

Memorias



Sociedad Latinoamericana en
Percepción Remota y Sistemas
de Información Espacial
Capítulo Colombia

30
AÑOS

Medellín, Colombia
29 de Septiembre al 3 de Octubre de 2014



Avaliação experimental de um processo automático para localizar pontos de controle em imagens aéreas e orbitais

Evaluación experimental de un proceso automático para la localización de puntos de control en las imágenes aéreas y de satélite

Adilson Berveglieri¹, Antonio M. G. Tommaselli²

Univ Estadual Paulista – UNESP

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

²Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305, Presidente Prudente – SP, Brasil, CEP 19060-900

adilsonberveg@gmail.com, tomaseli@fct.unesp.br

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo preliminar de um processo que objetiva localizar automaticamente pontos de controle em imagens aéreas e orbitais. A técnica proposta usa imagens terrestres verticais de áreas de apoio. Nos procedimentos, são empregadas técnicas baseadas em *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT), registro e retificação de imagens para extrair recortes das imagens terrestres, os quais são comparados com imagens aéreas/orbitais usando algoritmos de correspondência por área e refinamento por mínimos quadrados para localizar o ponto. Experimentos iniciais baseados em ressecção espacial foram realizados para verificar a abordagem, e a avaliação foi feita com base nas discrepâncias em pontos de verificação. Os primeiros resultados demonstraram que os pontos de controle foram localizados nas imagens com acurácia subpixel.

Palavras-chave: imagem terrestre, correspondência de imagem, orientação.

Resumen

En este artículo se presenta un estudio preliminar de un proceso que tiene como objetivo la localización automática de puntos de control en las imágenes aéreas y orbitales de alta resolución. La técnica propuesta adquiere imágenes terrestres verticales relacionadas con las áreas de los puntos de control. Procedimientos basados en *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT), registro y rectificación de imágenes son aplicados para generar los recortes terrestres georreferenciados. Cada recorte es combinado con su respectiva ventana de la imagen aérea/orbital para localizar el punto con algoritmos de *area-based matching* y refinamiento por *Least-Squares*. Experimentos basados en la resección espacial fueron realizados para aplicar la técnica automática. La técnica propuesta fue evaluada por análisis de discrepancias en puntos de verificación, y los resultados demostraron que los puntos fueron localizados con exactitud subpixel.

Palabras clave: imagen terrestre, correspondencia de imagen, orientación.

1. Introdução

Um requisito importante em Fotogrametria e Sensoriamento Remoto é o uso de Pontos de Controle (PCs) para orientar indiretamente imagens ou para corrigir erros sistemáticos dos Parâmetros de Orientação Exterior (POEs) diretamente coletados por georreferenciamento direto, o qual usa dados adquiridos por *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e *Inertial Measurement Unit* (IMU) para a orientação direta do sensor da câmara.

Normalmente os PCs utilizados como apoio terrestre referem-se a pontos com características naturais, sendo medidos interativamente por operadores humanos. Embora os softwares fotogramétricos tenham evoluído, melhorando a medição manual de pontos, a dependência da medição pelas habilidades que um operador pode desempenhar constitui uma fonte de erros na tarefa de orientação de imagens. Assim, este trabalho apresenta um estudo preliminar sobre uma técnica automática para medir PCs em imagens aéreas ou de satélites com alta resolução. A técnica proposta adquire PCs com imagens terrestres e extrair recortes orientados para compará-los com imagens aéreas/orbitais, localizando-os com algoritmos de correspondência por área e refinamento por mínimos quadrados.

Nas seções seguintes, detalhes sobre a técnica proposta e alguns experimentos preliminares serão mostrados, bem como uma avaliação sobre a orientação de um modelo de imagens aéreas.

2. Metodologia

A abordagem tem como propósito automatizar a fase de medição de pontos de controle em imagens aéreas e orbitais de alta resolução. Para explicar sua implementação,

os procedimentos foram organizados em passos sequenciais que tratam sobre a: calibração da câmara; aquisição das imagens terrestres; orientação de imagens, retificação das cenas de apoio e correspondência entre imagens terrestre e aérea.

2.1 Calibração da câmara

A calibração da câmara é realizada por um procedimento em campo de calibração terrestre para definir os Parâmetros de Orientação Interior (POIs). Em geral, são determinados a distância focal, as coordenadas do ponto principal e os coeficientes de distorção das lentes. É utilizado um modelo apropriado para lente *fisheye* conforme Schneider et al. (2009), com acréscimo dos parâmetros de distorção das lentes pelo modelo Conrady-Brown (Brown 1971).

