

GERAÇÃO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO POR RETIFICAÇÃO E FUSÃO DE IMAGENS

RODRIGO FERREIRA LOPES
ROBERTO DA SILVA RUY
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Universidade Estadual Paulista - Unesp
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
Departamento de Cartografia, Presidente Prudente - SP
eng.rodrigo.flopes@gmail.com
rruy@pos.prudente.unesp.br
tomaseili@fct.unesp.br

RESUMO - A utilização de câmaras digitais de médio formato para a aquisição de informações espaciais é uma tendência internacional. Uma das desvantagens destas câmaras é a menor área de cobertura em relação às câmaras fotogramétricas convencionais. Para resolver este problema podem ser usados vários sensores que são acionados simultaneamente, sendo necessária uma etapa posterior de fusão e mosaicagem destas imagens. Neste trabalho será discutido um método para a fusão de imagens, utilizando-se da calibração prévia de um sistema composto por duas câmaras (arranjo *Dual*), e ao final do processo será analisada a qualidade dessa fusão por meio da resseção espacial e análise de resíduos.

ABSTRACT – Using medium format digital cameras for spatial information acquisition is a worldwide growing tendency. One disadvantage of this technology is the reduced coverage area when compared to conventional photogrammetric film cameras. In order to solve this drawback several sensors can be used simultaneously, but a further step of image fusion and mosaicking have to be developed. Is this work a method for image fusion using previous calibration data will be presented with the quality assessment with space resection and residual analysis.

1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista o alto custo das câmaras métricas e o tempo de resposta inerente às câmaras baseadas em filme, devido às etapas de revelação do filme e digitalização dos filmes, a utilização de câmaras digitais de médio formato emergiu como uma alternativa para as atividades de aquisição de informações espaciais. Trata-se de uma alternativa para aquisição de imagens de menor custo, além de permitir o acesso rápido e direto aos dados digitais, a possibilidade de reutilização da mídia de gravação e o controle da qualidade da imagem durante o voo.

Este tipo de câmara não foi inicialmente projetada para propósitos fotogramétricos, devido a possíveis instabilidades de seus parâmetros de orientação interior (OI). Experimentos realizados por Habib e Morgan (2003) e Machado et al (2003) mostraram que esta instabilidade dos parâmetros de OI não afeta significativamente os resultados. A diferença fundamental entre as câmaras não-métricas de filme e digitais é que nestas últimas o elemento sensor é plano e considerado sem deformações, ou seja, não há trabalho do filme e pode-se adotar um referencial de imagem aproximado com confiabilidade,

como mostram alguns estudos recentes (MACHADO et al, 2003; TELLES e TOMMASELLI, 2002).

No mercado há algumas abordagens bem definidas para solucionar o problema das limitações de resolução dos sensores CCD, como os sensores tri-linear e a configuração modular de câmaras matriciais. Estes sistemas utilizam câmaras digitais métricas integradas a sensores de orientação direta de precisão e são sistemas de custos elevados. Existem no mercado três tecnologias destinadas à produção de imagens de alta resolução: as câmaras baseadas nos sensores tri-lineares, podendo-se citar, as câmaras ADS-40 (*Leica Geosystems - Hexagon*), HRSC-A, HRSC-AX e HRSC-AXW (desenvolvidas pelo Centro Alemão de Pesquisas Espaciais - DLR); a configuração modular de câmaras matriciais convergentes como, por exemplo, o sistema DMC (*Z/I Imaging*) e, finalmente, os sistemas matriciais com câmaras verticais, como a UltracamX (*Microsoft Vexcel*) e a DIMAC (*Dimac Systems*).

A abordagem proposta neste trabalho baseou-se no desenvolvimento de um sistema de câmaras de médio formato, estabilizadas mecanicamente e calibradas em conjunto. Uma vez conhecidos os parâmetros de orientação interior e exterior das câmaras, pode-se

calcular os elementos de orientação relativa entre elas, o que permite retificar as imagens. Após a retificação pode-se fundir os pares de imagens em imagens de maior resolução. Neste projeto apresenta-se alguns passos para a obtenção destas imagens e resultados preliminares com imagens terrestres.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar a qualidade de um método desenvolvido e aplicado para a fusão de imagens, coletadas com as câmaras *Hasselblad (HID)* de médio formato em um arranjo *Dual*, usando para isso, dados da orientação relativa e orientação interior das câmaras.

3 SISTEMA DUAL CONVERGENTE

O sistema *Dual* de aquisição de imagens foi desenvolvido no contexto do projeto ARMOD (2005), que tem como objetivo principal o estudo e desenvolvimento de metodologias para a utilização de câmaras digitais de pequeno e médio formato na aquisição de imagens aéreas, integrando-se também um sistema GPS de precisão e uma Unidade de Medida Inercial. O projeto enfatiza, ainda, a automação dos processos de orientação e geração automática de modelos digitais de terreno e foi financiado inicialmente pelo CNPq. Considerando o potencial da proposta, um *spin-off* foi criado em conjunto com uma empresa privada (Engemap) para o qual foi obtido um financiamento da Fapesp no programa PIPE (SAAPI (2005)), resultando em um sistema que já está em operação produtiva. A ênfase do projeto SAAPI está na aquisição, ao passo que o projeto ARMOD, de natureza mais acadêmica, trabalha no desenvolvimento da automação dos processos.

