

Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas a Partir de Aerofotos Digitais (Scanning)

Prof. Edson A. Mitishita ¹

Prof^a. Mary A. A. Olivas ²

Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Universidade Federal de Paraná
Curitiba PR

¹ ✉ mitishit@geoc.ufpr.br

² ✉ mary@geoc.ufpr.br

Conteúdo	
	1 Introdução
	2 Calibração do Sistema Fotogramétrico
	3 Materiais
	4 Observações Fotogramétricas
	5 Referencial Fiducial
	6 Refração Fotogramétrica Total
	7 Determinação Dos Parâmetros Geométricos
	8 Distância Focal Calibrada
	9 Distorção Descentrada
	10 Conclusões
	11 Referências Bibliográficas

Resumo : Os parâmetros que permitem a reconstrução da geometria projetiva do instante da tomada da foto são fundamentais para a realização dos trabalhos fotogramétricos no domínio da fotogrametria analítica e digital. Porém, as informações geométricas contidas no certificado de calibração fornecido pelo fabricante, necessárias para tal reconstrução, não contemplam os princípios estabelecidos por Eisenhart (1963), sobre calibração de instrumentos. Assim, verifica-se a necessidade de determinação de um novo conjunto de parâmetros. Este trabalho mostra os resultados de testes de calibração de um sistema fotogramétrico a partir de observações em aerofotos digitalizadas e a comparação com a calibração realizada a partir de observações fotogramétricas em diapositivos analógicos. As aerofotos são provenientes de uma câmara aerofotogramétrica Wild RC-10. Utilizou-se o campo de testes de São Luis do Purunã - PR, e o método dos campos misturados para a determinação dos parâmetros geométricos da imagem digital.

Palavras chave : Calibração de Câmaras, Imagem Digital, Campos Misturados

Abstract : The parameters that allow the reconstruction of the instant of the photograph taking projective geometry are essential for the execution of photogrammetric work in the domain of analytical and digital photogrammetry. However, the geometric information contained in the calibration supplied by the aerial camera manufacturer does not match the instrument calibration principles established by Eisenhart (1963). As a consequence, we face the need of determining a new group of geometric parameters. This research shows the results of the photogrammetric calibration system, from digital (scanning) airphotos comparing with the results from photogrammetric observations in analog photographs. The images come from a Wild RC-10 photogrammetric camera. The test field was located in São Luis do Purunã - Paraná, and the mixed ranges method was used to determine the geometric parameters of the digital image.

Keywords : Camera Calibration, Digital Image, Mixed Ranges

1 Introdução

O desenvolvimento constante da informática, disponibilizando computadores cada vez mais eficientes quanto à velocidade de processamento e capacidade de armazenamento, vem possibilitando uma maior aplicação da fotogrametria digital na obtenção de informações da superfície terrestre.

Tomando-se como base a aerofotogrametria métrica convencional, as aerofotos empregadas nos sistemas digitais, ainda são obtidas a partir da digitalização de originais analógicos (diafilmes ou negativos) em "Scanners" que transformam a imagem analógica para a sua correspondente digital.

Os "Scanners" empregados nesta transformação são os fotogramétricos que possuem uma superfície plana que possibilita a melhor fixação da imagem analógica, como também são providos de qualidades mecânicas e ópticas que permitem obter aerofotos digitais com resolução e exatidão geométrica necessárias aos trabalhos fotogramétricos (Ver, MEHLO, 1995).

Dependendo do tipo de trabalho fotogramétrico digital a ser realizado são necessárias imagens digitais com maiores resoluções e precisões geométricas, visando melhorar a exatidão das informações obtidas. Neste caso, os parâmetros geométricos que permitem reconstruir a geometria projetiva da imagem no instante da exposição são de fundamental importância.

Considerando-se como premissa os conceitos estabelecidos por (EISENHART, 1963), sobre a **calibração do Sistema**, pioneiramente aplicados no Brasil por (ANDRADE, 1981), verifica-se a importância de realizar a calibração do sistema fotogramétrico a partir das imagens digitais, pois desta forma poderão ser parametrizadas as eventuais deformações existentes no processo de

"scannerização" dos originais fotográficos.

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos da calibração do Sistema Fotogramétrico a partir de aerofotos digitais.