2.2 Aquisição de imagens terrestres

Para adquirir imagens terrestres, utiliza-se a técnica desenvolvida por Tommaselli & Berveglieri (2014) da seguinte forma: seleciona-se uma área fotoidentificável para posicionar um receptor GNSS acoplado a um alvo de referência (uma placa de controle). Este conjunto de levantamento é posicionado para coletar sinais GNSS sobre uma feição natural bem definida. Próximo ao receptor, um segundo tripé é posicionado para adquirir imagens com a câmara *fisheye* em posição nadiral, como ilustra a Figura 1.

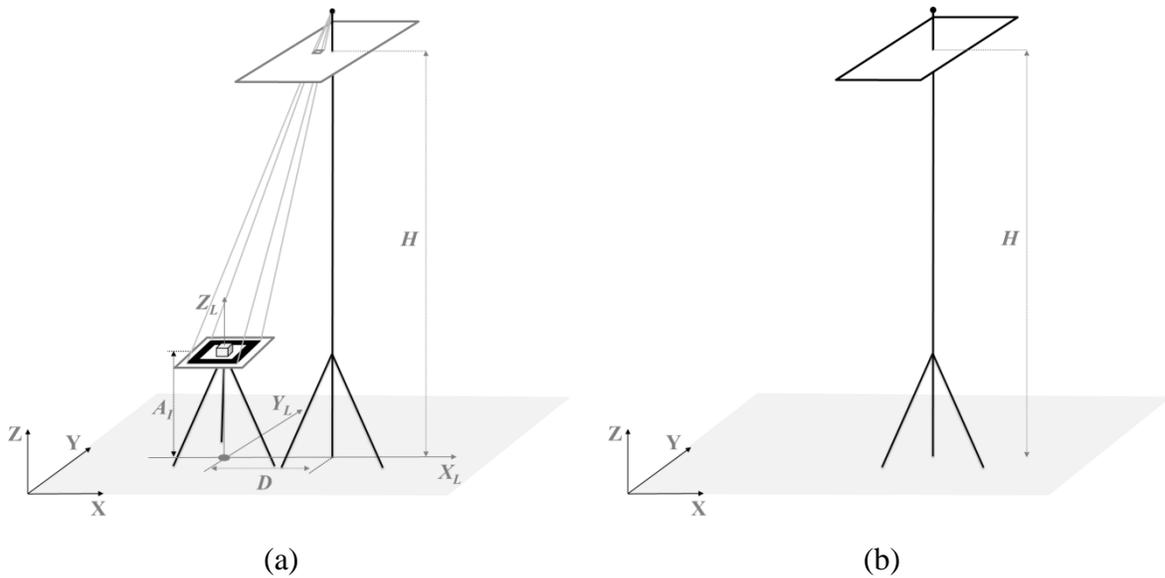


Figura 1 – (a) Aquisição de uma imagem registrando a placa de controle. (b) Segunda aquisição de imagem sem a placa de controle.

No procedimento, a placa de controle é posicionada, nivelada e alinhada perpendicularmente em relação ao tripé da câmara. O azimute aproximado pode ser medido com uma bússola ou magnetômetro. Enquanto ocorre o rastreamento GNSS, duas imagens são adquiridas, sendo a primeira imagem com os alvos e a segunda, na mesma posição, sem a placa de controle e receptor. A distância relativa D entre o eixo de centragem do tripé GNSS e o eixo do bastão da câmara e as alturas (A_I e H) também são medidas. O posicionamento dos dispositivos e as medições relativas definem um sistema local (X_L, Y_L, Z_L) que pode ser convertido para outro sistema (X, Y, Z), por exemplo, para o sistema *Universal Transverse de Mercator* (UTM), considerando-se as correções de convergência meridiana e declinação magnética.

2.3 Orientação de imagem terrestre

Uma vez que o centro da placa tem sua coordenada terrestre definida pelo levantamento GNSS, os oito cantos do alvo quadrado (bordas externa e interna) passam a ter também suas coordenadas conhecidas e são usadas como pontos de controle para orientar a imagem. Com base no azimute coletado em campo, as coordenadas são reorientadas aproximadamente para o norte verdadeiro, aplicando-se as devidas correções.

O alvo de controle é automaticamente identificado por um detector de contornos retangulares e seus vértices são extraídos (com precisão subpixel) por intersecção de linhas, como apresentado por Garrido-Jurado et al. (2014).

Como as duas imagens são coletadas em uma posição aproximadamente similar, pode-se orientar a primeira imagem que contém o alvo usando ressecção espacial e, em seguida, registrar a outra imagem, que não tem o alvo, usando pontos de correspondência em relação à primeira. Os pontos homólogos entre ambas as imagens são determinados pela técnica *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT), a qual extrai automaticamente características distinguíveis baseadas em informações de gradientes locais. Essas características são parcialmente invariantes a mudanças de escala, rotação, iluminação e ponto de vista da câmara. As características extraídas são armazenadas em vetores descritores, e a comparação entre os descritores de imagens permite estabelecer a correspondência de imagens. Detalhes sobre a técnica SIFT são dados por Lowe (2004).

