

# Aerotriangulação de Imagens Obtidas com Câmara não Métrica e de Pequeno Formato Apoiada com Dados LIDAR

Eng. M.Sc. Roosevelt de Lara Santos Jr.  
Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

UFPR - Depto. de Geomática  
81531-990 Curitiba PR  
rls@ufpr.br  
mitishita@ufpr.br

**Resumo:** No presente trabalho apresenta-se a integração de dados LIDAR e imagens aéreas obtidas por câmara digital não métrica e de pequeno formato, através de ajustamento simultâneo do bloco de imagens utilizando a técnica de aerotriangulação por feixes de raios convergentes ou *bundle adjustment*. O objetivo principal é a verificação da possibilidade do emprego de câmaras não métricas e de pequeno formato em atividades aerofotogramétricas, bem como analisar a consistência dos dados posicionais oriundos da varredura laser como apoio fotogramétrico. As etapas aqui apresentadas foram desempenhadas desconsiderando as unidades métricas convencionais para o espaço imagem, optando-se pelo *pixel* como unidade nesse espaço.

**Palavras chaves:** integração, câmara digital, não métrica, pequeno formato, LIDAR, *bundle adjustment*.

**Abstract:** The use of non-metric, low cost digital cameras is becoming a very attractive option as a source of spatial information about terrestrial surfaces. This is being motivated by the increased resolution of CCD sensors, as well as the results of recent studies indicating the stability of the internal parameters of such cameras. On the other hand, Digital Elevation Model obtained by laser scanning is an excellent source of reliable three-dimensional coordinates for several applications in photogrammetry and other fields. Although the Laser Scanner provides high reliable geometric information, it can not be compared to information contained in a digital image, because the spectral information of the laser system is very poor. Therefore, the integration of both data sources is an attractive option for mapping. In this paper, it is presented a methodology to perform the bundle block adjustment using non-conventional aerial images and Laser Scanner data. Some check points were surveyed with conventional GPS techniques allowing for the comparison and evaluation of the precision/accuracy of the final results.

**Keywords:** integration, digital camera, non-metric, small format, LIDAR, *bundle adjustment*.

## 1 Introdução

Os diferentes ramos do conhecimento vêm continuamente sendo afetados pela crescente disponibilização de elementos tecnológicos oriundos principalmente das áreas de eletrônica e informática. A Fotogrametria tem feito uso destas novas tecnologias de forma que atualmente as tarefas de *escritório*, outrora dependentes de equipamentos e pessoal especializado, hoje restringem-se ao operador e um computador. Da mesma forma, as operações de campo relacionadas ao apoio fotogramétrico foram drasticamente simplificadas com o advento do GPS (Global Positioning System) otimizando o apoio convencional ou realizando o vôo apoiado. Há cerca de quinze anos os sistemas Laser Scanning vêm sendo utilizados para modelagem do terreno com precisões em torno de um decímetro para altimetria e o dobro cerca de dois decímetros para planimetria( Wever e Lindeberger, 1999). Estes sistemas compostos basicamente de GPS, SMI ( Sistema de Medição Inercial) e um dispositivo de varredura LASER (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation) permite a determinação da atitude e o posicionamento tridimensional de pontos no terreno. A atitude deste sistema pode ser transferida para um quarto elemento, por exemplo, uma câmara fotogramétrica convencional ou digital, realizando o sonho de todo fotogrametrista, ou seja, a obtenção em tempo real e simultânea da imagem, parâmetros de orientação exterior (OE) da estação de

exposição e ainda o modelo digital do terreno (MDT). A crescente disponibilização de dados gerados pelo perfilamento a laser, e também desfrutando nesta data (novembro 2003) da possibilidade de aquisição de câmaras amadoras digitais com resolução de até 8 Mb, ao custo de cerca de mil dólares americanos (Sony 2003), a qual possibilita a aquisição de imagens digitais coloridas com resolução compatível à realização de trabalhos fotogramétricos, fatos estes que tornam interessantes a integração dos dados posicionais oriundos do Laser Scanner e os dados espectrais da câmara digital. Neste sentido o presente trabalho apresenta a aerotriangulação por feixes convergentes (*Bundle Adjustment*), apoiada por dados LIDAR (*Light Detection and Ranging*) de 13 imagens (2 faixas, direção das linhas de voo nordeste-sudoeste) obtidas com câmara digital não métrica de pequeno formato modelo Sony DSC-F717, CCD - *Charge Coupled Device* com resolução 2560 x 1920 pixel (5,2 megapixels), objetivando também, mostrar a viabilidade aerofotogramétrica desta integração de dados através da análise da qualidade posicional oriunda da aerotriangulação. Outro objetivo é o de dar continuidade à execução de procedimentos fotogramétricos sem a utilização de uma unidade métrica convencional pertencente ao Sistema Internacional de Unidades (SI ex. milímetro ou micrômetros) como unidade de medida no espaço imagem, aqui substituída pela unidade de resolução da imagem, o pixel, (*Picture Element*). Tomando-se em conta que câmaras não métricas não possuem marcas fiduciais, e a conseqüente necessidade de um sistema de referência para imagem, substitui-se o referencial fiducial (clássico e associado à unidades do SI) por um referencial de imagem baseado sobre o sensor de área da câmara digital e em sua respectiva resolução em *pixels* (seja como no presente caso CCD, e da mesma forma para os CMOS - *Complementary Metal Oxide Semiconductor* e HDRC - *High-Dynamic-Range CMOS*). Estas considerações permitiram primeiramente proceder a calibração da câmara digital (Andrade, 2001; Delara, 2003) sem a necessidade do conhecimento das dimensões métricas de seu sensor de área e que no presente trabalho terá testada sua operacionalidade durante o procedimento de aerotriangulação, realizando a geocodificação direta das coordenadas de imagem sobre o CCD para o espaço objeto em coordenadas de terreno. Conseqüentemente, não se mencionará termos como sistema de coordenadas fiducial, correção do trabalho do filme, coordenadas das marcas fiduciais.

