

ORIENTAÇÃO INDIRETA DE IMAGENS COM USO DE APOIO FOTOGRAMÉTRICO EXTRAÍDO A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE DADOS DERIVADOS DO SISTEMA LiDAR E FOTOGRAMETRIA

Indirect orientation of images using photogrammetric control extracted through integration of data derived from LiDAR system and Photogrammetry

DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS¹
ALUIR PORFÍRIO DAL POZ²
QUINTINO DALMOLIN¹

¹ Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências da Terra
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
CEP 81531-Curitiba/PR-Brasil

{danielsantos; qdalmolin}@ufpr.br

² Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
CEP 19060-900-Presidente Prudente/SP-Brasil
aluir@prudente.unesp.br

RESUMO

Neste trabalho é proposto um método para orientação indireta de imagens com uso de apoio fotogramétrico extraído a partir da integração de dados derivados de Fotogrametria e do sistema LiDAR. O apoio fotogramétrico é obtido com o emprego de um modelo fotogramétrico inverso, que permite a projeção de uma linha reta do espaço imagem para o espaço objeto. O desenvolvimento deste modelo matemático é baseado na interseção entre uma reta (definida pela condição de colinearidade entre o centro perspectivo da câmara, o ponto imagem e seu correspondente no espaço objeto) e uma superfície matemática que modela o relevo, neste caso, um MDS derivado do sistema LiDAR. O modelo matemático utilizado na orientação indireta de imagens é conhecido como modelo dos planos equivalentes. O modelo dos planos equivalentes relaciona funcionalmente linhas

retas descritas no espaço imagem e objeto por meio da equivalência entre o vetor normal ao plano de interpretação no espaço imagem e o vetor normal ao plano de interpretação rotacionado no espaço objeto. O objetivo deste trabalho é verificar a qualidade, eficiência e potencialidade do apoio fotogramétrico na orientação indireta de imagens. Foram conduzidos experimentos com dados reais e os resultados obtidos mostraram que o método é promissor e possui potencialidade na orientação indireta de imagens.

Palavras-chave: Apoio fotogramétrico; Sistema LiDAR; Linhas retas; Orientação indireta de imagens.

ABSTRACT

In this work a method is proposed to allow the indirect orientation of images using photogrammetric control extracted through integration of data derived from Photogrammetry and Light Detection and Ranging (LiDAR) system. The photogrammetric control is obtained by using an inverse photogrammetric model, which allows the projection of image space straight lines onto the object space. This mathematical model is developed based on the intersection between the collinearity-based straight line and a DSM of region, derived from LiDAR data. The mathematical model used in the indirect orientation of the image is known as the model of equivalent t planes. This mathematical model is based on the equivalence between the vector normal to the projection plane in the image space and to the vector normal to the rotated projection plane in the object space. The goal of this work is to verify the quality, efficiency and potential of photogrammetric control straight lines obtained with proposed method applied to the indirect orientation of images. The quality of generated photogrammetric control was statistically available and the results showed that proposed method is promising and it has potential for the indirect orientation of images.

Keywords: Photogrammetric control; LiDAR system; Straight lines; Indirect orientation of images; Monoplotting; model of equivalent planes.

1. INTRODUÇÃO

O apoio de campo ou fotogramétrico é informação essencial no processo de orientação indireta de imagens e pode ser definido por um conjunto de primitivas, que descrevem feições pontuais e/ou lineares. O tipo de primitiva a ser utilizado para o processo supracitado depende do modelo matemático funcional empregado para relacionar os espaços imagem e objeto. A primitiva mais adequada é aquela menos afetada por fatores de variação de escala, presença de oclusões, projeção perspectiva e variação do terreno. Dentre as primitivas mais utilizadas as linhas retas apresentam perenidade, são de fácil extração automática em imagens digitais e reconhecimento semântico (propriedades geométricas e/ou radiométricas).

O uso de linhas retas como apoio para orientação indireta de imagens tem sido bastante difundido na comunidade científica, citam-se os métodos desenvolvidos

por: Lugnani (1981); Mulawa e Mikhail (1988); Roberts (1988); Tommaselli e Lugnani (1988); Kubik (1988); Liu e Huang (1988); Buchanan (1992); Zielinski (1992); Wilkin (1992); Petsa e Patias (1994); Tommaselli e Tozzi (1996); Forkert (1996); Heuvel (1998); Dal Poz e Tommaselli (1998; 1999); Habib (1999); Zalmason (2000); Habib et al. (2000); Kokubum e Tommaselli (2002); Shan (2003); Klinec (2004); Zhang (2004); Chen et al. (2004); Tommaselli e Reiss (2005); Medeiros e Tommaselli (2006); Medeiros e Tommaselli (2009); etc.

Usualmente, os métodos supracitados utilizam apoio de campo para orientação indireta de imagens, cujas coordenadas tridimensionais são determinadas sobre a superfície física por meio de levantamentos geodésicos e topográficos. Essas técnicas são morosas e de alto custo operacional. Uma alternativa para extração de apoio fotogramétrico de forma rápida e autônoma é o uso de técnicas de levantamento indireto, que englobam os processos fotogramétricos e de sistema LiDAR (em inglês, *Light Detection and Ranging*).

Em Fotogrametria existem dois métodos de medidas de coordenadas fotogramétricas, isto é, o método de medida estereoscópica e o método de medida monoscópica. Os métodos estereoscópicos utilizam duas ou mais imagens para a determinação de coordenadas com precisão, enquanto os métodos monoscópicos utilizam apenas uma imagem. Os métodos monoscópicos para determinação de coordenadas tridimensionais dependem de um MDT (Modelo Digital do Terreno) ou MDS (Modelo Digital de Superfície) de qualidade, para uma solução rigorosa. Esses métodos também são conhecidos como monorrestituição, cujas soluções alternativas podem ser encontradas em: Makarovic (1973); Masry (1979); Dal Poz (1991); Dal Poz (1997); Dal Poz (1998); Mitishita e Machado (1999); Dal Poz e Santos (1999); Wolter (2000); Souza (2001); Ros e Dal Poz (2002); Jauregui et al. (2002); Mitishita e Saraiva (2002); Mitishita et al. (2003), Ressler et al. (2006); etc.

