

ESTUDO DE CASO: CORREÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS EM CÂMARAS DIGITAIS NÃO MÉTRICAS

Alvaro Muriel Lima Machado ¹
Edson A. Mitishita ²
Roosevelt de Lara Santos Jr ³

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – alvaroml@ufpr.br

² Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – mitishita@ufpr.br

³ Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – rls@ufpr.br

RESUMO

A calibração de câmaras fotogramétricas parte de um equacionamento teórico que tem por objetivo modelar os erros sistemáticos apresentados pela geometria projetiva da câmara. Diversos parâmetros são definidos e calculados, baseados em modelos cujas componentes podem ser atribuídas diretamente a fontes físicas. Os mais tradicionais modelam distorção radial simétrica, distorção descentrada, e afinidade ou não-ortogonalidade, sendo que o último tem especial importância nas calibrações de câmaras digitais. Ao se utilizar uma câmara calibrada, adota-se o modelo definido quando de sua calibração, e corrigem-se os eventuais desvios geométricos existentes na imagem. Existem situações, entretanto, quando se parte do espaço objeto para o espaço imagem, que se deve efetuar o inverso da correção dos erros, ou seja, introdução de erros sistemáticos. Frequentemente usam-se os mesmos equacionamentos empregados quando da correção dos erros sistemáticos, apenas invertendo-se o sinal da operação (menos para eliminação de erros e mais para introdução dos mesmos). Tal sistemática não traz grande prejuízo à exatidão do processo quando câmaras fotogramétricas são utilizadas. Já no que se refere às câmaras digitais não métricas, isto não é mais verdadeiro, dada a ordem de grandeza dos parâmetros de calibração, principalmente da distorção radial simétrica. Os erros gerados pelos procedimentos inadequados são discutidos. Para a manutenção da precisão e acurácia dos processos de tratamento dos erros sistemáticos, recomenda-se um equacionamento adequado para o seu manuseio que emprega a metodologia numérica de resolução de equações simultâneas pelo processo iterativo de Newton-Raphson.

Palavras-chave: Câmaras Digitais, Erros Sistemáticos, Calibração.

A CASE STUDY: DIGITAL CAMERA SYSTEMATIC ERRORS

ABSTRACT

The calibration of photogrammetric cameras makes use of a theoretical equation which aims to model the systematic errors shown by the projective geometry set of a camera. Several parameters are defined and calculated, based on physical models, which means that all components are derived from actual physical errors sources. The most traditional models radial lens distortion, and decentering lens distortion. There are also the affinity errors, that are specially suited for digital photogrammetry. When using a calibrated camera, we must adopt the defined calibration model, so that the eventual existing geometric deviations can be corrected in the image. There are situations, however, when we came from the object space to the image space, that we should make use of the inverse of the correction of the errors, that is, introduction of systematic errors. We frequently use the same employed equations when correcting the systematic errors, just inverting the signal of the operation (minus for correction and plus for introduction). Such approximated methodology does not bring great prejudice to the accuracy of this process when we are using photogrammetric cameras. However, in what regards to non metric digital cameras, this is not true, given to the greatness order of the parameters, mostly of the radial lens distortion. The errors generated by this approximated methodology are analyzed. For the sake of precision and accuracy maintainment, we recommend an alternative way for the introduction of the systematic errors, based on Newton-Raphson iterative numerical method for simultaneous equations.

Keywords: *Digital Camera, Systematic Errors, Calibration.*

1. INTRODUÇÃO

A imagem gerada por uma câmara fotogramétrica ou digital apresenta distorções resultantes de desvios da perfeita projeção central, e são causados por erros sistemáticos e aleatórios. Para que se possa utilizar os métodos de ajustamento por mínimos quadrados, largamente empregados em fotogrametria, deve-se identificar os erros sistemáticos (modelando-os) e corrigi-los, de forma que os ajustamentos trabalhem apenas com erros aleatórios. A modelagem introduz diversos parâmetros tais que permitam a reconstrução da geometria projetiva no instante da foto, e sua determinação se dá através de um processo de calibração.

