^\circ < \theta < 45^\circ$ ou $135^\circ < \theta < 225^\circ$, que compreende as retas aproximadamente verticais, utilizam-se os seguintes parâmetros:

$$a' = \frac{\Delta x_{12}}{\Delta y_{12}} \quad e \quad b' = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{\Delta y_{12}} \quad (8)$$

Arranjando a equação (6), chega-se ao primeiro grupo de equações do modelo de estimação dos POE:

$$\begin{aligned} (r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3) + a(r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3) &= 0 \\ c(r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3) - b(r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

O segundo grupo de equações é determinado considerando os parâmetros a' e b' , resultando em:

$$\begin{aligned} (r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3) + a'(r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3) &= 0 \\ c(r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3) - b'(r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Considerando o modelo de orientação usando pontos apresentado em (ORUN e NATARAJEN, 1994) e o modelo dos planos equivalentes, os valores de N_1 , N_2 e N_3 , componentes do vetor normal no espaço objeto, podem ser expressos pelas Equações 11.

$$\begin{aligned}
 N_1 &= (\Delta Y t a_3 + \Delta Y t^2 b_3 - \Delta Z t a_2 - \Delta Z t^2 b_2) + (\Delta Y Z_0 - \Delta Y Z_1 - \Delta Z Y_0 + \Delta Z Y_1) \\
 N_2 &= (\Delta X t a_3 + \Delta X t^2 b_3 - \Delta Z t a_1 - \Delta Z t^2 b_1) + (\Delta Z X_1 - \Delta Z X_0 - \Delta X Z_1 + \Delta X Y_0) \\
 N_3 &= (-\Delta X t a_2 - \Delta X t^2 b_2 + \Delta Y t a_1 - \Delta Y t^2 b_1) + (\Delta X Y_1 - \Delta X Y_0 - \Delta Y X_1 + \Delta Y X_0)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

As coordenadas do centro perspectivo para cada linha são estimadas pela equação (1). A matriz de rotação R é considerada com algumas restrições (ORUN e NATARAJEN, 1994): o ângulo ϕ é considerado nulo e o ângulo ω um valor fixo previamente definido (equação 12).

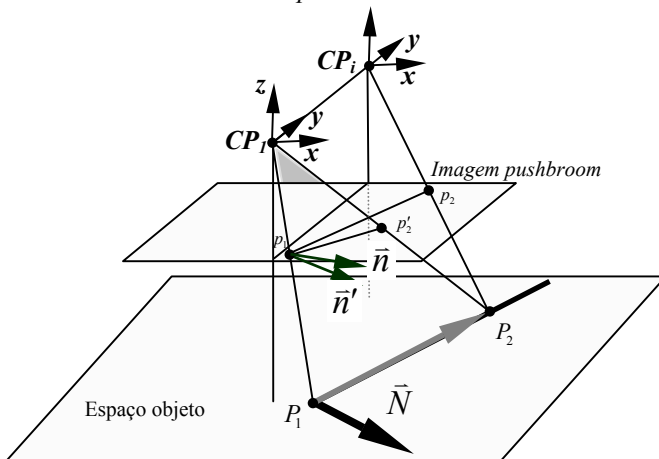
$$R = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \cos \omega \operatorname{sen} \kappa & \operatorname{sen} \omega \operatorname{sen} \kappa \\ -\operatorname{sen} \kappa & \cos \omega \cos \kappa & \operatorname{sen} \omega \cos \kappa \\ 0 & -\operatorname{sen} \omega & \cos \omega \end{bmatrix}
 \tag{12}$$

O angulo κ é modelado por um polinômio de segunda ordem (1):

$$\kappa_s = \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2
 \tag{13}$$

Observa-se que $r_{31} = 0$; r_{32} e r_{33} são constantes e então, esses elementos podem ser agrupados com outras constantes.

Figura 4 - O problema de orientação do vetor normal para o caso de sensores *pushbroom*.