2 Calibração do Sistema Fotogramétrico

O método dos Campos Misturados (Ver, ANDRADE, 1998), foi o procedimento calibração de câmaras empregado na realização desta pesquisa. Proposto inicialmente por **Merchant** no início dos anos 70 nos EUA (Ver MERCHANT, 1979), foi otimizado e melhorado no Brasil por **Andrade** (Ver ANDRADE, 1981), onde no início dos anos 80 implantou o Campo de Calibração na região da Serra de São Luiz do Purunã – Paraná e desenvolveu procedimentos teóricos e práticos necessários à realização da calibração do sistema fotogramétrico.

As aerofotos são geometricamente tomadas do campo, de forma que os marcos pré-sinalizados sejam "imageados" por todo o quadro do negativo. As imagens são rigorosamente observadas num sistema fotogramétrico de leitura monoscópica. Um ajustamento simultâneo de aerofotos (M.M.Q.), acrescido com injunções de posição, altitude e distância (Ver ANDRADE, 1998) permite recuperar os parâmetros geométricos necessários à reconstrução matemática da geometria perspectiva. As equações de colinearidade (01) acrescidas dos parâmetros matemáticos que modelam as distorções de lentes são as equações básicas do procedimento.

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{m_{11}(X-X_o)+m_{12}(Y-Y_o)+m_{13}(Z-Z_o)}{m_{31}(X-X_o)+m_{32}(Y-Y_o)+m_{33}(Z-Z_o)} + x_o + \Delta_x x + \Delta_{\alpha} \\ y &= -c \frac{m_{21}(X-X_o)+m_{22}(Y-Y_o)+m_{23}(Z-Z_o)}{m_{31}(X-X_o)+m_{32}(Y-Y_o)+m_{33}(Z-Z_o)} + y_o + \Delta_y y + \Delta_{\phi} \end{aligned} \quad (01)$$

$$\Delta_x = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)$$

$$\Delta_{\alpha} = P_1 (r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy$$

$$\Delta_{\phi} = 2P_1 xy + P_2 (r^2 + 2y^2)$$

(x, y) = Coordenadas de pontos no referencial fiducial;

c = Distância focal da câmara;

(k_1, k_2, k_3) = Parâmetros da distorção radial simétrica;

(P_1, P_2) = Parâmetros da distorção descentrada;

(x_o, y_o) = Coordenadas do ponto principal no referencial fiducial;

(X_o, Y_o, Z_o) = Coordenadas da estação de exposição;

$[X \ Y \ Z]^T$ = Coordenadas de pontos no referencial geodésico local;

m_{ij} = Elementos da matriz de rotação $(R(\chi).R(\phi).R(\omega))$

Para calibrar o sistema fotogramétrico torna-se necessário a eliminação de todos os erros sistemáticos ou a parametrização matemática dos mesmos nas equações de colinearidade.

A refração fotogramétrica é um erro sistemático que não pode ser parametrizado, nas equações de colinearidade, junto com a distorção radial simétrica, pois são fisicamente o mesmo fenômeno e portanto correlacionados. O valor do parâmetro que descreve matematicamente o afastamento do ponto imagem, devido a refração fotogramétrica total (diferentes índices de refração existentes no trajeto que a luz percorre do ponto objeto até a entrada na câmara) deve ser primeiramente determinado, através da parametrização isolada da refração fotogramétrica nas equações de colinearidade, possibilitando assim a correta pré-correção deste efeito nas coordenadas de foto dos pontos observados (Ver ANDRADE, 1977 e ANDRADE, 1988).

As equações 02 são as parcelas referentes à refração fotogramétrica em fotocoordenadas.

$$\begin{aligned} \Delta_x &= \varepsilon_{45} \left(1 + \frac{r^2}{c^2}\right) x \\ \Delta_y &= \varepsilon_{45} \left(1 + \frac{r^2}{c^2}\right) y \end{aligned} \quad (02)$$

3 Materiais

A câmara aerofotogramétrica WILD RC 10, de propriedade da Empresa Universal Aerofotogrametria S.A., montada com o cone grande angular (distância focal nominal de 152,060 mm), lente Wild 15 UAG I, filtro Wild PAN 500 Yellon N° 2791 e filme Kodak Double X – Aerographic Film 2405 (Star base) foram empregados para o recobrimento aéreo do campo de calibração em São Luiz do Purunã, localizado no estado do Paraná.