## 2 Generalidades

### 2.1 Sistema de Referência no Espaço Imagem

Neste trabalho utilizou-se os seguintes sistemas de referência para o espaço imagem (Figura 1):

- Sistema Digital (Matricial)  $(x'', y'')$ , definido como um sistema cartesiano plano retangular, levógiro, com origem no canto superior esquerdo da imagem, sendo  $x''$  coincidente com a primeira linha e  $y''$  coincidente com a primeira coluna;
- Sistema de Imagem  $(x, y)$ , é paralelo ao sistema digital, sua origem localiza-se (arbitrariamente) no centro geométrico da imagem, sua orientação é dextrógiro, com  $x$  positivo no sentido das abcissas (da esquerda para direita) e  $y$  positivo ao longo do eixo das ordenadas (de baixo para cima);

A transformação entre os sistemas digital e imagem pode ser realizada através das equações a seguir:

$$x = x'' - \frac{Col + 1}{2} \quad (1)$$

$$y = \frac{Lin + 1}{2} - y'' \quad (2)$$

$x'', y''$  = coordenadas no sistema digital;  
 $x, y$  = coordenadas no sistema de imagem;  
 $Col$  = número de colunas da imagem;  
 $Lin$  = número de linhas da imagem;

- Sistema de Coordenadas Fotogramétricas  $(x', y')$ , o referencial fotogramétrico é por definição paralelo ao referencial de imagem, resumindo a transformação de um sistema para o outro numa translação no plano a partir do conhecimento das coordenadas do ponto principal no referencial de imagem  $(x_0, y_0)$ .

A transformação entre coordenadas no sistema de imagem e sistema de coordenadas fotogramétricas pode ser realizado com as equações a seguir:

$$x' = x - x_0 \quad (3)$$

$$y' = y - y_0 \quad (4)$$

$x', y'$  = coordenadas fotogramétricas ;

$x_0, y_0$  = coordenadas do ponto principal no sistema de imagem.

## 2.2 Sistema de Referência no Espaço Objeto

O sistema de referência para o espaço objeto adotado para o presente trabalho foi um sistema híbrido no qual as coordenadas geodésicas UTM-SAD69 (E,N) e a altitude ortométrica  $h$ , foram igualadas respectivamente a coordenadas cartesianas plano retangulares  $X, Y, Z$ , sendo que tal aproximação é possível em função da pequena área de abrangência do levantamento aerofotogramétrico realizado (cerca de 2 km<sup>2</sup>).

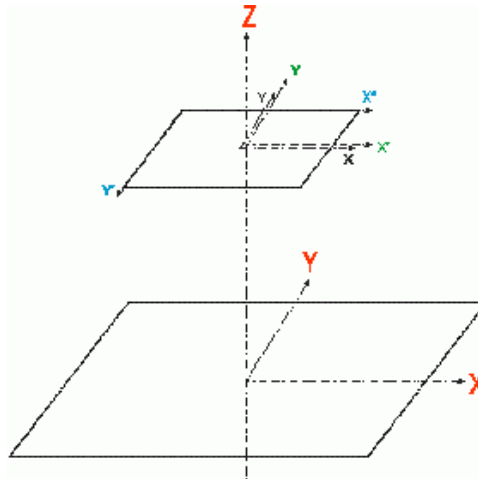


Figura 1 : Sistemas de Referência

## 2.3 Matrizes de Rotação

Os ângulos de Euler ( $\kappa, \varphi, \omega$ ) representam as rotações (atitude), entre sistemas envolvidos, dadas pela matriz de rotação  $M$ .

$$M = R_z(\kappa) \cdot R_y(\varphi) \cdot R_x(\omega) \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$m_{11} = \cos \varphi \cdot \cos \kappa$$

$$m_{12} = \cos \omega \cdot \text{sen} \kappa + \text{sen} \omega \cdot \text{sen} \varphi \cdot \cos \kappa$$

$$m_{13} = \text{sen} \omega \cdot \text{sen} \kappa - \cos \omega \cdot \text{sen} \varphi \cdot \cos \kappa$$

$$m_{21} = -\cos \varphi \cdot \text{sen} \kappa$$

$$m_{22} = \cos \omega \cdot \cos \kappa - \text{sen} \omega \cdot \text{sen} \varphi \cdot \text{sen} \kappa$$

$$m_{23} = \text{sen} \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \text{sen} \varphi \cdot \text{sen} \kappa$$

$$m_{31} = \text{sen} \varphi$$

$$m_{32} = -\text{sen} \omega \cdot \cos \varphi$$

$$m_{33} = \cos \omega \cdot \cos \varphi$$

## 2.4 Equações de Colinearidade

$$x' = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (7)$$

$$y' = -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (8)$$

$c$  = constante da câmara (espaço imagem);  
 $X, Y, Z$  = coordenadas dos pontos (espaço objeto);  
 $X_0, Y_0, Z_0$  = coordenadas do centro perspectivo (espaço objeto);  
 $m_{ij}$  = elementos da matriz de rotação  $M$ .

As equações (7) e (8) são denominadas equações de colinearidade. Estas possibilitam o relacionamento matemático (geometria projetiva) de coordenadas fotogramétricas de pontos no espaço imagem com suas correspondentes coordenadas de pontos no espaço objeto (Lugnani, 1987; Merchant, 1988; Novak, 1991; Mitishita, 1997; Schenk, 1999).

## 2.5 Distorção Radial Simétrica

A distorção radial simétrica pode ser encarada como sendo a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente ou sistema de lentes (detalhes em Andrade e Olivas, 1981). O modelo empregado para corrigir as observações fotogramétricas da distorção radial simétrica foi desenvolvido a partir do modelo apresentado por Conrady em 1929 (Merchant, 1988).

$$\delta r_x = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \cdot (x - x_0) \quad (9)$$

$$\delta r_y = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \cdot (y - y_0) \quad (10)$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (11)$$

$\delta r_x$  e  $\delta r_y$  = correção devida à distorção radial simétrica;  
 $k_1, k_2, k_3$  = coeficientes da distorção radial simétrica;  
 $r$  = distância do ponto considerado ao ponto principal.