A formulação para correção de erros sistemáticos existentes em uma imagem embasa-se em teorias bem fundamentadas, apresentando resultados satisfatórios dentro do estado da arte. Costuma-se tratar quatro fontes de erros, por ordem de importância: translação do ponto principal, corrigindo a projeção do centro óptico da câmara sobre a imagem gerada; distorção radial simétrica, devido às imperfeições no processo de fabricação das lentes que compõem a objetiva; distorção descentrada, devido à impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes; distorção de não ortogonalidade ou afinidade, devido à não planaridade do filme (ou da área do sensor CCD) e não ortogonalidade entre eixos. Este modelo é um “modelo físico” porque todas as suas componentes podem ser atribuídas diretamente a fontes de erros físicas.

A translação do ponto principal é uma operação muito importante, porque qualquer erro na correção desta implica em tratamento inadequado de todos os demais erros sistemáticos, visto que os mesmos se referem ao ponto principal (centro fiducial transladado).

Diversas etapas de transformações são aplicadas quando se parte do espaço imagem, em coordenadas de máquina, para se chegar no espaço objeto, em coordenadas de terreno. Estas etapas iniciam com a aplicação de uma transformação afim geral no plano para converter o referencial levógiro de máquina (como por exemplo, coluna e linha em uma imagem digital) para o referencial dextrógiro fiducial em câmaras fotogramétricas. Como não se dispõe de referencial fiducial, e por conseguinte centro fiducial, nas câmaras digitais de pequeno formato, utiliza-se, costumeiramente, o centro geométrico da imagem digital como tal. Conforme mostrado em MITISHITA (1997), os resultados práticos com a transformação afim geral no plano tem sido plenamente adequados nas aplicações desta natureza.

Realizada a transformação afim geral no plano, passa-se à correção dos erros sistemáticos, segundo duas fases. Na primeira, translada-se do centro fiducial para o ponto principal. Na segunda fase, corrigem-se simultaneamente distorção radial simétrica, distorção descentrada e distorção de afinidade, sempre em relação a uma mesma coordenada referida ao ponto principal. Para se chegar ao referencial de terreno, no espaço objeto, usa-se ainda a equação de colinearidade, não abordada aqui.

Deve-se olhar com atenção especial, entretanto, a tarefa (inversa) de introdução dos erros sistemáticos, quando se vem do espaço objeto pretendendo-se chegar no espaço imagem. Tal é o percurso adotado usualmente na produção de ortoimagens. Este sentido de transformação apresenta grandes discrepâncias, quando não equacionado adequadamente, especialmente no caso de imagens tomadas por câmaras digitais não métricas. Na era em que as câmaras digitais de pequeno formato assumem um papel cada vez mais acentuado na fotogrametria, a ponto de serem inclusive montadas em helicóptero com fins profissionais (Ver MITISHITA et al., 2001b), estes cuidados no equacionamento tornam-se muito relevantes.

2. AS CÂMARAS

A câmara digital de pequeno formato empregada neste estudo de caso foi a Sony modelo DSC-F717, não métrica, de propriedade da Agritec. A câmara apresenta resolução de 5,2Mb, com CCD de dimensões 2560 x 1920 pixels (8,8mm X 6,6mm). MACHADO et al. (2003) efetuou a calibração desta câmara, em três oportunidades diferentes (25/02/2003, 10/03/2003 e 01/04/2003). Não obstante este fato, utilizou-se neste trabalho a calibração realizada por DELARA (2003), por ser mais recente e por apresentar uma parametrização mais completa (parâmetros de afinidade), sendo a primeira câmara das quatro calibradas em seu trabalho, e os resultados obtidos são mostrados no quadro 1. Os parâmetros são os seguintes:

c = Distância focal, em mm;

x_0, y_0 = Coordenadas do ponto principal no referencial fiducial, em mm;

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

P_1, P_2 = Parâmetros da distorção descentrada;

A, B = Parâmetros de afinidade.

Muito embora DELARA (2003), seguindo tendência de não fazer uso das dimensões em milímetros do quadro CCD (ANDRADE, 2001; JEYAPALAN, 2004), tenha dado ênfase ao uso da unidade pixels, no

cálculo dos parâmetros de calibração da câmara digital, optamos aqui pela sua apresentação tradicional, em mm, com intuito de melhor visualização comparativa entre as câmaras digital e a fotogramétrica.

