

Avaliação da qualidade geométrica de imagens IKONOS ortorretificadas utilizando-se a transformação polinomial racional

Wagner Barreto da Silva
Oscar Ricardo Vergara

Instituto Militar de Engenharia – IME
Seção de Ensino de Engenharia Cartográfica – SE/6
Praça Gal Tibúrcio, 80, Urca – 22290-270 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
wbarr@ig.com.br, vergara@ime.eb.br

Abstract. This work aims at geometrically evaluating IKONOS orthoimages, generated by the Rational Function Model. An IKONOS Geo Ortho Kit product of Rio de Janeiro City is used. That comprises a Geo image and a file with the rational transformation coefficients (RPC's). Rio de Janeiro was chosen due to its rough relief, which makes the evaluation become more reliable. For the generation of DEM, 1:2,000 and 1:10,000-scale digital maps are used. Finally, the orthoimages are evaluated by using ground control points, collected by differential GPS. The results show that such orthoimages are appropriate to work at 1:5,000 scale.

Palavras chave: IKONOS, orthoimagery, Rational Function Model, Rational Polinomial Camera, Rational Polinomial Coeficients, IKONOS, ortoimagem, Modelo Funcional Racional, Transformações Polinomiais Racionais, Coeficientes Polinomiais Racionais.

1. Introdução

Com o lançamento do satélite IKONOS II, em 24 de setembro de 1999, foi dado início à produção de imagens de alta resolução espacial para fins comerciais. Desde então estão sendo desenvolvidas diversas pesquisas que têm por objeto essas imagens. Uma das áreas onde os estudos apresentam avanço é a da exatidão geométrica das imagens. Como as imagens de alta resolução espacial possuem normalmente pixels com dimensões em torno de 1 m, os erros de posicionamento são bem mais perceptíveis nessas imagens do que nas de média resolução, que possuem pixels pelo menos dez vezes maiores.

A empresa *Space Imaging* fornece imagens IKONOS corrigidas geometricamente em diferentes níveis, como vem exposto na **tabela 1**, onde são apresentados também alguns indicadores de exatidão para cada nível de produto, quais sejam, o erro circular ao nível de confiança 90% (CE90), indicando que 90% dos pontos da imagem tem erro abaixo de determinado valor; o erro médio quadrático (EMQ) e o indicador *National Mapping Accuracy Standard* (NMAS, usado nos Estados Unidos) . Dentre os produtos apresentados na **tabela 1**, somente o GEO não é ortorretificado, mas corrigido geometricamente a partir das efemérides do satélite (Gisplan, 2003).

TABELA 1 – Relação dos Produtos IKONOS (Adaptado de *Space Imaging*, 2003)

Produto	CE90	EMQ	US NMAS
Geo	15m	Não disponível	Não disponível
Standard Ortho	50 m	25 m	1:100000
Reference	25m	11,8m	1:50000
Pro	10m	4,8m	1:12000
Precision	4m	1,9m	1:4800
Precision Plus	2m	0,9m	1:2400

Na **tabela 1**, o indicador de exatidão para o produto Geo não considera o efeito do deslocamento devido ao relevo. Cada um dos outros produtos é obtido por ortorretificação, alcançando-se melhores exatidões de um nível para o outro pela utilização de modelos digitais do terreno de melhor resolução e pontos de controle.

O preço dos produtos é diretamente relacionado com a precisão apresentada por cada um deles. Assim, temos que os últimos produtos da **tabela 1**, apresentam preços bem mais elevados do que o produto Geo.

A empresa que produz e comercializa as imagens do satélite IKONOS II não fornece os parâmetros das efemérides e da atitude do sensor, o que permitiria aos usuários a possibilidade de realizarem a ortorretificação, ou, no caso de pares estereoscópicos, a extração de feições tridimensionais do terreno (restituição). O motivo apresentado pela *Space Imaging* para a adoção desta postura é a complexidade do modelo físico do sensor, que por adquirir, na formação da imagem, uma linha a cada instante, apresenta parâmetros de orientação exterior (coordenadas do centro perspectivo e ângulos de atitude) diferentes para cada linha, o que torna difícil a implementação de soluções para o modelo por parte do usuário final (Grodecki, 2001).