O modelo apresentado anteriormente baseia-se na hipótese de que os vetores normais são paralelos, exceto por uma rotação entre os referenciais. Esta hipótese tem como base o fato de que uma reta no espaço objeto é projetada como uma reta para o espaço imagem, no caso de uma projeção perspectiva. Isto ocorre para câmaras do tipo quadro, mas em câmaras de varredura linear (*pushbroom*) o efeito de perspectiva existe somente ao longo da linha, sendo eliminado na direção da trajetória (ver Figura 4). Por esta razão, o vetor normal calculado com base na reta medida na imagem (\vec{n}) tem uma pequena rotação em relação ao vetor normal ideal, que seria obtido por uma projeção perspectiva (\vec{n}').

Existem duas abordagens possíveis para solucionar este problema: a primeira seria pré-multiplicar a matriz de rotação por uma segunda matriz de rotação, calculada em função dos POE das linhas nas quais aparecem os vértices p_1 e p_2 ; a segunda alternativa seria calcular uma correção em função dos POE exterior aproximados. Ambas as alternativas estão sendo estudadas, mas não serão discutidas neste trabalho. Em experimentos com dados reais a técnica de cálculo de correções mostrou-se efetiva. Para evitar este efeito, entretanto, as simulações apresentadas na seção 4 foram realizadas projetando-se ambos os vértices do espaço objeto para o espaço imagem com os POE da linha correspondente ao primeiro vértice.

O modelo matemático usando pontos foi baseado nas equações de colinearidade também considerando a geometria de varredura linear. O grupo de parâmetros foi o mesmo (12 parâmetros) e o mesmo modelo polinomial (equação 1) foi usado para estimar os POE para cada linha.

Ambos os modelos (planos equivalentes e equações de colinearidade) são do tipo explícito, o que permite a estimação de parâmetros por Mínimos Quadrados usando o método paramétrico (GEMAEL, 1994), considerando-se os elementos de controle (pontos ou retas) como conhecidos. Foram implementados programas em linguagem C++ que permitem a estimação dos POE usando retas, pontos e a combinação de ambos.

3. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Para gerar os parâmetros de orientação exterior ($X_s, Y_s, Z_s, \kappa_s, \varphi, \omega$) para cada linha de uma imagem de varredura linear simulada, foram definidos os parâmetros iniciais da primeira linha (X_0, Y_0, Z_0, κ_0) e os coeficientes polinomiais de primeira e segunda ordem (a_1, a_2, \dots, b_4).

Aos parâmetros angulares φ e ω foram atribuídos valores zero para a geração dos POE simulados, valendo lembrar que, na abordagem proposta, esses elementos são considerados como constantes, devido à correlação entre parâmetros. A tabela 1 mostra os POE usados e os valores dos coeficientes polinomiais.

Tabela 1- Parâmetros de orientação exterior simulados.

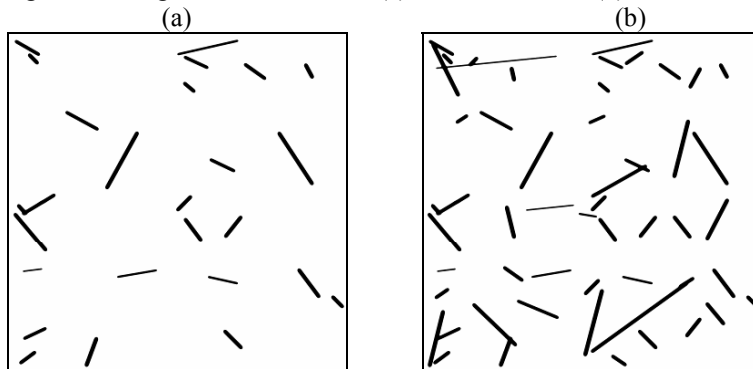
POE	Valores simulados				
	Parâmetros para t=0	Coeficientes Polinomiais			
X_0	50000m	a_1	5.0E-3	b_1	5.0E-8
Y_0	0m	a_2	20	b_2	5.0E-7
Z_0	800000.0m	a_3	5.0E-5	b_3	5.0E-6
κ_0	0.00243346rd	a_4	5.0E-8	b_4	5.0E-11

Os valores simulados correspondentes aos POE (X_0 , Y_0 , Z_0 , κ_0) para $t=0$, foram definidos de acordo com um sistema de referência local a fim de evitar problemas numéricos. Os valores de a_1 , a_2 ,..., b_4 foram simulados de forma a inserir pequenas distorções nos POE da imagem formada. O parâmetro a_2 apresenta um valor elevado visto que corresponde a translação das linhas na imagem simulada.