Quadro 1: Parâmetros de calibração das câmaras (Fonte: DELARA, 2003; MITISHITA, 2001)

Câmara	DSC-F717 - 1	WILD RC10
Resolução	2560x1920	23000 X 23000
Tamanho	8,8mm X 6,6mm	230mm X 230mm
c	10,078mm	152,209mm
x0	-0,246mm	-0,020mm
y0	-0,142mm	0,036mm
k1	-2,25E-03mm ⁻²	6,3892818E-08mm ⁻²
k2	2,49E-05mm ⁻⁴	-7,4152301E-12mm ⁻⁴
k3	1,29E-07mm ⁻⁶	2,4049528E-16mm ⁻⁶
P1	-1,17E-04mm ⁻¹	-9,9601589E-08mm ⁻¹
P2	6,90E-05mm ⁻¹	4,3407418E-07mm ⁻¹
A	-1,50E-04	0
B	9,54E-06	0

A câmara fotogramétrica empregada foi a WILD RC-10, de propriedade da empresa Universal Aerofotogrametria S.A., montada com o cone grande angular (distância focal nominal de 152,060mm), lente Wild 15 UAG I, calibrada por MITISHITA (2001a). Seus parâmetros de calibração também são mostrados no quadro 1, e correspondem aos parâmetros de aerofoto digitalizada (Ver MITISHITA, 2001a), com o fim de adequar este artigo aos procedimentos práticos. A cobertura aerofotogramétrica foi executada na escala 1/12000, de acordo com as necessidades geométricas exigidas pelo método de calibração ANDRADE (1998).

Os negativos foram digitalizados no scanner fotogramétrico Digital VEXCEL VX3000, na empresa Universal Fotogrametria S.A. A dimensão do pixel empregado foi de 0,010mm, resultando um arquivo digital com tamanho aproximado de 590Mbytes para cada imagem. Deduz-se daí que é perfeitamente válido utilizar-se 23000 pixels por 23000 pixels como dimensões da imagem digital gerada (230mm/0,010mm por pixel).

3. TRANSFORMAÇÃO ENTRE REFERENCIAIS DE IMAGEM E FIDUCIAL

A orientação interior tem por fim transformar o referencial de imagem levógiro de linha e coluna, onde são realizadas as observações, para o referencial fotogramétrico dextrógiro com origem no centro de perspectiva de tomada da foto, adequando as coordenadas das observações, após correção de erros sistemáticos, para a orientação exterior. O referencial levógiro de linha e coluna tem sua origem no canto superior esquerdo da imagem. Como não existem marcas fiduciais na imagem digital, tomada pela câmara Sony DSC-F717, assumiu-se um centro fiducial situado exatamente no centro geométrico da imagem. O primeiro pixel, no canto superior esquerdo de ambas as imagens, foi definido como sendo o de coordenadas 0,0 (coluna 0 e linha 0).

A transformação afim geral no plano, responsável pela mudança de coordenadas entre o referencial de imagem e o referencial fiducial, tem a forma

$$\begin{aligned} x_f &= a_1 * Col_i + a_2 * Lin_i + a_3 \\ y_f &= b_1 * Col_i + b_2 * Lin_i + b_3 \end{aligned} \quad (01)$$

onde x_f e y_f são as novas coordenadas (analógicas) das observações realizadas, no sistema fiducial;

Col_i e Lin_i representam as colunas e linhas respectivamente, ou sejam, as coordenadas de imagem das observações; e a_i e b_i são os parâmetros da transformação.

No caso da câmara digital, a transformação afim geral no plano, responsável pela mudança de coordenadas entre o referencial de imagem e o referencial fiducial, tem seus parâmetros determinados sem nenhum ajustamento, pois se trata de uma mera conversão matemática de coordenadas, não existindo a necessidade de observações de pontos para tal finalidade. Observe-se que $0,0034375 \text{ mm/pixel} = 8,8\text{mm}/2560\text{pixels} = 6,6\text{mm}/1920\text{pixels}$. Os parâmetros são

$$a_1 = 0,0034375; a_2 = 0; a_3 = -\left(\frac{2560-1}{2}\right) * 0,0034375$$

$$b_1 = 0; b_2 = -0,0034375; b_3 = \left(\frac{1920-1}{2}\right) * 0,0034375$$
(02)

e a transformação afim geral no plano, para conversão de coordenadas de imagem para o referencial fiducial, é expressa pelas equações (câmara digital Sony DSC-F717)

$$x_f = 0,0034375 * Col_i - 4,39828125$$

$$y_f = -0,0034375 * Lin_i + 3,29828125$$
(03)