## 2.6 Distorção Descentrada

A distorção descentrada, oriunda da impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem uma objetiva, resulta em deslocamentos na imagem. Esta distorção é composta pelas distorções tangencial e radial assimétrica, conforme demonstrado por Conrady (1919), detalhes em (Andrade e Olivas 1981). A distorção descentrada não era considerada nos trabalhos iniciais de fotogrametria. A magnitude do erro era bem inferior ao da distorção simétrica, isto se devia à existência de sistemas de lentes mais simples nas câmaras antigas, com a fabricação de câmaras modernas com elaborados sistemas de lentes e a exigência de trabalhos fotogramétricos mais precisos, verificou-se a necessidade de modelar esta distorção nos trabalhos fotogramétricos. O modelo matemático utilizado para a correção desta distorção foi desenvolvido por Duane Brown em 1966, baseado no modelo de Conrady em 1919, denominado então de Conrady e Brown (Merchant, 1988).

$$\delta d_x = P_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] \cdot 2 \cdot P_2 \cdot (x - x_0) \cdot (y - y_0) \quad (12)$$

$$\delta d_y = P_2[r^2 + 2(y - y_0)^2] \cdot 2 \cdot P_1 \cdot (x - x_0) \cdot (y - y_0) \quad (13)$$

$\delta d_x$  e  $\delta d_y$  = parcela de correção devida à distorção descentrada;  $P_1$  e  $P_2$  = coeficientes da distorção descentrada.

## 2.7 Coeficientes de Afinidade

Os parâmetros de afinidade modelam a possibilidade de não ortogonalidade e diferença de escala entre os eixos  $x$  e  $y$  do sistema de coordenadas de imagem. Em câmaras digitais, este efeito ocorre quando: (Galo, 1993; Reiss, 2002)

- o pixel possui dimensões diferentes em  $x$  e  $y$ , ou seja, não é perfeitamente quadrado;
- o sensor CCD não é perfeitamente perpendicular ao eixo óptico.

As equações a seguir desenvolvidas por (Moniwa, 1977), a partir da Transformação Afim Geral no Plano (TAGP) oferecem correção aos elementos descritos no parágrafo anterior.

$$\delta a_x = A_a \cdot (x - x_0) \quad (14)$$

$$\delta a_y = B_a \cdot (x - x_0) \quad (15)$$

$A_a, B_a$  = parâmetros de afinidade.

## 2.8 Refração Fotogramétrica

A refração atmosférica produz um deslocamento da imagem na direção aproximadamente radial a partir do ponto principal para imagens aproximadamente verticais, devido à variação progressiva do índice de refração da atmosfera. No presente trabalho adota-se o modelo aproximado de Saastamoinen para o cálculo do índice de refração para um ângulo nadiral de  $45^\circ$  ( $e_{45}$ ) para atmosfera padrão US Standard Atmosphere 1962, para altitudes de vôo até 9 km (Merchant, 1988). Dada por:

$$e_{45} = 13 \cdot (Z_c - Z_p) \cdot [1 - 0,02 \cdot (2 \cdot Z_c + Z_p)] \cdot 10^{-6} \quad (16)$$

$$\delta f_x = e_{45} \cdot (1 + r^2 / c^2) \cdot x \quad (17)$$

$$\delta f_y = e_{45} \cdot (1 + r^2 / c^2) \cdot y \quad (18)$$

$e_{45}$  = índice de refração para um ângulo nadiral de  $45^\circ$ ;

$Z_c$  = altitude de vôo (em km);

$Z_p$  = altitude média do terreno (em km).

## 2.9 Aerotriangulação por Feixes de Raios Convergentes

A determinação de coordenadas de pontos num referencial específico por uma determinada técnica fotogramétrica é denominada fototriangulação, quando se trata de fotos ou imagens aéreas esta técnica é também conhecida por Aerotriangulação, Triangulação Aérea ou Triangulação Espacial. A aerotriangulação tem como objetivo principal a determinação precisa dos parâmetros de orientação exterior absoluta de uma imagem no espaço, consiste na determinação das coordenadas tridimensionais da estação de exposição no espaço objeto ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) e a atitude desta estação representada pelos ângulos de Euler ( $\kappa, \varphi, \omega$ ), bem como coordenadas de outros pontos necessários à restituição fotogramétrica ou para elaboração de ortofotos. (Andrade, 1998) A aerotriangulação por feixes de raios convergentes (*bundle method*) considera uma imagem como um feixe de retas, onde cada reta fica definida pela condição de colinearidade de três pontos (os pontos nos espaços imagem e objeto, e o centro perspectivo). Esta técnica trabalha com as observações no espaço imagem como dados básicos do problema (Lugnani 1987). O modelo matemático do *bundle adjustment* são as equações de colinearidade e o modelo de ajustamento é o dos mínimos quadrados (MMQ), contando com a superabundância de observações. O *bundle adjustment* é interessante por permitir o ajustamento simultâneo de todas imagens e pontos integrantes do bloco (Novak, 1991).

O modelo matemático para o ajustamento:

$$x = x_0 - x' - \delta r_x - \delta d_x - \delta a_x - \delta f_x \quad (19)$$

$$y = y_0 - y' - \delta r_y - \delta d_y - \delta a_y - \delta f_y \quad (20)$$

## 2.10 Ajustamento por MMQ – Combinado

Inicialmente apresenta-se o Método dos Mínimos Quadrados com modelo Combinado, dado por:

$$F(L_a, X_a) = 0 \quad (21)$$

O qual reúne tanto parâmetros ajustados  $X_a$  como valores observados ajustados  $L_a$ , através de uma função não explícita. Assume após linearização a seguinte forma:

$$AX + BV + W = 0 \quad (22)$$

$$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_0} \quad (23)$$

$$B = \frac{\partial F}{\partial L_a} \Big|_{L_b} \quad (24)$$

$$W = F(Lb, X_0) \quad (25)$$

$$W = L_b - L_0 = L \quad (26)$$

$$B = I \quad (27)$$

$$AX + V + L = 0 \quad (28)$$

$L_a$  = vetor dos valores observados ajustados;

$X_a$  = vetor dos parâmetros ajustados;

$A$  = matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros ajustados;

$B$  = matriz das derivadas parciais em relação às observações ajustadas;