O sistema SAAPI (Sistema de Aquisição e Pós-processamento de Imagens Tomadas com Câmaras Digitais) está sendo desenvolvido em conjunto pelo Grupo de Pesquisa em Fotogrametria da UNESP e a empresa ENGEMAP, com financiamento da FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisas do Estado de São Paulo). O modelo protótipo utilizado neste teste integra um par de câmaras HASSELBLAD H1D de 22 Mpixels e uma câmara digital infravermelha SONY – CYBERSHOT de 8 Mpixels, bem como um sistema de georreferenciamento direto (RUY et al., 2007). O modelo atual utiliza câmaras de 39 megapixels.

A Figura 1 exibe as disposições das câmaras, acopladas ao sistema SAAPI.

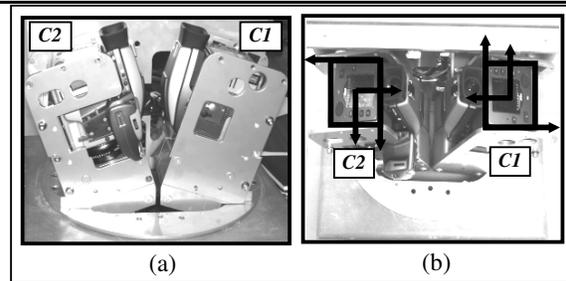


Figura 1: Sistema SAAPI: (a) Posições das câmaras (b) Orientações dos sistemas imagem Adaptado de Bazan et al. (2008).

A unidade de controle é composta por um computador que processa um *software* que sincroniza o disparo das câmaras e a coleta dos dados GPS; dois HDs de 40 GB para o armazenamento das imagens adquiridas pelas câmaras; um receptor GPS LEICA GRS 1200 e baterias para alimentação dos equipamentos eletrônicos. A plataforma de coleta consiste em duas câmaras inclinadas em relação à vertical apoiadas sobre um suporte e um berço estabilizador.

A principal vantagem desse sistema é a sua capacidade de cobertura de uma área maior com um número menor de faixas de voo. Assim, é possível diminuir o tempo de voo e minimizar custos do projeto como combustível e despesas da tripulação.

4 METODOLOGIA

Para se calibrar o sistema foram tomadas imagens do campo de calibração localizado no ginásio de esportes da Faculdade de Ciências e Tecnologia UNESP, campus de Presidente Prudente. O sistema SAAPI, conforme mencionado anteriormente, integra duas câmaras *Hasselblad* de médio formato, posicionadas de maneira convergente. As imagens são adquiridas simultaneamente, de tal forma que as câmaras registrem áreas adjacentes do terreno, como ilustra a Figura 2.

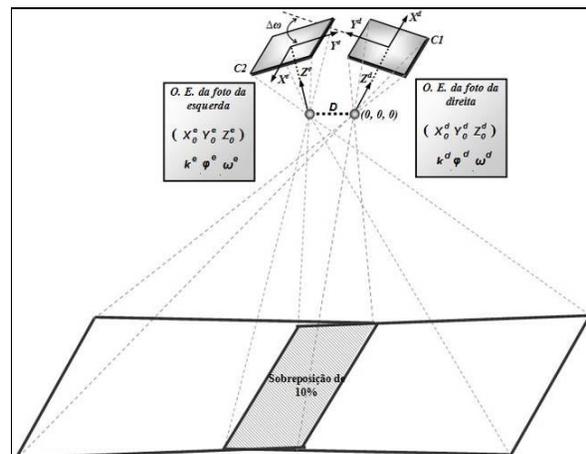


Figura 2: Geometria do arranjo *Dual* Adaptado de Bazan et al. (2008).

A utilização de uma configuração *Dual* de câmaras digitais permite o aumento da área de cobertura fotografada do terreno. Nesta configuração pode-se manter uma área de superposição de cerca de 10%, correspondente à área nadiral de cada imagem, para permitir a posterior fusão das imagens. A orientação relativa entre as câmaras é obtida por um processo prévio de calibração, utilizando-se para isso de dados do campo de calibração.



Figura 3: Campo de Calibração.

O campo de calibração mencionado conta com 83 alvos, dos quais 4 se apresentam fora do plano da parede com 1,5 m de comprimento. Os pontos de apoio foram levantados por intersecção à vante, e apresentam uma precisão de aproximadamente 3 mm nas coordenadas calculadas (BAZAN et al., 2007).

Os parâmetros resultantes do processo de calibração descrevem a geometria interna de cada câmara, incluindo a modelagem das distorções provocadas pelas imperfeições no sistema de lentes, as quais podem comprometer a precisão dos processos fotogramétricos. Para o caso das câmaras digitais, o conjunto de parâmetros de orientação interior determinado na calibração compreende:

- f - Distância focal gaussiana equivalente da câmara;
- x_0 e y_0 - Coordenadas do ponto principal;
- K_1 , K_2 e K_3 - Parâmetros de distorção radial simétrica;
- P_1 e P_2 - Parâmetros de distorção descentrada;
- A e B - Coeficientes de afinidade.

No processo de calibração de um sistema composto por duas câmaras deve-se considerar também a calibração dos elementos de orientação relativa entre as câmaras, que podem ser obtidos em função da orientação exterior de ambas as câmaras (BAZAN et al., 2007). Os elementos de orientação relativa são expressos por:

- $\Delta\omega$, $\Delta\phi$ e $\Delta\kappa$ - Rotações entre os referenciais fotogramétricos das câmaras;

- B_x , B_y e B_z - Elementos de base no referencial de uma das câmaras, tomada como referência.

