

Desenvolvimento de um Sistema de Orientação e Restituição de Estereomagens Orbitais

Júlio Kiyoshi Hasegawa

Universidade Estadual Paulista - UNESP/FCT
19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil
hasegawa@fct.unesp.br

Abstract. This paper aims to present one system of orientation and restitution the digital images using stereoscopic resources. The orientation of the pair of images was performed with the models of transformation DLT (Direct Linear Transformation), APM (Affine Projection Mode), 2nd order polynomial and rational equations of 1st order. To validate the developed system was performed ALOS/PRISM-1B imaging experiments, the results showed that the system was successfully developed.

Palavras-chave: Sensor Pushbroom, Stereoscopic Model, Photogrammetric Restitution

1 INTRODUÇÃO

Segundo Oliveira (1993) restituição (fotogramétrica) é “a elaboração de um mapa, ou parte dele, a partir de fotografias aéreas e de dados de controle geodésico, por meio de instrumentos fotogramétricos”. Neste sentido, pode-se dizer que a restituição é um procedimento de transferência de informações contidas nas imagens para o mapa com o uso de instrumentos denominados de restituidores (analógicos, analíticos ou digitais). Neste trabalho será tratado, somente o caso digital.

Assim um restituidor é um instrumento capaz de transformar a imagem obtida pela projeção perspectiva em projeção ortogonal, que é o sistema de projeção de uma carta ou mapa.

Na geração de uma carta ou mapa fotogrametricamente algumas operações devem ser realizadas nos restituidores, cuja finalidade consiste na formação do modelo estereoscópico (matematicamente) que é utilizado para as medidas (observações) dos pontos a serem restituídos. Assim, a observação estereoscópica do modelo e conseqüentemente dos pontos homólogos são de fundamental importância para o processo de restituição.

Ao observar, com os dois olhos, as regiões homólogas nas duas imagens a percepção de profundidade, ou visão estereoscópica (tridimensional) será formada na mente do observador (WOLF, 1988). Essa observação não é natural, pois os eixos ópticos dos 2 olhos deverão permanecer paralelos (posição que fica ao observar para o infinito) e a focalização será a uma distância de aproximadamente 250mm (posição de leitura – cujos eixos ópticos ficam convergentes).

Neste sentido, para auxiliar na visualização estereoscópica (3D) a partir de um par de imagens, utiliza-se de equipamentos e técnicas auxiliares: estereoscópios, cintilamento, polarização e anaglifo (MIKHAIL e BETHEL, 2001). Para programar as técnicas de cintilamento, polarização, anaglifo, computacionalmente, é necessária a utilização vários recursos computacionais (softwares e hardwares) mais sofisticados.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema capaz de orientar um par de imagens orbitais e restituir feições de interesse. O processo de visualização será desenvolvido utilizando-se estereoscópio de espelho colocado à frente da tela do computador.

O processo de restituição consiste basicamente em observar na tela do PC os pontos das feições (estereoscopicamente) que o sistema fotogramétrico processa os dados com o modelo matemático de transformação para determinar as coordenadas ajustadas dos pontos.

2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ORIENTAÇÃO E RESTITUIDOR DE IMAGENS

Para a descrição do protótipo hora proposto dividiu-se a concepção em duas etapas distintas:

- Desenvolvimento do sistema de observação com estereoscópio de espelho na frente do monitor do computador; e
- Módulos de orientação e restituição das feições a serem restituídas.

O software foi desenvolvido em linguagem C/C++ usando a plataforma C++ Builder da Borland para ambiente Windows.

2.1 Módulo de observação estereoscópica

A visão estereoscópica está relacionada à capacidade das pessoas observarem a profundidade, ou seja, a percepção tridimensional do ambiente na qual ela está inserida. Ao observar um objeto com os dois olhos, como eles são separados, o olho da esquerda recebe uma imagem um pouco diferente do olho da direita. Ao receber essas imagens, o cérebro as funde em uma única, gerando-se assim, a sensação de profundidade da cena observada. Essa sensação é provocada pelo deslocamento aparente nas imagens dos pontos objetos obtido de dois pontos de vista distinto, provocando um efeito (deslocamento dos pontos homólogos) denominado de paralaxe estereoscópica.