Em 2001, um novo produto passou a ser disponibilizado pela Space Imaging: o *Geo Ortho Kit*, que se trata de um conjunto de dados que compreende uma imagem do nível Geo, de qualquer uma das bandas ou de combinações entre as mesmas, e um arquivo que contém os coeficientes de uma Transformação Polinomial Racional (modelo geométrico da imagem), determinados a partir do modelo físico do sensor. Segundo Grodecki (2001) a exatidão do modelo racional polinomial, chamado *Rational Polinomial Câmera (RPC)* difere da exatidão do modelo rigoroso de no máximo 0,04 pixel, enquanto que apresenta um erro médio quadrático abaixo de 0,01 pixel. Desde então, os usuários puderam utilizar o *RPC* para ortorretificar as imagens IKONOS, eliminando a necessidade de comprar produtos mais caros produzidos pela Space Imaging e a de disponibilizar dados necessários à ortorretificação (modelo digital do terreno e pontos de controle), que muitas vezes são de circulação restrita. Como o *RPC* faz o relacionamento do espaço objeto como o espaço imagem, pode também, no caso de pares estereoscópicos, ser utilizado para se realizar a extração tridimensional de feições do terreno.

O *RPC (Rational Polinomial Camera)* é um caso particular do Modelo Funcional Racional (RFM). O RFM 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):

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

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

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, sendo que quando a potência máxima é igual a 3, ou seja, $m+n+p = 3$, tem-se o caso particular utilizado pelas empresas como *Space Imaging* e *Digital Globe*, onde os polinômios possuem 20 termos e são de terceira ordem, e que vem sendo empregado como um padrão da indústria (Xu, 2004). A normalização minimiza a introdução de erros durante o cálculo (NIMA, 2000). A forma inversa para o Modelo Funcional Racional, ou seja, a que apresenta as coordenadas X,Y em função das coordenadas linha e coluna e Z, pode também ser utilizada.

Há duas abordagens para a solução do Modelo, ou seja, para a determinação dos coeficientes da transformação: Independente do terreno e dependente do terreno.

Na forma independente do terreno, o modelo físico do sensor é imprescindível para a determinação dos coeficientes da transformação: uma grade bidimensional de pontos é gerada sobre toda a extensão da imagem. O modelo físico do sensor é utilizado para se calcularem as coordenadas tridimensionais que formam uma grade tridimensional, que tem como extensão toda a área da imagem e a amplitude do terreno. A grade tridimensional é cortada por várias camadas e cada camada possui vários pontos de mesma altura. O Modelo Racional Polinomial é então utilizado para relacionar os dois conjuntos de coordenadas e seus coeficientes são estimados por ajustamento.

Na forma dependente do terreno, são utilizados pontos de controle medidos em campo para determinação dos coeficientes da transformação. Esta abordagem demonstra-se dependente da existência de uma grande quantidade de pontos de controle e também da sua distribuição. No entanto, é a única opção quando não se dispõe do modelo físico do sensor.

O modelo racional entregue pela Space Imaging aos usuários no produto Geo Ortho Kit é da forma direta, com polinômios de 3º ordem, cujos coeficientes foram estimados por uma abordagem independente do terreno. Este caso particular do *RFM*, chamado *RPC*, está descrito detalhadamente em Grodecki (2001), onde são apresentadas suas equações e o procedimento para a normalização das coordenadas.

Visando avaliar os resultados que se poderiam obter utilizando-se uma metodologia de ortorretificação de imagens de alta resolução através das transformações polinomiais racionais, neste trabalho ortorretifica-se um produto IKONOS *Geo Ortho Kit* de uma área de relevo movimentado, verificando a exatidão posicional da imagem resultante. Avalia-se este procedimento utilizando-se dados que configuram uma situação adequada para testar o procedimento aplicado: relevo movimentado, com diferenças altimétricas de até 780 m. Os resultados desta avaliação podem vir a servir de subsídio a instituições de produção cartográfica.

É importante ressaltar que a aplicação da metodologia que emprega o *Geo Ortho Kit* é viável desde que se tenham condições de rapidamente obter um modelo digital de terreno da região (bases cartográficas antigas, por exemplo), de coletar alguns pontos de campo para, opcionalmente, melhorar a qualidade da ortoimagem e de se dispor de programas aptos a realizar a ortorretificação.

Neste contexto, é interessante que se façam testes considerando-se situações diversas: tomando-se bases cartográficas de diferentes escalas, com diferentes quantidades de pontos de campo, e visando-se chegar a diferentes exatidões. Os resultados das avaliações dos produtos gerados podem vir a ser grande subsídio no sentido de se definir novas metodologias de utilização de imagens de alta resolução na produção de novos documentos cartográficos de escalas grandes.

