

## Aplicação de três métodos matemáticos para georreferenciamento expedito e rigoroso (ortorretificação) de imagens Ikonos II

Joel Gripp Junior <sup>1</sup>  
Vicente Paulo Soares <sup>1</sup>  
José Marinaldo Gleriani <sup>1</sup>  
Agostinho Lopes de Souza <sup>1</sup>  
Carlos Antônio Álvares Soares Ribeiro <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Viçosa – UFV/DEF  
36570-000 – Viçosa – MG, Brasil  
{jgripp, vicente, gleriani, souza, cribeiro}@ufv.br

**Abstract.** In the last ten years, remote sensors with high spatial resolution such as Ikonos II and Quickbird have been used in several fields of science, including cartographic updating, urban planning, Land Use/Land Cover mapping, among others. These images are available in different levels of precision, since raw until orthorectified. In order to get good results from these images, it is necessary that they be orthorectified, which are usually very expensive. Thus, the objective of this work was to evaluate the use of three correction models: affine transformation model, polynomial ratio model and rigorous or parametric model, along with Digital Elevation Model with 2m resolution and 49 Ground Control Points for orthorectifying an image/GEO Ikonos II, obtained in rugged terrain conditions, located in Zona da Mata region, State of Minas Gerais - Brazil. The orthorectified images obtained from the three procedures were evaluated based on cartographic accuracies, which were calculated through the difference between the ground control points coordinates obtained from GPS and the homologous points coordinates extracted from the images. Results showed that the polynomial ratio model got best result, serving the Class A Pattern for 1:5,000 scale, according to the law # 89,817 of June 1984, which establishes the cartographic accuracy pattern.

**Palavras-chave:** orthorectifying, Digital Elevation Model, Ikonos, cartography, ortorretificação, Modelo Digital de Elevação, Ikonos, Cartografia.

### 1. Introdução

Devido à presença de deformações geométricas originadas por diversos fatores (Wolf, 2000), as imagens orbitais não devem ser corrigidas a partir de simples operações de rotações e translações, mas sim submetidas a correções geométricas que podem ser mais rigorosas ou simples, dependendo do modelo de correção geométrica adotado. Assim, as imagens orbitais podem ser georreferenciadas ou transformadas em imagens com qualidade cartográfica após sofrerem correções utilizando-se diferentes metodologias. Com este propósito podem ser utilizados o método polinomial simples, o método polinomial proporcional (ou razão de polinômios) e o método rigoroso (ou paramétrico) Toutin & Cheng (2000).

Além de imagens de alta resolução geradas a partir de uma série de satélites atualmente disponíveis, as imagens Ikonos são muito utilizadas para diversas finalidades, entre elas, a atualização cartográfica. As imagens Ikonos II são produzidas e comercializadas segundo diferentes níveis de processamento, sendo a mais acessível a do tipo *GEO* que possui qualidade geométrica, e a mais elaborada, a do tipo *Precision* com qualidade de uma carta, tendo com isto, sido submetida às correções geométricas inerentes à uma ortorretificação ou georreferenciamento rigoroso Toutin & Cheng (2000).

O objetivo deste trabalho foi aplicar três métodos matemáticos para o georreferenciamento expedito e rigoroso (ortorretificação) de uma imagem Ikonos II, tipo GEO, de uma região montanhosa, obtida em condições quase que extremas do pondo de vista de inclinação do sensor (visada *off-nadir*).

## 2. Metodologia de trabalho

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo encontra-se situada na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais, contemplando parte dos municípios de Canaã, Araponga e Ervália. Está compreendida entre os meridianos de 42° 31' 19" W e 42° 37' 20" W e entre os paralelos 20° 40' 22" S e 20° 45' 41" S.

A escolha desta área de estudo, teve como motivação, o fato da região ser uma amostra típica e representativa da Zona da Mata mineira, e se caracteriza por um relevo que varia de ondulado a montanhoso, com altitude mínima de 661 m e máxima de 1.309 m. A Tabela 1 mostra a distribuição das fases do relevo, segundo classificação utilizada por Resende et al. (2002), e aplicado à região do estudo.