$X$  = vetor de correção aos parâmetros ajustados;

$V$  = vetor dos resíduos das observações;

$L_b$  = vetor dos valores observados;

$W$  = vetor resultante da aplicação das observações e dos parâmetros aproximados pela (25);

$$X = -(A^T P A)^{-1} (A^T P L) = -N^{-1} U \quad (29)$$

$$X_a = X_0 + X \quad (30)$$

$$P_i = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{xi}^2 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{yi}^2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$X_a$  = vetor dos parâmetros ajustados;

$X_0$  = vetor dos parâmetros aproximados;

$X$  = vetor das correções aos parâmetros aproximados;

$P_i$  = submatriz da matriz (diagonal) dos pesos das observações no espaço imagem;

$\sigma_{xi}^2, \sigma_{yi}^2$  = variâncias das coordenadas dos pontos observadas no espaço imagem;

Considerando que  $N$  seja singular, será necessário a aplicação de injunções de maneira a eliminar sua deficiência de característica. No presente trabalho optou-se pelo uso de Injunções de Peso ou Posição, o modelo de injunção é o que se segue: (Andrade e Olivas, 1981)

$G$  = função de injunção (no presente caso coordenadas  $X, Y, Z$  medidas no espaço objeto dos respectivos pontos de apoio);

$$C = \frac{\partial G}{\partial (X, Y, Z)} \quad (32)$$

$C$  = é a matriz das derivadas parciais da função de injunção em relação aos parâmetros de injunção;

A matriz  $C$ , no presente estudo, será composta de dois blocos: o primeiro composto de zeros, diz respeito ao bloco dos parâmetros (portanto derivadas parciais nulas); o segundo composto de submatrizes com dimensão 3x3, diagonal nula ou unitária conforme o tipo de injunção – planialtimétrica ( $X, Y, Z$ ), planimétrica ( $X, Y$ ) ou altimétrica ( $Z$ )), resultando genericamente em:

$${}_{3j}C = \begin{matrix} \leftarrow XYZ \rightarrow \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (33)$$

$$X = -(N_1 + N_2)^{-1} (U_1 + U_2) \quad (30)$$

$$N_1 = A^T P A \quad (31)$$

$$N_2 = C^T P^C C \quad (32)$$

$$U_1 = A^T P L \quad (33)$$

$$U_2 = C^T P^C \varepsilon \quad (34)$$

$$\varepsilon = X_c^a - X_{obs} \quad (35)$$

$\varepsilon$  = vetor erro de fechamento das injunções, ou resíduos nos pontos do espaço objeto;

$X_c^a$  = vetor das coordenadas calculadas pelo ajustamento;

$X_{obs}$  = vetor das coordenadas do espaço objeto, observadas;

$P^C$  = matriz de pesos das observações no espaço objeto;

$np$  = parâmetros de orientação exterior das imagens envolvidas;

$N_2$  = será uma matriz bloco diagonal de  $(np + 3j)$  linhas por  $(np + 3j)$  colunas, com submatrizes de peso

$P_j^C$ , dadas por:

$$P_j^C = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{xy}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{yy}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sigma_{zj}^2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$U_2$  = será um vetor  $(np + 3j, 1)$ , com subvetores  $U_j$  dados por:

$$U_j = \begin{bmatrix} (1/\sigma_{xy}^2)\varepsilon_x \\ (1/\sigma_{yy}^2)\varepsilon_y \\ (1/\sigma_{zj}^2)\varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (37)$$

$\sigma_{xy}^2, \sigma_{yy}^2, \sigma_{zj}^2$  = variância das coordenadas do espaço objeto;

A verificação da qualidade na determinação dos parâmetros, pode ser realizada através da análise dos resíduos nas observações no espaço imagem ( $V$ ), resíduos nas injunções ( $\varepsilon$ ) e matriz variância e covariância dos pontos ajustados ( $\Sigma_{Xa}$ ), dada por:

$$\Sigma_{Xa} = \hat{\sigma}_0^2 (N_1 + N_2)^{-1} \quad (38)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V + \varepsilon^T P^C \varepsilon}{gl} \quad (39)$$

$\hat{\sigma}_0^2$  = variância das observações de peso unitário *a posteriori*;

$gl$  = graus de liberdade, igual ao do n° total de equações do modelo mais o n° de equações de injunção menos o n° de parâmetros.

$$H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2 \quad \text{contra} \quad H_1 : \sigma_0^2 > \hat{\sigma}_0^2$$

$$\chi_a^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \cdot gl \quad (40)$$

A hipótese básica não será rejeitada ao nível de significância ( $\alpha$ ) se:

$$\chi_a^2 \leq \chi_{(gl, \alpha)}^2 \quad (41)$$

$\chi_a^2$  = representa o qui-quadrado amostral;

$\chi_{(gl, \alpha)}^2$  = representa o qui-quadrado tabelado para o nível de significância  $\alpha$  e  $gl$  graus de liberdade.

Caso contrário tem-se um indicativo de erro no ajustamento devendo-se proceder análise cuidadosa da matriz variância covariância (MVC) dos valores observados, possibilidade de falha grosseira ou presença de erros sistemáticos, ou que o modelo matemático não é consistente para os valores observados ou ainda um possível mal condicionamento do sistema (Gemaël, 1994).