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas sete (07) aerofotos, na escala de 1/12.000 da cobertura aerofotogramétrica executada de acordo com as necessidades geométricas exigidas pelo método de calibração (Ver ANDRADE, 1998).

Em cada faixa de vôo, selecionou-se as aerofotos que recobrem a área central do Campo de Calibração, obtendo-se a seguinte distribuição: duas na faixa leste-oeste, duas na faixa oeste-leste, duas na faixa sul-norte e uma na faixa norte-sul.

Os negativos foram digitalizados no Scanner fotogramétrico Digital VEXCEL VX3000, na Empresa Universal Aerofotogrametria S.A. A dimensão do "pixel" empregado foi de 0,010 mm, resultando um arquivo digital de dimensões de aproximadamente 590 Mbytes para cada imagem.

4 Observações Fotogramétricas

As aerofotos digitais foram lidas no sistema fotogramétrico Monorestituído Digital (Ver MITISHITA, 1999) e os negativos originais foram lidos no sistema fotogramétrico analítico ZEISS Planicomp C_100.

Três séries completas de leituras foram feitas nos pontos fotogramétricos pré-sinalizados existentes no campo de calibração. O número de imagens identificadas e lidas nas sete aerofotos e os desvios padrões médios resultantes das observações nos sistemas fotogramétricos são apresentados na tabela 01.

Tabela 1: Mostra os resultados estatísticos das observações fotogramétricas realizadas.

	MonoRestituído Digital	Zeiss Planicomp c-100
Aerofoto	Digital	Negativo
Número de Imagens	227	232
Desvio Padrão Médio em x	0,003	0,003
Desvio Padrão Médio em y	0,003	0,004

5 Referencial Fiducial

As observações fotogramétricas foram realizadas em ambos os Sistemas fotogramétricos, no referencial de medidas (denominado aqui de referencial de máquina). Utilizando uma transformação matemática, as observações das marcas fiduciais no referencial de máquina e as coordenadas das marcas fiduciais no referencial fiducial, pode-se matematicamente parametrizar as principais diferenças existentes entre o referencial de máquina e o fiducial.

A câmara aerofotogramétrica utilizada nesta pesquisa possui somente quatro (04) marcas fiduciais e admitindo-se que a diferenças existentes entre os dois referenciais sejam devidas a uma rotação no plano, translações, não ortogonalidade entre eixos e fatores de escala distintos nos eixos, empregou-se a transformação Afim Geral no plano, conforme mostrado em (MITISHITA, 1997) que os resultados práticos obtidos com esta transformação tem sido suficientes nas aplicações desta natureza.

Realizou-se o ajustamento por MMQ para a determinação matemática da transformação, admitindo-se uma precisão de 0,0025 mm para as coordenadas no referencial fiducial e 0,005 mm para as coordenadas no referencial de máquina. A tabela 02 mostra os resíduos médios obtidos na determinação dos parâmetros da transformação matemática em ambos os sistemas fotogramétricos.

RESULTADOS MÉDIOS – AJUSTAMENTO

Tabela 2: Mostra os resultados médios obtidos no ajustamento da transformação.

MonoRestituído Digital – Resíduos Médios				Planicomp C-100 – Resíduos Médios				
Ref. de Máquina		Ref. Fiducial		Ref. de Máquina		Ref. Fiducial		
Marca	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
01	-0,009	0,005	0,003	-0,001	0,003	-0,005	0,000	0,000
02	0,009	-0,005	-0,003	0,001	-0,003	0,005	0,000	0,000
03	-0,009	0,005	0,003	-0,001	0,003	-0,005	0,000	0,000
04	0,009	-0,005	-0,003	0,001	-0,003	0,005	0,000	0,000
a = 0,9999 ± 0,00007		b = 0,0018 ± 0,00007		a = 0,9999 ± 0,00003		b = 0,0120 ± 0,00003		
c = 110,8243 ± 0,00710		d = -0,0017 ± 0,00007		c = 1,7547 ± 0,00320		d = -0,0119 ± 0,00003		
e = 0,9998 ± 0,00007		f = -109,3344 ± 0,0071		e = 0,9999 ± 0,00003		f = -3,4339 ± 0,00320		

6 Refração Fotogramétrica Total

A determinação do parâmetro matemático, referente ao efeito da refração fotogramétrica total (atmosfera e pela camada de ar perturbada pelo deslocamento da aeronave), foi determinado através de um ajustamento simultâneo de aerofotos (feixes perspectivos), utilizando-se equações de colinearidade (01), parametrizada somente do efeito do erro sistemático, refração fotogramétrica (equações 02), conforme proposto por (ANDRADE, 1987).