A vegetação natural da região pode ser classificada como Floresta Estacional Semidecidual, ou seja, parte das espécies arbóreas perde folhas no período correspondente ao inverno. Este tipo de vegetação é condicionado pelo comportamento estacional do clima, que apresenta verão quente com chuvas intensas, seguidas de inverno seco com queda acentuada de temperatura, Meira (2006).

Numa parte considerável da região as terras são utilizadas para a agricultura, principalmente com milho, café e feijão, sendo também utilizadas para a pecuária, com grandes porções de terras em pastagem limpas e sujas.

Tabela 1 - Distribuição das fases do relevo na área de estudo

Fases	Declividade (%)	Área (ha)	%
Plano	0 – 3	200,5312	1,6
Suavemente ondulado	3 – 8	875,4164	7,0
Ondulado	8 – 20	3.070,1144	24,6
Fortemente ondulado	20 – 45	5.455,8232	43,8
Montanhoso	45 – 75	2.214,7240	17,9
Escarpado	>75	635,4544	5,1
Total		12.452,0636	100,0

### 2.2 Imagem Ikonos II utilizada no estudo.

A imagem Ikonos II disponibilizada para o estudo é do tipo *GEO*, pancromática com 1,0 m de resolução espacial, foi obtida no dia 31 de maio de 2005, abrangendo uma área de 11 por 11 km, possuindo as seguintes características:

- Tamanho do pixel: 1 metro pancromático.
- Ângulo de elevação do sol: 42,81415°
- Ângulo azimutal do sol: 26,7147°
- Ângulo de elevação nominal: 64,73846°
- Ângulo azimutal da imagem: 295,2658°
- Direção da varredura: 180,02°
- Sistema geodésico: WGS84

### 2.3 – Georreferenciamento de imagens orbitais

Tal como em Fonseca (2004), pode-se classificar o georreferenciamento de imagens orbitais de dois modos distintos, o primeiro em que se realiza uma simples correção geométrica planimétrica, o **georreferenciamento expedito**, que faz uso de apenas pontos de

controle terrestres, e o segundo, o **georreferenciamento rigoroso**, onde é realizada a ortorretificação da imagem utilizando, além dos pontos de controle terrestres, um modelo digital de elevação (MDE).

As distorções geométricas podem ser eliminadas e/ou reduzidas, utilizando-se de modelos de correção geométrica. Entre os procedimentos matemáticos com aplicação em sensoriamento remoto, pode-se citar: Método Polinomial Simples, Método Polinomial Proporcional (ou Razão de polinômios) e Método do Modelo Rigoroso.

### **2.3.1 - Método Polinomial Simples**

Trata-se de um método que faz uso de um modelo polinomial onde são estimados coeficientes de transformação a partir de pontos de controle terrestres identificáveis na imagem e com localização geodésica precisamente conhecida. O uso do polinômio do primeiro grau (projeção ou transformação afim) é o mais utilizado. Lugnani (1987) diz que o modelo matemático de projeção afim, que também é conhecido como Equação de Projeção Paralela, projeta o espaço 3D para o plano 2D, e diz tratar de um caso particular de uma projeção central onde o centro de projeção é deslocado para o infinito. É um método que apresenta bons resultados para regiões planas ou aproximadamente planas, já que não considera a altimetria do terreno.

### **2.3.2 - Método polinomial proporcional ou Modelo Funcional racional**

O Modelo Funcional Racional utiliza coeficientes polinomiais racionais que são calculados a partir dos dados da câmara do sensor e da órbita do satélite. As agências de distribuição de imagens podem disponibilizar estes coeficientes para imagens de alta resolução como as originárias do Ikonos II e do Quickbird, conforme Pinheiro (2003).

Na situação das imagens onde não se dispõem dos parâmetros de órbita, pode-se realizar também um ajustamento tal como se faz pelo procedimento polinomial (transformação afim).

Segundo o *PCI Geomatics* (2003), os cálculos com as funções racionais conduzem a uma maior precisão que o método polinomial.

A *Space Imaging* fornece para alguns de seus produtos os coeficientes de transformação, que inseridos nas funções racionais polinomiais, vem a constituir uma expressão matemática precisa do relacionamento entre o terreno e a imagem, e vice-versa. Desta forma, o usuário reconstitui a geometria de coleta da imagem sem necessidade de conhecimento explícito dos parâmetros de posicionamento e orientação do sensor (efemérides e atitude do satélite). Neste caso, a precisão final da ortorretificação é limitada somente pela precisão do MDE da área de interesse, e dos pontos de controle terrestres.