Este trabalho tem por objetivo avaliar a qualidade geométrica de imagens IKONOS da linha *Geo Ortho Kit*, ortorretificadas utilizando transformação polinomial racional e MDTs gerados a partir de bases cartográficas digitais nas escalas 1:10.000 e 1:2000.

2. Área de Estudo

Para a realização do estudo, foi escolhida uma área do município do Rio de Janeiro - RJ. A área apresenta variação altimétrica de até 785m, o que confere a imagem um significativo deslocamento devido ao relevo. As características da área de estudo são apresentadas na **tabela 2**.

TABELA 2- Características da Área de Estudo

Coordenadas dos cantos limites (WGS 84)	superior esquerdo: -22°51'19.46", -43°13'19.30" superior direito: -22°51'16.44", -43°8'55.16" inferior esquerdo: -22°57'30.92", -43°13'14.45" inferior direito: -22°57'27.90", -43°8'50.11"
Área aproximada (Km ²)	86,5
Altitude mínima (m)	0
Altitude máxima (m)	785
Bairros totalmente ou parcialmente abrangidos pela área de trabalho	Urca, Botafogo, Humaitá, Alto da Boa Vista, Cosme Velho, Santa Tereza, Laranjeiras, Flamengo, Catete, Glória, Rio Comprido, Catumbi, Estácio, Tijuca, Maracanã, Praça da Bandeira, Cidade Nova, Centro, Saúde, Gamboa, Santo Cristo, São Cristóvão, Caju e Cidade Universitária

3. Materiais

Os materiais, dados e *softwares*, utilizados na realização do trabalho são relacionados a seguir:

- a. Produto Geo Ortho Kit, contendo: uma Imagem IKONOS-2 GEO da cidade do Rio de Janeiro e um arquivo de texto do modelo geométrico da imagem, com os 80 (oitenta) coeficientes da Transformação Polinomial Racional utilizada para a correção geométrica da imagem.
- b. Par estereoscópico IKONOS-2, com dois produtos Geo Ortho Kit, aproximadamente da mesma área da imagem anterior.
- c. Bases digitais da Cidade do Rio de Janeiro, cedidos pelo Instituto Pereira Passos, órgão da Prefeitura, nas escalas de 1:10.000 e 1:2.000, cujas feições de altimetria são utilizadas para a geração dos modelos digitais do terreno.
- d. 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.
- e. Software Microstation SE, para prévia edição dos arquivos das bases cartográficas digitais utilizadas para geração dos modelos digitais do terreno.

f. Software ENVI 4.0, para geração dos modelos digitais do terreno (MDT) e para ortorretificação das imagens.

g. Rastreador Topcon GP-R1D, com antena Topcon Geodetic Rev 1. B, para medição de pontos de controle visando a avaliação da qualidade das ortoimagens.

4. Metodologia

A metodologia inicia-se com a preparação dos arquivos digitais das bases cartográficas nas escalas 1:10.000 e 1:2.000. Os arquivos estavam inicialmente no formato SEQ (proprietário do *software* MaxiCad) e foram convertidos para o formato DXF, versão 12, utilizando-se um programa conversor específico. Os arquivos DXF foram então importados para o Microstation SE, sendo convertidos para o formato DGN, para a realização do seu preparo.

Este preparo consiste na seleção das feições a serem utilizadas na geração dos MDT. Foram separadas todas as curvas de nível e os pontos cotados. A hidrografia não foi utilizada por apresentar informações de altimetria incoerentes com as informações das curvas de nível e dos pontos. Algumas feições de hidrografia apresentavam inclusive coordenada z nula.

Em seguida, foram gerados dois MDT, um com o arquivo da base cartográfica 1:10.000 e outro com a base 1:2.000. Para a geração desses MDT, os arquivos foram importados para o ENVI 4.0, sendo convertidos para o formato de arquivo vetorial proprietário do ENVI, o EVF (*Envi Vector File*). O espaçamento utilizado para geração dos MDT foi de 1 m para os dois arquivos nas duas escalas. A escolha desse espaçamento se deve porque, em várias porções da área de trabalho, existem inclinações acentuadas, sendo que nesses casos muitas vezes as informações distam planimetricamente de aproximadamente 0,5 m para a escala 1:10.000 e 0,1 m para a escala 1:2.000. Isto significa que em regiões de grande inclinação, como encostas de grandes elevações, o que é comum na área, a distância entre dois pontos do MDT (1m) adequa-se mais à realidade do terreno do que se fossem utilizadas distâncias maiores. Os MDT gerados são do formato matricial, isto é, são imagens cujos pixels têm a dimensão de 1 m e cada um de seus pixels possui coordenadas planimétricas, referenciadas a um sistema geodésico configurado por ocasião da geração, e uma coordenada altimétrica, que corresponde ao nível de cinza daquele pixel. Como os MDT têm a mesma resolução espacial da imagem IKONOS, quando é feita a ortorretificação e é necessário a reamostragem desses MDT, não há nenhuma perda de informação por degradação da resolução espacial. Esta é uma outra vantagem de se gerar MDT com a mesma resolução da imagem a ser ortorretificada.