O sistema LiDAR é composto por três componentes básicos: um receptor GPS (em inglês, *Global Positioning System*); um INS (em inglês, *Inertial Navigation System*); e um gerador de pulsos LASER (em inglês, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). O sistema consiste em realizar uma varredura sobre a superfície física de forma aleatória, registrar o tempo de emissão e recepção do pulso, bem como as informações fornecidas pelo GPS/INS e as respostas espectrais de cada objeto perfilado pelo sistema (característico apenas dos sistemas da Opetch ALTM). As informações registradas pelo sistema são, após o processamento, utilizadas para gerar um MDS da região, assim como para produzir uma imagem de intensidade.

De acordo com Wehr e Lohr (1999) o sistema LiDAR fornece coordenadas, com precisão planimétrica em torno de 50 cm e altimétrica em torno de 15 cm. No entanto, Maas (2003) afirma que a complexidade do sistema reflete sobre a qualidade posicional das coordenadas, cujas principais fontes de erros são: os componentes básicos que integram o sistema; a altitude de vôo; transformação de coordenadas entre sistemas; tipo e declividade do terreno perfilado. Portanto, a

precisão nominal do equipamento depende dos diversos fatores supracitados e os produtos gerados sempre devem ser avaliados estatisticamente com a finalidade de checagem da precisão oferecida no perfilamento específico. Uma vantagem do sistema LiDAR é sua autonomia e rapidez na determinação de coordenadas no espaço objeto, o que reduz a necessidade de levantamento de apoio de campo por meio de técnicas de levantamento direto.

Atualmente, muitos trabalhos científicos têm desenvolvido soluções alternativas para orientação indireta de imagens, tais como, a resseção espacial e aerotriangulação de imagens, baseada no uso de apoio fotogramétrico extraído diretamente da imagem de intensidade, tais como: Wehr e Wiedmann (1999), Habib e Schenk (1999), Schenk et al. (2001), Schenk e Csatho (2002), Habib et al. (2004a, 2004b, 2004c), Furkuo e King (2004), Delara et al. (2004), Chen et al. (2004), Zhang et al. (2005), Dalmolin et al. (2005), Habib et al. (2005), Habib et al. (2006), Machado e Mitshita (2006), Habib et al. (2007), Abdelhafiz et al. (2007), Mitshita et al. (2008), Delara et al. (2008); e outros.

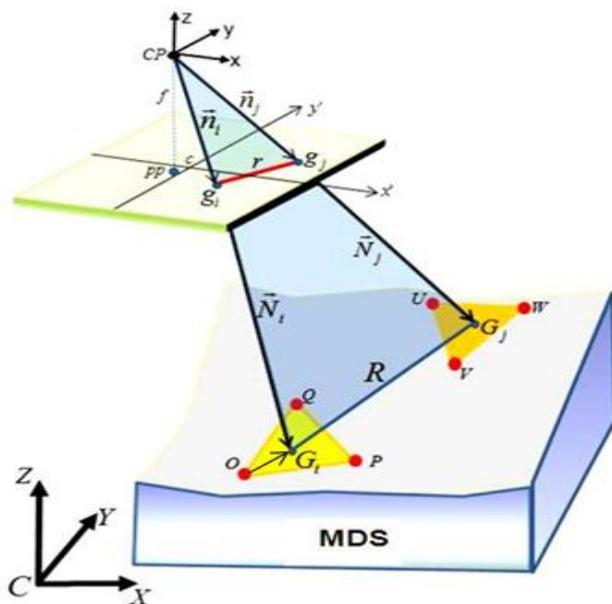
Neste trabalho é proposto um método que combina técnicas para extração de apoio fotogramétrico e orientação indireta de imagens a partir da integração de dados derivados de Fotogrametria e do sistema LiDAR. O apoio fotogramétrico é obtido com o emprego de um modelo fotogramétrico inverso não iterativo (Dal Poz, 1991) adaptado para linhas retas, que permite a projeção de uma linha reta do espaço imagem para o espaço objeto. O desenvolvimento deste modelo matemático é baseado na interseção entre uma reta (definida pela condição de colinearidade entre o centro perspectivo da câmara, o ponto imagem e seu correspondente no espaço objeto) e uma superfície matemática que modela o relevo, neste caso, um MDS derivado do sistema LiDAR. O modelo matemático utilizado na orientação indireta de imagens é conhecido como modelo dos planos equivalentes, desenvolvido por Tommaselli e Tozzi (1996). O modelo dos planos equivalentes relaciona funcionalmente linhas retas descritas no espaço imagem e objeto por meio da equivalência entre o vetor normal ao plano de interpretação no espaço imagem e o vetor normal ao plano de interpretação rotacionado no espaço objeto.

O objetivo deste trabalho é verificar a qualidade posicional, a eficiência e a potencialidade do apoio fotogramétrico, extraído com o emprego do modelo fotogramétrico inverso adaptado, na orientação indireta de imagens. Foram conduzidos experimentos com dados reais e os resultados obtidos mostraram que o método é promissor e possui potencialidade na orientação indireta de imagens. O desenvolvimento deste trabalho é motivado por ser um tema em aberto, pela escassez de investigações sobre o assunto proposto, necessidade de explorar o assunto sobre integração de dados derivados de diferentes sensores e a necessidade de apresentar novas alternativas à comunidade. Enfim, pela relevância científica comprovada, devido à importância dispensada pela ISPRS *Commision III - Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis*, aos objetos de estudo deste trabalho.

2. MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático proposto é baseado na intersecção entre uma reta (definida pela condição de colinearidade entre o centro perspectivo da câmara, o ponto no espaço imagem e seu correspondente no espaço objeto) e uma superfície matemática que modela o relevo (Dal Poz, 1991). A superfície matemática adotada neste trabalho é um poliedro, cujas faces são extraídas de um MDS derivado do sistema LiDAR. Neste trabalho o modelo proposto será adaptado para linhas retas, ou seja, é aplicado sobre os pontos extremos de linhas retas extraídas na imagem digital, cujos dados previamente conhecidos são: um MDS da região; parâmetros de orientação interior e exterior da imagem. A Figura 1 mostra a geometria do modelo proposto.

Figura 1 -. Geometria do modelo proposto.



Os seguintes elementos ilustrados na Figura 1 são definidos, como segue:

- c $x'y'$: sistema com origem no centro da imagem digital. Os eixos x e y do sistema fotogramétrico são paralelos e de mesmo sentido aos eixos x' e y' ;
- CP : Centro Perspectivo da câmara;

- CP xyz: sistema fotogramétrico tridimensional de coordenadas;
- pp : ponto principal definido pela projeção ortogonal do CP sobre o plano da imagem;
- f : distância focal calibrada da câmara;
- r : linha reta extraída no espaço imagem;
- R : linha reta a ser determinada no espaço objeto;
- XYZ: sistema de coordenadas tridimensionais no espaço objeto;
- OPQ : vértices de uma face do poliedro (figura geométrica formada por quatro vértices de pontos quaisquer do MDS), com coordenadas $O(E_o, N_o, H_o)$, $P(E_p, N_p, H_p)$, $Q(E_q, N_q, H_q)$, respectivamente;
- g_i e g_j : fotocoordenadas dos pontos extremos das feições linear extraídas na imagem digital, cujas coordenadas no sistema $x'y'$ são $x_i'y_i'$ e $x_j'y_j'$, respectivamente; e
- $G_i = [E_i \ N_i \ H_i]^T$, $G_j = [E_j \ N_j \ H_j]^T$: pontos extremos das linhas retas, a serem determinados no espaço objeto.

Na Figura 1 o vetor visada $\vec{n}_i = \overrightarrow{CPg_i}$ é formado pelo CP da câmara e um dos pontos extremos de uma linha reta extraída na imagem digital, dado pela expressão que segue:

$$\vec{n}_i = (x_i' - x_0, y_i' - y_0, -f)^t \quad (1)$$

Onde, i representa um dos pontos extremos da feição reta extraída no espaço imagem. O vetor visada em uma base ortonormal é expresso pela equação, a saber:

$$\vec{n}_i = \frac{(x_i' - x_0)}{d_i} \vec{k} + \frac{(y_i' - y_0)}{d_i} \vec{l} + \frac{(-f)}{d_i} \vec{m} \quad (2)$$

Onde, $d_i = \sqrt{(x_i' - x_0)^2 + (y_i' - y_0)^2 + (-f)^2}$.

Considerando que o fator de escala é absorvido com a estratégia adotada na Equação (2), para que o referencial do sistema no espaço objeto seja paralelo ao referencial fotogramétrico é necessário aplicar ao vetor \vec{n}_i a matriz de rotação transposta (M^T), dada em função dos ângulos de Euler (κ, φ, ω).

O vetor visada no espaço objeto (\vec{N}_i) é definido por:

$$\vec{N}_i = M^T \vec{n}_i = \begin{bmatrix} N_x^i \\ N_y^i \\ N_z^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

O modelo matemático básico é a equação da reta na sua forma paramétrica, definida como segue:

$$G_i = \vec{N}_i t_i + CP \quad (4)$$

No qual, t_i é um parâmetro livre.

Como descrito anteriormente, o modelo proposto implica na intersecção entre uma reta (definida pela condição de colinearidade entre o centro perspectivo da câmara, o ponto no espaço imagem e seu correspondente no espaço objeto) e uma das faces do poliedro extraído no MDS da região. Sendo assim, como os vetores \vec{PO} , \vec{QP} e $\vec{G_iO}$ (ver Figura 1) são assumidos como não colineares e linearmente independentes, tem-se que o produto misto entre eles é nulo, tal como segue:

$$\vec{G_iO} \bullet (\vec{PO} \wedge \vec{QP}) = 0 \quad (5)$$

A Equação (5) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{vmatrix} E_i - E_o & N_i - N_o & H_i - H_o \\ E_p - E_o & N_p - N_o & H_p - H_o \\ E_q - E_p & N_q - N_p & H_q - H_p \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

Desenvolvendo o determinante da Equação (6) pela primeira linha e fazendo algumas manipulações tem-se a equação geral do plano:

$$A_1^i E_i + A_2^i N_i + A_3^i H_i + B^i = 0 \quad (7)$$

Sendo, A_1^i, A_2^i, A_3^i, B^i são os parâmetros da equação geral do plano.