Da mesma forma, as imagens funcionam como o olho humano (gera imagens sob a projeção central), possibilitando o registro dos detalhes do instante da exposição. Se forem tomadas duas fotos de pontos de vista distintos, as imagens podem ser observadas estereoscopicamente.

Para obter a visualização estereoscópica a partir dos pares de imagens, basta observá-las com o olho da direita, a da direita, e com o olho da esquerda a mesma região da outra. Para ter uma perfeita visão estereoscópica e facilitar a observação estereoscópica, os estereoscópios de espelhos, com suas lentes atuam como focalizador e realiza a acomodação, tornando o procedimento mais agradável para a observação.

Desta forma, basta visualizar no monitor do computador as regiões homólogas e colocar o estereoscópio de espelho em frente para possibilitar a visão 3D da cena. A Figura 1 apresenta o protótipo do sistema desenvolvido com o estereoscópio de espelho na frente do monitor.

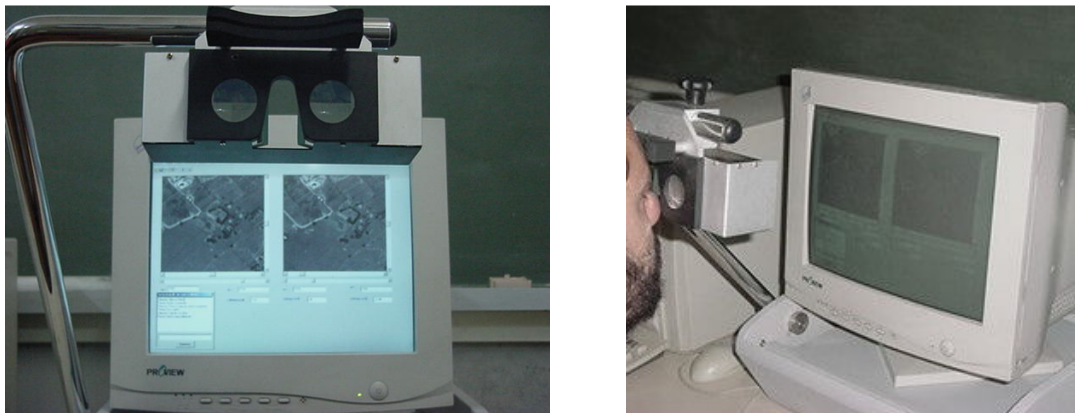


Figura 1: Protótipo do sistema de restituição com estereoscópio de espelho.

2.2 Modelos matemáticos de orientação de imagens de satélites

A orientação de um modelo estereoscópico em imagens obtidas por câmaras de quadro são concretizadas pelas orientações interior e exterior.

A Orientação Interior (OI) tem como objetivo recriar a mesma geometria dos feixes de raios gerados pela câmara no instante da aquisição. A Orientação Exterior (OE) consiste em determinar a mesma posição e atitude de cada foto no instante da tomada, segundo um referencial terrestre. Geralmente utilizam-se as equações de colinearidade para determinar os elementos de orientação exterior. As equações de colinearidade partem do princípio que o ponto imagem, o centro perspectivo e o ponto imagem estão alinhados (maiores detalhes podem ser vistos em ANDRADE, 1998; LUGNANI, 1987; WOLF e DEWITT, 2000; MIKHAIL e BETHEL, 2001).

Essas soluções são válidas para as imagens obtidas com sensores de quadro, na qual gera uma imagem matricial instantânea do terreno. No sensor linear *pushbroom* cada linha que compõe a imagem é tomada em um instante distinto, impondo condições diferentes de orientação.

Assim, cada linha da cena, é uma imagem independente e tem sua própria posição e orientação devido ao movimento da plataforma, tornando o processo de orientação dessas imagens uma tarefa mais complexa do que a de quadro (MIKHAIL e BETHEL, 2001).

No sensor linear *pushbroom* cada linha que compõe a imagem é tomada em um instante diferente, a imagem disponibilizada é composta de várias tomadas (linhas), conforme a Figura 2.

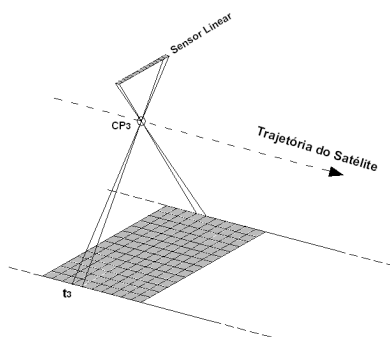


Figura 2: Princípio da formação da imagem com sensor *pushbroom*.