A ortorretificação das imagens é feita utilizando-se o modelo racional fornecido pela *Space Imaging*, chamado *Rational Polynomial Camera (RPC)*. O software utilizado é o ENVI 4.0, que nesta versão possui a ferramenta para geração de ortoimagens pelo modelo da empresa fornecedora das imagens IKONOS. Para geração das ortoimagens, são fornecidas ao programa algumas informações, das quais as mais importantes são: o método de reamostragem das imagens, que para esse trabalho foi a convolução cúbica, por apresentar o melhor resultado visual na ortoimagem final; o MDT a ser utilizado; o método utilizado para reamostrar o MDT para a mesma resolução da ortoimagem a ser gerada. Neste último caso, inicialmente acreditava-se que a utilização de métodos de reamostragem que não fossem o vizinho mais próximo, o único a não alterar os níveis de cinza e, conseqüentemente, as informações altimétricas do MDT original, iriam degradar a exatidão desse modelo. No entanto avaliações feitas em amostras de modelos digitais do terreno reamostrados pelo método bilinear e pela convolução cúbica apresentaram menos 1% dos pontos com diferenças superiores a 1m em relação ao reamostrado pelo vizinho mais próximo. Segundo Mascarenhas e Velasco (1989), para regiões heterogêneas ou acidentadas, o método da convolução cúbica (com 16 vizinhos) produz melhores resultados. Em função dessas avaliações e da referência citada, foi escolhido o método da convolução cúbica. Por último, são também informados ao

software o nome da ortoimagem, o local onde será armazenada e o local em que se encontra o arquivo de coeficientes da transformação racional utilizada para a ortoretificação.

5. Avaliação da qualidade das ortoimagens

A avaliação da qualidade foi feita comparando-se os valores das coordenadas de 22 (vinte e dois) pontos de controle bem distribuídos com as coordenadas desses mesmos pontos medidos nas duas ortoimagens. Os pontos foram obtidos de maneiras diferentes, sendo que dois deles são vértices de triangulação e os outros vinte foram obtidos por rastreamento de satélites do GPS, utilizando-se receptores geodésicos, fornecendo coordenadas com precisão geodésica. A **figura 1** mostra os resultados obtidos nas comparações entre os dois conjuntos de coordenadas. Pode-se observar que os erros planimétricos encontrados são próximos nos dois casos, mostrando que não há melhora significativa na qualidade das ortoimagens obtidas quando, para a geração do MDT, utiliza-se uma base na escala 1:2.000 ao invés de uma outra na escala 1:10.000.