Empregou-se, neste caso as observações feitas nos negativos, tendo em vista o conhecimento de distorções neste ambiente. Os principais resultados obtidos no ajustamento são apresentados na tabela 03.

RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DETERMINAÇÃO DE (ϵ_{45})

Tabela 3 : Mostra os principais resultados obtidos do ajustamento na determinação de ϵ_{45}

(ϵ_{45})	-5,64880711e-04 ± 8,64459e-05
Rm(x)	± 0,002 mm
Rm (y)	± 0,002 mm
Rm(Z)	± 0,001 m
Nm	35
Ni	224

Rm(x)= Erro médio dos resíduos em fotocoordenas (x)

Rm(y)= Erro médio dos resíduos em fotocoordenas (y)

Rm(Z)= Erro médio dos resíduos nos pontos de apoio altimétrico

Nm= Número de marcos

Ni= Número de pontos imageados nas aerofotos

7 Determinação Dos Parâmetros Geométricos

Os parâmetros geométricos de ambos os sistemas fotogramétricos são determinados pelo ajustamento MMQ, conforme apresentado no item 02, com as observações realizadas nos sistemas fotogramétrico digital e analítico. Os principais valores obtidos são apresentados na tabela 04.

Na tabela 04 verifica-se um aumento significativo nos valores dos parâmetros de distorção radial simétrica no caso da utilização das observações realizadas nas aerofotos digitais.

CALIBRAÇÃO DO SISTEMA FOTOGAMÉTRICO

Tabela 4 : Mostra os principais resultados obtidos na calibração dos Sistemas

Parâmetro	Aerofotos Digitais	Negativos
C	152,209 mm	152,131 mm
x_0	-0,020 mm	-0,003 mm
y_0	0,036 mm	0,042 mm
k_1	6,3892818e-08 mm ⁻²	4,9260422e-08 mm ⁻²
k_2	-7,4152301e-12 mm ⁻⁴	-5,3830377e-12 mm ⁻⁴
k_3	2,4049528e-16 mm ⁻⁶	1,6918894e-16 mm ⁻⁶
P_1	-9,9601589e-08 mm ⁻²	-3,6090256e-07 mm ⁻²
P_2	4,3407418e-07 mm ⁻²	3,1761421e-07 mm ⁻²
Rm (x)	0,002 mm	0,002 mm
Rm (y)	0,002 mm	0,002 mm
Rm(Z)	0,001 m	0,001 m
Nm	218	224
Ni	35	35

As figuras 01 e 02 mostram graficamente o comportamento de cada parâmetro individual da distorção radial simétrica, e o resultado com todos os parâmetros envolvidos. As curvas nas cores verde e vermelha são respectivamente referentes a calibração do sistema digital e analógico.

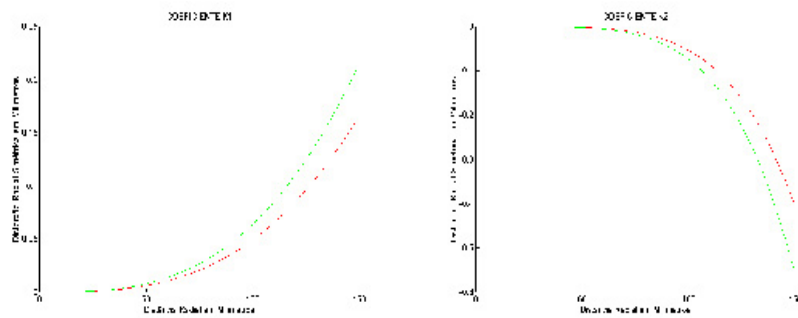


Figura 1 : Gráficos de distorção radial simétrica para os coeficientes K1 e K2.