Se a imagem não dispõe dos coeficientes polinomiais racionais (ou coeficientes de transformação), pode-se realizar um ajustamento de observações pelo método dos mínimos quadrados, tal como o realizado para o método polinomial simples, só que neste caso o número de pontos de controle é bem superior Toutin (2000).

### **2.3.2 – Método rigoroso ou paramétrico**

O método rigoroso é considerado o mais preciso, e considera as informações do satélite e do sensor, refletindo a realidade física da geometria da visada completa e corrige as distorções da plataforma, conforme Pinheiro (2003), Toutin (2000), Toutin (2004) e outros. Este método é baseado no uso das equações de colinearidade adaptadas para as técnicas de aquisição das imagens orbitais, e exige o conhecimento de propriedades físicas do processo de aquisição da cena, e parâmetros de órbita da plataforma que nem sempre são disponibilizadas pelos fornecedores das imagens.

Thierry Toutin, pesquisador do Centro Canadense de Sensoriamento Remoto – CCRS, desenvolveu uma técnica de extração dos dados/parâmetros necessários para a implantação do

método rigoroso, a partir da imagem e do seu arquivo de metadados. Esta técnica foi implementada no módulo *OrthoEngine* do programa *PCI Geomatics*. Em Toutin (2000) e outros, encontram-se afirmações, e também experimentos em que este método apresentou melhores resultados.

#### **2.4 Pontos de controle terrestres e de checagem.**

As coordenadas dos pontos necessários para a ortorretificação e verificação de resultados, foram obtidas utilizando o posicionamento GPS. Conforme o recomendado nas normas do INCRA para posicionamento de imóveis rurais, adotou-se como critério para a definição da metodologia de posicionamento com GPS, que os pontos tivessem precisão superior a 0,5 m.

Para atender esta precisão, o método empregado foi o estático com um tempo mínimo de rastreamento de uma hora. Um ponto base foi lançado aproximadamente no centro da área com 8 horas de rastreamento em um equipamento de dupla frequência.

Para a escolha dos locais do ponto base e dos pontos medidos, adotou-se como critério:

- Boas condições para a recepção de sinais emitidos pelos satélites;
- Pontos bem definidos na imagem, e com uma distribuição homogênea por toda a área de estudo.
- Preferencialmente, pontos situados em posições altimétricas extremas, ou seja, pontos situados em posições mais altas e mais baixas do terreno.

Os pontos de controle são os que participam do ajustamento no modelo matemático da ortorretificação, já os pontos de checagem não participam do ajustamento e servem para verificação da qualidade do produto resultante. Entre os pontos obtidos, foram selecionados 43 bem visualizados e com distribuição uniforme na imagem, para servirem como pontos de checagem. Para o experimento apresentado neste trabalho foram escolhidos 49 pontos de controle terrestres bem distribuídos ao longo da imagem, e preferencialmente localizados em posições mais altas e baixas do terreno.

#### **2.5 Geração do Modelo Digital de Elevação – MDE**

A opção disponível para a geração do MDE da região de estudo foi a utilização do mapeamento digital do IBGE, originário da escala 1:50.000, com equidistância de 20 m. Como a região de estudo não estava em apenas uma carta, houve a necessidade de realizar um recorte das mesmas e um correspondente ajuste, para a geração do MDE necessário à ortorretificação. Como ajustes, citam-se: a junção de curvas de nível das diferentes cartas, a introdução de altitudes nas curvas de nível, o estudo da coerência da rede hidrográfica, etc. Todo este estudo foi realizado utilizando-se das ferramentas do programa ARCGIS.

Com as curvas de nível, rede de drenagem e limite das áreas coerentes, gerou-se o MDE com resolução de 2 m utilizando a ferramenta TOPOGRID do ARCGIS (Figura1). Como a imagem original se encontrava no sistema de projeção UTM e sistema geodésico WGS84, optou-se por trabalhar com o MDE também nestes sistemas e utilizar as altitudes ortométricas.