## 2.11 Câmaras Digitais de Pequeno Formato

Câmara (fotográfica) digital, pode ser descrita como um equipamento para aquisição de imagens digitais, doravante, simplesmente imagem, desejando-se ressaltar a diferença entre uma imagem adquirida digitalmente, das analógicas (fotografias) convencionais que posteriormente são digitalizadas. O termo imagem refere-se a uma função de intensidade luminosa bidimensional, denotada por  $F(x,y)$ , em que o valor ou amplitude de  $F$  nas coordenadas espaciais  $(x,y)$  representa a intensidade (brilho) da imagem naquele ponto. Como a luz é uma forma de energia,  $F(x,y)$  deve ser positiva e finita, isto é,

$$0 \leq F(x,y) \leq \infty \quad (42)$$

As imagens que as pessoas percebem em atividades visuais corriqueiras consistem de luz refletida dos objetos. A natureza básica de  $F(x,y)$  pode ser caracterizada por dois componentes, *iluminação* ou a quantidade de luz incidindo na cena observada e a *reflectância* ou quantidade de luz refletida pelos objetos

dispostos na cena. Representadas respectivamente por  $i(x,y)$  e  $r(x,y)$  O produto destas funções resulta  $F(x,y)$ :

$$F(x,y) = i(x,y) r(x,y) \quad (43)$$

$$0 \leq i(x,y) \leq \infty \quad (44)$$

$$0 \leq r(x,y) \leq 1 \quad (45)$$

A equação (2.4) indica que a reflectância é limitada entre 0 (absorção total) e 1 (reflectância total), a natureza de  $i(x,y)$  é determinada pela fonte de luz e  $r(x,y)$  é determinada pelas características dos objetos na cena (Gonzalez e Woods, 1993).

Dois elementos são necessários para aquisição de imagens digitais. O primeiro é o dispositivo físico sensível à banda do espectro de energia eletromagnética e que produza um sinal elétrico de saída proporcional a um nível de energia percebida. O segundo chamado digitalizador, é um dispositivo para a conversão da saída elétrica de um dispositivo físico para a forma digital (realiza a conversão analógica/digital). A tecnologia usada em sensores de imageamento do estado sólido (tanto nos sensores por varredura linear quanto nos sensores de área), são baseados principalmente em dispositivos de carga acoplada (CCD). Um sensor típico de CCD por varredura de linha contém uma linha de "fotossítios", dois portos de transferência usados para transportar os conteúdos dos elementos de imageamento para os denominados registradores de transporte e um porto de saída usado para transferir os conteúdos dos registradores de transporte para um amplificador, que produz um sinal de tensão proporcional ao conteúdo da linha de fotossítios. Os sensores de área por carga acoplada (matrizes) são similares aos sensores de varredura por linha, exceto que os fotossítios são arrançados em forma matricial e uma combinação de porta / registrador de transporte separa as colunas de fotossítios (Gonzalez e Woods, 1993). Fases de formação da imagem digital (Galo, 1993; Atkinson, 1996; Reiss, 2002):

- a formação da imagem inicia-se no momento em que a radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos atravessa o sistema óptico de uma câmara digital e é exposta a um sensor;
- a partir deste instante o feixe luminoso é desviado e projetado sobre os elementos sensores, que produzem um sinal proporcional à intensidade luminosa;
- os sinais são recebidos pelos circuitos eletrônicos que os convertem em voltagens;
- em seguida, o sinal analógico é discretizado por um conversor A/D (analógico / digital);
- por fim, o sinal analógico é discretizado em tons de cinza e armazenado em uma memória de alta velocidade (*frame buffer*), para posteriores processamentos digitais.

Por câmaras digitais de pequeno formato, consideram-se as câmaras portáteis (as conhecidas como *câmaras fotográficas de mão*, equivalentes as câmaras convencionais de 35mm), da mesma maneira, por não métrica se adotará as que não possuem marcas fiduciais (Oliveira, 1987).

## 2.12 LIDAR

No presente trabalho apenas indicaremos ao leitor os princípios básicos de funcionamento do sistema de perfilamento a laser, maiores detalhes podem ser obtidos em Dalmolin e Santos 2003. O sistema de perfilamento a laser gera coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície baseado no tempo de emissão e retorno de um pulso de laser. Este processo é denominado LIDAR - *Light Detection and Ranging*, caracterizado pela soma das componentes emissora e receptora dos pulsos laser (Optech, 2003).

- Primeiramente, o laser gera um pulso óptico;
- o pulso é refletido pelo objeto e retorna ao sistema receptor;
- a diferença de tempo no trajeto de ida e volta é determinada;

O sistema LIDAR permite a separação dos pulsos emitidos de maneira a posicionar os objetos em seu topo e ao nível do terreno, respectiva e genericamente denominados primeiro e último pulsos, os quais possibilitam a construção do modelo digital de elevações (MDE) para o primeiro pulso e do modelo digital do terreno (MDT) para o último pulso. Conforme observamos na figura a seguir, primeiramente um preciso *laser rangefinder* (telêmetro a Laser) varre a superfície registrando os pulsos (distâncias) e suas respectivos direções (ângulos); a fim de corrigir os movimentos da aeronave durante o pós-processamento, são gerados e gravados pelo sistema de medição inercial as atitudes referentes a cada distância medida; o posicionamento da aeronave é realizado por GPS através de dois receptores um

instalado na aeronave e outro no terreno permitindo a correção diferencial e refino das coordenadas. Posterior à realização da missão de voo os dados gerados são combinados e determinam a posição precisa dos pontos de terreno. A precisão nominal do sistema é de cerca de 15 cm ( erro médio quadrático) para altimetria e cerca de 30 cm para a planimetria (Wever e Lindeberger, 1999; Optech, 2003).

### 3 Metodologia

#### 3.1 Dados LIDAR

A fim de se verificar a consistência posicional dos dados LIDAR (ver Tabela 1), utilizou-se dados posicionais precisos de 8 pontos referidos ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), posicionados geodesicamente por GPS e nivelados geometricamente, com precisões informadas pelo LAIG – Laboratório de Aferição Instrumental Geodésica - UFPR, respectivamente de alta precisão em planimetria (da ordem de 1/100.000) (CONCAR 2003), e de alta precisão em altimetria ( $2\text{mm}/\sqrt{k}$ , k em quilômetros)(CONCAR 2003), permitindo após a comparação dos dados que se concluí-se o seguinte:

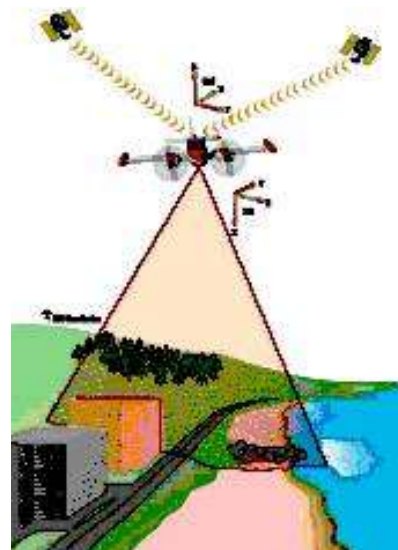


Figura 2 : LIDAR aerotransportado (www.optech.on.ca)