Conhecendo-se os parâmetros de orientação exterior da imagem ($\kappa, \varphi, \omega, X^c, Y^c, Z^c$) e lembrando que $G_i = [X_i Y_i Z_i]^T$, pode-se interceptar a reta definida pela condição de colinearidade entre o centro perspectivo da câmara, o ponto no espaço imagem e seu correspondente no espaço objeto, com uma face do

poliedro (pontos OPQ). Portanto, substituindo a Equação (4) na Equação (7) obtém-se a seguinte expressão matemática:

$$A_1^i(N_x^i t_i + X^C) + A_2^i(N_y^i t_i + Y^C) + A_3^i(N_z^i t_i + Z^C) + B^i = 0 \quad (8)$$

Com as devidas manipulações da Equação (8) determina-se o parâmetro livre t_i para a reta diretora, como segue:

$$t_i = -\frac{A_1^i X^C + A_2^i Y^C + A_3^i Z^C + B}{A_1^i N_x^i + A_2^i N_y^i + A_3^i N_z^i} \quad (9)$$

Por fim, ao substituir t_i na Equação (4) tem-se o modelo proposto, denominado Modelo de monorrestituição direta, dado por:

$$\begin{aligned} E_i &= -\frac{A_1^i X^C + A_2^i Y^C + A_3^i Z^C + B}{A_1^i N_x^i + A_2^i N_y^i + A_3^i N_z^i} N_x^i + X^C \\ N_i &= -\frac{A_1^i X^C + A_2^i Y^C + A_3^i Z^C + B}{A_1^i N_x^i + A_2^i N_y^i + A_3^i N_z^i} N_y^i + Y^C \\ H_i &= -\frac{A_1^i X^C + A_2^i Y^C + A_3^i Z^C + B}{A_1^i N_x^i + A_2^i N_y^i + A_3^i N_z^i} N_z^i + Z^C \end{aligned} \quad (10)$$

A Equação (10) representa o Modelo de monorrestituição direta (Dal Poz, 1991), aplicado a um ponto extremo da linha reta no espaço imagem (g'_i). Para aplicar o modelo, no segundo ponto extremo da linha reta (g'_j), deve-se considerar a mesma dedução descrita acima. Para isto, o modelo proposto deve ser agora desenvolvido em função da intersecção entre a reta (definida pela condição de colinearidade entre o CP da câmara, o ponto imagem g'_i e seu correspondente G_j no espaço objeto) e uma das faces do poliedro dada pelos pontos UVW (ver Figura 1).

3. EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os experimentos conduzidos neste trabalho foram divididos em 3 etapas, a saber: 1) Avaliação da qualidade posicional do apoio fotogramétrico extraído com emprego do Modelo de monorrestituição direta; 2) Extração de apoio fotogramétrico baseado em linhas retas (adaptação do modelo proposto); 3) Avaliação da potencialidade do apoio fotogramétrico na orientação indireta de imagens. Os algoritmos utilizados para realizar os experimentos foram

implementados em linguagem C++ ambiente de programação Builder 5.0 para Windows.

3.1. Avaliação da qualidade posicional do apoio fotogramétrico

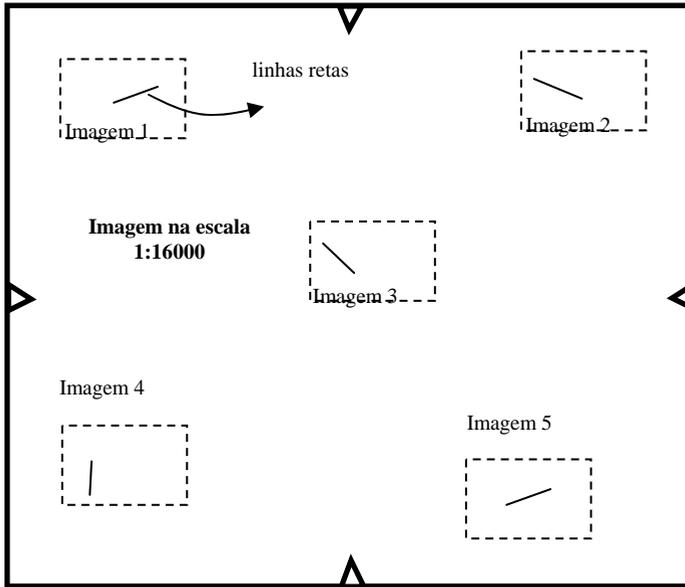
Para avaliar a qualidade posicional (precisão plani-altimétrica) do apoio fotogramétrico extraído com o emprego do Modelo de monorrestituição direta, foram utilizados os seguintes dados: uma imagem digital adquirida com a câmara digital de pequeno formato DSC F717 (CCD de quadro), na escala 1:8000 e tamanho do pixel de 3,4 μm ; parâmetros de orientação interior e exterior da imagem, previamente conhecidos; um conjunto de pontos determinados em campo por GPS (serão utilizados como valores de referência para a análise estatística), referenciados ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), cujo Datum planimétrico é o vértice Chuá, localizado em Minas Gerais e o Datum vertical é a referência de nível do marégrafo de Imbituba, Santa Catarina (a figura de representação da Terra é o elipsóide de referência IGGU 1967, compondo o chamado *South Americam Datum* 1969 ou SAD69); e um arquivo bruto ASCII de pontos por linha - derivado do sistema LiDAR ALTM 2050 -, contendo coordenadas tridimensionais referenciadas ao SGB e suas respectivas postostas espectrais.

O modelo proposto foi empregado em 19 pontos coletados sobre uma imagem digital na escala 1:8000 e, posteriormente, realizada uma análise de discrepância. A análise de discrepância é realizada em função da média das discrepâncias calculada pela diferença entre os valores de referência (pontos GPS) e os pontos tridimensionais determinados com o emprego do Modelo de monorrestituição direta. Neste trabalho é importante lembrar que as faces dos poliedros são coletadas manualmente na imagem de intensidade LASER, em função do ponto imagem coletado pelo operador. Os resultados encontrados mostraram que a precisão da média das discrepâncias em ambas as componentes planimétricas é em torno de 37 cm. A precisão altimétrica permaneceu equivalente à precisão nominal do equipamento (em torno de 15 cm).