A partir desses dados, um processo de retificação pode ser realizado nas imagens, através de um método similar à reamostragem Epipolar. Esse processo é aplicado para corrigir a inclinação transversal que cada câmara possui e permitir a fusão das imagens.

A geometria epipolar expressa o fato de que pontos conjugados em imagens distintas deveriam aparecer na mesma linha nestas imagens, ou seja, não deveria haver paralaxe vertical (SCHENK, 1999).

Para obter imagens retificadas a partir das originais devem ser aplicadas algumas transformações, de tal forma que os eixos óticos das câmaras tornem-se perpendiculares à linha de base.

4.1 Cálculo das Imagens Retificadas

Na Figura 4, C1 e C2 são as posições dos centros perspectivos das imagens da esquerda e da direita que compõem o par, respectivamente. Os elementos de base relativos entre as duas câmaras são expressos por: B_x , B_y e B_z , e são dados no referencial fotogramétrico da câmara da direita. Os ângulos entre os referenciais fotogramétricos são dados por: $\Delta\kappa$, $\Delta\phi$ e $\Delta\omega$. Adotando a câmara 1 (C1) como referência a transformação das imagens oblíquas para as imagens retificadas pode ser conduzida em duas etapas:

1. Rotacionar o sistema fotogramétrico da imagem da câmara 1 (C1), para alinhar o eixo x com o centro perspectivo da câmara da esquerda (C2);
2. Rotacionar o sistema fotogramétrico da imagem da esquerda para tornar os referenciais fotogramétricos paralelos.

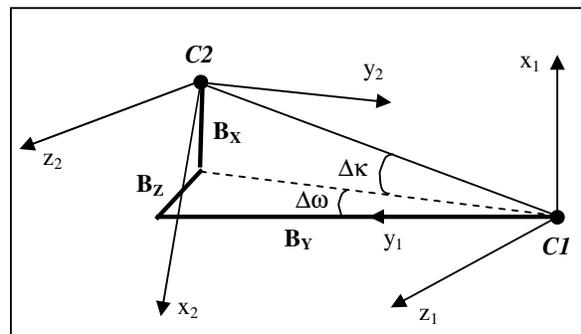


Figura 4: Relação entre os sistemas das duas câmaras.

4.2 Cálculo dos elementos da orientação relativa

Os ângulos de orientação relativa ($\Delta\kappa$, $\Delta\phi$ e $\Delta\omega$) podem ser calculados em função dos elementos de orientação exterior das câmaras 1 e 2, como mostrado na equação 3.

As matrizes de rotação de cada câmara foram definidas a partir de uma seqüência de rotações, como apresentado na equação 1.

$$R_{Cn} = R_{\kappa} R_{\varphi} R_{\omega} \quad (1)$$

onde:

R_{Cn} : matriz de rotação para cada câmara.

com:

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$R_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

sendo:

ω, φ, κ : parâmetros de orientação exterior de cada câmara.

$$R_R = R_{C1} (R_{C2})^{-1} \quad (3)$$

onde:

R_R : matriz de rotação relativa

Os elementos de orientação exterior podem ser determinados por um processo de fototriangulação.

Adotando a câmara 1 como referência, as componentes de base relativa (B_X, B_Y e B_Z), são determinados pela seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_Z \end{bmatrix} = R_{C1} \begin{bmatrix} (X_{C2} - X_{C1}) \\ (Y_{C2} - Y_{C1}) \\ (Z_{C2} - Z_{C1}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

4.3 Cálculo das matrizes de rotações das imagens a serem retificadas

A partir da equação 03 são determinados os ângulos relativos entre as câmaras ($\Delta\kappa, \Delta\varphi$ e $\Delta\omega$). Dependendo da precisão com que foram determinados os Centros Perspectivos na Fototriangulação, haverá uma grande variação nos elementos de base, como se verificou experimentalmente. Para evitar este problema, adotou-se para o ângulo ω de rotação da imagem da direita metade do ângulo de convergência entre as câmaras $\left(\frac{\Delta\omega}{2}\right)$.

A Tabela 1 exibe os desvios padrão nos ângulos de orientação, obtidas no relatório de calibração.

Tabela 1: Desvio-padrão nos ângulos da O.E. para cada imagem

Câmara	Imagem	$\sigma\omega$ (°)	$\sigma\varphi$ (°)	$\sigma\kappa$ (°)
1	0009	0,016470	0,009947	0,003413
2	0008	0,015322	0,012383	0,004363
1	0012	0,017494	0,014027	0,005958
2	0010	0,014626	0,008718	0,002572
1	0016	0,015899	0,009526	0,003901
2	0014	0,014617	0,011375	0,004312
1	0019	0,016851	0,013109	0,006285
2	0016	0,014041	0,008806	0,002570

Sendo assim, a matriz de rotação da base é determinada por:

$$R_{C1} = R_{\omega_B} R_{\varphi_B} R_{\kappa_B} \quad (5)$$

com:

$$\omega_B = \frac{\Delta\omega}{2}$$

$$\varphi_B = 0^\circ \quad (6)$$

$$\kappa_B = \arctan\left(\frac{B_X}{\sqrt{B_X^2 + B_Y^2}}\right)$$

Aplicando-se essas rotações na câmara tida como referência (C1), o eixo x da câmara 1 está aproximadamente alinhado com o CP da câmara 2.