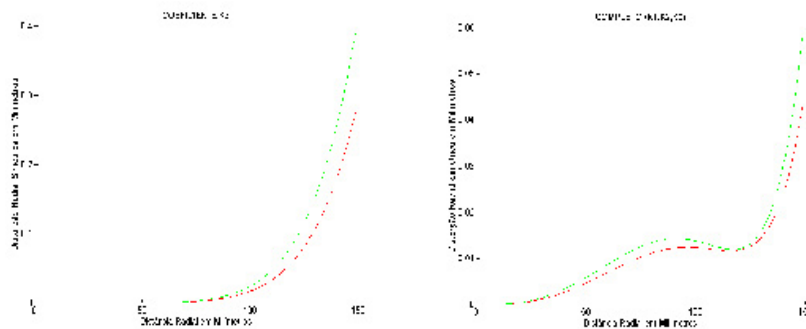


Figura 2 : Gráficos de distorção radial simétrica para o coeficiente K3 e a Total.

Dos resultados analíticos e gráficos apresentados verificamos que existe um significativo aumento de distorção radial nas bordas das imagens digitais que deve estar associado ao procedimento de transformação da imagem analógica para digital. As causas desta distorção no procedimento de "scanning" podem estar ligadas com as deformações devidas a não planificação do negativo (colocação imprópria do negativo no "scanner") ou imprecisões mecânicas e ópticas do "scanner".

8 Distância Focal Calibrada

A curva de distorção radial simétrica correspondente à distância focal gaussiana equivalente (determinada por um processo de calibração) pode ser balanceada com a introdução de um termo linear em r no polinômio e recálculo dos coeficientes não lineares (Ver ANDRADE, 1998). As equações matemáticas (03) descrevem as novas distorções radiais em fotocoordenadas.

$$\begin{aligned} \Delta_{rx} &= (k_0' + k_1' r^2 + k_2' r^4 + k_3' r^6) x \\ \Delta_{ry} &= (k_0' + k_1' r^2 + k_2' r^4 + k_3' r^6) y \end{aligned} \quad (03)$$

A nova distância focal, denominada de calibrada, para esta nova configuração de distorção pode ser calculada com a equação 04.

$$c' = c(1 - k_0') \quad (04)$$

Na tabela 05 apresentam-se os resultados das compensações realizadas com as curvas de distorção radial simétrica determinadas nas calibrações. Adotou-se o critério de se ter como distorções máximas o valor de 0,010 mm na área útil de trabalho da aerofoto (considera-se aqui, como sendo área útil a região definida por uma circunferência de raio 130 mm, contada a partir do centro da aerofoto), e deixando as maiores deformações nas bordas dos cantos das diagonais da aerofoto, geralmente não utilizada nos trabalhos fotogramétricos.

COMPENSAÇÃO DE DISTORÇÃO

Tabela 5 : Mostra os resultados obtidos da compensação da distorção radial simétrica

Parâmetro	Aerofotos Digitais	Negativos
c'	152,238 mm	152,159 mm

k_0	-1,9000000e-04	-1.8500000e-04
k_1	6,3904991e-08 mm ⁻²	4,9269488e-08 mm ⁻²
k_2	-7,4166429e-12 mm ⁻⁴	-5,3840285e-12 mm ⁻⁴
k_3	2,4054110e-16 mm ⁻⁶	1,6922008e-16 mm ⁻⁶

A figura 03 mostra as curvas de distorção radial simétrica para as distâncias focais calibradas nos sistemas fotogramétricos para as aerofotos digitais e analógicas.

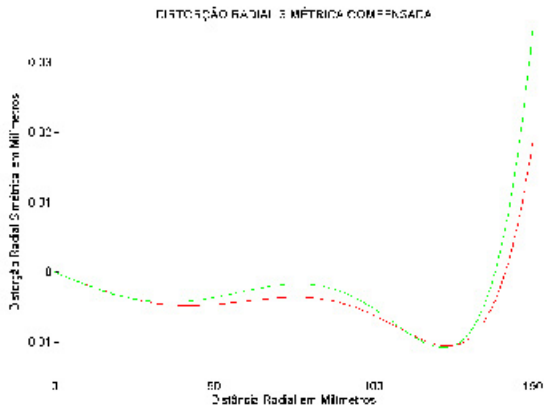


Figura 3 : Mostra as curvas de distorção radial simétrica compensada.