3.2. Extração do apoio fotogramétrico baseado em linhas retas

Os dados utilizados para conduzir este experimento são os que seguem: cinco imagens digitais na escala 1:8000 com seus parâmetros de orientação interior e exterior, previamente determinados por um processo de aerotriangulação de imagens (equação de colinearidade); e o arquivo bruto ASCII de pontos por linha, derivado do sistema LiDAR. As cinco imagens digitais sobrepõem algumas porções referentes à área recoberta pela imagem aérea digitalizada (escala 1:16000 obtida por uma câmara métrica convencional RC10 Wild), que será utilizada na orientação indireta da imagem. A Figura 2 mostra a distribuição geométrica das imagens digitais sobre a imagem digitalizada.

Figura 2 - Distribuição das imagens digitais para extração do apoio fotogramétrico.



Foi extraído, manualmente nas imagens digitais, um total de 100 linhas retas geometricamente distribuídas na imagem digitalizada. O Modelo de monorrestituição direta foi aplicado sobre os pontos extremos de cada uma das linhas retas e calculadas as coordenadas tridimensionais no espaço objeto e seus respectivos cossenos diretores.

Cada ponto extremo das linhas retas do apoio fotogramétrico foi projetado para o espaço imagem (via equação de colinearidade, parâmetros de orientação interior e exterior das imagens digitais, bem como realizada a adição dos erros sistemáticos) com a finalidade de facilitar o processo de estabelecimento de correspondências.

3.3. Avaliação da potencialidade do apoio fotogramétrico na orientação indireta de imagens

A finalidade deste experimento é avaliar a potencialidade do apoio fotogramétrico - extraído com uso da técnica proposta -, para orientação indireta de imagens, cujos dados utilizados são os que seguem: uma imagem aérea digitalizada, com escala 1:16000 - obtida por uma câmara métrica convencional RC10 Wild, com seus parâmetros de orientação interior previamente conhecidos e marcas fiduciais

calibradas fornecidas pelo fabricante da câmara; o apoio fotogramétrico extraído com a técnica de extração proposta; e parâmetros de orientação exterior aproximados. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados, utilizados no processo inicial da orientação indireta da imagem digitalizada.

Tabela 1 - Parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões.

Atitude (rad)			Posição (m)		
κ	φ	ω	X^c	Y^c	Z^c
4,2	0,0	0,0	677920,00	7184010,00	2567,00
Desvios-padrão					
±0,45	±0,05	±0,05	±200,00	±200,00	±200,00

O modelo dos planos equivalentes (Tommaselli e Tozzi, 1996) foi utilizado como equação funcional no método paramétrico com injunções de peso, para estimação dos parâmetros de orientação exterior da imagem digitalizada. Este modelo é baseado na equivalência entre o vetor normal ao plano de interpretação descrito no espaço imagem e o vetor normal ao plano de interpretação rotacionado e descrito no espaço objeto.

Como o modelo dos planos equivalentes possui duas parametrizações que dependem da orientação da linha reta extraída ($45^0 < \theta < 135^0$ ou $225^0 < \theta < 315^0$ horizontal, caso contrário, vertical) foram extraídas, manualmente na imagem digitalizada a ser orientada, 34 linhas retas regularmente distribuídas e com orientações alternadas (vertical-horizontal-vertical-horizontal-...). As mesmas possuíam homologia com o apoio fotogramétrico extraído na etapa anterior.

Para cada linha reta extraída no espaço imagem, foram calculados os parâmetros a e b ou $*a$ e $*b$ da reta (ver equações do modelo dos planos equivalentes – Tommaselli e Tozzi, 1996), suas respectivas variâncias e atribuídos: um rótulo; os pontos iniciais ENH da linha reta correspondente no espaço objeto; e seus respectivos cossenos diretores.

Os resultados encontrados foram comparados com os valores dos parâmetros de orientação exterior da imagem digitalizada, determinados com o modelo de colinearidade (aerotriangulação de imagens por pontos). A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

A análise de qualidade do ajustamento foi realizada para um nível de significância de 5%, cujo Qui-Quadrado teórico (χ_t^2) para esse nível de significância é de 79,08 e o calculado (χ_c^2) foi de 0,78. Com isto, os parâmetros ajustados têm 95% de probabilidade de estarem corretos, pois $\chi_c^2 < \chi_t^2$.

Tabela 2 - Valores estimados com o modelo dos planos equivalentes, valores estimados com o modelo de colinearidade, desvios-padrão e a discrepância entre os valores obtidos.

Valores estimados com o modelo dos planos equivalentes					
Atitude (rad)			Posição (m)		
κ	φ	ω	X^C	Y^C	Z^C
4,666	-0,0056	0,05475	677821,66	7183910,96	2366,84
Desvios-padrão					
±0,0016	±0,0073	±0,0091	±5,59	±6,84	±1,36
Valores estimados com o modelo de colinearidade					
Atitude (rad)			Posição (m)		
κ	φ	ω	X^C	Y^C	Z^C
4,669	-0,0067	0,05461	677821,23	7183910,46	2367,71
Desvios-padrão					
±0,0000018	±0,000022	±0,000019	±0,017	±0,013	±0,0016
Discrepâncias					
Atitude (rad)			Posição (m)		
κ	φ	ω	X^C	Y^C	Z^C
0,003	0,0011	0,0014	0,43	0,50	1,13

A partir da Tabela 2 nota-se que as discrepâncias calculadas entre os valores estimados e os de referência são pouco acentuadas, sendo a maior discrepância encontrada no parâmetro de rotação κ (0,003 radianos $\sim 18'16''$) e no parâmetro de translação Z^C (1,13 metros). Isto mostra a compatibilidade entre os métodos.