Para a geração de uma imagem de varredura linear, foram considerados valores compatíveis com as características geométricas de uma imagem CBERS. A imagem gerada é formada por 5000 linhas e 5000 colunas, com distância focal de 520mm e 800km de altitude.

Com relação ao espaço objeto, dois conjuntos de linhas retas (27 e 54 retas) foram estabelecidos de acordo com o sistema de referência adotado. A figura 5 ilustra os dois grupos de retas definidos no espaço objeto, a partir de suas extremidades.

Figura 5 - Imagens simuladas com (a) 27 linhas retas e (b) 54 linhas retas.



Para cada linha da imagem foram projetados os vértices de cada reta para o espaço imagem usando as equações de colinearidade e os POE desta linha. Erros aleatórios foram gerados e introduzidos nas coordenadas fotogramétricas de cada um dos vértices. A partir dos vértices da reta foram calculados os parâmetros angular e linear de cada reta e, conseqüentemente, o vetor normal. A intersecção de cada linha reta projetada com a linha ($y=0$) foi então calculada, simulando um sensor de varredura linear.

Se a linha reta realmente intercepta a linha central, então são calculados os componentes do vetor normal ao plano de projeção e armazenados em um arquivo indexado com o número de cada linha. Para esse procedimento um programa de simulação foi desenvolvido, o qual gera um arquivo com observações (parâmetros angular e linear) e outras informações para controle do algoritmo, bem como uma imagem *raster*, apenas para visualização (figura 5). A simulação com pontos é realizada similarmente, projetando-se os pontos para o espaço imagem e testando para verificar se o ponto projetado está contido na linha $y=0$.

Foram, então, realizados experimentos utilizando o programa de estimação desenvolvido para recuperar os POE, usando as informações simuladas. Nestes experimentos houve a variação de erros aleatórios e número de retas como apoio de campo. Os resultados e comentários são apresentados a seguir.

O primeiro experimento foi realizado usando 27 linhas retas com três variações de erros aleatórios, com desvio padrão de 1, 2 e 5 μm , introduzidos nas coordenadas imagem. A magnitude desses erros foi introduzida considerando que a extração das linhas será feita com um algoritmo que permite precisão sub-pixel. Após a estimação usando o método dos Mínimos Quadrados, o erro verdadeiro para cada parâmetro foi calculado, bem como o desvio padrão estimado a partir da matriz variância-covariância dos parâmetros.

Os erros verdadeiros dos coeficientes polinomiais estimados e seus respectivos desvios-padrão são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Erros verdadeiros nos POE e coeficientes polinomiais (coef.) estimados e respectivos desvios padrão estimados usando 27 linhas retas.

POE e coef.	1 μm		2 μm		5 μm	
	\mathcal{E}_v (m)	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v (m)	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v (m)	$\hat{\sigma}_x$
X_0	1.017	3.276	4.267	6.386	13.027	16.574
Y_0	0.843	1.963	-1.77	3.827	-2.102	9.935
Z_0	-42.940	53.413	-105.362	104.071	-281.086	270.310
κ_0	-1.55E-4	9.27E-5	4.24E-4	1.80E-4	-5.64E-4	4.69E-4
a_1	1.23E-3	2.66E-3	3.85E-3	5.18E-3	-1.61E-3	1.34E-2
a_2	-3.59E-3	1.86E-3	4.61E-3	3.63E-3	7.54E-3	9.44E-3
a_3	2.13E-2	6.77E-2	0.241	0.1319	-8.34E-2	0.3423
a_4	1.90E-7	8.87E-8	-5.29E-7	1.72E7	-3.43E-7	4.48E-7
b_1	8.68E-7	4.99E-7	-3.66E-7	9.74E-7	9.34E-7	2.52E-6
b_2	1.11E-6	4.36E-7	-1.79E-6	8.51E-7	-2.10E-6	2.20E-6
b_3	1.46E-5	1.61E-5	-8.68E-5	3.14E-5	7.79E-6	8.16E-5
b_4	-2.60E-11	1.80E-11	1.00E-10	3.60E-10	1.16E-10	9.47E-11

