

Análise de métodos de refinamento do Modelo Polinomial Racional utilizando pontos de controle através da avaliação da exatidão posicional de ortoimagens de alta resolução

Wagner Barreto da Silva

Centro de Imagens e Informações Geográficas do Exército – CIGEX
Rodovia DF 001 - Km 4,5 – Sobradinho – Brasília, DF
CEP: 73001-970

wbarr@ig.com.br

Abstract. Recent studies come affirming that the Rational Function Model supplied with the images can be refined to achieve better accuracy using ground control points. In the present work, a review of the main works dealing with this subject is done and imagery from IKONOS II and Quickbird platforms are orthorectified by the original rational model (supplied with the image) and for models refined for up to four control points. Comparisons between the geometric quality of the first orthoimagery and the another ones with the refined rational models are done. The geometric quality of the images is evaluated by comparing coordinates obtained in the image with the coordinates of 20 control points in an area of 80 Km² of Rio de Janeiro.

Palavras-chave: Rational Function Model, refinement, orthoimagery, Modelo Polinomial Racional, refinamento, ortoimagens.

1. Introdução

Com o advento das imagens de alta resolução espacial, os modelos matemáticos baseados nas transformações polinomiais racionais vêm sendo largamente utilizados por fotogrametristas na correção geométrica das imagens. Isto ocorre tanto por se apresentarem como um método simples e genérico de relacionamento preciso entre as coordenadas dos espaços objeto e imagem (Dial e Grodecki, 2004), quanto pelo fato de os parâmetros rigorosos da órbita e do sensor (modelo físico) muitas vezes não estarem disponíveis aos usuários. Esta modelagem matemática recebe, com maior frequência, na literatura, as denominações de *Rational Function Model (RFM)* ou *Rational Polynomial Camera (RPC)*, e neste trabalho será chamado de Modelo Polinomial Racional ou Modelo RPC. Esta modelagem relaciona coordenadas tridimensionais do espaço objeto (X,Y,Z) com coordenadas bidimensionais do espaço imagem (linha, coluna), ou vice versa, assim como o modelo físico do sensor (Hu et al., 2004) e é apresentado da seguinte forma (OGC, 1999):

$$\text{Linha}(X_n, Y_n, Z_n) = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{p_2(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad \text{Eq.1}$$

$$\text{Coluna}(X_n, Y_n, Z_n) = \frac{p_3(X_n, Y_n, Z_n)}{p_4(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p c_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p d_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad \text{Eq.2}$$

Onde Linha (X_n, Y_n, Z_n) e Coluna (X_n, Y_n, Z_n) são as coordenadas normalizadas do espaço imagem; X_n, Y_n , e Z_n são as coordenadas normalizadas do espaço objeto e $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}$ e d_{ijk} são os coeficientes da transformação, chamados de RPCs (Coeficientes Polinomiais Racionais). As potências das coordenadas do espaço objeto podem variar caso a caso. Quando a potência máxima de cada coordenada é igual a 3 e a potência total em cada termo dos polinômios é menor ou igual a 3 ($m+n+p \leq 3$), tem-se o caso particular onde os polinômios possuem 20 termos e são de terceira ordem, e que vem sendo empregado como um padrão da indústria (Xu, 2004).

Há duas abordagens para a solução do modelo, ou seja, para a determinação dos coeficientes da transformação: seriam as soluções independente e dependente do terreno. A solução independente do terreno é viável quando são conhecidos os parâmetros do imageamento: centros de perspectiva e ângulos de atitude da plataforma para cada faixa imageada. Normalmente, somente a empresa responsável pelo satélite tem conhecimento sobre esses parâmetros e pode produzir um modelo de imageamento substituto (no caso, o RPC), utilizando-os. O modelo RPC determinado por este processo demonstra-se capaz de atingir exatidões bastante próximas ao do modelo físico do sensor, como pode ser observado em Grodecki e Dial (2001), que chegaram a resultados em que, no pior dos casos, as coordenadas calculadas pelo modelo não tiveram erros maiores do que 0,04 pixel quando comparadas às calculadas pelo modelo físico, podendo-se afirmar que a solução independente do terreno torna o RPC um substituto seguro para os modelos físicos de sensor (Hu et al, 2004).

