

Análise de exatidão cartográfica de ortoimagens Ikonos 2 geradas por modelos empíricos: estudo para uma região da Serra da Mantiqueira

Thiago Batista dos Santos¹
Yosio Edemir Shimabukuro¹
Antonio Roberto Formaggio¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{batista, yosio, formag}@dsr.inpe.br

Abstract. The images from satellite sensors with planimetric accuracy allows them to be used as cartographic documents for geographic positioning, measurements of distances, angles and areas. In images not rectified, these measurements can be done only approximately, due to the shift in image and scaling caused by irregular reliefs and the tilt sensor. The correction of geometric distortions in remote sensing data can be done using models or mathematical functions by empirical or physical models. In this context the objective of this paper is to apply the geometric corrections techniques to Ikonos 2 images acquired over a very hilly area. The results demonstrated the positional quality of raw images, processed with the RPC and RPC processed along with control points. The trend analysis and the planimetric accuracy indicated that Ikonos 2 images can be used as a cartographic scale of 1/4500 with PEC Class A.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, orthorectification, planimetric accuracy, sensoriamento remoto, processamento de imagens, ortorretificação, exatidão planimétrica.

1. Introdução

Entre a década de 1970 e os dias atuais, inúmeros sensores orbitais foram lançados e produziram vastos acervos de dados históricos. Graças a essa disponibilidade de dados é possível realizar estudos de detecção de mudanças na cobertura da terra, monitorar e gerenciar os recursos naturais de forma multitemporal e espacial. Para tanto, são necessárias uma plataforma de integração de dados confiável e correção geométrica das imagens orbitais, em uma base comum, que possua qualidade geométrica compatível com o produto a ser gerado (BALTSAVIAS, 1996).

A exatidão planimétrica de imagens de sensores orbitais permite que elas sejam usadas como documentos cartográficos para posicionamentos geográficos, medições de distâncias, ângulos e áreas. Em imagens não retificadas, essas medições podem ser feitas somente de maneira aproximada, devido ao deslocamento na imagem e mudança de escala, causados por relevos irregulares e pela inclinação do sensor.

A correção de distorções geométricas em dados de sensoriamento remoto é feita com uso de modelos ou funções matemáticas empíricas ou por modelos físicos (TOUTIN, 2004). Geralmente, os modelos físicos são mais precisos do que os empíricos, pois consideram todas as distorções decorrentes do movimento da plataforma (posição, velocidade, atitude), do sensor (ângulos de visada, efeitos panorâmicos), da forma e da representação da superfície da Terra (elipsoide e topografia) e da projeção cartográfica (SHAKER, 2008; TOUTIN, 2006).

Porém, muitas vezes, as distribuidoras de imagens comerciais de alta resolução espacial não disponibilizam os parâmetros de órbita e nem do sensor. Entretanto, são disponibilizados os coeficientes de polinômios racionais (RPC), uma forma genérica de modelar e distribuir tais parâmetros. Considerando este cenário e a disponibilidade de imagens Ikonos 2 e de pontos de controles precisos, o presente trabalho teve como objetivo analisar o desempenho dos RPCs em atenuar as distorções geométricas para uma área de relevo muito acidentado, próximo ao município de Piquete -SP, na Serra da Mantiqueira.

2. Área de Estudo

A área de estudo abrange parte do Médio Vale do Paraíba, da Serra da Mantiqueira e do Sul de Minas Gerais, no Brasil. Estão inseridos nessa área parte dos municípios de Cachoeira Paulista-SP, Cruzeiro-SP, Guaratinguetá-SP, Lorena-SP, Piquete-SP, Delfim Moreira-MG, Marmelópolis-MG, e Virgínia-MG, e.