A partir do conjunto de pontos homólogos nas duas imagens, aplica-se o registro de imagens por um ajuste polinomial, sendo então a segunda imagem reamostrada em função da primeira, de modo que possam ser usados os mesmos POEs estimados na ressecção espacial.

2.4 Retificação da imagem terrestre

Objetivando-se extrair um recorte da imagem terrestre para transferir o ponto GNSS levantado para sua respectiva imagem aérea ou orbital, a segunda imagem é então retificada com centro no ponto de apoio. Para esta tarefa, são requeridos: os POIs calibrados, as coordenadas do ponto GNSS e a imagem com seus POEs estimados.

O procedimento corrige os efeitos da geometria *fisheye* para um vista em perspectiva usando um único plano de projeção (valor Z do ponto GNSS coletado) com espaçamento de grade no GSD da imagem a ser comparada. Assim, tem-se a área de apoio retificada e orientada, e o recorte terrestre pode ser extraído aproximadamente na mesma orientação e resolução da imagem aérea ou orbital.

A Figura 2(a) mostra um exemplo de imagem terrestre coletada com a câmara *fisheye* em posição nadiral e, na Figura 2(b), tem-se a respectiva imagem retificada.



(a)

(b)

Figura 2 – (a) Exemplo de uma imagem terrestre *fisheye* em posição nadiral. (b) Respectiva imagem retificada.

2.5 Correspondência de imagens

O recorte terrestre deve ser comparado com a imagem aérea/orbital para medir automaticamente o ponto de apoio com precisão subpixel. Então o ponto GNSS é projetado direto pelas equações de colinearidade e um cálculo de propagação de erros, a partir dos POEs das imagens, determina as dimensões do espaço de busca. O tamanho do recorte (em níveis de cinza) é adaptativamente definido com base no maior valor do coeficiente de correlação (Kraus 2007), o qual também determina o pixel de correspondência pela comparação entre as áreas nas imagens.

Em seguida, um refinamento é aplicado para definir a posição subpixel. Este refinamento realiza um ajuste iterativo por *Least-Squares Matching* (LSM), o qual minimiza as diferenças entre pares correlacionados usando seis parâmetros geométricos e dois radiométricos, como descrito por Gruen (1996).

A Figura 3 exemplifica um par correspondente no nível de resolução da imagem aérea, em que 3(a) é a janela aérea e 3(b) é o recorte terrestre subamostrado.

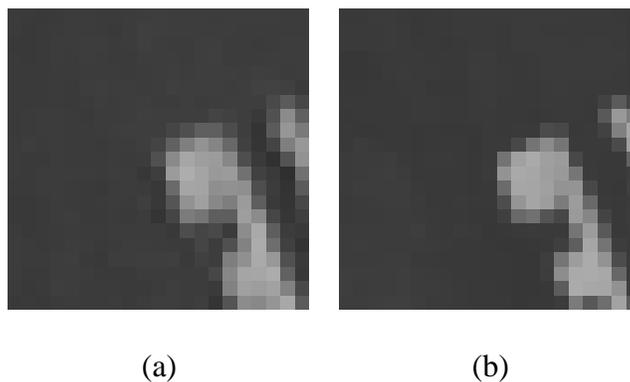


Figura 3 – (a) Janela de correspondência na imagem aérea. (b) Recorte terrestre subamostrado e correlacionado no nível de resolução da imagem aérea.

Na próxima seção, os experimentos realizados com a aplicação da técnica automatizada serão apresentados, bem como uma análise sobre os primeiros resultados obtidos.

3. Resultados experimentais

Experimentos preliminares foram conduzidos para aplicar e testar a técnica automática. Previamente uma câmara Nikon D3100 com lente *fisheye* Bower (focal de 8 mm) foi calibrada em campo de calibração terrestre para a determinação dos POIs. Usando a técnica de aquisição descrita na Seção 2.2, um conjunto de nove pontos terrestres foi levantado e imageado para avaliar a abordagem.

A orientação de um modelo de imagens aéreas foi usada como base para os experimentos. O modelo é formado por quatro imagens aéreas adquiridas por uma câmara Hasselblad 50 Megapixels (focal nominal de 50 mm), com *Ground Sample Distance* (GSD) de aproximadamente 15 cm, contendo quatro PCs nos cantos e cinco Pontos de Verificação (PVs) distribuídos internamente. A Figura 4 mostra a configuração geométrica desse modelo.