Analisando os resultados apresentados na tabela 2 pode-se verificar que os valores estimados com o grupo de 27 linhas retas e seus respectivos desvios-padrão, são coerentes com os valores simulados, embora algumas discrepâncias, principalmente no parâmetro Z_0 sejam maiores. Os resultados mostraram que o aumento dos erros aleatórios introduzidos nas coordenadas imagem, provoca um aumento proporcional nos erros verdadeiros e nos desvios-padrão estimados. Os valores dos desvios-padrão estimados são compatíveis, em todos os casos, com os erros verdadeiros. No entanto, verifica-se que esses resultados ainda não são adequados para realizar a geração dos POE para toda a imagem (ver figura 7c).

Um segundo experimento foi realizado aumentando-se o número de linhas retas, para verificar se o aumento da redundância dos dados melhoraria os resultados. Além disso, foi introduzido um experimento no qual o desvio padrão dos erros randômicos é de 1 pixel ($13 \mu\text{m}$) e retirado o experimento com erros de $1 \mu\text{m}$.

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos com o uso de 54 linhas retas, com os erros verdadeiros dos coeficientes polinomiais estimados e seus respectivos desvios-padrão para 3 experimentos, nos quais foram introduzidos erros randômicos nas coordenadas imagem de $2 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ e $13 \mu\text{m}$, respectivamente.

Tabela 3 - Erros verdadeiros nos POE e coeficientes polinomiais (coef.) estimados e respectivos desvios padrão estimados usando 54 linhas retas.

POE e coef.	$2 \mu\text{m}$		$5 \mu\text{m}$		$13 \mu\text{m}$	
	\mathcal{E}_v (m)	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v (m)	$\hat{\sigma}_x$	\mathcal{E}_v (m)	$\hat{\sigma}_x$
X_0	0.157	3.391	1.734	7.270	11.15	17.33
Y_0	1.825	2.694	-7.601	5.778	14.55	14.30
Z_0	69.635	77.479	87.754	166.120	339.23	406.49
κ_0	2.67E-4	1.20E-4	-1.51E-4	2.59E-4	-0.19E-4	0.63E-4
a_1	6.74E-3	3.57E-3	5.27E-3	7.66E-3	-0.017	0.018
a_2	7.98E-4	2.87E-3	1.08E-2	6.15E-3	-0.016	0.015
a_3	-0.1229	9.35E-2	-0.2494	0.2004	-0.159	0.488
a_4	-2.11E-7	5.11E-7	-8.79E-8	3.23E-7	-0.14E-7	0.79E-7
b_1	-3.73E-7	7.48E-7	4.33E-8	1.60E-6	0.25E-6	0.38E-6
b_2	-3.95E-7	6.22E-7	-1.99E-6	1.33E-6	0.52E-6	0.32E-6
b_3	3.02E-5	2.05E-5	4.46E-5	4.39E-5	-0.28E-5	0.10E-4
b_4	4.80E-11	3.30E-11	1.47E-12	7.20E-11	-0.65E-11	0.17E-10

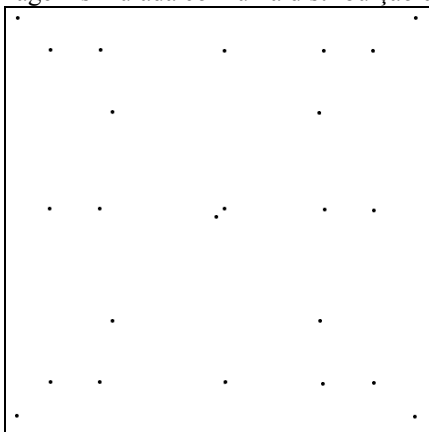
Os valores obtidos com o segundo experimento (tabela 3) mostraram que o aumento do número de linhas retas melhorou significativamente os resultados dos parâmetros estimados, como pode ser observado comparando-se os valores obtidos com erro aleatório de $5 \mu\text{m}$. Nota-se a melhora expressiva da estimação do parâmetro Z_0 , visto que esse parâmetro apresenta as maiores discrepâncias, que podem ser acarretadas pela geometria do sensor de varredura linear e pela altitude