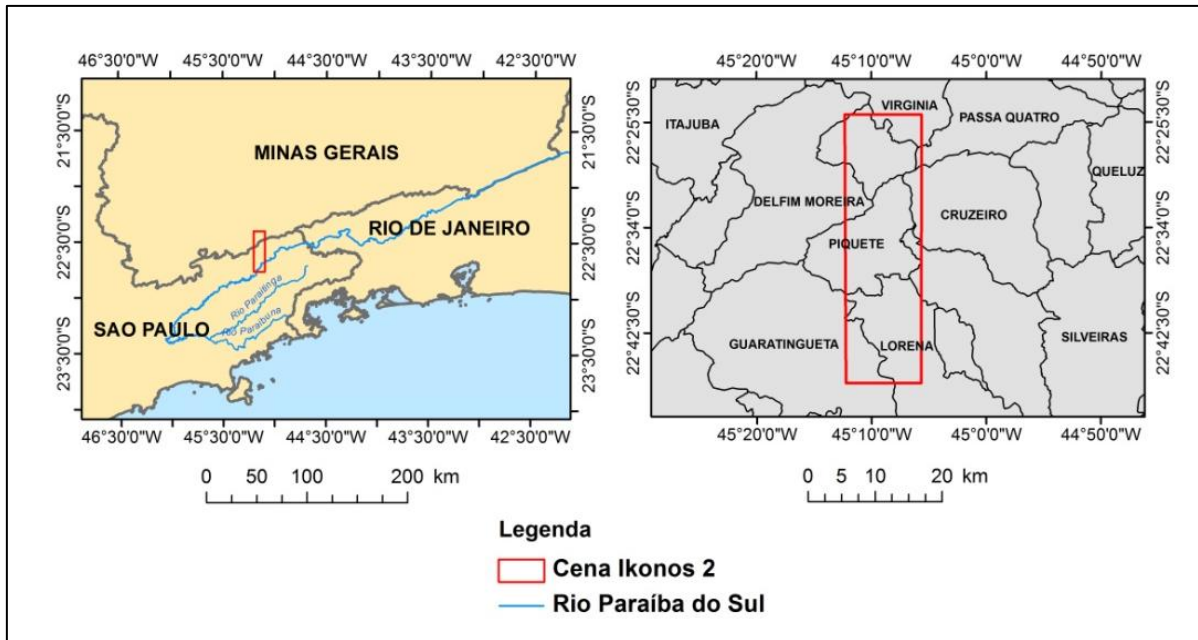


Figura 1: Localização da Cena Ikonos, em torno do município de Piquete-SP, na Serra da Mantiqueira

Essa região possui áreas com relevo suave, moderado e muito acidentado. Grande parcela dessa área representa uma das poucas regiões do país cujo relevo acidentado, de colinoso a montanhoso, tem elevações superiores a 2.000 metros de altitude. Nela é possível encontrar altitudes de 500 a 2422 metros acima do nível do mar.

3. Conjunto de dados

3.1 Imagens Ikonos 2

As características das imagens Ikonos Geo utilizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características das Imagens IKONOS Geo

Data do Imageamento	01/10/2011
Resolução Espacial	1 metro pancromática/ 4 metros multiespectrais
Resolução Radiométrica	11 bits
Resolução Espectral	Pan 0,45 - 0,90 μm Azul 0,45 - 0,52 μm Verde 0,52 - 0,60 μm Vermelho 0,63 - 0,69 μm Infravermelho próximo 0,76 - 0,90 μm
Ângulo de Visada	77,19°
Azimute de Visada	184,02°
Ângulo Azimutal Solar	53,31°

Ângulo de Elevação Solar	60,28°
--------------------------	--------

3.2 Cartas Topográficas

Carta Virgínia - Folha.SF-23-Y-B-III-4/MI-2711-4
 Carta Lorena - Folha.SF-23-Y-B-VI-2/MI-2741-2
 Carta Guaratinguetá - Folha. SF-23-Y-B-VI-4/MI-2741-4

3.3 Softwares

SPRING 5.2;
 Google Earth;
 Google Maps para Smartphone;
 Navegador GPS para Smartphone;
 Carango para Smartphone (gerenciamento de gastos com a viatura) e
 Topcon Tools 7.5.1

3.4 Equipamentos e viaturas

Uma viatura, Chevrolet Celta LS, 2011, equipado com rack e calha para transporte de bicicleta;
 uma mountain bike;
 três extensores de amarração;
 um inversor 12VDC – 110VAC e régua de distribuição;
 um Smartphone, Samsung Galaxy 5, com sistema operacional Android 2.1 ;
 recarregadores de pinhas AA/AAA;
 um laptop;
 máquina fotográfica, Canon EOS Rebel Ti;
 dois receptores GPS *Topcon Hipe Plus L1/L2* e seus acessórios (tripé convencional, base nivelante e trena).