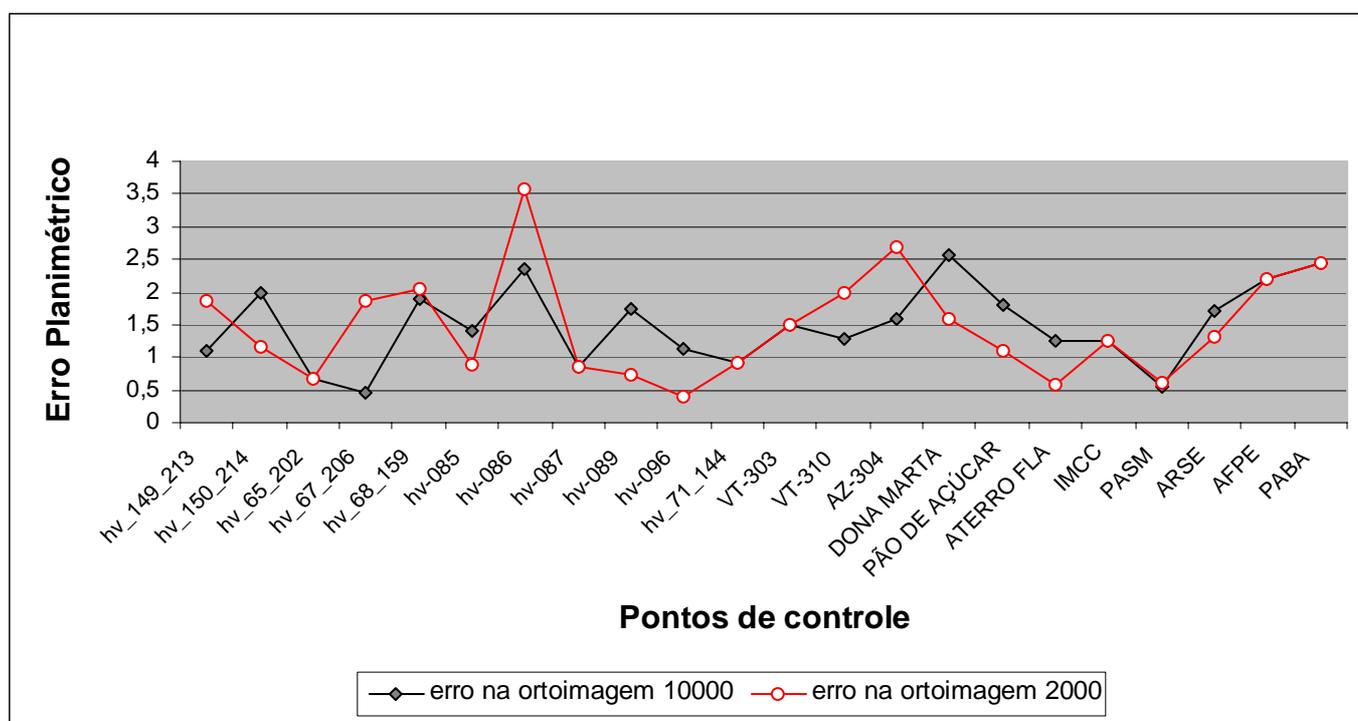


FIGURA 1: Comparação entre a qualidade das duas ortoimagens

De modo geral, pode-se verificar também que os maiores erros ficam próximos aos 2,5 m, a menos de um ponto que ficou em 3,5 m para a ortoimagem gerada a partir do MDT produzido com a base 1:2.000. Considerando-se o Padrão de Exatidão Cartográfica discriminado no Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, temos que as ortoimagens geradas seriam classificadas como documentos cartográficos da classe A para a escala 1:5.000. Pois pelo menos 90% dos pontos apresentam erros menores do que 0,5 mm na escala da carta, o que, para a escala 1:5.000, é 2,5 m.

Um outro aspecto avaliado nas ortoimagens geradas foi a qualidade visual das mesmas. Neste contexto, foi identificado um importante problema que pode ocorrer em relevos bem movimentados. Numa feição específica da área de trabalho, o Morro do Pão de Açúcar, observou-se o problema na imagem ortoretificada (**figura 2b**): devido à oclusão existente por

causa da elevação do sensor ($70,74^\circ$), houve problema na reamostragem dos pixels por ocasião da ortorretificação.



FIGURA 2a: Imagem com elevação do sensor de $70,74^\circ$ - original



FIGURA 2b: Imagem com elevação do sensor de $70,74^\circ$ - ortorretificada

Diante deste problema, foi solicitada a *Space Imaging* uma outra imagem, que possuísse maior elevação do sensor, o que minimizaria a oclusão feita ocasionada pela elevação e o efeito resultante na ortorretificação. Desta forma, foi disponibilizado um par estereoscópico, cujas imagens possuíam ângulos de elevação do sensor de $74,86^\circ$ e $72,37^\circ$. A imagem de maior elevação do sensor foi testada no intuito de se minimizarem os efeitos apresentados na **figura 2b**. Os resultados podem ser observados nas **figuras 3a e 3b**.