(Fonte: Adaptado de WOLF e DEWITT, 2000)

Esses modelos podem ser classificados, basicamente, em dois grupos os rigorosos (físicos) e os não paramétricos (generalizados) (MEDEIROS, 2007).

Segundo Kim e Dowman (2006) os modelos rigorosos empregam os parâmetros físicos do sensor e da plataforma, em suas representações matemáticas (modelo de plataforma). As maiorias dos modelos físicos utilizam as equações de colinearidade modificadas.

Os modelos não paramétricos a transformação 2D para 3D são realizadas por algumas funções que não necessitam dos parâmetros físicos do sensor, utilizando pontos de apoio do terreno para estimar os parâmetros de transformação (TONOLO e POLI, 2010).

Os métodos de orientação baseados em modelos não paramétricos, como funções de polinômios racionais, projeções afins e Transformação Linear Direta (DLT) são principalmente usados para imagens orbitais de alta resolução (POLI, 2010). Esses modelos são alternativas viáveis quando os modelos do sensor e da plataforma não são fornecidos.

Neste sentido, para este trabalho foram implementados o modelo de Transformação Linear Direta - DLT acrônimo de (*Direct Linear Transformation*); modelo polinomial com 20 parâmetros; transformação Afim Paralela - APM acrônimo de (*Afine Projection Model*); e os polinômios racionais de primeiro grau.

2.2.1 Transformação Linear Direta

A DLT realiza a transformação de coordenadas cartesianas 2D para as coordenadas de cartesianas 3D. Modelo aplicado em casos onde os parâmetros de orientação interior da câmara são desconhecidos.

$$\begin{aligned} u &= L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - uL_9X - uL_{10}Y - uL_{11}Z - ur^2 L_{12} \\ v &= L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8 - vL_9X - vL_{10}Y - vL_{11}Z - vr^2 L_{12} \\ r^2 &= u^2 + v^2 \end{aligned} \quad \begin{matrix} (1) \\ (2) \end{matrix}$$

onde:

u e v são as coordenadas 2D dos pontos no espaço imagem;
X, Y, Z são as coordenadas 3D dos pontos no espaço objeto; e
L_i (p/ i=1,..11) são os parâmetros da DLT.

Reescrevendo a equação 1 de forma a permitir algumas simplificações par que possa considerá-la linear e inserindo o primeiro termo da distorção radial, obtém-se:

2.2.2 Modelo Polinomial

As equações 3 representa o modelo polinomial de segunda ordem.

$$\begin{aligned} u' &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5xz + a_6yz + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2 \\ v' &= a_{10} + a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14}xy + a_{15}xz + a_{16}yz + a_{17}x^2 + a_{18}y^2 + a_{19}z^2 \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

u' e v' são as coordenadas imagens normalizadas (0-1) dos pontos;
x, y, z são as coordenadas 3D dos pontos no espaço objeto normalizadas (0-1); e
a_i para i=0, ...,19 são os parâmetros do polinômio.

2.2.3 Transformação Afim Paralela

APM (*Afine Projection Model*) é conhecida como Equação de Projeção Paralela que projeta o espaço R3 no plano R2.

$$u' = a_1x + a_2y + a_3z + a_4 \quad (4)$$

$$v' = a_5x + a_6y + a_7z + a_8$$

onde:

x, y são as coordenadas de pontos no referencial da imagem;
X, Y, Z são as coordenadas de pontos no referencial de terreno; e
a₁, a₂,...,a₈ são os parâmetros de transformação.

2.2.4 Polinômios Racionais

As equações 5 representam genericamente os polinômios racionais.

$$Linha(X_n, Y_n, Z_n) = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{p_2(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad (5)$$

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

onde:

Linha (X_n, Y_n, Z_n) e Coluna (X_n, Y_n, Z_n) representam as coordenadas normalizadas do espaço imagem;
 $X_n, Y_n, e Z_n$ representam as coordenadas normalizadas do espaço objeto e
 $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}$ e d_{ijk} são os coeficientes da transformação, denominados de Coeficientes Polinomiais Racionais (RPCs).