da plataforma, que proporciona um ângulo de abertura muito pequeno. Observou-se, ainda, que os resultados obtidos com observações com $13 \mu\text{m}$ de desvio-padrão são de qualidade inferior, como seria esperado.

Um terceiro experimento foi realizado com pontos de controle para comparar ambas as abordagens. Foi utilizado um conjunto de 24 pontos bem distribuídos na cena usando as equações de colinearidade adaptada. Neste experimento os pontos foram gerados com erros aleatórios de $5 \mu\text{m}$ e de $13 \mu\text{m}$, visto que a identificação e medição de pontos são tarefas, na maioria das vezes, realizadas de maneira manual, produzindo erros da ordem de 1 pixel de magnitude. Em casos especiais, consegue-se pontaria subpixel e, por esta razão utilizou-se o experimento com erros de $5 \mu\text{m}$. Foi utilizada uma configuração com um grande número de pontos bem distribuídos na cena para que este experimento sirva de referência, com relação aos experimentos realizados com retas. Sabe-se, contudo, que esta é uma situação de difícil obtenção na prática, sendo esta uma das razões que motivaram este trabalho.

A figura 6 ilustra a distribuição dos pontos de controle na imagem simulada com 24 pontos. Os erros verdadeiros dos coeficientes polinomiais e seus respectivos desvios-padrões estimados são apresentados na tabela 4.

Figura 6 - Imagem simulada com uma distribuição de 24 pontos.



Os valores estimados com a abordagem baseada em pontos, com erros aleatórios de $13 \mu\text{m}$ (1 pixel), são bastante similares aos valores estimados com o modelo que usa retas com erros de $5 \mu\text{m}$.

Comparando os resultados (tabelas 3 e 4) verifica-se que ambas as abordagens apresentaram resultados satisfatórios e que podem ser utilizados para a correção geométrica de imagens de varredura linear. Nota-se também que o número de retas deve ser maior que o de pontos, para se alcançar resultados similares. No entanto, verifica-se que a distribuição de pontos usada no terceiro experimento é de difícil obtenção na prática.

Tabela 4 - Erros verdadeiros nos POE e coeficientes polinomiais (coef.) estimados e respectivos desvios padrão estimados usando 24 pontos.

POE e coef.	5 μm		13 μm	
	ϵ_v (m)	$\hat{\sigma}_x$	ϵ_v (m)	$\hat{\sigma}_x$
X_0	1.16	0.752	0.604	3.276
Y_0	0.074	0.752	2.374	1.963
Z_0	29.50	15.676	-89.9421	53.413
κ_0	-2.7E-5	1.96E-5	-2.827E-5	9.274E-5
a_1	-0.00123	7.78E-4	2.468E-4	0.0026E-5
a_2	-0.00122	7.78E-4	-5.480E-3	0.001E-5
a_3	-0.05622	0.0186	0.1288	0.067 E-5
a_4	7.78E-9	2.32E-8	2.080E-9	8.871E-8
b_1	2.44E-7	1.50E-7	-1.234E-6	4.997E-7
b_2	3.08E-7	1.52E-7	1.127E-6	4.368E-7
b_3	1.09E-5	3.62E-6	-2.673E-5	1.6162E-5
b_4	-1.8E-12	1.43E-12	-3.551E-12	1.873E-11

A fim de verificar a qualidade dos parâmetros foi realizado um experimento utilizando as equações de colinearidade inversa. Neste teste 10 pontos de verificação foram selecionados para determinar o erro nas coordenadas destes pontos no terreno, considerando os POE estimados por cada abordagem. Foi usado o valor da coordenada Z verdadeiro.

Tabela 5 - Discrepâncias em 10 pontos de verificação para as abordagens que usam pontos e retas.