Dispondo das matrizes de rotações R_B (rotação da base) e R_{C1C2} (rotação entre os sistemas das câmaras), torna-se possível determinar a rotação aplicada às imagens da câmara 2 (R_{C2}), pela seguinte relação:

$$R_{C2} = R_R^{-1} \cdot R_B \quad (7)$$

4.4 Transformação das imagens oblíquas para as imagens retificadas

A matriz de rotação das imagens retificadas deve ser determinada para ambas as imagens de cada câmara (R_{C1} e R_{C2}).

As coordenadas nas imagens retificadas (x_r, y_r) são projetadas para o sistema fotogramétrico nas imagens originais (x_p, y_p) por meio das equações de colinearidade:

$$x_p = -f \frac{m_{R_{Cn}11}x_r + m_{R_{Cn}12}y_r + m_{R_{Cn}13}(-f_r)}{m_{R_{Cn}31}x_r + m_{R_{Cn}32}y_r + m_{R_{Cn}33}(-f_r)} \quad (8)$$

$$y_p = -f \frac{m_{R_{Cn}21}x_r + m_{R_{Cn}22}y_r + m_{R_{Cn}23}(-f_r)}{m_{R_{Cn}31}x_r + m_{R_{Cn}32}y_r + m_{R_{Cn}33}(-f_r)}$$

sendo:

f: distância focal da câmara;

$m_{R_{Cn,11}} \dots m_{R_{Cn,33}}$: elementos da matriz de rotação retificada para cada câmara R_{Cn} , e f_r a distância focal da imagem retificada.

As inversas das equações 8 são usadas para calcular os limites de cobertura das imagens retificadas. Um *grid* é então definido com espaçamento relativo ao tamanho do pixel, e o processo de reamostragem é então conduzido pelas equações 8, a fim de definir as imagens retificadas. Valores fracionais de x_p e y_p necessitarão de interpolações nas imagens originais, para obter os níveis de cinza correspondentes. Neste trabalho foi utilizado o método de interpolação bilinear, por proporcionar bons resultados a um custo computacional relativamente baixo (RUY, 2004).

4.5 Fusão das Imagens

Após a retificação das imagens é identificada a área comum entre elas. Esta área de sobreposição é fixa devido à inclinação das câmaras acopladas ao sistema. Nesta área são identificados pontos homólogos, utilizando um processo de correspondência.

Com a finalidade de se fundir as imagens e verificar a qualidade da fusão de imagens utilizou-se o

software REGEEMY. O REGEEMY é um software desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela Universidade da Califórnia, que permite mosaicar imagens de satélite, fotografias aéreas, fotos de câmaras digitais e imagens de modo geral.

O passo inicial é definir pontos homólogos na área de superposição. Com as coordenadas destes pontos, em ambas as imagens pode-se calcular as discrepâncias posicionais.

Na seqüência, deve-se compensar estas discrepâncias, por meio de translações na imagem da esquerda, permitindo a montagem de uma única imagem de alta resolução, com o formato borboleta (*butterfly*).

Apesar das imagens estarem retificadas geometricamente, elas apresentam diferenças radiométricas, causadas por diversos fatores. O principal fator para que esse efeito ocorra, é a inclinação de cada câmara no instante de tomada das imagens. Por esse motivo, posteriormente ao processo de retificação das imagens, há a necessidade de se realizar um ajuste radiométrico, para que não seja notada a área de junção das imagens. Para isto foi aplicado um realce nas imagens, utilizando-se o método da equalização de histogramas.

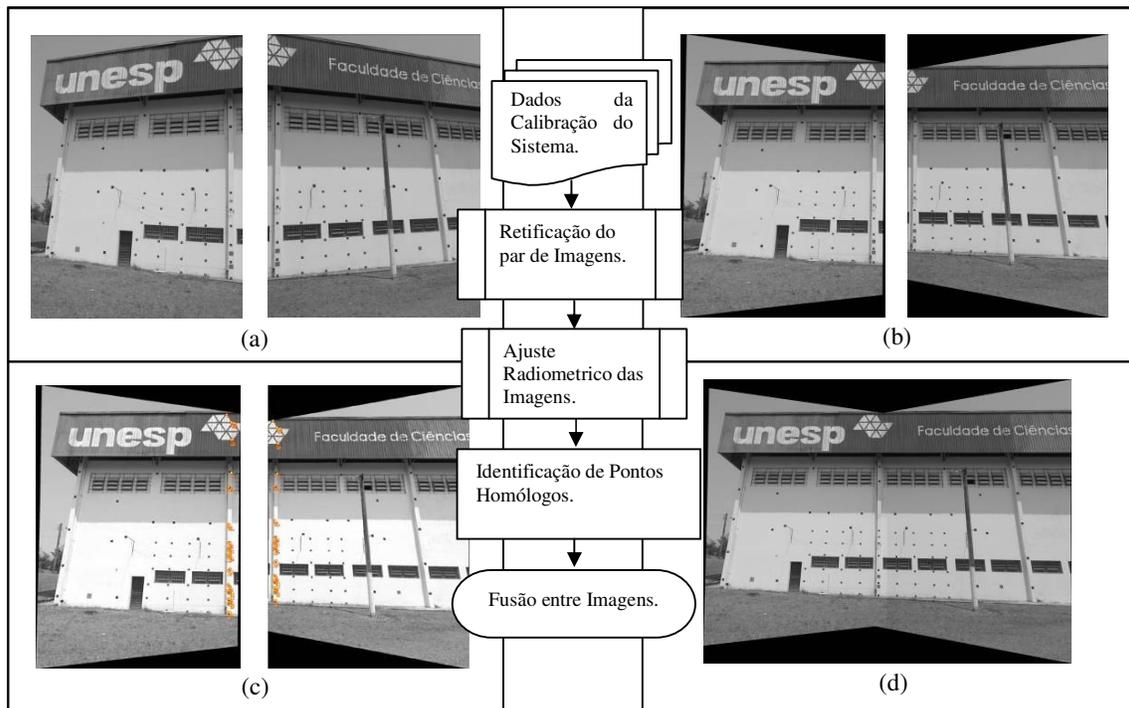


Figura 6: Etapas do Processo de Fusão (a) Imagens obliquas (b) Imagens retificadas (c) Identificação de pontos homólogos (d) Fusão das imagens.