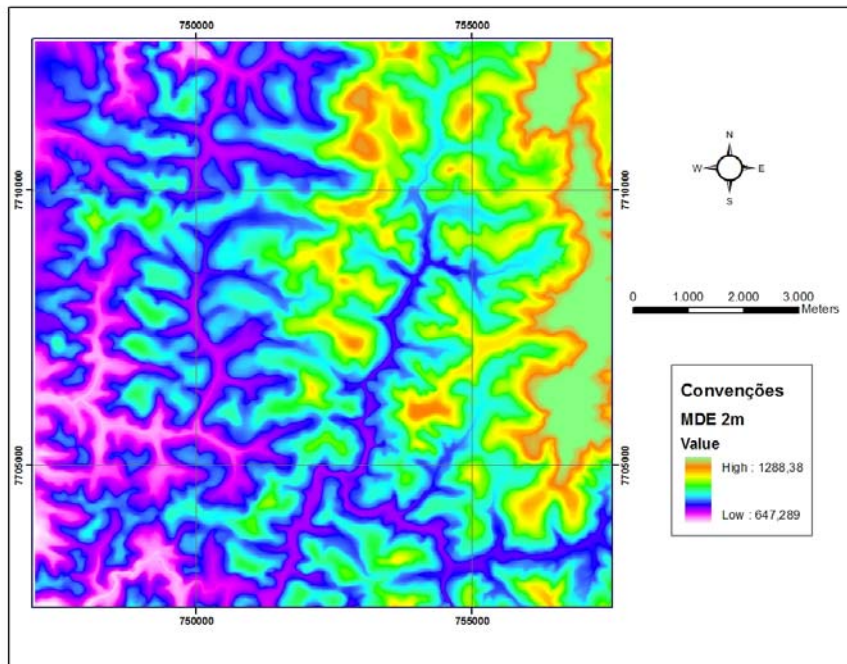


Figura 1 – Modelo Digital de Elevação da região em estudo.

### 2.6 Aplicação dos tratamentos matemáticos da imagem

Para proceder os tratamentos matemáticos propostos neste trabalho foi utilizado o programa *OrthoEngine* do *PCI Geomatics* que dispõe destas ferramentas.

### 3. Resultados e Discussão

A verificação dos resultados foi realizada tomando-se adequadamente 43 pontos para checagem com medidas de coordenadas nas ortomagens resultantes da aplicação dos diferentes métodos, cujos resultados foram comparados com os resultados da medição de campo utilizando o rastreamento GPS. Na Figura 2 encontram-se as deformações resultantes para cada ponto de checagem nos três métodos testados. Já na Figura 3 encontram-se as deformações médias, máxima e os RMSs resultantes da aplicação dos três métodos.

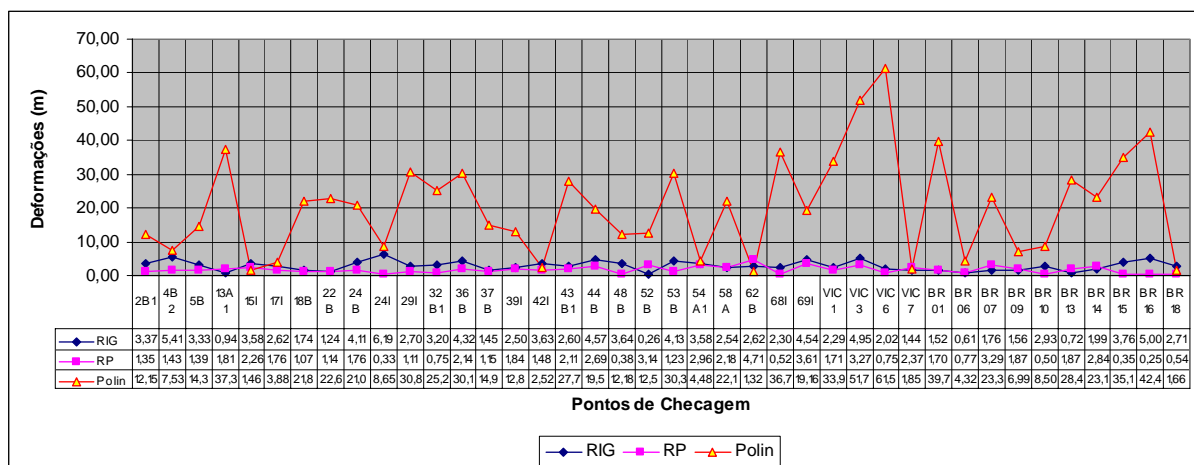


Figura 2 – Deformações resultantes dos pontos de checagem e com 49 pontos de controle terrestres com a aplicação dos três métodos: Rígido (RIG), Razão de Polinômios (RP) e Polinomial (Polin).