Pontos de Verificação	Abordagem com pontos		Abordagem com retas	
	ϵ_v (m)		ϵ_v (m)	
	X	Y	X	Y
P1	-2.29	1.02	-4.22	12.72
P2	2.24	-2.92	-15.43	-20.74
P3	3.07	-2.86	-6.14	-6.31
P4	9.99	-8.89	10.62	4.37
P5	-1.93	3.49	-13.55	-21.03
P6	-9.29	1.09	-3.39	24.01
P7	9.61	0.88	5.84	-3.50
P8	-7.41	3.79	-9.48	17.54
P9	-2.45	9.09	-12.86	-22.45
P10	-14.01	-0.71	-5.18	30.19
Média	-1.24	0.39	-5.37	1.48
$\hat{\sigma}_x$	7.77	4.79	8.35	19.38

A tabela 5 apresenta os erros verdadeiros nas coordenadas X e Y de 10 pontos no espaço objeto, bem como a média destes erros e os desvios-padrão.

Como pode ser verificado na tabela 5, apesar dos valores estimados com a abordagem de pontos apresentarem valores próximos aos da abordagem usando retas, principalmente para X_0 , Y_0 e Z_0 , os resultados da verificação da exatidão dos dados, são melhores com a abordagem de pontos. Isso pode ter ocorrido devido à modelagem do parâmetro Z_0 com relação aos valores de Z_0 simulados, influenciando de modo direto os erros nas coordenadas de X e Y no terreno. A Figura 7 mostra os POE (X_S , Y_S e Z_S) para cada linha da imagem, calculados a partir dos coeficientes estimados para a abordagem de retas (54 retas com $5 \mu m$ de erro) e para a abordagem de pontos (24 pontos com $13 \mu m$ de erro), em comparação com os valores verdadeiros, evidenciando as discrepâncias em Z_0 .

De fato, não houve uma estimação adequada do parâmetro Z_S em ambos os casos (linhas e pontos), como pode ser visto no terceiro gráfico (Figura 7c), o qual apresenta discrepâncias entre os valores de até 250m para o modelo de retas e de até 50m para o modelo de pontos. O mesmo não ocorreu com os parâmetros X_S e Y_S , comparados com os valores simulados, que não apresentaram diferenças significativas, principalmente para o caso de Y_S , que foram na ordem de centímetros.

Os valores dos POE obtidos com a abordagem por pontos apresentaram melhores resultados, do que os obtidos pela abordagem de retas. Entretanto, as discrepâncias significativas ocorreram principalmente no parâmetro Z_0 que está diretamente relacionado com geometria de abertura do sensor. No caso do CBERS a geometria é de ângulo muito pequeno (distância focal de 520mm e altitude da plataforma de 780km). É importante ressaltar que a extração de linhas pode ser facilmente realizada com exatidão subpixel, ou seja, espera-se os resultados comparáveis com aqueles obtidos com erros de 2 a $5 \mu m$ de erro observacional.

Os resultados podem ser melhorados com a combinação de ambas as abordagens, visando deste modo, minimizar os problemas oriundos de cada modelo.

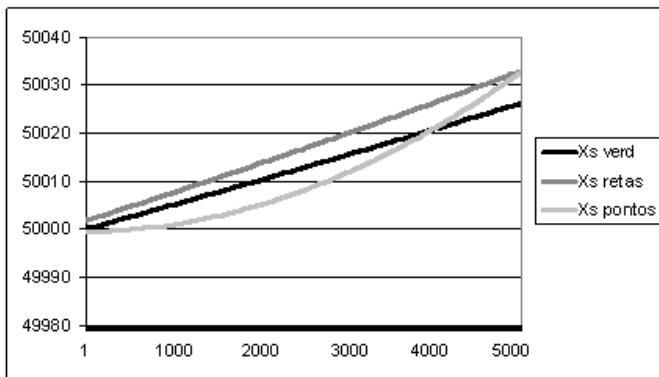
A correção de orientação do vetor normal, necessária para a utilização prática do modelo, está em desenvolvimento e não será descrita neste trabalho. Testes preliminares com dados reais mostram que a aplicação da correção permite a obtenção de resultados comparáveis aos obtidos nestas simulações.