5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Para serem realizados os experimentos foram utilizadas imagens do campo de calibração, obtidas em

duas diferentes estações. Tanto na estação 1 quanto na estação 2 foram adquiridos dois pares de imagens, que após o processo de fusão geraram 4 super imagens. As Figuras 7 e 8 exibem as referidas imagens.

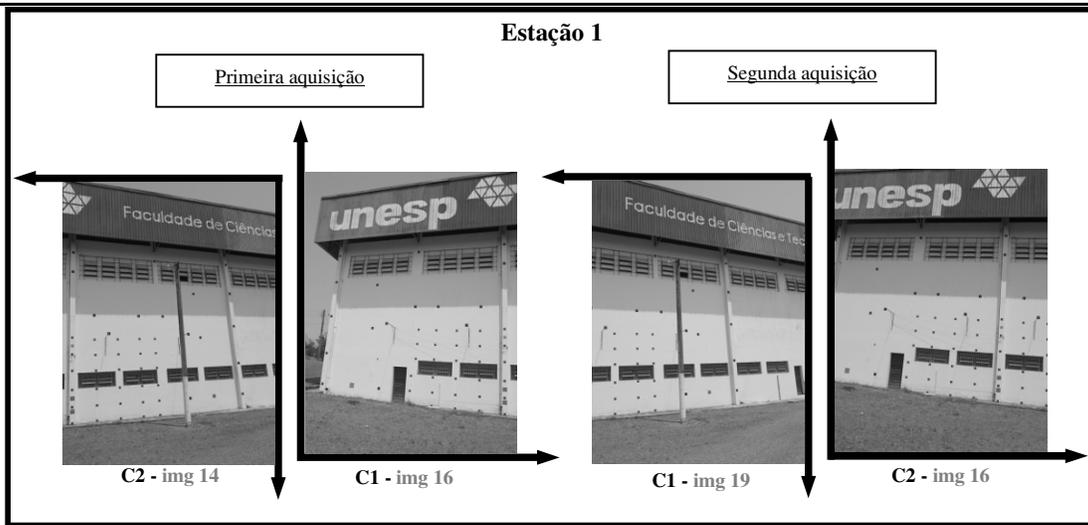


Figura 7: Imagens da estação 1, primeira e segunda aquisição.

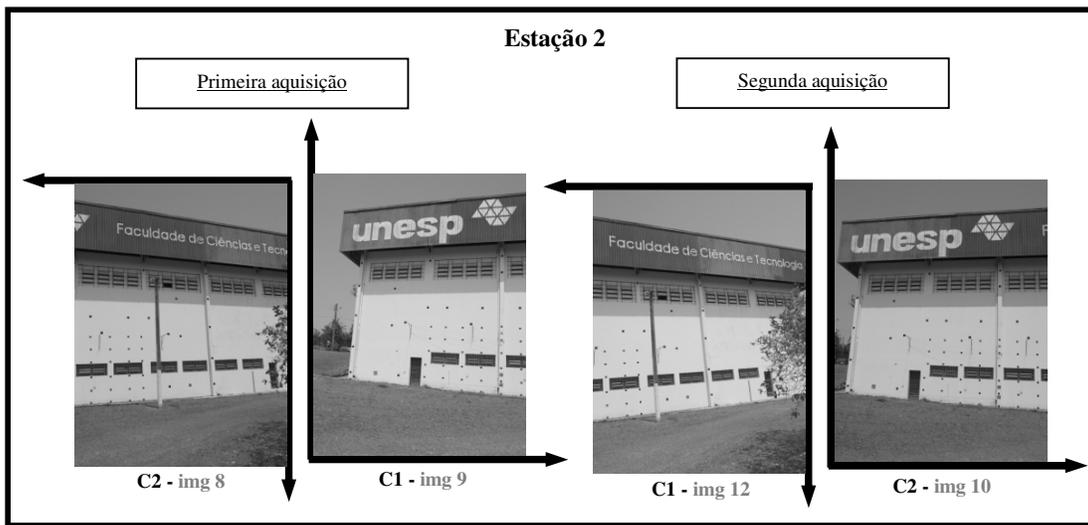


Figura 8: Imagens da estação 2, primeira e segunda aquisição

O procedimento para a fusão de imagens utiliza os dados da calibração do sistema, gerados em uma etapa anterior, que fornece: os parâmetros de orientação interior (OI), os parâmetros de orientação exterior (OE) e os elementos de orientação relativa (OR) do par de imagens entre as duas câmaras. Nas tabelas 2 a 7 são apresentados os valores obtidos por Bazan (2008), para os parâmetros de calibração do arranjo *Dual*.

Tabela 2: Parâmetros de Orientação interior da câmara 1 e respectivos desvios-padrão.