4. Abordagem metodológica

4.1 Modelagem matemática

As imagens Ikonos, selecionadas para o trabalho foram submetidas ao processo de ortorretificação. Para tanto, utilizou-se uma modelagem matemática baseada em polinômios racionais. Esses polinômios relacionam a rede de pontos de controle ou pontos extraídos de uma imagem de referência, por meio de suas coordenadas geodésicas (Latitude - ϕ , Longitude - λ e altitude - H), com a imagem não ortorretificada, por meio de suas coordenadas de imagem (linha - L e coluna - C).

Computacionalmente, o modelo matemático de funções racionais é dividido em duas etapas de processamento. Inicialmente, a função polinomial é computada utilizando-se apenas o endereço da linha da imagem que será ortorretificada. Em seguida, o mesmo processo é feito com o endereço da coluna da imagem. A razão dos polinômios é descrita pelas equações 1.1 e 1.2 (TOUTIN, 2004).

$$\text{Lin}_n = \frac{P(X_n, Y_n, Z_n)}{Q(X_n, Y_n, Z_n)} \quad (1.1)$$

$$\text{Col}_n = \frac{P(X_n, Y_n, Z_n)}{Q(X_n, Y_n, Z_n)} \quad (1.2)$$

em que:

Lin_n = endereço normalizado da linha do pixel da imagem
 Col_n = endereço normalizado da coluna do pixel da imagem
 X_n = valor normalizado da longitude
 Y_n = valor normalizado da latitude
 Z_n = valor normalizado da altitude

Os polinômios P e Q possuem a seguinte forma:

$$P = \sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} A_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k \quad (1.3)$$

$$Q = \sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} B_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k \quad (1.4)$$

$$P = A_0 + A_1Z + A_2Y + A_3X + A_4XY + A_5ZX + A_6YX + A_7Z^2 + A_8Y^2 + A_9X^2 + A_{10}ZYX + A_{11}Z^2Y + A_{12}Z^2X + A_{13}Y^2Z + A_{14}Y^2X + A_{15}ZX^2 + A_{16}YX^2 + A_{17}Z^3 + A_{18}Y^3 + A_{19}X^3 \quad (1.5)$$

$$Q = B_0 + B_1Z + B_2Y + B_3X + B_4XY + B_5ZX + B_6YX + B_7Z^2 + B_8Y^2 + B_9X^2 + B_{10}ZYX + B_{11}Z^2Y + B_{12}Z^2X + B_{13}Y^2Z + B_{14}Y^2X + B_{15}ZX^2 + B_{16}YX^2 + B_{17}Z^3 + B_{18}Y^3 + B_{19}X^3 \quad (1.6)$$

em que:

A_{ijk} e B_{ijk} são os coeficientes dos polinômios racionais (RPC)

A potência máxima para cada grupo de coordenadas (m1, m2, m3, n1, n2 e n3) é limitada a 3. A soma das três potências não poderá exceder o valor 3 ($i+j+k > 3$). Caso isso aconteça, os valores dos coeficientes receberão o valor 0.

As quatro funções polinomiais possuem grupos com três coordenadas: latitude, longitude e altitude. Esses grupos de coordenadas e as duas coordenadas (linha x coluna) da imagem não ortorretificada são normalizados e dimensionados para o intervalo de -1.0 a +1.0, conforme as equações abaixo (TOUTIN, 2004):

$$r_n = \frac{r-r_0}{r_s} \quad (1.7) \quad c_n = \frac{c-c_0}{c_s} \quad (1.8)$$

$$x_n = \frac{x-x_0}{x_s} \quad (1.9) \quad y_n = \frac{y-y_0}{y_s} \quad (2.0)$$

$$z_n = \frac{z-z_0}{z_s} \quad (2.1)$$

em que:

- ✓ r_0 / c_0 = valores médios dos endereços das linhas e colunas, respectivamente;
- ✓ r_s / c_s = valores de fator de escala;
- ✓ $x_0 / y_0 / z_0$ = valores médios para as coordenadas;
- ✓ $x_s / y_s / z_s$ = valores do fator de escala

Todo o processo de ortorretificação foi feito no módulo OrthoEngine do software PCI Geomatic 12.0. Após a seleção do MDE, pontos de controles coletados em campo, bem distribuídos na cena Ikonos, foram identificados e inseridos no software. Para cada pixel da ortoimagem com latitude e longitude conhecidas, o algoritmo usa inicialmente o MDE para determinar a altitude do ponto. Por meio dos polinômios racionais determina-se o pixel na imagem que corresponde ao ponto sobre o terreno no mundo real. A intensidade desse ponto foi atribuída ao pixel de saída na ortoimagem através do método de reamostragem vizinho mais próximo.

4.2 Modelo digital de elevação (MDE)

Foi gerado um MDE da área de estudo, a partir de isolinhas de cartas topográficas do IBGE, na escala de 1:50.000, com equidistância de 20 metros.

Todo o processo de construção do MDE foi feito no software SPRING 5.2. O primeiro passo foi converter as isolinhas do formato .dgn para .spr, formato nativo do SPRING. Tal conversão foi feita com o uso da extensão "dgn2spr" disponível na pasta "util" do diretório de

instalação do SPRING. Após esta conversão as curvas de nível foram importadas e tiveram suas cotas editadas manualmente.

As amostras de cotas foram transformadas em uma rede triangular através da triangulação *Delaunay*, sem linha de quebra. Os parâmetros tolerância de isolinha, distância entre pontos de isolinhas receberam valor 0,1, pois, a fim de preservar todas as amostras de altitude disponíveis não foi feita a simplificação de linhas. Após esta etapa a grade retangular (MDE) foi gerada a partir da grade triangular.

4.3 Dados GPS

A coleta das coordenadas dos pontos de controle e de verificação foi realizada com o uso de receptores GPS (*Global Positioning System*) *Topcon Hiper Plus*, de duas frequências, pelo método de levantamento relativo estático. Para tanto, foram instaladas 3 bases de apoio. Uma no município de Marmelópolis-MG, outra em Piquete-SP e a terceira em Lorena-SP. Elas foram instaladas em locais livres de obstáculos e com um raio de 10 km de abrangência. Tal configuração proporcionou a redução do tempo de amostragem em cada ponto sem comprometer a quantidade de amostras. Isso foi possível, pois, o tempo de registro de cada amostra pôde ser reduzido e a linha de base de cada ponto coletado tornou-se relativamente curta (menor do que 10 km).

Os receptores foram operados com intervalo de amostragem de 05 segundos e com máscara de elevação mínima de 15°. A duração da sessão de observações foi de no mínimo 20 minutos para cada ponto. O pós-processamento dos dados foi feito com o software *Topcon Tools V. 7.51*, com uso das observações das fases das portadoras L1 e L2. A solução admitida foi a Fixa, e o erro padrão admissível nas componentes horizontais foi de no máximo 0,4 cm e na vertical de no máximo 1,5 cm, com 95% de nível de confiança. Destaca-se que a estação CHPI da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - RBMC/IBGE foi utilizada para o transporte de coordenadas das bases.

4.4 Análise de Tendência

As análises de tendências foram feitas seguindo a metodologia proposta por Galo & Camargo (1994). A qualidade geométrica das ortomagens foi identificada com o uso de 37 pontos de verificação independentes, coletados em campo. As distribuições dos pontos de controle e de verificação independentes são apresentadas na figura 2.