As figuras 04 e 05 mostram a distribuição espacial das observações realizadas nas aerofotos empregadas na calibração dos sistemas fotogramétricos. Em cada ponto observado, tem-se o vetor que caracteriza a dimensão e orientação da distorção radial simétrica compensada na posição. A dimensão linear do vetor está numa escala 1000 vezes maior em relação ao referencial de medida em que se encontra.

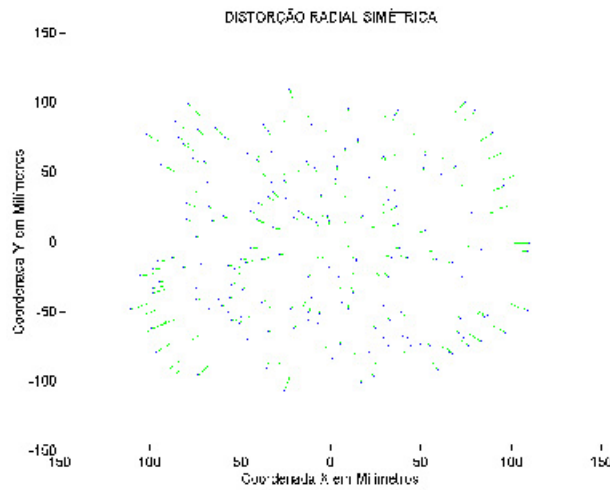


Figura 4 : Mostra a distribuição espacial das observações empregadas na calibração do sistema digital e gráfico de vetores da distorção radial simétrica.

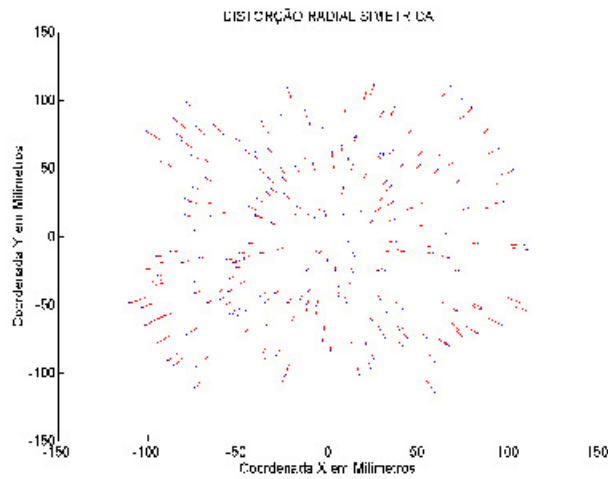


Figura 5 : Mostra a distribuição espacial das observações empregadas na calibração do sistema analógico e gráfico de vetores da distorção radial simétrica.

9 Distorção Descentrada

A distorção descentrada é a resultante das parcelas de distorções tangencial e radial assimétrica existentes numa dada posição na imagem fotográfica. A causa desta distorção está relacionada com a impossibilidade de alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que formam a objetiva (ver ANDRADE, 1998).

As figuras 06 e 07 mostram, em forma de vetores lineares, o comportamento da distorção descentrada nas imagens digital e analógica. A dimensão linear do vetor está numa escala 1000 vezes maior em relação ao referencial de medida em que se encontra.

Analisando as figuras 06 e 07, verifica-se que o conjunto de distorção descentrada determinados nas calibrações dos sistemas, utilizando imagens digitais e analógicas apresenta resultados similares. Máximos valores de distorção descentrada existentes em posições observadas nas imagens digital e analógica são respectivamente 0,014 mm e 0,021 mm.

Os valores médios de distorções descentradas, obtidos na imagem digital e analógica (considerando valores absolutos) são respectivamente 0,005 mm e 0,006 mm.

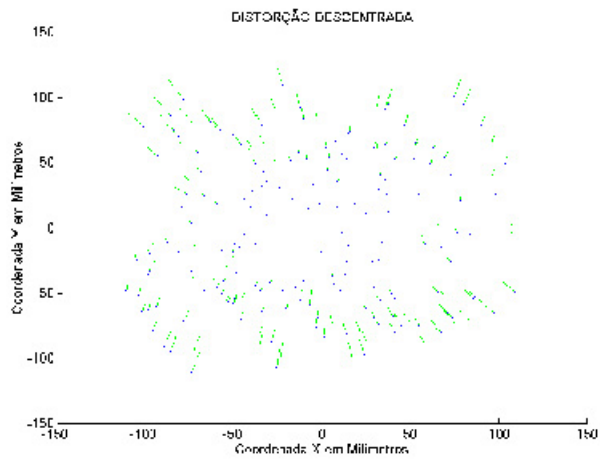


Figura 6 : Mostra o gráfico de vetores da distorção descentrada na imagem digital.