Orientação interior		σ
f	50,06405195 mm	+/- 0,01295493 mm
x0	-0,28512610 mm	+/- 0,01282603 mm
y0	-0,06067980 mm	+/- 0,01170280 mm
k1	-0,00002899 mm ⁻²	+/- 0,00000044 mm ⁻²
k2	0,00000012931 mm ⁻⁴	+/- 0,000000001205 mm ⁻⁴
k3	0,000000000004 mm ⁻⁶	+/- 0,000000000001 mm ⁻⁶
p1	0,000003067193	+/- 0,000001474930
p2	-0,000004085354	+/- 0,000001270382

Tabela 3: Parâmetros de Orientação interior da câmara 2 e respectivos desvios-padrão.

Orientação interior		σ
f	50,14352136 mm	+/- 0,01283858 mm
x0	-0,66589691 mm	+/- 0,01109047 mm
y0	-0,23760834 mm	+/- 0,00987206 mm
k1	-0,00002871 mm ⁻²	+/- 0,00000036 mm ⁻²
k2	0,000000011580 mm ⁻⁴	+/- 0,000000001080 mm ⁻⁴
k3	0,000000000004 mm ⁻⁶	+/- 0,000000000001 mm ⁻⁶
p1	0,000001644336	+/- 0,000001235916
p2	-0,000005592553	+/- 0,000001001336

Tabela 4: Ângulos de rotação para cada imagem.

Cam.	Img.	ω (°)	ϕ (°)	κ (°)
1	9	11,292928	15,480407	90,421735
2	8	12,465068	-21,211427	-88,724922
1	12	12,738112	-25,913675	-90,159598
2	10	11,97192	10,788100	90,533775
1	16	14,287679	17,077518	89,956170
2	14	15,169471	-19,626025	-89,213847
1	19	13,903235	-25,97441	-87,481552

2	16	11,491195	10,656408	92,993063
---	----	-----------	-----------	-----------

Tabela 5: Coordenadas do Centro Perspectivo de cada imagem no referencial do espaço objeto.

Cam.	Img.	X ₀ (mm)	Y ₀ (mm)	Z ₀ (mm)
1	9	105,008	401,016	19,901
2	8	104,898	401,020	19,907
1	12	104,889	401,145	19,956
2	10	104,991	401,119	19,985
1	16	104,873	401,043	16,168
2	14	104,764	401,050	16,176
1	19	104,755	401,161	16,226
2	16	104,860	401,145	16,251

Tabela 6: Ângulos de orientação relativa no referencial da câmara 1.

Par de Imagens	$\Delta\omega$	$\Delta\phi$	$\Delta\kappa$
img. 16 - img. 14	-36,712136°	-0,372983°	179,066919°
img. 19 - img. 16	-36,704227°	-0,380226°	179,060580°
img. 9 - img. 8	-36,708277°	-0,367544°	179,086456°
img. 12 - img. 10	-36,707745°	-0,370108°	179,077594°

Tabela 7: Componentes da base relativa no referencial da câmara 1.

Par de Imagens	B _x (mm)	B _y (mm)	B _z (mm)
img. 16 - img. 14	8,677	105,970	-20,714
img. 19 - img. 16	14,204	106,185	-20,714
img. 9 - img. 8	5,888	107,330	-24,444
img. 12 - img. 10	18,669	106,664	-13,977

A estratégia para a fusão de imagens adotada, leva em conta o ângulo de convergência entre as imagens e as bases relativas entre as câmaras (ver seção 4.2). No experimento realizado foram considerados os elementos de O.R. individual para cada par de imagens. Num caso geral será usado um valor médio, que melhor modele a O.R. A tabela 8 exibe os valores dos ângulos de retificação adotados para cada par imagem.

Tabela 8 – Valores dos ângulos de orientação para a retificação de cada imagem.

Par de imagens	ângulos	Câmara 1	Câmara 2
Img. 16 - Img. 14	ω (°)	18,356068	-18,2019784
	ϕ (°)	0,0	-3,6414961
	κ (°)	4,6654862	-175,7283822
Img. 19 - Img. 16	ω (°)	18,3521135	-18,0141424
	ϕ (°)	0,0	-5,3662893
	κ (°)	7,5525450	-173,3979124
Img. 09 - Img. 08	ω (°)	18,3541385	-18,2694037
	ϕ (°)	0,0	-2,7130953
	κ (°)	3,1353280	-176,9711056
Img. 12 - Img. 10	ω (°)	18,3538725	-17,8289325
	ϕ (°)	0,0	-6,6677794
	κ (°)	9,7819412	-171,5988982

Após a retificação das imagens, é aplicada uma correção radiométrica média em cada imagem, utilizando o método da equalização do histograma.

A fusão das imagens foi realizada no software REGEMY, identificando-se interativamente os pontos homólogos e aplicando-se duas translações. O erro residual médio obtido foi de aproximadamente 3 pixels,

após a fusão das imagens. As figuras 9 e 10 exibem os pares de imagens fundidas. A Figura 11 mostra um detalhe da consequência desta diferença entre as imagens.

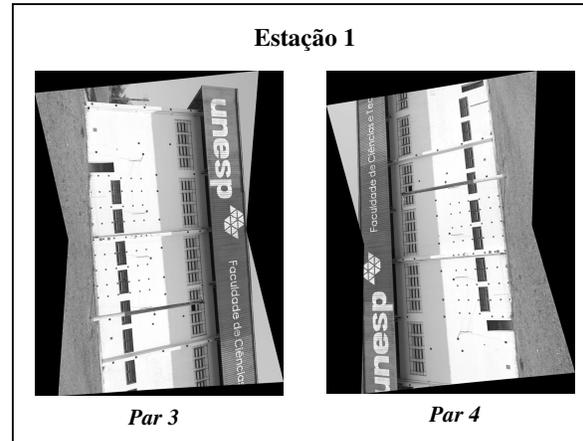


Figura 9: Imagens fundidas correspondentes à estação 1.