Os desvios-padrão determinados com o modelo dos planos equivalentes são piores que os determinados pela aerotriangulação de imagens. Este comportamento era esperado, pois o número de observações utilizado no método de aerotriangulação de imagens foi de 181 pontos (distribuídos simetricamente na imagem a ser orientada), ou seja, 5,3 vezes maior que o número de observações empregado no método proposto (34 feições lineares) e a quantidade de agrupamentos extraídos com configuração formada por feições lineares de orientações alternadas (bordas de cruzamentos de vias, por exemplo) não foi suficiente, influenciando na qualidade da estimativa. Entre os valores estimados de rotação, a pior precisão encontrada foi no ângulo ω e entre os parâmetros de translação, a coordenada Y^C . Isto mostra o uso de uma configuração fortemente baseada em feições lineares paralelas ao eixo x do sistema fotogramétrico. Em Habib (1998) e Tommaselli e Lugnani (1988), podem ser encontrados estudos referentes ao uso de diferentes configurações de linhas retas no processo de orientação indireta de imagens.

O uso de linhas retas coletadas com distribuição regular ao longo da imagem digitalizada e com orientações alternadas (horizontal-vertical-...), fortaleceu a geometria do agrupamento de observações e reduziu a possibilidade de um efeito

sistemático no processo de resseção espacial com uso do modelo dos planos equivalentes, melhorando sua eficiência.

Como o modelo dos planos equivalentes é não linear, a entrada de parâmetros aproximados com boa qualidade é essencial para a solução do método. Neste experimento, o valor do parâmetro κ apresentou maior sensibilidade, havendo solução somente com uso de valores aproximados com variação máxima de 1 grau.

A precisão média do parâmetro linear da linha reta (b) foi de 0,19 mm, o que provocou um erro aleatório em torno de 3 m nas coordenadas X^c e Y^c . Outro fator muito importante é a sensibilidade do modelo dos planos equivalentes em relação ao paralelismo entre os vetores normais aos planos de interpretação descritos no espaço imagem e no espaço objeto. Qualquer mudança na orientação da linha reta utilizada como observação, distorce o paralelismo entre os vetores e provoca distúrbios na relação funcional entre as feições correspondentes.

O modelo dos planos equivalentes apresentou resultados muito próximos dos encontrados pelo processo de aerotriangulação de imagens, mostrando sua potencialidade e eficiência para recuperar parâmetros de orientação exterior de imagens. E o apoio fotogramétrico, extraído com o emprego do Modelo de MonoRestituição Direta, mostrou sua potencialidade ao ser aplicado na orientação indireta de imagens, o que torna a técnica eficiente e factível.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um método que combina técnicas para extração de apoio fotogramétrico e orientação indireta de imagens. O método utilizado para extrair apoio fotogramétrico é baseado na integração de dados derivados de Fotogrametria e do sistema LiDAR. Um modelo fotogramétrico inverso não iterativo foi proposto com a finalidade de extrair apoio fotogramétrico sobre os pontos extremos de linhas retas extraídas manualmente na imagem. O método para orientação indireta de imagens é baseado no uso do modelo de planos equivalentes que relaciona funcionalmente linhas retas descritas no espaço imagem e no espaço objeto. Foram conduzidos experimentos com dados reais e os resultados obtidos mostraram que o método proposto é promissor e possui potencialidade.

O sistema LiDAR é um sistema autônomo que reduz a necessidade de levantamento de apoio de campo por meio de métodos de levantamento direto. A integração de dados derivados do sistema LiDAR e de Fotogrametria possibilitou extrair apoio fotogramétrico de melhor qualidade que a precisão nominal fornecida pelo sistema LiDAR, tendo em vista que, o modelo proposto foi aplicado sobre uma imagem digital na escala 1:8000, o que trouxe um ganho em torno de 13 cm de precisão nas coordenadas planimétricas.

O Modelo de monorestituição direta possui algumas vantagens tais como: não exige iterações na determinação da coordenada H do ponto, o que o torna mais atrativo em relação ao modelo fotogramétrico inverso iterativo, proposto por Makarovic (1973); quando integrado com dados LiDAR, proporciona uma

superabundância de apoio fotogramétrico; e proporciona um refinamento da malha de pontos derivados do sistema LiDAR.

O uso do modelo dos planos equivalentes é eficiente e compatível com o modelo de colinearidade, além de ser mais flexível por não exigir correspondência ponto-a-ponto e possui maior potencialidade na automação dos processos de orientação indireta de imagens. No entanto, é essencial utilizar linhas retas com orientações alternadas (horizontal-vertical-...) no processo de estimação dos parâmetros de orientação exterior de imagens, para fortalecer a geometria do agrupamento e reduzir a possibilidade de um efeito sistemático no processo de orientação indireta de imagens.