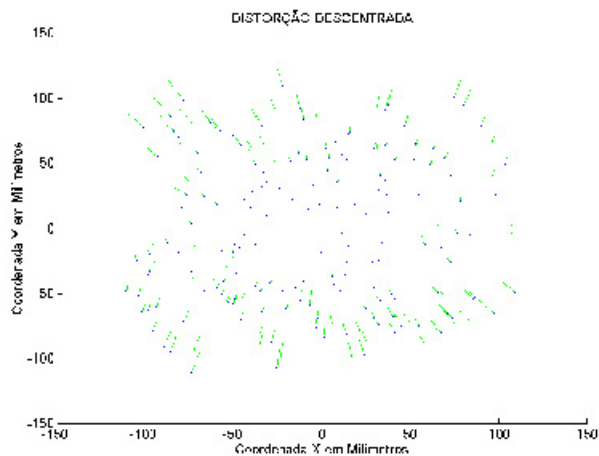


Figura 7 : Mostra o gráfico de vetores de distorção descentrada na imagem analógica.

10 Conclusões

Os resultados obtidos nesta pesquisa nos mostram a importância da calibração do sistema para aumentar a exatidão dos trabalhos fotogramétricos.

A utilização de aerofotos digitais com dimensão do "pixel" de 0,010 mm, permitiu que os procedimentos fotogramétricos de calibração com a adoção de imagens digitais apresentassem precisões e exatidões equivalentes a utilização de originais analógicos.

O sistema MonoRestituído digital, empregado para a realização da leitura de pontos nas imagens digitais apresentou resultados excelentes de precisão para a realização de observações fotogramétricas.

Maiores distorções foram encontradas na utilização de imagens digitais, entretanto o procedimento de calibração do sistema, permitiu a correta parametrização matemática dos efeitos, resultando distorções praticamente iguais na área útil de trabalho da aerofoto.

A obtenção de maiores deformações radiais nas imagens digitais, admitidas nesta pesquisa com sendo função do processo de transformação do original analógico para digital, podendo estar relacionado com falhas de operação do "scanner" ou imprecisões ópticas e mecânicas do equipamento, necessita de maiores pesquisas para poder avaliar as causas destas distorções.

11 Referências Bibliográficas

ANDRADE, José Bittencourt. Photogrammetric Refraction. Columbus, Ohio, 1977. PhD dissertation - Department of Geodetic Science, The Ohio State University.

ANDRADE, José Bittencourt; OLIVAS, Mary A. Azevedo. Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas. Boletim da UFPR, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1981 Curitiba, N° 26 p. 01-39.

ANDRADE, José Bittencourt; MITISHITA, Edson. A. System Calibration Versus Phogrammetric Refraction. In: 16th International Congress Of International Society For Photogrammetry And Remote Sensing (1988 : Kyoto). **Anais...** Kyoto : ISPRS, 1988. Volume 27, Part B8, p. 42- 49.

ANDRADE, José Bittencourt. Fotogrametria. SBEE, 1998. ISBN 85-86180-07-6.

MEHLO, Herwing, A. Photogrammetric Scanners. Photogrammetric Week 1995, Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 11-17.

EISENHART, Churchill. Realistic Evaluation of the Precicion and Accuracy of Instrument Calibration Systems. Journal of Reseach of the National Bureau of Standards. C. Engineering and Instrumentation. 67C(2): 161-87. Apr./Jun. 1963 USA.

MERCHANT, Dean C. Analytical Photogrammetry: Theory and Practice, part I and II. Columbus, Ohio, 1979. Department of Geodetic Science, The Ohio State University.

MITISHITA, Edson. A. Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D., para Fins de Mapeamento na Área Florestal. Curitiba, 1997. Tese (Doutoramento em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

MITISHITA, Edson. A.; MACHADO, Álvaro, M. L. Sistema Monorestituídor Digital. XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, Recife, 1999. Anais do Congresso – Fotogrametria.