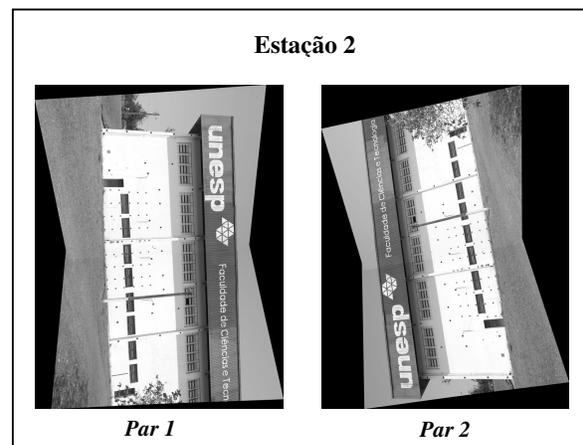


Figura 10: Imagens fundidas da estação 2.

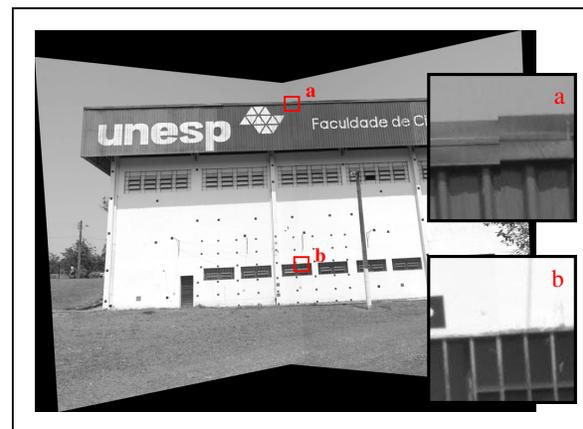


Figura 11: Detalhe da fusão de imagem (a) Detalhe do letreiro mostrando uma pequena discrepância de fusão, devida à paralaxe (b) Detalhe da janela inferior, onde se nota que esta discrepância é menor.

Observa-se na figura 11 que o erro no letreiro é mais pronunciado do que na parede, onde estão situados os pontos do campo de calibração. A explicação para esse fato é que o letreiro está mais próximo da estação, a partir da qual foram tomadas as fotografias e, portanto, sua paralaxe é maior do que os pontos situados na parede. Uma quantificação teórica deste efeito é mostrada a seguir.

Considerando a equação de paralaxe dada por:

$$p_a = \frac{B \cdot f}{Z} \tag{12}$$

sendo:

p_a - Paralaxe do ponto considerado;

B - Base entre as câmaras;

f - Distância focal;

Z - Distância entre a câmara e o ponto considerado.

A tabela 9 exhibe as paralaxes em dois pontos distintos.

Tabela 9 – Valores aproximados para exemplificação do efeito da paralaxe na fusão de imagens.

Elementos	Ponto na parede	Ponto no letreiro
B (mm)	110	110
f (mm)	50	50
Z (mm)	22000	20000
p_a (mm)	0,25	0,275

A diferença de paralaxe entre os dois pontos considerados é de 0,025 mm. Sabendo-se que o tamanho do pixel da imagem é 0,009 mm, essa diferença é de

aproximadamente 3 pixels, que é o erro residual encontrado na fusão das imagens

Este tipo de problema ocorreu por conta da proximidade do objeto em relação à câmara. A relação Base/Distância neste caso foi de 0,0055.

Supondo uma altura de vôo de 1.500m, com uma diferença de altitudes na área coberta pela imagem de 100m, esta relação Base/Distância seria de 7×10^{-5} e a diferença de paralaxe seria menor que 0,2 μ m, ou 1/50 do tamanho do pixel. Portanto, para imagens aéreas a diferença será imperceptível.

Após a fusão das imagens realizou-se um processo de resseção espacial em cada imagem fundida para verificar a qualidade geométrica do processo. Foram utilizados 51 pontos de apoio, cujas coordenadas na imagem foram medidas interativamente. Na tabela 10 são apresentados os desvios-padrão a posteriori para cada imagem após a resseção. A Figura 12 mostra os resíduos nas coordenadas fotogramétricas (x e y) nas imagens para cada ponto.

Tabela 10 – Desvio padrão a posteriori após o cálculo da Resseção Espacial para cada imagem.