- os dados LIDAR estão referenciados ao SGB;
- os dados LIDAR não apresentaram características de conter erros sistemáticos;
- o vetor planimétrico resultante médio das diferenças entre as coordenadas precisas e LIDAR (dN, dE) é igual a 0,254 m (dR);
- da mesma forma para a altimetria constatou-se uma variação média em altitude de 0,486m (dh1), ou seja, sistematicamente os dados LIDAR estavam 0,486m abaixo dos dados precisos;
- pelo exposto no item anterior aplicou-se correção altimétrica aos dados LIDAR, através de uma translação em Z (simplesmente se adicionou 0,486m a todas as altitudes LIDAR) de forma que a média das diferenças altimétricas passou para -0,002 m e desvio padrão de 0,109m (a média próxima de zero indicando a exclusão do erro sistemático e o desvio padrão de ordem decimétrica compatível com a precisão nominal oferecida pelo fabricante do sistema, da mesma maneira atendendo aos anseios do LACTEC realizador do levantamento LIDAR);
- a partir desta verificação conclui-se ser verdadeira a consistência dos dados LIDAR o seu real potencial de uso como apoio fotogramétrico.

Tabela 1. Verificação Posicional LIDAR.

PONTO	dN	dE	dR	dh1	hort(cor)	h1+hcor
RN02	-0,020	0,215	0,216	0,408	914,073	0,085
RN03	-0,215	-0,019	0,216	0,440	909,693	0,053
RN08	-0,006	0,136	0,136	0,543	902,423	-0,050
RN09	-0,001	0,121	0,121	0,502	901,623	-0,009
RN12	0,321	-0,120	0,343	0,662	921,023	-0,168
RN14	-0,227	0,315	0,388	0,626	917,523	-0,133
RN21	-0,032	-0,397	0,398	0,480	907,163	0,013
RN23	-0,169	-0,130	0,213	0,224	913,536	0,192
média	-0,044	0,015	0,254	0,486		-0,002
des.pad.	0,164	0,214	0,102	0,128		0,109

#### 3.2 Aerotriangulação

Procedimentos:

- Primeiramente providenciou-se cópias em papel fotográfico das 13 imagens (2 faixas, direção aproximada nordeste-sudoeste), que constituiram o bloco aerotriangulado visando facilitar a escolha dos pontos fotogramétricos (apoio, ligação e verificação);
- em ambiente ENVI 3.4, sobre as 13 imagens aéreas e de intensidade analisou-se e definiu-se a posição

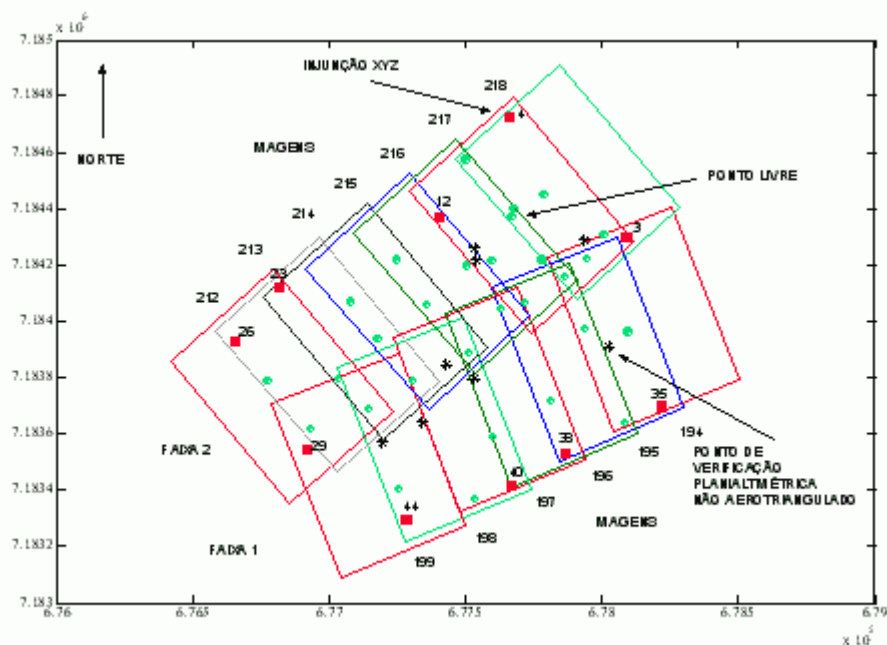
dos pontos identificáveis nos dois tipos de imagem e extraiu-se as coordenadas planimétricas destes pontos na imagem de intensidade (LIDAR);

- posteriormente utilizando o arquivo texto contendo as coordenadas *brutas LIDAR* destes pontos pesquisou-se coordenadas de pontos vizinhos a estes num raio de 1 m, definindo assim as três coordenadas no espaço objeto para os pontos de apoio fotogramétrico e de verificação;

- novamente em ambiente ENVI 3.4 realizou-se a leitura de coordenadas no espaço imagem e sistema de imagem digital (em pixels) dos pontos definidos anteriormente nas 13 imagens aéreas;

- visando obtenção de dados aproximados de orientação exterior a serem utilizados durante o *bundle adjustment* realizou-se a resseção espacial individual das 13 imagens aéreas (programa ORIONE.m);

- finalmente o *bundle adjustment* para o bloco (ver Figura 3), foi realizado pelo programa BUNDLE.m. Com relação a escolha dos pontos de apoio do bloco aerotriangulado priorizou-se que os pontos de apoio injuncionados planialtimetricamente (fixados X,Y,Z código 3), ocupassem o entorno do bloco de maneira a serem mínimos em número e deixando a maior área possível no interior deste bloco ocupada por pontos livres (código 0). A distribuição final dos pontos aerotriangulados pode ser observado na figura 3 (no presente estudo não foram utilizados injunções planimétrica, código 2 e altimétrica, código 1).