A solução dependente do terreno necessita do conhecimento de coordenadas de pontos no campo. A correspondência das coordenadas entre a imagem e o terreno só pode ser feita através da determinação de coordenadas de pontos de controle e pontos de verificação. No entanto, a precisão deste método está relacionada à abundância e distribuição de pontos de controle no terreno (Toutin et al., 2002). Os coeficientes do modelo polinomial são normalmente determinados pelo método dos mínimos quadrados. Considerando os polinômios da função como sendo do 3º grau, seria necessária, para a solução determinística, a disponibilidade de 40 pontos de controle para obtenção de 80 coeficientes. Para uma superabundância, levando a resultados mais confiáveis, seria necessário um número ainda maior de pontos, sem comentar que estes devem ser bem distribuídos na imagem. Segundo Hu et al (2004), o modelo solucionado pela abordagem dependente do terreno não deve ser usado como um substituto do modelo físico se for requerida grande exatidão.

Quando determinado de forma independente do terreno, com a utilização do modelo físico do sensor, o Modelo Polinomial Racional (RPC) mostra-se um substituto seguro e preciso para o modelo rigoroso, além de ser mais simples e rápido. No entanto, é possível, com a utilização de pontos de controle adicionais, refinar-se o modelo Polinomial Racional, tornando-o mais preciso do que o modelo inicialmente fornecido pela empresa que comercializa as imagens.

As pesquisas realizadas nos últimos cinco anos sobre os métodos de refinamento do Modelo RPC vêm mostrando que existem duas formas de se refinar os coeficientes da transformação polinomial, como pode ser verificado em Hu et al (2004): São os chamados métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos de refinamento atualizam os próprios coeficientes da transformação, enquanto que os indiretos introduzem transformações no espaço imagem ou objeto, sem alterar os coeficientes originais.

2. Métodos Diretos de Refinamento

Hu e Tao (2002) propõem dois métodos diretos de refinamento:

O primeiro método utiliza o conjunto de pontos que foi inicialmente utilizado para determinação do modelo polinomial racional e mais um conjunto adicional de pontos, determinado de forma independente em relação aos pontos originais. Este método foi chamado *Batch Iterative Least-Squares (BILS) Method*. O refinamento pode ser realizado incorporando-se o novo conjunto de pontos na equação normal da solução do modelo racional deduzida em Tao e Hu (2001) e em Hu e Tao (2002), com atribuição dos pesos apropriada para cada conjunto de pontos. Como é necessário o conhecimento do conjunto original de pontos que foram usados na determinação do modelo, este método pode ser empregado apenas pela empresa que comercializa as imagens, pois é normalmente quem tem conhecimento do processo de determinação do modelo RPC fornecido e, conseqüentemente, de tais pontos.

O segundo utiliza somente o conjunto de pontos adicionais, determinados independentemente dos originais. É chamado de *Incremental Discrete Kalman Filtering (IDKF) Method*. O modelo pode ser refinado utilizando-se os coeficientes originais e a matriz variância-covariância dos coeficientes determinados na solução do modelo, que também é resultante da solução. Hu e Tao (2002) sugerem às empresas que vendem as imagens de satélite que a matriz variância-covariância dos coeficientes polinomiais racionais seja incluída nos arquivos de metadados das imagens, o que ajudaria os usuários a obter melhores resultados com o refinamento do modelo RPC utilizando o método *IDKF*.