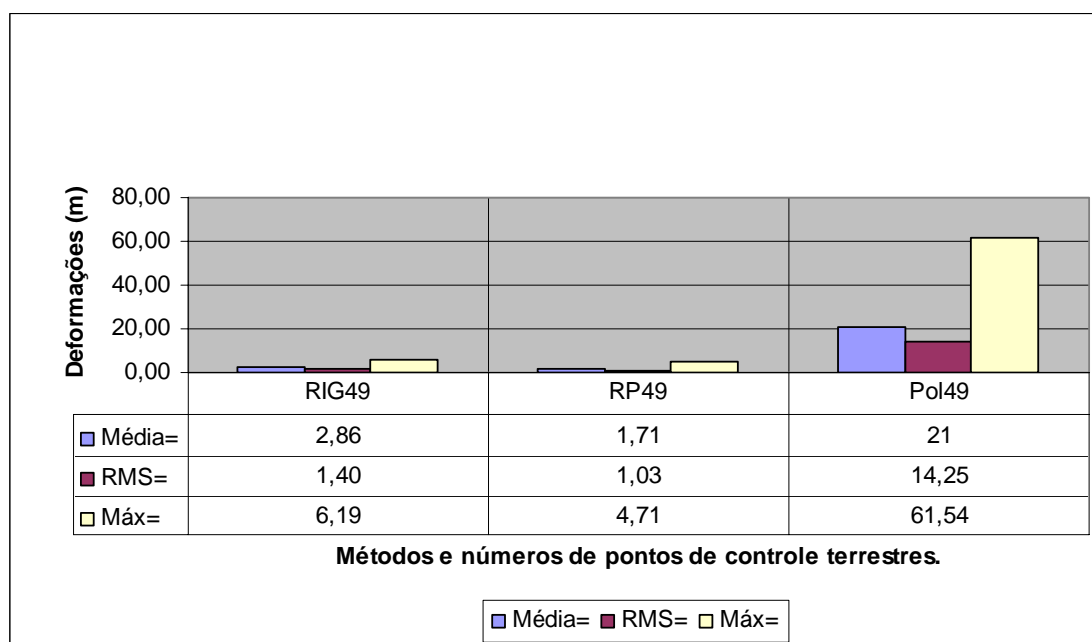


Figura 3 – Deformações médias, RMSs e máximas resultantes da medição nos pontos de checagem com a aplicação dos três métodos (Rigoroso, Razão de Polinômios e Polinomial) e 49 pontos de controle terrestres.

Na Tabela 2 encontra-se, de forma resumida, os resultados das análises estatísticas realizadas objetivando a verificação do padrão de exatidão e precisão nas imagens resultantes da aplicação dos três métodos.

Analisando a disposição e os dados que constam na figura 2 verifica-se que as deformações nos pontos de checagem das ortomagens são consideravelmente inferiores às deformações apresentadas na imagem que sofreu apenas correção planimétrica com o uso do método polinomial simples.

#### 4. Conclusões

Pela análise dos resultados da aplicação do método polinomial simples, método das razões de polinômios e o método rigoroso, em uma imagem Ikonos II obtida fora do nadir e em condições quase que extremas (ângulo de elevação 64,73846°), verificou-se a importância da correção do relevo mediante os procedimentos de ortorretificação, levando a média das deformações superiores a 20 metros, para próximo de 2 metros.

Pelas análises estatísticas realizadas, o método das razões de polinômios apresentou resultado superior em relação ao método rigoroso, apresentando Padrão de Exatidão Cartográfica e Erro Padrão Classe A para a escala 1:5000. Já com o uso do método rigoroso a ortomagem apresentou Padrão de Exatidão Cartográfica e Erro Padrão Classe B para a escala 1:5000.