Para o caso da câmara fotogramétrica WILD RC-10, assumiu-se, sem prejuízo ao presente trabalho, que o centro fiducial da imagem foi digitalizado exatamente sobre o centro geométrico da mesma imagem. Esta coincidência pode realmente ser obtida pela localização fortuita do negativo no momento da sua digitalização. Neste caso, os parâmetros da transformação afim geral no plano assumem os seguintes valores, pelas mesmas razões expostas para a câmara digital:

$$a_1 = 0,010; a_2 = 0; a_3 = -\left(\frac{23000-1}{2}\right) * 0,010$$

$$b_1 = 0; b_2 = -0,010; b_3 = \left(\frac{23000-1}{2}\right) * 0,010$$
(04)

e a transformação afim geral no plano, para conversão de coordenadas de imagem para o referencial fiducial, é expressa pelas equações (câmara fotogramétrica WILD RC-10)

$$x_f = 0,010 * Col_i - 114,995$$

$$y_f = -0,010 * Lin_i + 114,995$$
(05)

Ao se efetuar o caminho inverso, isto é, do referencial fiducial para o referencial de imagem (coluna e linha), usa-se a mesma transformação afim geral no plano, só que agora em sua forma inversa

$$Col_i = c_1 * x_f + c_2 * y_f + c_3$$

$$Lin_i = d_1 * x_f + d_2 * y_f + d_3$$
(06)

onde c_i e d_i são os parâmetros da transformação inversa, sendo obtidos a partir de a_i e b_i . Fazendo-se

$$D = a_1 * b_2 - a_2 * b_1$$
(07)

tem-se que

$$c_1 = \frac{b_2}{D}; c_2 = \frac{-a_2}{D}; c_3 = \frac{a_2 * b_3 - a_3 * b_2}{D}$$

$$d_1 = \frac{-b_1}{D}; d_2 = \frac{a_1}{D}; d_3 = \frac{a_3 * b_1 - a_1 * b_3}{D}$$
(08)

Assim, a partir das equações (03) conseguimos a transformação afim geral no plano inversa para a câmara digital

$$Col_i = 290,90909 * x_f - 1279,5$$

$$Lin_i = -290,90909 * y_f + 959,5$$
(09)

e a partir das equações (05) conseguimos a transformação afim geral no plano inversa para a câmara fotogramétrica

$$Col_i = 100,0 * x_f - 11499,5$$

$$Lin_i = -100,0 * y_f + 11499,5$$
(10)

4. CORREÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS

O sistema de coordenadas fotogramétricas tem sua origem no centro óptico da câmara, sendo necessário uma pequena translação de coordenadas, do sistema fiducial para o sistema fotogramétrico

(x_o , y_o e c são informados nos parâmetros de calibração). Os eixos de ambos os referenciais são paralelos e de mesmo sentido.

$$\begin{bmatrix} x_{err} \\ y_{err} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} \quad (11)$$

onde x_{err} e y_{err} representam as coordenadas fotogramétricas de observações transladadas do ponto fiducial para o centro de perspectiva (Ver ANDRADE, 1981), e ainda com erros sistemáticos a serem eliminados.

Com base nos parâmetros de calibração da câmara, todas as observações, após as transformações anteriores, devem ser corrigidas da distorção radial simétrica (k_1, k_2, k_3), da distorção descentrada (P_1, P_2), e das distorções de afinidade ou não ortogonalidade (A, B). O modelo matemático empregado para as correções destes erros sistemáticos é o mesmo utilizado por MONIWA (1977), por ser o mais amplamente difundido na literatura:

$$\begin{bmatrix} x_{corr} \\ y_{corr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{err} \\ y_{err} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{xr} \\ \delta_{yr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{xd} \\ \delta_{yd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{xa} \\ \delta_{ya} \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde x_{corr} e y_{corr} representam coordenadas no sistema fotogramétrico isentas de erros sistemáticos.