AGRADECIMENTOS

Os autores externam seus agradecimentos ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) pela concessão de auxílio financeiro referente ao projeto Jovem Pesquisador no. Processo 570316/2008-1, ao LACTEC e à Empresa AGRITEC/AS, por disponibilizarem os dados derivados do sistema LiDAR e as imagens digitais adquiridas com a câmara digital DSC-F717, ao doutorando João Tavares Cortês, por disponibilizar os dados de levantamento GPS e da fototriangulação da imagem digitalizada na escala 1:16000, adquirida com a câmara métrica RC-10 da Wild.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELHAFIZ, A.; RIEDEL, B.; NIEMEIER, W.. “3D Image” As a Result From the Combination Between the Laser Scanner Point Cloud and the Digital Photogrammetry. *In: Optical 3-D Measurement Techniques VII*, Vol. 1, pp. 204-213, 2007.
- BUCHANAN, T. Critical sets for 3D reconstruction using lines. *Computer Vision – ECCV*. Berlin, Germany, p.730-738, 1992.
- CHEN, L. T.; TEO, Y.; SHAO, Y.; LAI J.; RAU, J.. Fusion of LIDAR data and optical imagery for building modeling, *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35(B4):732-737, 2004
- DAL POZ, A. P. *Um sistema fotogramétrico voltado para a exploração do recurso de feições retas*. 1991. 111f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná-UFPR, Curitiba.
- DAL POZ, A. P. Uma solução para o problema fotogramétrico inverso. *Cartografia e Cadastro* (Lisboa), Lisboa, Portugal, v. 7, p. 43-47, 1997.
- DAL POZ, A. P. Um modelo fotogramétrico inverso: Aplicações na Cartografia. *Revista de Engenharia e Ciências Aplicadas*, São Paulo,SP, v. 4, p. 98-116, 1998.
- DAL POZ, A. P. ; SANTOS, D. R.. Geração de ortofoto digital através de uma metodologia híbrida. *In: XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, 1999, Recife-SP. XIX Congresso Brasileiro de Cartografia*. Rio de Janeiro-RJ :

- Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, v. 1, p. 1-8, 1999.
- DAL POZ, A. P.; TOMMASELLI, A. M. G. Automatic absolute orientation of scanned aerial photographs. *In Anais do X SIBGRAPI*, p. 1-8, 1998.
- DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R.; DELARA, R.; BÄHR, H. P. O uso de feições retas extraídas do MDT gerado pelo sistema de varredura LASER como apoio para o cálculo da resseção espacial de imagens digitais. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 11, n. 1, p.117-140, 2005.
- DELARA, R. S. Jr.; MITISHITA, E. A.; VOGTLE, T.; BÄHR, H. P. Automatic digital image resection controlled by LIDAR data. *3D Geo-Information Sciences*, v. 11, n. 2, p.213-234, 2008.
- FORKERT, G. Image orientation exclusively based on free-form tie curves. *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. vol. XXXI, p.196-201, 1996.
- FORKUO, E.; KING, B.. Automatic Fusion of Photogrammetric Imagery and Laser Scanner Point Clouds. *In: Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing*, Vol. XXXV, pp. 921-926, 2004.
- HABIB, A. F. Motion parameters estimation by tracking stationary three-dimensional straight lines in image sequences. *ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*, Vol. 53: pp. 174-182, 1998.
- HABIB, A. F.; SCHENK, T.. A new approach for matching surfaces from laser scanners and optical sensors, *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(3W14):55-61, 1999.
- HABIB, A. Aerial triangulation using point and linear features. *International Archives of Photogrammetry and remote Sensing*, München, Germany, vol. 32, part 3-2W5, p.137-141, 1999.
- HABIB, A; DEVIN, K.; ASMAMAW, A. Straight line in linear array scanner imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol XXXIII, part B1, Amsterdam, 2000.
- HABIB, A.; MORGAN, M.; KIM, E. M.; CHENG, R. Linear Features in Photogrammetric Activities. *In: ISPRS Congress Geo-imagery bridging continents*, Istanbul: ISPRS, p. 170-176, 2004.
- HABIB, A. F; GHANMA, M. S.; MORGAN, M. F.; MITISHITA, E. A. Integration of laser and photogrammetric data for calibration purposes. *International Archives of XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, Comission I, 6p., 2004a.
- HABIB, A. F; GHANMA, M. S.; KIN, C. J.; MITISHITA, E. A. Alternative approaches for utilizing LiDAR data as a source of control information for photogrammetric models. *International Archives of XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, Comission I, 6p., 2004b.
- HABIB, A. F; GHANMA, M. S.; TAIT, M. Integration os LiDAR and photogrammetry for close range applications. *International Archieves of XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, Comission I, 6p., 2004c.

- HABIB, A. F.; GHANMA, M. S.; MITISHITA, E. A.. Photogrammetric Georeferencing Using LIDAR Linear and Areal Features. *Korean Journal of Geomatics*, Coreia do Sul, v. 5, n. 1, p. 1-13, 2005.
- HABIB, A. F.; GHANMA, M. S.; MORGAN, M. F.; Al-Ruzouq, R. Photogrammetric and LiDAR data registration using linear features. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 71(6): pp. 699-707, 2005.
- HABIB, A. F.; CHENG, R.W.; KIM, E.; MITISHITA, E. A.; FRAYNE, R.; RONSKY, J. L.. Automatic Surface Matching for the Registration of LIDAR Data and MR Imagery. *ETRI Journal*, Coreia do Sul, v. 28, n. 2, p. 162-174, 2006.
- HEUVEL, F.A. van den. Exterior orientation using coplanar parallel lines. *10th Scandinavian Conference on Image Analysis*, Lappeenranta, p. 71-78, 1997.
- HEUVEL, F. A. van den; 3D Reconstrucion From a Single Image Using Geometric Constraints. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, Vol 53. No. 6, 354 - 368.
- JAUREGUI, M; VÍLCHEZ, J.; CHACÓN, L. A procedure for map updating using digital mono-plotting. *Computers & Geosciences*, vol. 28, p. 513-523, 2002.
- KLINEC, D. A model based approach for orientation in urban enviroments. *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, commission III, Istanbul, 2004.
- KOKUBUM, C. N.C.; TOMMASELLI, A. M. G. Orientação de imagens aéreas usando linhas retas. *Anais: I Simpósio Brasileiro de Geomática*. Presidente Prudente: UNESP, p. 144-149, 2002.
- KUBIK, K., Relative and Absolute Orientation Based on Linear Features. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 46, p. 199-204, 1988.
- LIU, Y.; HUANG, T, S.; *A Linear Algorithm for Motion Estimation Using Straight Line Correspondences*. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 44(1), pp. 35-57, October 1988.
- LIU, Y.; HUANG T.; FAUGERAS O. *Determination of camera locations from 2D to 3D line and point correspondences*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 1, p.28-37, 1990.
- LUGNANI, J.B. *Using Digital Entities as Control*. 1981. 159f. PhD thesis. Department of Surveying Engineering. University of New Brunswick.
- MAAS, H. G. Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data – user requerements and system performance. *Proceedings of 49o. Photogrammetric Week 2003* (Ed. D. Fritsch), Wichmann Verlag, pp. 117-125, 2003.
- MAKAROVIC, B. Digital mono-plotters. *ITC Journal*, pp. 583-599, 1973.
- MASRY, S. E.; MCLAREN, R. A. Digital map revision. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 45, n. 2, pp. 193-200, 1979.
- MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A. Detecção automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e