**Figura 3 : Bloco Aerotriangulado**

## 4 Análise dos Resultados

### 4.1 RESULTADO DA AEROTRIANGULAÇÃO

O resultado obtido com a Aerotriangulação por Feixes de Raios Convergentes foi satisfatória, considerando-se primeiramente a variância da unidade de peso a *posteriori*, com valor próximo da unidade, os baixos resíduos nas observações (todos os pontos abaixo de 1,6 pixels, cerca de 40 cm no terreno); outro indicativo de qualidade do ajustamento foi a aprovação pelo teste global e fundamentalmente os baixos resíduos nas coordenadas ajustadas dos pontos livres (sem qualquer tipo de injunção, código 0).

## 4.2 ANÁLISE DE EXATIDÃO

Conforme apresentado no item 3.1 os dados LIDAR apresentam consistência posicional planialtimétrica o que respalda sua utilização como referência para verificação da exatidão nas coordenadas aerotrianguladas nos pontos livres através da comparação com suas respectivas coordenadas oriundas da varredura laser conforme apresentado na Tabela 2.

Na presente análise considera-se que a finalidade primordial da aerotriangulação empregada é o fornecimento dos parâmetros de orientação exterior (OE) das imagens componentes do bloco e que potencialmente e posteriormente podem ser utilizadas na confecção de um produto cartográfico final, a ortofotocarta ou simplesmente ortoimagem (produto este dependente da OE advinda da aerotriangulação, do MDT ou do MDE gerado pelo LIDAR e é claro das imagens aéreas digitais). Com esta visão buscou-se classificar o resultado obtido pela verificação realizada com os pontos livres aerotriangulados com o padrão de exatidão cartográfico vigente no país.

A classificação de cartas conforme sua exatidão no Brasil é regimentada pela Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR), através do Decreto nº 89.817 de 20 de Junho de 1984 - Normas Cartográficas – que decreta instruções reguladoras das normas técnicas da Cartografia Nacional, que em seu Capítulo II – Seção 1 Classificação de uma Carta Quanto a Exatidão, Artigo 8º, diz:

As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, segundo o critério abaixo:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica – Planimétrico - estabelecido.
2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico – estabelecido.

...

Na seqüência da norma na Seção 2 Classes de Cartas, Artigo 9º diz o seguinte sobre os critérios para classificação de uma carta como Classe A:

...

- Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico, 0,5 mm na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o erro padrão correspondente;

- Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico, metade da equidistância entre as curvas de nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro Padrão correspondente.

...

(CONCAR 2003)

Analisando o Quadro 2, e considerando os 29 pontos testados, portanto, com limite máximo de pontos que possam extrapolar ao PEC em planimetria e altimetria igual a 3, e que o erro resultante planimétrico dR (máximo para o caso da escala 1:2000, até 1 m) e para altimetria considerando meia equidistância das curvas de nível igual a 0,5 m, verifica-se que o levantamento realizado enquadre-se no Padrão de Exatidão Cartográfica – Planimétrica Classe A até a escala 1:2000 (aprovado em 93,1% dos pontos testados).

Evidentemente haveria negativa para a altimetria (aprovado em apenas 68,9% dos pontos testados), porém em se considerando que na prática deve-se preservar a altimetria advinda do LIDAR o resultado é satisfatório e abrange grande gama de serviços aerofotogramétricos.

## 4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DE RESULTADOS

- é importante destacar que os modelos de superfície gerados pelo sistema LIDAR atingem precisões equivalentes aos gerados pelas técnicas topográficas convencionais (Wever e Lindeberger, 1999);
- o nível de automação de processamento dos dados LIDAR é maior que os equivalentes fotogramétricos, porém em tal automação não é possível a determinação precisa do efeito da aplicação dos diversos filtros e interpolações desse processo (Adams e Chandler, 2002);
- a precisão altimétrica LIDAR é normalmente apresentada na literatura científica variando de 10 a 15 cm, porém poucos estudos relatam a precisão planimétrica do sistema, que segundo (Maas, 2003) é da ordem de 50 cm para alturas de vôo LIDAR entre 500 e 700 m;

Comentando as três opiniões anteriores:

- primeiramente ressaltamos o enquadramento técnico do experimento aqui apresentado aos realizados por outros pesquisadores;
- da mesma forma com relação a precisão nominal do equipamento fornecida pelo fabricante;
- o alto grau de automação dos dados LIDAR e a conseqüente dependência de softwares fechados;
- repetidamente na literatura especializada encontramos verificações de qualidade de coordenadas geradas por LIDAR por comparação às geradas por processos fotogramétricos convencionais.

O futuro:

- os modelos de sistemas LIDAR vêm se modernizando e já está ofertado ao mercado equipamento que possibilita precisão planimétrica de 0,25m para altura de vôo de 1500m (Optech, 2003).

## **5 Conclusões e Recomendações**

### **Conclusões:**

- dados LIDAR, planimétricos e altimétricos, podem ser utilizados como apoio fotogramétrico em vôos não simultâneos à sua realização;
- as câmaras digitais não métricas (de baixo custo) e de pequeno formato têm real potencial para uso em levantamentos Aerofotogramétricos;
- havendo disponibilidade de levantamentos geodésicos, portanto confiáveis, na região levantada por LIDAR, estes dados podem e devem ser integrados aos dados LIDAR permitindo o seu refinado, conforme apresentado neste trabalho ou não;
- a utilização do *pixel* como unidade no sistema imagem é consistente e eficaz;
- a integração de dados LIDAR e imagens aéreas coloridas obtidas com câmaras digitais não métricas e de pequeno formato mostra-se promissora em seus resultados considerando o progressivo aumento de resolução nos sensores de área destas câmaras e o crescimento das regiões levantadas por LIDAR;
- o uso de dados LIDAR pré-existentes numa dada região é estratégico em termos de atualização cartográfica e ou de seu detalhamento cartográfico.

### **Recomendações:**

- continuidade nos testes de integração LIDAR – câmara de pequeno formato;
- testes com câmaras não métricas que se utilizem de tecnologias como CMOS e HDR/CMOS, uma vez que os fabricantes de câmaras digitais prevêem que estas tecnologias serão dominantes no futuro próximo;
- automação do processo de integração aqui apresentado, seja total ou parcial.