As correções da equação (12) são calculadas através de:

$$\delta_{xr} = (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \cdot x_{err} \quad (13)$$

$$\delta_{yr} = (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \cdot y_{err}$$

$$\delta_{xd} = P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x_{err}^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x_{err} \cdot y_{err} \quad (14)$$

$$\delta_{yd} = P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y_{err}^2) + 2 \cdot P_1 \cdot x_{err} \cdot y_{err}$$

$$\delta_{xa} = A \cdot x_{err} \quad (15)$$

$$\delta_{ya} = B \cdot x_{err}$$

onde

δ_{xr} e δ_{yr} = componentes x e y da distorção radial simétrica;

δ_{xd} e δ_{yd} = componentes x e y da distorção descentrada;

δ_{xa} e δ_{ya} = componentes x e y da distorção de não ortogonalidade;

$r = \sqrt{x_{err}^2 + y_{err}^2}$ = distância do ponto de coordenadas x_{err} e y_{err} ao ponto principal.

Um aspecto muito importante que se deve chamar a atenção é o de que todas as três correções acima são aplicadas às mesmas coordenadas de pontos x_{err} e y_{err} , isto é, referidas ao centro óptico. Então a aplicação destas correções não se dá em cascata (em série), e sim de uma vez só, simultaneamente. Usam-se os mesmos x_{err} e y_{err} para se calcular todas as três distorções. Este detalhe deve sempre ser observado, evidentemente, e deve corresponder ao modelo matemático da calibração realizada. Após estas correções, todas as medidas encontram-se no referencial fotogramétrico isentas de erros sistemáticos.

5. INTRODUÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS

Suponha-se que se pretenda agora retornar ao sistema de imagem digital, expresso em colunas e linhas. Torna-se claro que se deve atingir as mesmas coordenadas das quais se partiu. Então, deve-se partir de x_{corr} e y_{corr} , no referencial fotogramétrico, e se chegar em Col_i e Lin_i , pois numa aplicação inversa parte-se de coordenadas X, Y e Z de terreno, aplica-se a equação de colinearidade e obtém-se x_{corr} e y_{corr} , no espaço imagem.

Observando-se com rigor matemático as equações (13), (14) e (15), pelas quais se deveria começar (desconsiderando-se as equações de colinearidade), elas não podem ser utilizadas. Isto se dá porque elas são funções de x_{err} e y_{err} (coordenadas fotogramétricas com erros, isto é, não corrigidas de todos erros sistemáticos) e, neste ponto, não se dispõe destes valores. Tudo o que se tem são x_{corr} e y_{corr} (coordenadas fotogramétricas isentas de erros). A equação (12) fica sendo

$$\begin{bmatrix} x_{err} \\ y_{err} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{corr} \\ y_{corr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{xr} \\ \delta_{yr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{xd} \\ \delta_{yd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{xa} \\ \delta_{ya} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Atendendo-se o rigor matemático, dever-se-ia usar funções diferentes das equações (13), (14) e (15). Seriam funções que relacionassem x_{corr} e y_{corr} (e não x_{err} e y_{err}) com os erros introduzidos (δ_{xr} , δ_{yr} , δ_{xd} , δ_{yd} , δ_{xa} , δ_{ya}), para só então poder-se utilizar a equação (16). Acontece que não se consegue explicitar x_{err} e y_{err} em função de x_{corr} e y_{corr} . Nestes casos propõem-se o uso de métodos numéricos iterativos, que partem de uma solução aproximada, que é exatamente o que se tem (x_{corr} e y_{corr}). A literatura matemática aponta diversos algoritmos: método da interpolação ou da falsa posição (regula falsi), plotagem sucessiva em escalas maiores (equivalente gráfico de regula falsi), e método de Newton-Raphson, entre outros.

Quando a derivada de uma função $f(x)$ for uma expressão simples e facilmente encontrada, as raízes reais de $f(x) = 0$ podem ser calculadas rapidamente por um processo denominado de método de Newton-Raphson. A idéia básica proveio de Newton, mas o método tal como é conhecido hoje é devido a Raphson.

Sejam a um valor aproximado da raiz desejada, e h a correção que se deve aplicar a a para se obter o valor exato da raiz. Então $x = a+h$, e a equação $f(x) = 0$ se torna $f(a+h) = 0$. Expandindo-se pela fórmula de Taylor, tem-se

$$f(a+h) = f(a) + h.f'(a) + \frac{h^2}{2}.f''(a + \theta h) = 0, \quad 0 \leq \theta \leq 1 \quad (17)$$