Tabela 2 – Análise estatística do padrão de exatidão e precisão das ortoimagens

	Método →	RP 49pct	RIG 49pct
Dados	Média amostral $\bar{X}$	1,71	2,86
	Desvio padrão amostral (s)	1,03	1,40
	Número de amostras (n)	43	43
	Grau de liberdade (n-1)	42	42
	Intervalo de confiança (IC)	90%	90%
Padrão de Exatidão Escala 1/5.000  CONDIÇÃO:  $t_{calculado} < t_{(\alpha, n-1)}$	PEC máximo (Classe A) $\mu_o$	2,50	2,50
	$t_{(\alpha, n-1)}$ (Tabela <i>t de Student</i> ) ( $\alpha=1-IC$ )	1,303	1,303
	$t_{calculado}$ $t_{calc} = \frac{(\bar{X} - \mu_o) \sqrt{n}}{s}$	-5,029	1,686
	$\mu \leq \bar{X} + (t_\alpha) \left( \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \leq$	1,91	4,13
	Satisfez a condição?	Sim	Não
	PEC máximo (Classe B) $\mu_o$		4,0
	$t_{calculado}$		-5,339
			SIM
Avaliação da Precisão: Escala 1/5.000  CONDIÇÃO:  $\chi_x^2 \leq \chi_{(n-1; \alpha)}^2$	Erro padrão máximo (Classe A) $\sigma_o$	1,50	1,50
	$\chi_\alpha^2$ ( $\nu=42, p=0,10$ ) (Tabela $\chi^2$ )	54,077	54,077
	$\chi_{1-\alpha}^2$ ( $\nu=42, p=0,90$ ) (Tabela $\chi^2$ )	30,779	30,779
	Desvio padrão populacional ( $\sigma$ ) $\sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi^2_{(1-\alpha)}}$	1,203	1,635
	$\chi_x^2$ amostral $\chi_x^2 = (n-1) \frac{s^2}{\sigma_o^2}$	19,80	36,58
	Satisfez a condição?	Sim	Não
	Erro padrão máximo (Classe B) $\sigma_o$		2,50
	$\chi_x^2$ amostral		13,17
	Satisfez a condição?		Sim

## 5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte financeiro, e ao Instituto de Geociências Aplicadas de Minas Gerais (IGA-MG) pelo apoio técnico e permissão de uso dos programas de computadores.

## 6. Referencias bibliográficas

Andrade, D. F. P. N. – **Avaliação da Exatidão de Documentos Cartográficos** – Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, Edição número 44, outubro de 1991, p.8 – 11.

Brasil. Decreto número 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil**, Brasília, n. 120, p8884-8886, 22 jun. 1984.

FONSECA, A. M. **Exploração de Imagens de Satélites de Alta Resolução**. – Lisboa, 2004. Informação Técnica de Detecção Remota, 35p.

IBGE 2001. Mapa Índice Digital - **Mapeamento Geral do Brasil**. 1ª Edição, CD-ROM.

Leal, E. M. – **Análise da Qualidade Posicional em Bases Cartográficas Geradas em CAD** – Apostila , IGA-MG, Belo Horizonte, 2006, 61p.

Meira, A. D. et al. **Relatório e Plano de Controle Ambiental – Central Geradora Hidrelétrica (CGH) Limoeiro**. 82p, 2006.

PCI Geomatics Inc. **OrthoEngine User Guide: version 9.1**, Canada, 2003.

Pinheiro, E. S. **Avaliação de Imagens QuickBird na Análise Geográfica de um Setor da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), INPE, 2003, 137p.

Resende, M., Lani, J. L. & Resende, S. B. **Pedossistemas da mata atlântica: considerações pertinentes sobre a sustentabilidade**. Revista árvore, Viçosa, v. 26, p161-269, 2002.

Toutin, T. & Cheng, P. **Demystification of Ikonos**. Earth Observation Magazine EOM, 2000, 9p.

TOUTIN T Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird. **IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING** 42 (10): 2121-2129 OCT 2004

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.

WOLF, P.R. **Elements of photogrammetry**. New York: MacGraw-Hill, 2000. 628p.