Imagem	Desvio padrão a posteriori (mm)
Par 1	0,027649
Par 2	0,004286
Par 3	0,003594
Par 4	0,006250

Pode-se observar que para a imagem 1, obteve-se um erro residual maior que as outras imagens, o que é

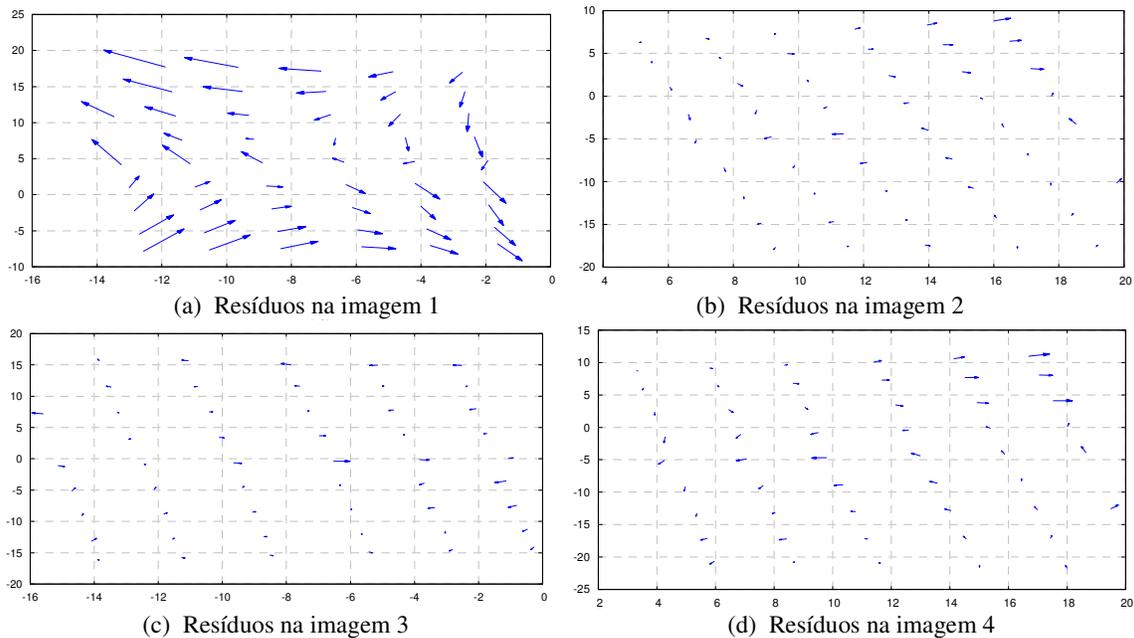


Figura 12: Resíduos nas coordenadas fotogramétricas correspondentes aos pontos de apoio após a resseção espacial.

mostrado graficamente na Figura 1(a). Verifica-se claramente uma tendência sistemática, o que indica algum problema na retificação das imagens. Nas demais imagens o desvio a posteriori foi inferior ao tamanho do pixel, indicando que o processo de fusão funcionou a contento.

6 CONCLUSÕES

O processo de fusão das imagens do arranjo *Dual* é fortemente dependente da calibração prévia do sistema. A incerteza nos parâmetros de OE prejudica o cálculo da Orientação Relativa e a posterior fusão das imagens.

Nas imagens obtidas após a fusão, verificou-se que os pontos de apoio estão concentrados em uma parte da imagem (centro), o que pode explicar os bons resultados nas imagens.

Recomenda-se realizar estudos mais detalhados, com a coleta de novas imagens para determinar os limites e erros do processo de fusão dual, com testes adicionais com imagens aéreas.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio ao projeto em forma de bolsa de estudo, à empresa Engemap (Assis - SP) pela disponibilidade dos equipamentos utilizados no trabalho, ao colega do programa de Pós-Graduação da UNESP (Presidente Prudente), Wimerson Bazan pelos dados da calibração do arranjo *Dual*, e à aluna de graduação Ana Claudia pela ajuda nas medições das imagens.

8 REFERÊNCIAS

ARMOD, **Automação dos processos de Reconstrução e orientação de Modelos usando imagens digitais**, Antonio Maria Garcia Tommaselli (Responsável), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq, processo: 472322/04-4, 2005.

BAZAN, W. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; RUY, R. S. Calibração de um sistema dual câmaras digitais convergentes. In: II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2007, Presidente Prudente. **Anais...** Presidente Prudente, 2007.

BAZAN, W. S. **Calibração de um Sistema Dual de Câmaras Digitais**. Dissertação de Mestrado, Presidente Prudente, 2008.

HABIB, A. F.; MORGAN, M. F. Small format digital cameras for mapping applications: Calibration and Stability Analysis. In: **Série em Ciências Geodésicas**. v. 3, Curitiba, 2003.

MACHADO, A. M. L. et al. Verificação da estabilidade geométrica dos parâmetros de calibração uma câmara

digital não métrica de pequeno formato Sony Dsc-f717, In: **Série em Ciências Geodésicas**. Curitiba, 2003, v. 3.

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

REGEMY automatic image registration and mosaicking system. Disponível em: <<http://regima.dpi.inpe.br>>. Acesso em: 30 jun. 2008.

RUY, R. S. **Geração Automática de Estereomodelos a partir de Imagens Digitais Georreferenciadas**. Dissertação de Mestrado, Presidente Prudente, 2004.

RUY, R. S., TOMMASELLI, A. M. G., HASEGAWA, J. K., GALO, M., IMAI, N. N., CAMARGO, P.O.: SAAPI: a lightweight airborne image acquisition system: design and preliminary tests. In: 7th Geomatic Week, 2007, Barcelona. **CD room of the 7th Geomatic Week**. Barcelona 2007, Não paginado.

SAAPI, **Sistema aerotransportado de aquisição e pós-processamento de imagens tomadas com câmaras digitais não-métricas**, Roberto da Silva Ruy (Responsável); Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, programa PIPE, processo 04/09217-3, 2005.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**. Ohio: TerraScience, 1999. v.1, 428p.

TELLES, S.S.; TOMMASELLI, A.M.G.. Calibração de câmaras digitais usando linhas retas. In: **Série em Ciências Geodésicas**. Curitiba, 2002, v. 2, p. 289-314.