As discrepâncias entre as coordenadas observadas nas imagens ortorretificadas e as coordenadas de referência foram calculadas da seguinte forma (GALO; CAMARGO, 1994):

$$\Delta X_i = X_i - X_i^1 \quad (2.2)$$

A média e o desvio padrão das discrepâncias amostrais foram calculados, respectivamente, pelas equações abaixo (GALO; CAMARGO, 1994):

$$\Delta \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.3)$$

$$S_{\Delta X} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2} \quad (2.4)$$

Após os cálculos das estatísticas descritas acima, foram feitos testes de tendência (“t de Student”) avaliados pelas seguintes hipóteses (GALO; CAMARGO, 1994):

$$H_0: \Delta X = 0,$$

$$H_1: \Delta X \neq 0$$

Para testar as hipóteses foi calculada a estatística amostral "t" e foi verificado se o valor de t amostral estava no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula. O valor de t amostral foi calculado por meio da equação 2.5 (GALO; CAMARGO, 1994):

$$t_x = \frac{\Delta\bar{X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n} \quad (2.5)$$

e o intervalo de confiança por:

$$|t_x| < (n - 1, \alpha/2) \quad (2.6)$$

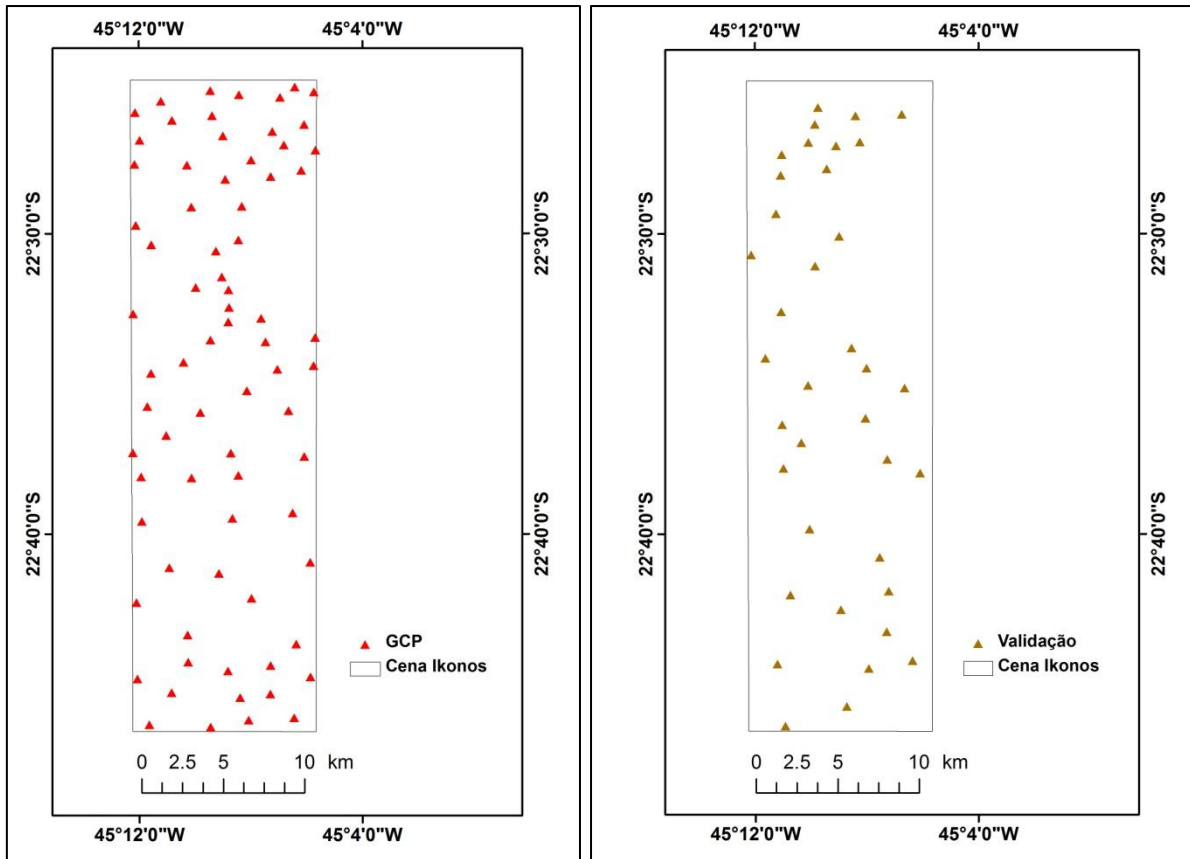


Figura 2: Grupo de pontos de controle à esquerda e de verificação à direita.