3. Métodos Indiretos de Refinamento

Quando os coeficientes do modelo *RPC*, ou seja, a solução do modelo, são determinados com base nas efemérides do satélite e nas informações de atitude do sensor, sem a utilização de pontos de campo, podem existir erros lineares sistemáticos (Hu et al., 2004). Nestes casos, uma simples transformação complementar no espaço imagem normalmente é suficiente para refinar-se o modelo *RPC*. Como proposto em Dial e Grodecki (2002), tem-se um modelo polinomial para as correções nas coordenadas linha e coluna e podem ser dadas por:

$$\begin{aligned}\Delta l &= l' - l = a_0 + a_C \cdot \text{Coluna} + a_L \cdot \text{Linha} \\ \Delta s &= c' - c = b_0 + b_C \cdot \text{Coluna} + b_L \cdot \text{Linha}\end{aligned}\tag{Eq.3}$$

onde Δl e Δc são os termos de ajustamento do modelo *RPC*, expressando as diferenças entre as coordenadas de linha e coluna medidas no campo (l' e c') e as calculadas pelo modelo *RPC* (l e c). Os parâmetros do modelo polinomial acima têm um significado físico. O parâmetro a_0 absorve todos os efeitos que causam translações na direção linha enquanto que o parâmetro b_0 absorve todos os efeitos na direção coluna. Há a possibilidade dos erros sistemáticos variarem em função do tempo devido, por exemplo, à não compensação de erros dos giroscópios de bordo (Dial e Grodecki, 2002). Os demais parâmetros a_L , b_L , a_C e b_C representam estes erros nas direções linha e coluna.

Avaliações do modelo de ajustamento do RPC realizadas por Dial e Grodecki (2002), considerando circunstâncias diferenciadas, como por exemplo, o tamanho das faixas de imagem variando de 10 a 100 km, mostraram que os modelos de ajustamento utilizados podem absorver precisamente os efeitos de erros das efemérides e atitude. Os modelos considerando apenas os parâmetros a_0 e b_0 , que absorvem os erros sistemáticos nas duas direções do espaço imagem, mostraram-se efetivos para faixas de imagem de até 50 Km. As faixas de 100 Km podem requerer a adição dos parâmetros de variação dos erros sistemáticos

na direção linha, aL, bL para melhor precisão. Os parâmetros aC e bC mostraram não serem necessários, pois os resultados produzidos com a presença ou ausência desses parâmetros têm diferenças desprezíveis.

Os resultados apresentados por Dial e Grodecki (2002) mostram que um refinamento do modelo RPC, visando o ajustamento de blocos das imagens de alta resolução, pode ser feito em faixas de imagens de até 50 Km somente com a adição de dois parâmetros de translação no espaço imagem. Na maioria dos casos, os usuários não utilizam faixas de imagem maiores do que 50 Km, o que significa que raramente será necessária a utilização do modelo com mais do que dois parâmetros de translação, resultando no modelo simples:

$$\begin{aligned}\Delta l &= l' - l = a_0 \\ \Delta s &= c' - c = b_0\end{aligned}\tag{Eq. 4}$$

Fraser e Hanley (2003) propuseram a correção do modelo RPC com a utilização de dois parâmetros de translação da imagem, que corrigem os erros sistemáticos que acontecem nas duas direções do espaço imagem. Esses parâmetros são justamente os parâmetros do modelo proposto por Dial e Grodecki (2002) para o caso em que as faixas não são maiores do que 50 Km. Em Hanley et al. (2002) são testados os modelos de ajustamento apenas com os parâmetros a0 e b0 e também com os parâmetros aL e bL em dois blocos de imagens de tamanhos diferentes, um com 580 Km² e outro com 2800 Km². Nos resultados apresentados pode-se observar que, no bloco de menor área, a utilização dos parâmetros que corrigem o erro devido a variação dos erros sistemáticos não melhorou o resultado do ajustamento, enquanto que os resultados no bloco de maior área obteve melhora significativa com a utilização de tais parâmetros.

4. Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram os seguintes:

- Imagem do satélite Quickbird:
 - Bandas multiespectrais fusionadas com a pancromática;
 - Resolução espacial: 0,6 m;
 - Data: 20-04-2004;
 - Ângulo off-nadir: 4,9°.
- Imagem do satélite Ikonos II:
 - Bandas multiespectrais fusionadas com a pancromática;
 - resolução espacial: 1 m;
 - Data: 16-06-2004
 - Ângulo off-nadir: 17,6°
- Modelo Digital do Terreno (MDT) com resolução planimétrica de 1m, no formato DEM do software ENVI 4.0, gerado a partir de arquivos das curvas de nível da base cartográfica 1:10.000, da Cidade do Rio de Janeiro, pertencente ao Instituto Pereira Passos;
- Coordenadas de 20 pontos de controle obtidos a partir de fontes diversas: por rastreamento de satélites em datas e com equipamentos diferentes, todos com precisão geodésica, e pontos cujas coordenadas são oriundos de topografia convencional (vértices de triangulação). Esses são utilizados para a avaliação da exatidão posicional das ortoimagens resultantes;
- Software ENVI 4.1, para ortorretificação das imagens.

5. Área de trabalho

Para a realização do trabalho, foi escolhida uma área do município do Rio de Janeiro – RJ, recobrimo aproximadamente 80 Km² de regiões do Centro, Zona Norte, Zona Sul e Baía de Guanabara. A área apresenta variação altimétrica de até 780m, o que confere a imagem um significativo deslocamento devido ao relevo. A área de trabalho pode ser visualizada nas figuras 1 e 2:



Figura 1: Imagem IKONOS da área de trabalho



Figura 2: Imagem Quickbird da área de trabalho

6. Metodologia

A metodologia consistiu em ortorretificar cada uma das imagens utilizando o modelo polinomial racional fornecido juntamente com as imagens, inicialmente sem nenhum refinamento e, em seguida, refinando com a utilização de um, dois e quatro pontos de campo. Para essas operações foi utilizado o *software* ENVI 4.1, que possui tanto a funcionalidade de ortorretificar imagens IKONOS e Quickbird somente com o modelo RPC, sem refinamento, e com a utilização de pontos de campo para refinamento do modelo por métodos indiretos.

No total, foram obtidas, como resultado, oito imagens, sendo quatro ortoimagens de cada uma das duas imagens primitivas (IKONOS e Quickbird). Para cada uma das ortoimagens, foram comparadas as coordenadas de pontos que não foram utilizados para o refinamento dos modelos na imagem e no terreno, visando a verificação da exatidão dessas imagens para uso cartográfico e, principalmente, a possível melhora dessa qualidade com a utilização de pontos de campo para refinar o modelo RPC original.

Para as ortoimagens do satélite Quickbird, foi utilizado um total de 20 pontos de campo para refinamento do modelo e verificação da qualidade, sendo que os pontos que fossem utilizados para refinamento não foram utilizados para verificação. No caso das ortoimagens IKONOS, o total de pontos foi dezesseis, em função da maior dificuldade da determinação exata desses pontos na imagem, dada a sua menor resolução espacial: 1m contra 0,6 m do Quickbird.

7. Resultados e Análise

Os resultados encontrados nas comparações feitas para as ortoimagens do Quickbird e do IKONOS podem ser observados, respectivamente, na **tabela 1** e na **tabela 2**.

Tabela 1: resultados encontrados com as ortoimagens Quickbird

Ortoimagens Quickbird	Nº de pontos utilizados para o refinamento	Nº de pontos utilizados para a verificação da qualidade	Média dos erros (m)	Desvio padrão (m)
Sem refinamento	0	20	4,0	1
Modelo refinado por 1 ponto	1	19	1,8	1
Modelo refinado por 2 pontos	2	18	1,7	1
Modelo refinado por 4 pontos	4	16	1,6	1

Tabela 2: resultados encontrados com as ortoimagens IKONOS

Ortoimagens IKONOS	Nº de pontos utilizados para o refinamento	Nº de pontos utilizados para a verificação da qualidade	Média dos erros (m)	Desvio padrão (m)
Sem refinamento	0	16	7,6	1,7
Modelo refinado por 1 pontos	1	15	2,1	1
Modelo refinado por 2 pontos	2	14	1,9	0,9
Modelo refinado por 4 pontos	4	12	1,8	0,9

Pode-se observar que houve uma significativa melhora da exatidão posicional das ortoimagens geradas com a utilização dos pontos de campo para refinamento do modelo polinomial racional.