Se h for relativamente pequeno, pode-se desprezar o termo contendo h^2 , obtendo-se a seguinte relação simples

$$f(a) + h.f'(a) = 0 \quad (18)$$

da qual se consegue

$$h_1 = -\frac{f(a)}{f'(a)} \quad (19)$$

O valor melhorado da raiz é então dado por

$$a_1 = a + h_1 = a - \frac{f(a)}{f'(a)} \quad (20)$$

e as sucessivas aproximações da raiz são calculadas pela fórmula seguinte

$$a_n = a_{n-1} - \frac{f(a_{n-1})}{f'(a_{n-1})} \quad (21)$$

Demonstra-se que a condição suficiente para a convergência das iterações pelo método de Newton-Raphson é

$$|f(a_n).f''(a_n)| < (f'(a_n))^2 \quad (22)$$

Aplicando o exposto ao problema da introdução dos erros sistemáticos, tem-se duas funções para serem trabalhadas: a componente x e a componente y . As raízes procuradas são x_{err} e y_{err} , e as funções são dadas por

$$f(x_{err}, y_{err}) = \begin{bmatrix} x_{corr} \\ y_{corr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{xr} \\ \delta_{yr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{xd} \\ \delta_{yd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{xa} \\ \delta_{ya} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{err} \\ y_{err} \end{bmatrix} = 0 \quad (23)$$

Neste caso deve-se usar o método de Newton-Raphson para equações simultâneas, empregando-se derivadas parciais. As raízes serão encontradas quando ambas apresentarem variação menor que um limiar (como por exemplo, $1,0E-6$). Maiores detalhes poderão ser encontrados em SCARBOROUGH (1958), ou qualquer outro livro sobre cálculo numérico.

Encontrados x_{err} e y_{err} , procede-se à eliminação do translado do ponto principal

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{err} \\ y_{err} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} \quad (24)$$

sendo sucedido pela transformação afim geral no plano inversa, já apresentada nas equações (09), para a câmara digital, e (10) para a câmara fotogramétrica.

Caso não se faça uso de um expediente tal como o método iterativo de Newton-Raphson, comete-se um erro de aproximação. Este erro passa despercebido para as câmaras fotogramétricas, graças à

ordem de grandeza dos erros sistemáticos existentes (muito pequenos). No caso das câmaras digitais esta aproximação ocasiona um erro já significativo para trabalhos fotogramétricos, principalmente por causa da ordem de grandeza da distorção radial simétrica, constituindo por si só um novo erro sistemático não desprezível.

Para verificação do que se está apresentando, fez-se um procedimento que consta em percorrer todos os pixels das duas imagens (fictícias) fornecidas. Sai-se do referencial de imagem e vai-se até o referencial fotogramétrico com isenção total de erros sistemáticos. A seguir retorna-se pelo caminho inverso, sem fazer uso da iteração por Newton-Raphson, ou seja, cometendo-se o erro de aproximação comentado. Verifica-se então as distâncias existentes entre o pixel do qual se saiu e o pixel ao qual se chegou.

Realizado este procedimento, conforme apresentado, não se chega às mesmas coordenadas das quais se partiu, sobretudo para câmaras digitais. Os erros de deslocamento de uma determinada localização (coluna e linha) são dependentes de sua distância ao ponto principal. Os erros que se obtém, neste processo errôneo (em termos matemáticos), expressos em pixel, são apresentados na figura 1, para a câmara digital, e na figura 2 para a câmara fotogramétrica. Os cálculos feitos não se preocuparam com o fato de que, ao se retornar ao referencial de imagem, deve-se arredondar coluna e linha para números inteiros. Não se usou deste arredondamento neste experimento, com fins de se observar melhor as discrepâncias existentes.