Nos casos em que a estatística amostral t estava fora do intervalo de confiança, rejeitou-se a hipótese nula, ou seja, a imagem não pode ser considerada livre de tendências significativas na coordenada testada. A existência de tendências em alguma direção indica a ocorrência de algum problema na geometria da imagem.

4.5 Avaliação do padrão de exatidão cartográfica

A exatidão posicional de imagens orbitais, a exemplo de documentos cartográficos, pode ser avaliada como base nas Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, que estabelece o Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Esse Decreto define o Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) e regulamenta a classificação dos produtos cartográficos quanto sua exatidão (CONCAR, 1984).

A avaliação da exatidão cartográfica foi feita com o uso da metodologia proposta por Galo e Camargo (1994). Esse método utiliza os resíduos existentes entre as coordenadas de pontos retirados de algum produto cartográfico e as de seus homólogos observados em campo ou em um documento oficial que tenha qualidade cartográfica compatível com o produto em análise.

A análise da exatidão foi feita comparando-se o desvio padrão das discrepâncias com o erro padrão (EP) esperado para as classes (valores tabelados pelo Decreto nº 89.817/84). Para tanto, utilizou-se as hipóteses descritas abaixo:

$$H_0: S_{\Delta X}^2 = \sigma_X^2$$

$$H_1: S_{\Delta X}^2 > \sigma_X^2$$

em que:

$s_{\Delta X}$: erro padrão esperado para coordenada analisada.

$\sigma_{\Delta X}$: valor de variância permitido (equação 2.7)

$$\sigma_X = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

Após o cálculo da variância, calculou-se a estatística abaixo, e foi verificado se o resultado estava dentro do intervalo de aceitação:

$$X_x^2 = (n - 1) \frac{S_{\Delta x}^2}{\alpha_x^2} \quad (2.8)$$

$$X_x^2 \leq X^2(n - 1, \alpha) \quad (2.9)$$

(intervalo de confiança)

Nos casos em que a equação 2.9 não foi obedecida, a hipótese H_0 foi rejeitada. A rejeição indica que as imagens não atenderam à exatidão mínima estabelecida para a classe que deveria enquadrar-se.

5. Resultados

Somente pela análise de discrepâncias e do desvio padrão, é possível identificar atenuação das distorções geométricas das imagens. A qualidade geométrica aumentou drasticamente em relação ao uso de RPC e pontos de controle, quando comparado com a imagem original.

Os valores de discrepâncias médias e desvio padrão das ortoimagens geradas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Discrepância média e desvio padrão das ortoimagens geradas

Imagens		Discrepâncias Médias	Desvio Padrão
Imagem Original	Orto(E)	2,5563	4,3925
	Orto(N)	8,0572	61,7946
Ortoimagens com RPC	Orto(E)	2,0368	2,1243
	Orto(N)	1,9783	2,4568
Ortoimagens com RPC e GCP	Orto(E)	-0,0570	0,5791
	Orto(N)	-0,5433	1,5021

Quanto a análise de tendência somente as ortoimagens geradas com uso conjunto do MDE, RPC e pontos de controle apresentaram-se livres de tendências nas componentes N e E. Nas imagens originais os erros sistemáticos podem estar associados ao relevo da área e a características intrínsecas a plataforma e as condições de visada: inclinação da plataforma, distorções panorâmicas, variação de velocidade da plataforma, distorções em perspectiva, rotação terrestre, entre outros (YANALAK et al., 2011). Apesar das informações de efemérides e atitude da plataforma estarem codificadas nos arquivos RPC's das imagens, as ortoimagens geradas por RPC e MDE também apresentaram tendências. Provavelmente, tais tendências estão relacionadas ao relevo da área de estudo. Com a ausência de pontos, a modelagem matemática perde desempenho, pois o ajuste fino entre as coordenadas das imagens, os RPC's e o relevo se torna deficiente.