É importante ressaltar que estes resultados se referem ao modelo apresentado neste trabalho, que utiliza vetores normais como elementos geométricos básicos. Outros modelos, como os descritos por Habib et al (2000) apresentam comportamento distinto e uma comparação com o modelo desenvolvido neste trabalho é deixada como sugestão para trabalhos futuros.

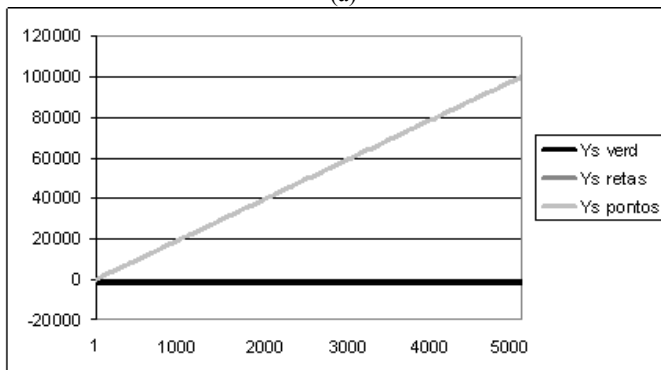
Vários outros experimentos foram realizados, variando-se a configuração de pontos e retas. Verificou-se que algumas configurações de pontos nas quais há distribuição não homogênea ou nas quais algumas regiões da imagem não possuem

pontos, apresentam resultados inferiores aos mostrados neste trabalho, cujo objetivo foi mostrar os casos mais favoráveis.

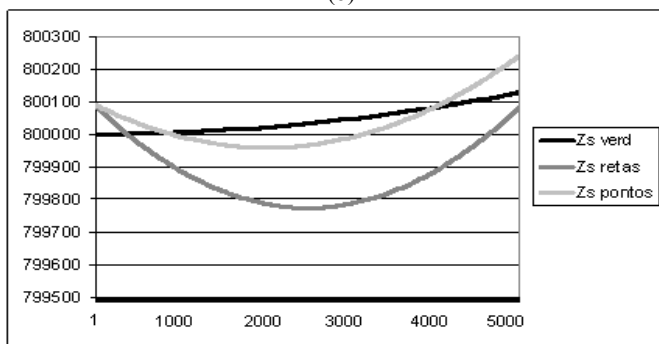
Figura 7 - Gráficos com os valores simulados e estimados de cada abordagem.



(a)



(b)



(c)

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pôde-se verificar que o modelo proposto recupera os coeficientes polinomiais satisfatoriamente, e pode ser usado para a correção de imagens de varredura linear.

Embora o modelo de colinearidade usando pontos tenha apresentado melhores resultados, quando comparado com o modelo de linhas retas, a diferença é mais significativa para os valores do parâmetro Z_0 . Vale ressaltar que os pontos utilizados no experimento possuíam uma boa distribuição geométrica na cena e que este caso ideal é de difícil obtenção prática.

Assim, considerando que não exista uma boa distribuição dos pontos na cena, o que é bastante comum em imagem reais, a opção de utilização de retas como controle de campo é de fundamental importância. Existem diversas vantagens no uso deste tipo de feição, como a redundância de informação, a não necessidade de correspondência ponto a ponto e a possibilidade de extração de linhas retas com precisão sub-pixel, o que justifica o desenvolvimento do modelo.

Com a combinação de ambos os modelos os resultados podem ser melhorados, principalmente por se levar em conta as vantagens de cada modelo, como por exemplo, a rigidez de pontos e a redundância fornecida por linhas.

Um problema importante a ser considerado em trabalhos futuros é a rotação do vetor normal em razão do efeito de perspectiva. Se este efeito não for corrigido adequadamente, a solução obtida é degradada.