Para a imagem do Quickbird ortorretificada sem refinamento do modelo polinomial,

observa-se uma média dos erros de 4 m, enquanto que as imagens ortorretificadas com o modelo refinado por, respectivamente, 1, 2 e 4 pontos, observam-se médias dos erros de 1,8m, 1,7m e 1,6 m.

Para a imagem do IKONOS ortorretificada sem refinamento do modelo polinomial, observa-se uma média dos erros de 7,6 m, enquanto que as imagens ortorretificadas com o modelo refinado por, respectivamente, 1, 2 e 4 pontos, observam-se médias dos erros de 2,1m, 1,9m e 1,8 m.

Não foi observada, entretanto, nas duas situações, grande melhora na exatidão posicional à medida que se aumenta o número de pontos de campo utilizados para o refinamento, mostrando que 1 ponto é suficiente para realizar o refinamento do modelo, pelo menos para área pequenas como a do presente trabalho.

A melhora da qualidade geométrica das ortoimagens implica na possibilidade da sua utilização em escalas de mapeamento maiores do que seria possível somente com a ortoimagem gerada a partir do modelo não refinado. Dentro desse contexto, o estudo da possibilidade de refinamento dos modelos polinomiais pode trazer grandes benefícios no sentido de se utilizarem as imagens de alta resolução de melhor exatidão para fins cartográficos.

8. Referências

- Dial, G., Grodecki, J. Block Adjustment With Rational Polynomial Camera Models. In: **ACSM - ASPRS 2002 Proceedings**. 19-26 Abril de 2002, Washington, DC. ASPRS. 2002.
- Dial, G., Grodecki, J. RPC Replacement Camera Models. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Vol 34, Part XXX, 2004.
- Fraser, C. S., Hanley, H. B. Bias compensation in rational functions for Ikonos satellite imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 69, 53–58. 2003.
- Grodecki, J., Dial, G. Ikonos Geometric Accuracy. In: **Proceedings of Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5 and IV/7 on High Resolution Mapping from Space 2001**, 19-21 set. 2001, Hannover, Germany. University of Hannover. 2001.
- Hanley, H. B., Yamakawa, T., Fraser, C.S. Sensor Orientation for High Resolution Satellite Imagery. In: **Pecora 15 / Land Satellite Information IV / ISPRS Commission I / FIEOS 2002 Conference Proceedings**, 10 a 15 de Novembro de 2002, Denver, CO, USA. ISPRS. 2002.
- Hu, Y., Tao, C.V. Updating solutions of the rational function model using additional control information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 68, 715-723. 2002.
- Hu, Y., Tao, V., Croitoru, A. Understanding the rational function model: methods and applications. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, 12-23 julho, Istanbul, vol. XX, 6 p. 2004.
- OGC (OPENGIS CONSORTIUM). The OpenGIS Abstract Specification - Topic 7: Earth Imagery. 1999. Disponível em :<http://www.opengis.org/docs/99-107.pdf>. Acesso em 24 set. 2004.
- Tao V., Hu Y. A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 67(12): 1347-1357. 2001.
- Toutin, Th., Chérnier, R., Carbonneau, Y. 3D Models for High Resolution Images: Examples with Quickbird, IKONOS, and EROS; In: **ISPRS Commission IV Symposium, Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications**, 8 a 12 de julho de 2002, Ottawa, CA. ISPRS. 2002 , Vol. 34, No 4 pp. 547-551.
- Xu, Z. **The Rational Function Model in Photogrammetric Mapping: Methods and Accuracies**. Master Thesis. North York, Ontario, Canada. Department of Earth Science, York University, 64 p. 2004.