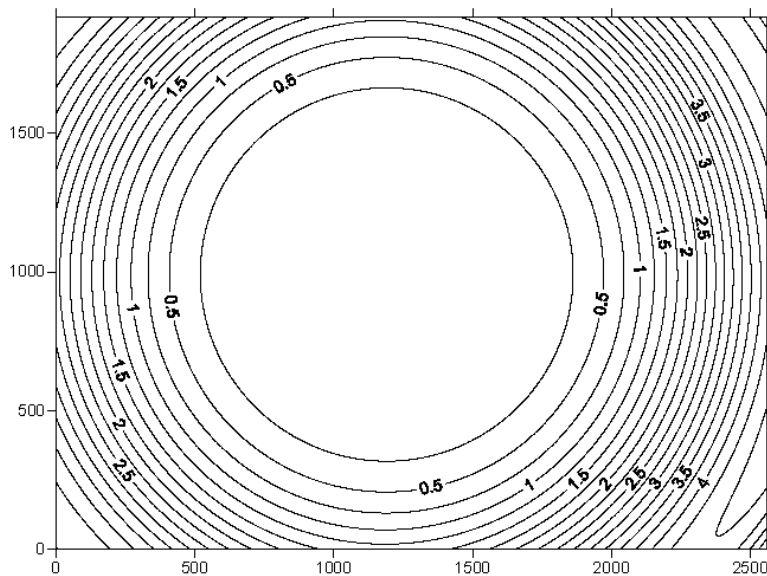


Figura 1: Erros em pixels para a câmara digital Sony DSC-F717

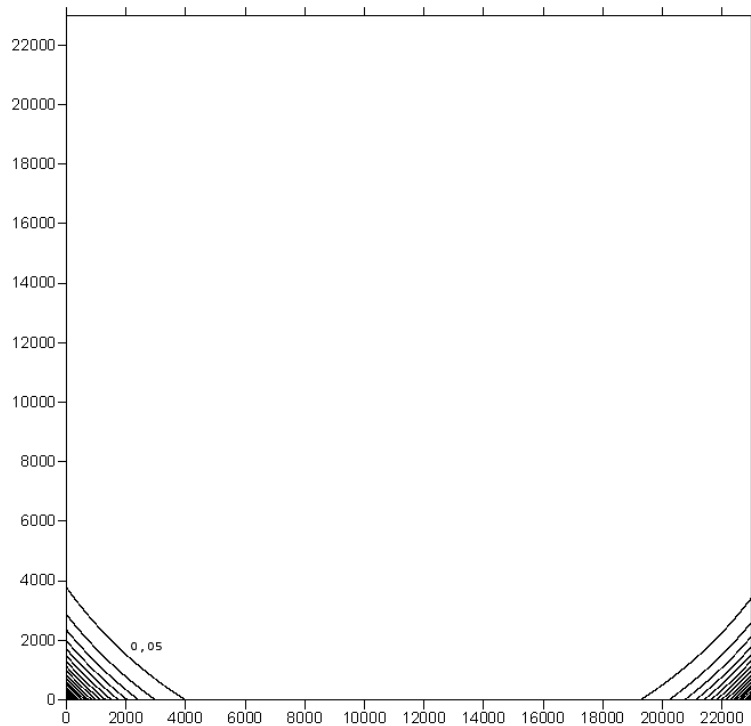


Figura 2: Erros em pixels para a câmara fotogramétrica WILD RC10

As diferenças de comportamento entre a câmara digital e a fotogramétrica são claramente visíveis nas figuras 1 e 2. As equidistâncias das curvas de isovalores na figura 1 valem 0,25 pixel, e na figura 2 valem 0,05 pixel. Chama-se a atenção ainda para o fato de que os parâmetros selecionados para a câmara fotogramétrica, extraído de MITISHITA (2001), foram os calibrados sobre uma imagem digitalizada, e não sobre o negativo. Este procedimento provocou um aumento nas distorções radiais nas bordas das imagens. Apesar deste aumento na significância da distorção radial simétrica, verifica-se o não comprometimento da qualidade geométrica destas câmaras pelo equacionamento aproximado de introdução dos erros sistemáticos.

Depreende-se ainda, destas figuras, que procedimentos aceitos para câmaras fotogramétricas devem necessariamente ser revistos para o caso de câmaras digitais, por força da ordem de grandeza dos parâmetros de calibração, sobretudo os da distorção radial simétrica.

Fez-se também um estudo estatístico de distribuição de erros introduzidos, que são apresentados no quadro 2.

O procedimento recomendado, no caso de câmaras digitais, para introdução de erros sistemáticos deve empregar métodos numéricos iterativos de resolução de equações. Neste estudo de caso observou-se que o método de Newton-Raphson atende perfeitamente os quesitos esperados, com erros iguais a zero, em toda a imagem.