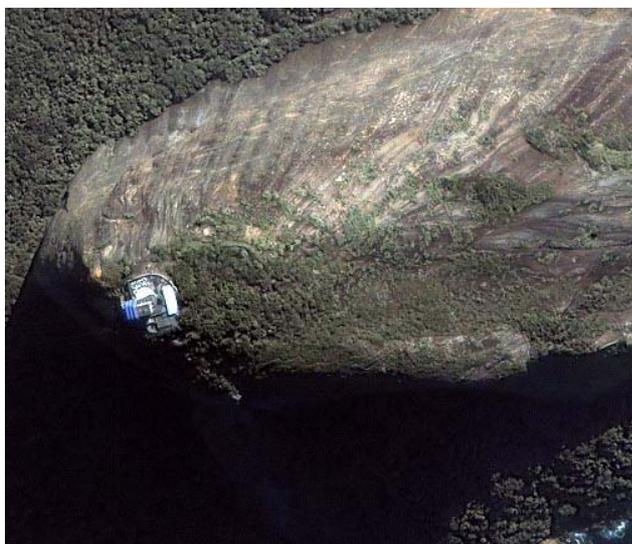


FIGURA 3a: Imagem com elevação do sensor de $74,86^\circ$ - original



FIGURA 3b: Imagem com elevação do sensor de $74,86^\circ$ - ortorretificada

6. Conclusões

As imagens IKONOS II, ortorretificadas utilizando-se o modelo *RPC (Rational Polinomial Camera)* apresentam qualidade geométrica adequada para uso em escalas de até 1:5.000, mesmo para relevos movimentados como o da Cidade do Rio de Janeiro.

Não há melhora significativa na qualidade geométrica das ortoimagens pelo fato de se utilizar um MDT gerado a partir de uma base digital na escala 1:2.000 em relação ao uso de um MDT gerado a partir de uma base digital 1:10.000. Esse fato aponta para um limite na melhora da qualidade da ortoimagem aumentando-se a quantidade de informações na geração do MDT. Seriam interessantes testes com escalas menores do que 1:10.000 para a verificação de uma possível degradação da qualidade.

Diante da apresentação do problema ocasionado pela elevação do sensor da primeira imagem ortorretificada, é recomendável que sejam utilizadas imagens com a mais alta elevação do sensor possível. O problema encontrado no transcórre deste trabalho foi, se não solucionado, ao menos bastante minimizado, com a utilização de uma nova imagem com ângulo de elevação do sensor de 74, 86°. Entretanto, para uma outra área, onde possa existir uma elevação ainda mais alta e íngreme do que o Pão de Açúcar, pode haver necessidade de uma imagem coletada com elevação do sensor até maior.

Há a intenção de dar prosseguimento a esse trabalho, estudando-se maneiras de refinamento do modelo *RPC* utilizando-se pontos de controle medidos no campo, a fim de se melhorar a qualidade da ortoimagem gerada.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa *Space Imaging*, nas pessoas dos Srs. Nisso Cohen, Maurício Braga Meira, Múcio Dias, Vítor França e Bernardo Souza Costa, pela cessão das imagens utilizadas no trabalho; ao Instituto Pereira Passos, pela utilização das bases digitais do Rio de Janeiro e de pontos de campo; ao Sr. Luiz Leonardi, da empresa Imagem, pelo fornecimento de 17 pontos de campo; e ao Sr. Antônio Machado e Silva, pelas sugestões.

8. Referências

- GISPLAN. **Guia de Produtos IKONOS**. Gisplan. 20 de fevereiro de 2003, Rio de Janeiro, RJ.
- Grodecki, J., 2001. **Ikonos Stereo Feature Extraction - RPC Approach**; ASPRS 2001 Proceedings, St.Louis, MO, 23-27 April 2001.
- Hu, Y., Tao, V., Croitoru, A., 2004. **Understanding the rational function model: methods and applications**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 12-23 July, Istanbul, vol. XX, 6 p.
- Mascarenhas, N.D.A., Velasco, F.R.D., 1989. **Processamento Digital de Imagens**. Buenos Aires, Kapelusz, 1989. Quarta Escola Brasileiro-Argentina de Informática, Termas de Rio Hondo, Argentina, janeiro 1989.
- National Imaging and Mapping Agency (NIMA), 2000. **The Compendium of Controlled Extensions for the National Imagery Transmission Format (NITF)**, 2000. Disponível em : <http://164.214.2.51/ntb/baseline/stdi0002/final.pdf>. Acesso em 16 ago. 2004.
- OpenGIS Consortium (OGC), 1999. **The OpenGIS Abstract Specification - Topic 7: Earth Imagery**. Disponível em :<http://www.opengis.org/docs/99-107.pdf>. Acesso em 24 set. 2004.
- Xu, Z., 2004. **The Rational Function Model in Photogrammetric Mapping: Methods and Accuracies** [Master Thesis], Department of Earth Science, York University, 64 p.