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS *PUSHBROOM*

O sistema possibilita a digitalização (restituição fotogramétrica) de feições no espaço 2D ou 3D, ambos com possibilidade de observação estereoscópica da cena. O processo de digitalização 2D, na prática, não necessita de recursos estereoscópicos, no entanto se esse recurso for disponível feições altimétricas podem ser mapeadas no espaço 2D.

No modo 2D, a digitalização das feições é realizada no espaço imagem em coordenadas de tela, não necessitando portanto de nenhuma orientação das imagens.

No modo 3D, o par de imagens digitais é orientado utilizando uns dos modelos apresentados nos itens 2.2.1 a 2.2.4 e possibilita a restituição das feições. As feições podem ser gravadas em arquivo texto com as coordenadas 3D ou 2D no formato público (DXF) do AutoCad (2D ou 3D).

A Figura 3 ilustra a sequencia de possíveis operações, com pares estereoscópicos de imagens digitais. Lembrando que essas operações podem ser realizadas em qualquer tipo de imagens digitais, desde que sejam pares estereoscópicos.

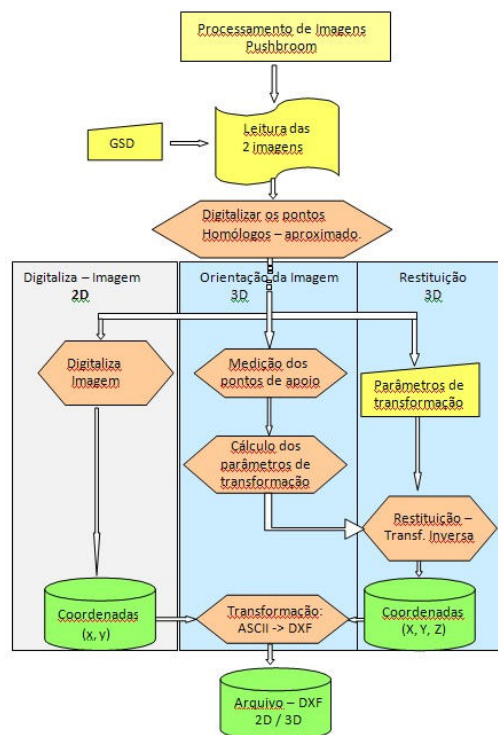


Figura 3: Fluxograma das operações do Sistema.

Ao iniciar o programa, as imagens reamostradas são visualizadas (Figura 4) e habilita 3 opções: Digitaliza (2D); Orientação das Imagens; e Restituição. Para habilitar a tela para visualização estereoscópica deve-se identificar os pontos homólogos e clicar sobre, para que a visualização das regiões homólogas seja visualizada.

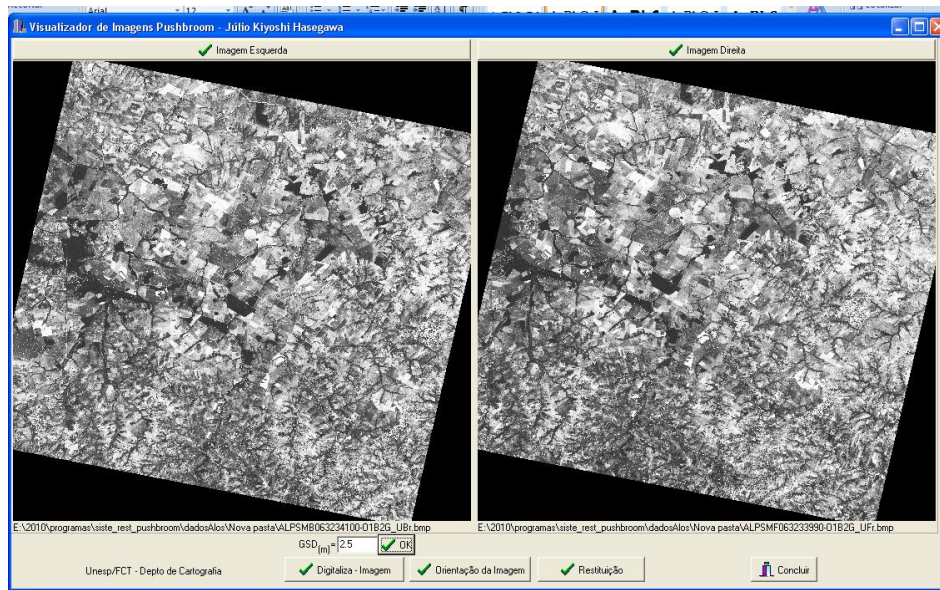


Figura 4: Tela inicial do programa.