Quadro 2: Estatística de erros, em pixel

Estatística	Câmara digital	Câmara fotogramétrica
0,0 pixel <= Erro < 0,5 pixel	39,157%	2,572%
0,5 pixel <= Erro < 1,5 pixel	25,479%	0,000%
1,5 pixel <= Erro < 2,5 pixel	14,612%	0,000%
2,5 pixel <= Erro < 3,5 pixel	10,428%	0,000%
3,5 pixel <= Erro < 4,5 pixel	8,419%	0,000%
4,5 pixel <= Erro < 5,5 pixel	1,905%	0,000%
5,5 pixel <= Erro < 6,0 pixel	0,000%	0,000%
Erro médio em Coluna	0,287	0,000
Erro médio em Linha	-0,052	-0,001
Desvio-padrão em Coluna	1,569	0,006
Desvio-padrão em Linha	0,991	0,006
Erro mínimo/máximo em Coluna	-3/+4	0/0
Erro mínimo/máximo em Linha	-3/+3	0/0

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se a importância de se utilizar procedimentos matemáticos corretos para a introdução dos erros sistemáticos em câmaras digitais. Estes procedimentos podem ser resolvidos pelo método iterativo de Newton-Raphson para equações simultâneas. No caso de câmaras fotogramétricas pode-se também utilizar os mesmos procedimentos, muito embora sejam totalmente desprezíveis as diferenças existentes (0,000% de todas as localizações coincidentes com uma malha virtual de pixels). Arredondando-se os resultados de coluna e linha, conforme seria feito normalmente, só faz diminuir ainda mais este percentual, tornando totalmente irrelevante a aplicação do método iterativo de Newton-Raphson (para câmaras fotogramétricas). As câmaras digitais apresentam distorções radiais simétricas bem maiores que as das câmaras fotogramétricas, obrigando o emprego dos métodos iterativos de resolução de equações polinomiais simultâneas. A correção dos erros sistemáticos, apesar de sua ordem de grandeza, restabelece a geometria projetiva das câmaras digitais.

Sabe-se que a qualidade visual de focalização das imagens e a geometria projetiva acurada são fatores que devem ser balanceados. Quando se melhora um aspecto, o outro fica comprometido. Neste sentido pode-se entender a ordem de grandeza da distorção radial simétrica nas câmaras digitais não métricas, haja visto que o seu direcionamento é para um público que não se preocupa com a qualidade geométrica, mas exige muito da condição de focalização das imagens.

A qualidade das câmaras digitais, aliada às resoluções crescentes, com preços decrescentes, fazem destes equipamentos uma solução atrativa para a fotogrametria. A eletrônica existente nestas câmaras permite facilmente que se elaborem alternativas de correção automática dos erros sistemáticos que hoje são pós-processados, propiciando o aparecimento de câmaras sem os erros sistemáticos aqui discutidos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. BITTENCOURT; OLIVAS, MARY A. AZEVEDO. **Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas**. Boletim da UFPR, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, N°26, p.01-39, Curitiba, 1981.
- ANDRADE, J. BITTENCOURT. **Fotogrametria**. SBEE, 1998. ISBN 85-86180-07-6.
- ANDRADE, REGINA R. **Mensurações Dendrométricas com Câmeras Digitais Calibradas**. Dissertação de Mestrado apresentada no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR, 2001.
- DELARA, JR. ROOSEVELT. **Calibração de Câmaras Digitais Não Métricas de Pequeno Formato Utilizando o Pixel como Unidade no Espaço Imagem**. Seminário apresentado no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Setembro, 2003.
- JEYAPALAN, K. **Mobile Digital Cameras for As-Built Surveys of Roadside Features**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 70 (3), March 2004, pp. 301-312.
- MACHADO, ALVARO M.L. et al. **Verificação da Estabilidade Geométrica dos Parâmetros de Calibração de uma Câmara Digital de Pequeno Formato SONY DSC-F717**. Série em Ciências Geodésicas, Novos Desenvolvimentos em Ciências Geodésicas, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003, Vol. 3, pp.292-309.
- 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.; OLIVAS, MARY A. AZEVEDO. **Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas a partir de Aerofotos Digitalizadas**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001, Vol. 7 (1), pp. 64-76.
- MITISHITA, EDSON A.; SILVA, VILMAR F.; SIKORSKI, JORGE. **Desenvolvimento de Técnicas de Mapeamento Fotogramétrico com Base em Imagens Digitais tomadas com Câmara de Vídeo e Helicóptero**. Série em Ciências Geodésicas, 30 Anos da Pós-Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001, Vol. 1, pp.181-198.
- 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.
- SCARBOROUGH, JAMES B. **Numerical Mathematical Analysis**. Fourth Edition. Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1958.