Outro aspecto importante a ser investigado em trabalhos futuros é a ordem dos polinômios usados para descrever a variação dos parâmetros de orientação exterior. Deve-se verificar a possibilidade de usar modelos lineares ou mesmo um único valor para toda a imagem, considerando-se o tempo de aquisição de cada cena e a relativa estabilidade da plataforma.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro destinado a essa pesquisa sob a forma de uma bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARMSTON, J.D.; DANAHER, T.J.; GOULEVITCH, B.M.; BYRNE, M.I. Geometric Correction of Landsat MSS, TM, and ETM+ Imagery for Mapping of Woody Vegetation Cover and Change Detection in Queensland. In: *Eleventh Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference Proceedings*, Brisbane, Australia, 2002.
- DOWMAN, I. J.; MICHALIS, P. Generic rigorous model for along track stereo satellite sensors. In: *ISPRS Workshop on High Resolution Mapping from Space*, Hannover, 2003.

- FENG, X.; WANG, K.; ZHOU, B.; DENG, J.; LUO, P.; LIN, O. Geometric correction error of SPOT5 remotely sensed image. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 05. Proceedings*. 2005 IEEE International Volume 4, 2005.
- FRITSCH, D.; STALLMANN, D. Rigorous Photogrammetric Modelling Processing of High-Resolution Satellite Imagery. In: *IAPRS*, Amsterdam, v. 33, part B1, p. 313-321, 2000.
- GEMAEL, C. *Introdução ao Ajustamento de Observações: aplicações geodésicas*. Curitiba: UFPR, 1994. 319p.
- GONCALVES, J.; DOWMAN, I. Precise orientation of SPOT panchromatic images with tie points to a SAR image. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (3A), p. 125-130, 2002.
- GUGAN, D. J. Practical Aspects of Topographic Mapping from SPOT Imagery. *Photogrammetric Record*, 12(69), p. 349-355, 1987.
- HABIB, A.; KELLEY, D.; ASMAMAW, A. Utilizing Straight Lines in Object Space for Linear Array Scanner Imagery. In: *XIXth ISPRS Congress*, Amsterdam, The Netherlands, July 2000.
- KRATKY, V. Rigorous photogrammetric Processing of SPOT Images at CCM Canada. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, p. 53-71, 1989.
- LEE, C.; THEISS, H.J.; BETHEL, J.S.; MIKHAIL, E.M. Rigorous mathematical modeling of airborne pushbroom imaging systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 66, No.4, p.385-392, 2000.
- LEE, Y.; HABIB, A. Pose Estimation of Line Cameras Using Linear Features. In: *ISPRS Symposium of PCV'02 Photogrammetric Computer Vision*, Graz, Austria, 2002.
- MORGAN, M.; KIM, K.; JEONG, S.; HABIB, A. Parallel Projection Modelling for Linear Array Scanner Scenes. In: *XXth ISPRS Congress, PS WG III/1: Sensor Pose Estimation*, Istanbul, Turkey, p.52, 2004.
- 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. Georeferencing of CCD linear array sensors imagery. In: *ASPRS Annual Meeting, Anchorage, AK. Proceedings on CD*, 2003.
- POLI, D. Orientation of Satellite and Airborne Imagery from Multi-Line Pushbroom Sensors with a Rigorous Sensor Model. In: *ISPRS: proceedings of the XXth ISPRS congress: Geo-imagery bridging continents*, Istanbul, Turkey, v. I, p. 130-136, 2004.

- TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L. A recursive approach to Space Resection using straight lines. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 62, n 1, p. 57-66, 1996.
- TOMMASELLI, A. M. G.; TELLES, S. S. S. A Mathematical Model for Camera Calibration using Straight Lines. In: *International Calibration and Orientation Workshop - EuroCOW*, 2006.
- TONOLO, G. F.; POLI, D. Georeferencing of EROS-A1 high resolution images with rigorous and rational function model. In: *ISPRS Workshop "High resolution mapping from space 2003"*, Hannover, Germany, 2003.
- WANG, Y. Automated Triangulation of Linear Scanner Imagery. In: *Joint Workshop of ISPRS WG I/1, I/3 and IV/4 on Sensors and Mapping from Space*, Hanover, 1999.

(Recebido em outubro de 2006. Aceito em dezembro de 2006)