A Figura 4 ilustra a tela de restituição, onde algumas feições são restituídas. No módulo, as feições que são digitalizadas são destacadas em vermelho na imagem e as coordenadas 3D dos pontos calculados são enviados para a caixa de texto, que podem ser gravadas (arquivo) a qualquer instante.

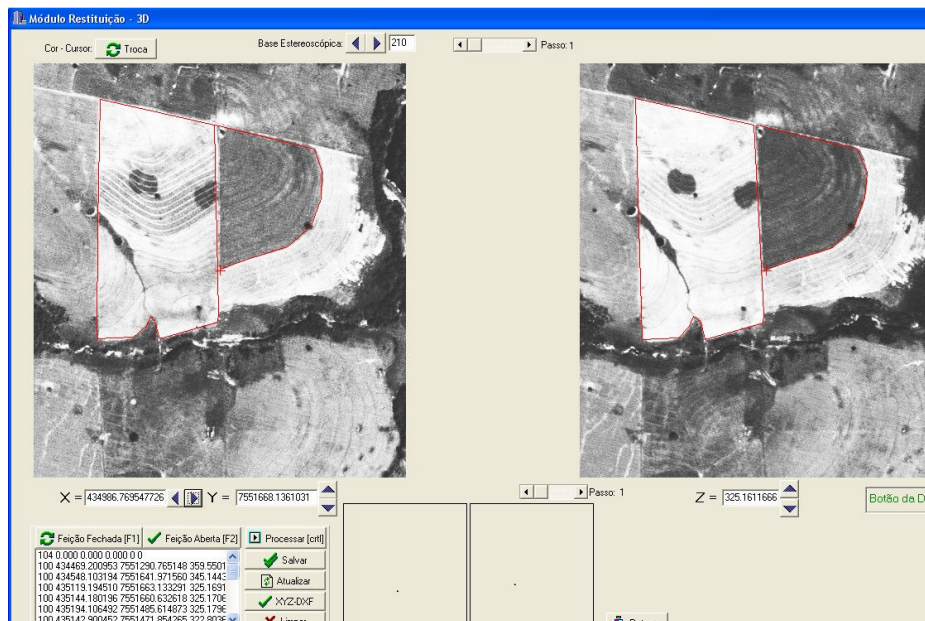


Figura 5: Tela do módulo de restituição.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Para validar os algoritmos de orientação (transformação) implementados foram realizados alguns experimentos com um par de imagens coletadas pelo sensor PRISM do satélite ALOS com GSD de 2,5m, no nível de processamento 1B1 nas direções para frente (*Forward*) e para trás (*backward*).

Foram levantados 17 pontos de apoio o GNSS de dupla frequência Hipper GGD, cujos dados foram processamento no software TGO (*Trimble Geomatics Office*) utilizando a técnica de posicionamento relativo estático.

Os dados foram processados com os modelos matemáticos apresentados nas seções 2.2.1 a 2.2.4. Na tabela 1 são apresentados os modelos de transformação e a quantidade de parâmetros e o mínimo de apoio por imagem.

Tabela 1: Número de parâmetros e de apoio por imagem.

Modelos	Parâmetros	Mínimo - Apoio
Modelo polinomial (2ª ordem)	20	10
Modelo das funções racionais (1ª ordem)	16	8
Transformação afim	8	4
Transformação Linear Direta	12	6

Foi realizado um experimento com os modelos relacionados na Tabela 1, utilizando 11 pontos de apoio, configuração mínima para aplicar o Método dos Mínimos Quadrados (conforme o valor da Tabela 1) e 6 pontos de verificação. A Figura 6 apresenta esta distribuição.