Tabela 2. Análise de Exatidão.

Ponto	Código	dE(m)	dN(m)	dR(m)	dh(m)
5	0	0,041	0,739	0,740	0,297
6	0	0,684	-0,009	0,684	-0,204
7	0	0,171	-0,231	0,287	0,044
8	0	-0,462	0,191	0,500	1,210
9	0	-0,189	-0,093	0,211	-0,080
10	0	0,632	0,254	0,681	-1,140
11	0	0,438	-0,464	0,638	-0,297
13	0	0,200	-0,579	0,613	-0,312
14	0	-0,320	-0,598	0,678	-0,194
15	0	-0,423	-0,289	0,512	1,643
16	0	0,728	-1,047	1,275	-0,146
17	0	0,363	0,344	0,500	1,032
18	0	0,228	-0,021	0,229	0,857
19	0	0,460	-0,583	0,743	0,143
20	0	-0,355	0,504	0,616	-0,453
21	0	0,352	-0,610	0,704	-0,096
22	0	0,083	0,121	0,147	0,371
24	0	-0,251	-0,360	0,439	-0,130
25	0	1,175	-0,418	1,247	-0,938
27	0	0,013	0,782	0,782	1,215
28	0	0,543	0,034	0,544	0,172
32	0	0,021	-0,036	0,042	0,074
33	0	-0,178	-0,151	0,233	0,232
34	0	0,518	-0,240	0,571	1,454
36	0	0,015	-0,039	0,042	-0,156
37	0	0,138	0,498	0,517	0,508
39	0	0,399	0,490	0,632	-0,228
42	0	-0,103	0,514	0,524	0,264
43	0	-0,549	-0,219	0,591	0,216
	Média	0,151	-0,052	0,549	0,185
	Des.Pad.	0,410	0,448	0,283	0,656

## 6 Referências Bibliográficas

- ADAMS J.C., CHANDLER J.H.** *Evaluation of LIDAR and Medium Scale Photogrammetry for Detecting Soft-Cliff Coastal Change*. Photogrammetric Record, 17(99): 405-418p. 2002.
- ANDRADE, J. B.** *Fotogrametria*. Curitiba: SBEE, 1998, 243p.
- ANDRADE, J.B.; OLIVAS, M.A.** *Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas*. Boletim de Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, nº 26, 39p, Curitiba, 1981.
- ANDRADE R.R.** *Mensurações Dedrométricas com Câmaras Digitais Calibradas*. Dissertação de mestrado. Curitiba.2001. UFPR, 138p.
- ATKINSON, K.B.** *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Department of Photogrammetry and Surveying – University College London, Whittles Publishing, 1996, 371p.
- DALMOLIN, Q.; SANTOS D.R.** *Sistema Laserscanning : Conceitos e Princípios de Funcionamento*. Curitiba: Ed. UFPR, 2003, 94p.
- DELARA, R.** *Calibração de Câmaras Digitais Não Métricas e de Pequeno Formato Utilizando o Pixel como Unidade no Espaço Imagem*. Curitiba, 2003, Seminário da Disciplina Tópicos Avançados em Fotogrametria, Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

- GALO, M.** *Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais*. Curitiba, 1993, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.
- GEMAEL, Camil.** *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. Curitiba: Ed. UFPR, 1994, 319p.
- GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E.** *Digital Image Processing*. Addison Wesley, 1993, 509p.
- KAVOURAS, M.** *On the detection of outliers and the determination of reability in geodetic networks*. Department of Surveying Engineering - University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, 1987, 120p.
- LUGNANI, J.B.** *Introdução à Fototriangulação*. Curitiba: ed UFPR, 1987, 134p.
- MAAS, H.G.** *Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data - User requirements and system performance*. Proceedings 49. Photogrammetric Week (Ed. D. Fritsch), Wichmann Verlag, 2003, 117-125p.
- MERCHANT, D.C.** *Analytical Photogrammetry: Theory and Practice. Part I*, Columbus, Ohio, 1988, Department of Geodetic Science, The Ohio state University.
- MITISHITA, E.A.** *Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D., para Fins de Mapeamento na área Florestal*. Curitiba, 1997, Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 253p.
- MITISHITA, E.A., BARBOSA, F.P.** *Verificação da Estabilidade Geométrica dos Parâmetros de Calibração de uma Câmara Digital não Métrica de Pequeno Formato Sony DSC-F717*. Anais do Terceiro Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, 2003.
- MONIWA, H.** *Analytical Photogrammetric System with Self-Calibration and its Applications*. Fredericton, N.B., 1977, Tese (Doctor of Philosophy) – Department of Surveying Engineering – University of New Brunswick, 107p.
- NOVAK, K.** *Analytical Photogrammetry (GS 628)*. Columbus, Ohio, 1991, Department of Geodetic Science and Surveying.
- OLIVEIRA, C.** *Dicionário Cartográfico*. IBGE: Rio de Janeiro, 3ed, 1987, 645p.
- REISS, M.L.L.** *Restituição Fotogramétrica Flexível de Imagens à Curta Distância: Estudo de Métodos e Desenvolvimento de Protótipo*. Dissertação de Mestrado, Presidente Prudente, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, 2002.
- SCHENK, T.** *Digital Photogrammetry - Volume I*. TerraScience, Laurelville, Ohio, 1999, 428p.
- SONY.** *Digital Still Camera Cybershot DSC-F717*. Sony Corporation, 2002, 121p.
- WEVER C., LINDEBERGER J.** *Experinces of 10 years laser scanning*. [www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo99 / wever.pdf](http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo99/wever.pdf), 1999, 125-132p.

#### Sites Consultados:

<http://homepages.ihug.com.au/~parsog/Guy/sensors.html> acessado em 24/03/2003

[www.sony.com](http://www.sony.com) acessado em 30/04/2003

[www.optech.on.ca](http://www.optech.on.ca) acessado em 15/10/2003

[www.concar.ibge.gov.br](http://www.concar.ibge.gov.br) acessado em 17/10/2003