- dados LIDAR. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 12, no. 2, p.215-233, 2006.
- MEDEIROS, N. G.; TOMMASELLI, A. M. G. Um modelo para orientação de imagens orbitais baseado em feições retas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 12, no. 2, p.175-194, 2006.
- MEDEIROS, N. G.; TOMMASELLI, A. M. G. Orientação indireta de imagens CBERS: Avaliação de técnicas que usam linhas retas e sua combinação com pontos. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 15, no. 1, p.33-57, 2009.
- MITISHITA, E. A.; OLIVAS, M. A. A. Viabilidade da utilização da Monorestituição na construção de base Cartográfica Digital. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 7, no 2, p.23-40, 2001.
- MITISHITA, E. A.; MACHADO, Álvaro Muriel Lima ; SILVA, V. F. ; TREVIZAN, S. J. ; SIKORSKI, J. . Desenvolvimento de técnicas de mapeamento planimétrico cadastral de rodovias utilizando-se da monorestituição, imagens digitais provenientes de câmara de vídeo e helicóptero. In: *Edson Aparecido Mitishita et al.. (Org.). Série em Ciências Geodésicas - Novos Desenvolvimentos em Ciências Geodésicas 2003 - Volume 3*. 01 ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, v. 01, p. 227-245, 2003.
- MITISHITA, E. A. ; SARAIVA, C. C. . Modelos Matemáticos para Fins de Monorestituição de Imagens de Alta Resolução Ikonos 2 - Geo. In: *Edson Aparecido Mitishita et al.. (Org.). Série em Ciências Geodésicas - Pesquisas em Ciências Geodésicas - 2002*. 1 ed. Curitiba: Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - UFPR, v. 2, p. 131-151, 2002.
- MITISHITA, E. A.; HABIB, A. F.; CENTENO, J. A. S.; MACHADO, A. M. L. Photogrammetric and LiDAR Data Integration Using the Centroid of a rectangular building roof as a control point. *Photogrammetric Record*, v. 23, p. 19-35, 2008.
- RESSL, C.; HARING, A.; BRIESE, C.; ROTTENSTEINER, F., A Concept For Adaptive Mono-Plotting Using Images and Laserscanner. In: *Int. Archives for Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXVI/3, pp. 98 – 104, 2006.
- ROS, G. A. ; DAL POZ, A. P. . Visualização 3D de uma imagem digital: Metodologia e potencial cartográfico. *Pesquisas em Geociências* (UFRGS), Porto Alegre, RS, v. 29, n. 2, p. 77-87, 2002.
- MULAWA, D. C.; MIKHAIL, E. M. Photogrammetric Treatment of linear features. In: *Proceedings of 16th International Congress of Photogrammetry and remote Sensing*. Kyoto, 1988.
- PETSA, E.; PATIAS, P. Sensor attitude determination using linear features. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXX, Commission I, p.62-70, 1994.
- ROBERTS, K. A New Representation for a Line. In: *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, p. 635-640, 1988.

- SCHENK, T.; SEO, S.; CSATHO, B.. Accuracy study of airborne laser scanning data with photogrammetry, *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 34 (part 3/W4), Annapolis, MD, pp.113, 2001.
- SCHENK, T.; CSATHO, B.. Fusion of Lidar Data and Aerial Imagery for a More Complete Surface Description. *In: Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIV/3A, pp. 310–317, 2002.
- SHAN, F. *An approach to single image automatic orientation and point determination by using ortho-images and DTM*. *Photogrammetric Record* vol. 17, p. 343-353. 2001.
- TELLES, S.; TOMMASELLI, A. M. G. Um Modelo Matemático para Calibração de Câmaras Baseado em Linhas Retas. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, v. 57, n. 3, p.1-9, 2005.
- TOMMASELLI, A. M. G.; LUGNANI, J. B. An alternative mathematical model to the collinearity equation using straight features. *In: Proceedings of 16th International Congress of Photogrammetry and remote Sensing*. Kyoto, 1988.
- TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. A recursive approach to space resection using straight lines. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 62, no. 1, p. 55-66, 1996.
- TOMMASELLI, A. M. G. ; REISS, M. L. L. A photogrammetric method for single image orientation and measurement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, Maryland, v. 71, n. 6, p. 727-732, 2005.
- WEHR, A.; LOHR, U. Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview. *Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. vol. 54, no. 1, pp. 68-82, 1999
- WILKIN, A. Robust 3D-Object Representation by Linear Features. *ISPRS 17th Congress*, Commission V, Washington, 1992.
- ZALMASON, G. Hierarchical recovery of exterior orientation from parametric and natural 3-D curves. *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIII, part B2, p.610- 617, 2000.
- ZHANG, C. Towards an operation system for automated updating for road database by integration of imagery and geodata. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58, pp. 166-186, 2004.
- ZIELINSKI, H. Line photogrammetry with multiple images. *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXIX, part B3, Washington, p.669-676, 1992.

(Recebido em setembro de 2008. Aceito em abril de 2010)