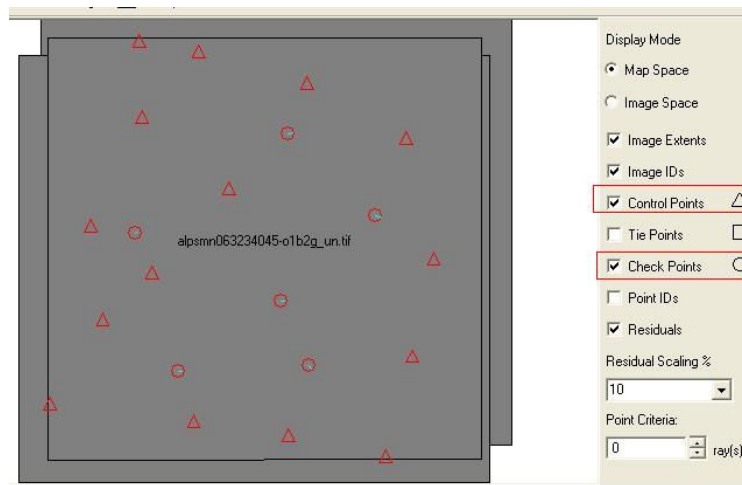


Figura 6: Distribuição dos pontos de apoio e de verificação

Tabela 2: Estatística dos resultados nos pontos de verificação nos experimentos.

	DLT			MODELO POLINOMIAL			AFIM			RPC		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
Mínimo	-7.403	1.869	-1.257	-1.778	-0.819	-2.077	-0.803	-0.553	-0.399	-1.244	-0.513	-3.602
Máximo	-1.809	7.450	3.683	2.199	0.493	3.669	1.748	0.385	1.410	2.257	0.688	2.680
Média	-5.322	4.916	0.246	0.210	-0.098	-0.235	0.463	-0.088	0.491	0.262	0.161	-0.257
DP	±2.278	±2.126	±1.989	±1.433	±0.515	±2.116	±0.983	±0.313	±0.722	±1.251	±0.516	±2.506
EMQ	±4.948	±4.577	±1.587	±1.147	±0.416	±1.685	±1.174	±0.464	±0.729	±1.014	±0.431	±1.993

Analisando a tabela 2, verifica-se que o erro médio quadrático (EMQ) e o desvio padrão (DP) das coordenadas apresentam uma precisão na ordem de 1 GSD para os experimento com o Modelo Polinomial, Afim e RPC. Com a DLT verifica um deslocamento sistemático nas coordenadas planimétricas (média), mas na ordem de dois GSD.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de orientação e restituição de imagens orbitais apresentado neste trabalho, mostrou, segundo os dados da Tabela 2, que as transformações foram implementadas com sucesso e que poderá ser utilizado para produzir produtos cartográficos.

Verifica-se que há uma tendência, nos dados gerados pela DLT, e que os resultados apresentados foram processados com poucos pontos de apoio e de verificação o que inviabiliza conclusões com respeito a precisão do resultado final dos pontos.

Para que resultados confiáveis possam ser gerados com o sistema desenvolvido neste trabalho, faz-se necessário realizar mais experimentos com diferentes configurações de pontos de apoio e de verificação, bem como com diferentes tipos de imagens e relevos.

AGRADECIMENTOS

Aos Alunos do curso de graduação em Engenharia Cartográfica Isadora de Oliveira Gigli e Júlio Inácio Tayra, pelo levantamento e processamento dos pontos de apoio.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B. *Fotogrametria*. SBEE, Curitiba, 1988.

LUGNANI, J. B. *Introdução a fototriangulação*. Imprensa Universitária, Curitiba, 1987.

Medeiros, N. G. **Orientação exterior de imagens orbitais usando modelos rigorosos com feições retas. 2007. 182 p.** Tese Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP, Presidente Prudente – SP.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J.; McGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 479p.

OLIVEIRA, C. “**Dicionário Cartográfico**”, 4ª Edição – Rio de Janeiro. IBGE, 1993.

POLI, D. Orientation of Satellite and Airborne Imagery from Multi-Line Pushbroom Sensors with a Rigorous Sensor Model. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.140.7214&rep=rep1&type=pdf>. Acesso 26/10/2010.

TONOLO, G. F.; POLI, D. Georeferencing of EROS-A1 high resolution images with rigorous and rational function model. <http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/tonolo.pdf>. acesso 26/10/2010.

WOLF, P. R., 1988. **Elements of Photogrammetry**. McGraw-Hill Book Company, 628 p.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry: with applications in GIS**. 3ed. U.S.A.: McGraw-Hill Book Company, 2000. 607p.