Os resultados da análise de erros sistemáticos (tendência), para as ortoimagens geradas, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da análise de erros sistemáticos (tendência) para as ortoimagens

Ortoimagens		$t_{amostral}$	$t_{(37-1, 5\%)}$	$t_{amostral} < t_{(37-1, 5\%)}$
Img. Original	Orto(E)	3,5400	1,6883	FALSO
	Orto(N)	0,7931	1,6883	VERDADEIRO

Com RPC	Orto(E)	5,8324	1,6883	FALSO
	Orto(N)	4,8979	1,6883	FALSO
Com RPC e GCP	Orto(E)	-0,5906	1,6883	VERDADEIRO
	Orto(N)	-2,1700	1,6883	VERDADEIRO

As análises de exatidão indicam que as ortoimagens geradas pela modelagem MDE, RPC e pontos de controle possuem qualidade planimétrica compatível à escala 1/4500 com padrão de exatidão cartográfica Classe A.

Os resultados da análise de exatidão das ortoimagens são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados da análise de exatidão das ortoimagens (PEC - Classe A)

Ortoimagens		$X^2_{amostral}$	$X^2_{(37-1, 10\%)}$	$X^2_{amostral} < X^2_{(37-1, 10\%)}$	Escala
Img. Original	Orto(E)	0,2382	47,2122	VERDADEIRO	1/180000
	Orto(N)	47,1429	47,2122	VERDADEIRO	1/180000
Com RPC	Orto(E)	32,0886	47,2122	VERDADEIRO	1/7500
	Orto(N)	42,9229	47,2122	VERDADEIRO	1/7500
Com RPC e GCP	Orto(E)	6,4409	47,2122	VERDADEIRO	1/4500
	Orto(N)	43,3323	47,2122	VERDADEIRO	1/4500

6. Conclusão

Neste trabalho foi possível identificar a qualidade dos coeficientes de polinômios racionais das imagens Ikonos. Foi constatado que as imagens originais, para a área de estudo, só podem ser consideradas PEC Classe A na escala de 1/180.000. Porém, apenas com a modelagem com o uso conjunto do MDE e dos RPC's, as ortoimagens apresentaram PEC Classe A na escala de 1/7.500. Como esperado, a modelagem por RPC, MDE e pontos de controle foi a mais eficaz em atenuar as distorções geométricas das imagens. Após as análises de tendência e de exatidão posicional verificou-se que as imagens geradas por esta modelagem possui PEC Classe A na escala de 1/4.500. Destaca-se que essas imagens possuem potencial para serem utilizadas em escalas maiores, porém, para a área de estudo, seriam necessários um MDE mais refinado (maior escala) e mais pontos de controle, o que poderia inviabilizar o projeto devido a elevação dos custos.

7. Referências bibliográficas

- BALTSAVIAS, E. P. Digital ortho-images - a powerful tool for the extraction of spatial and geo-information. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 51, p. 63–77, 1996.
- CONCAR, I. Decreto Federal nº 89.817, de 20 de junho de 1984, Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. . Retrieved from <http://www.concar.ibge.gov.br/detalheDocumentos.aspx?cod=8.>, 1984.
- GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. **Anais do I Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**, v. 1, n. 1, p. 41–8, 1994.
- SHAKER, A. Satellite sensor modeling and 3D geo-positioning using empirical models. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, n. 3, p. 282–295. doi: 10.1016/j.jag.2007.11.005, 2008.
- TOUTIN, T. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1893–1924. doi: 10.1080/0143116031000101611, 2004.
- TOUTIN, T. Generation of DSMs from SPOT-5 in-track HRS and across-track HRG stereo data using spatiotriangulation and autocalibration. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, n. 3, p. 170–181. doi: 10.1016/j.isprs.2006.02.003, 2006.
- YANALAK, M.; SERTEL, E.; MUSA OGLU, N.; IPBUKER, C.; KAYA, S. Comparison of Planimetric and Thematic Accuracy of OrbView-3 and IKONOS Images. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 39, n. 2, p. 135–146. doi: 10.1007/s12524-011-0084-4, 2011.