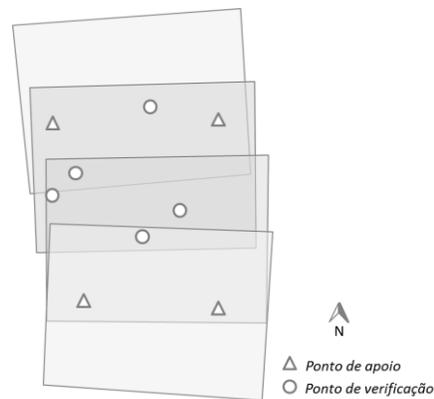


Figura 4 – Modelo de imagens aéreas mostrando quatro PCs e cinco PVs.

A técnica automática, implementada em C/C++, foi então aplicada para localizar cada coordenada terrestre em uma única imagem aérea. Posteriormente, cada coordenada imagem foi transferida para posições homólogas nas imagens adjacentes, usando correlação por mínimos quadrados.

Para avaliar a acurácia dessa localização, configurou-se um projeto fotogramétrico no software LPS-ERDAS[®] para realizar sobre o modelo: a geração automática de pontos de enlace; a transferência de coordenadas entre as imagens e o processamento da triangulação. Além disso, o mesmo projeto foi usado para medir manualmente as coordenadas e permitir uma comparação entre as medições manual e automática, sendo a manual realizada por um operador experiente.

Os parâmetros do projeto fotogramétrico foram definidos com os seguintes valores:

- Dados do georreferenciamento direto usados como aproximações iniciais para os POEs, adotando-se os desvios-padrão de $\sigma = 0,1$ m para posição e $\sigma = 2^\circ$ para atitude;
- Desvio-padrão no espaço imagem de $\sigma = 0,5$ pixel;
- Desvio-padrão no espaço objeto de $\sigma = 5$ cm, com base no processamento GNSS do levantamento de campo.

Então se realizou uma primeira triangulação do modelo com as coordenadas manuais e outra com as coordenadas automáticas.

Em seguida, os valores de Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) foram calculados tanto para os PCs quanto para os PVs, sendo estes considerados independentes, não inseridos no cálculo do ajustamento do modelo.

No espaço imagem, os valores REMQ resultantes das duas técnicas demonstraram-se aproximadamente similares, equivalentes a 0,4 pixel em xy nos PCs e 0,3 pixel em xy nos PVs.

As maiores diferenças ocorreram no espaço objeto. A Figura 5 apresenta os resultados dos valores REMQ obtidos a partir do ajustamento nos PCs para as duas medições. Como pode ser visto, as coordenadas automáticas alcançaram precisão em torno de 4 cm na planimetria e quase 2 cm em elevação, sendo estes valores mais precisos em comparação com a medição manual, em que todas as coordenadas resultaram em erros maiores.

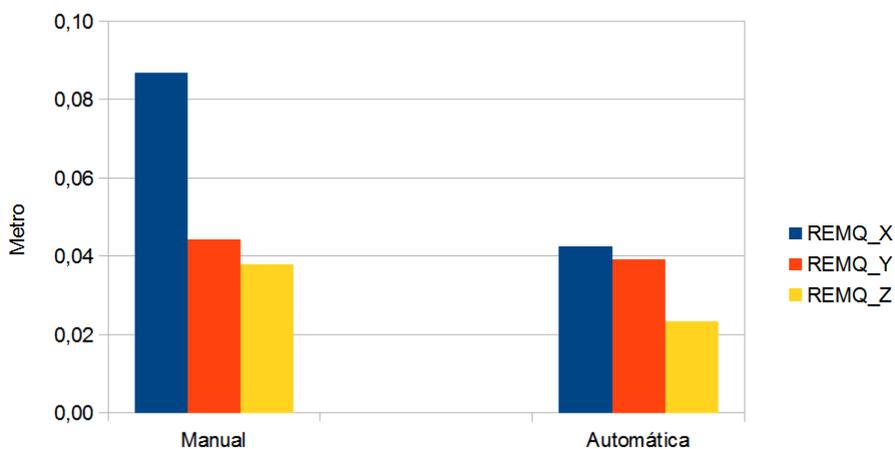


Figura 5 – REMQs resultantes do ajustamento nos quatro PCs no espaço objeto.

Uma análise similar pode ser feita nos PVs para avaliar a acurácia atingida. A Figura 6 mostra as discrepâncias nos valores REMQ considerando ambas as medições. A acurácia planimétrica na medição manual foi acima de 10 cm, ao passo que as mesmas coordenadas XY obtiveram discrepâncias abaixo de 5 cm na técnica automática.

Na coordenada Z, também a técnica automática resultou em um valor REMQ menor na comparação, sendo próximo a 1 GSD da imagem aérea.

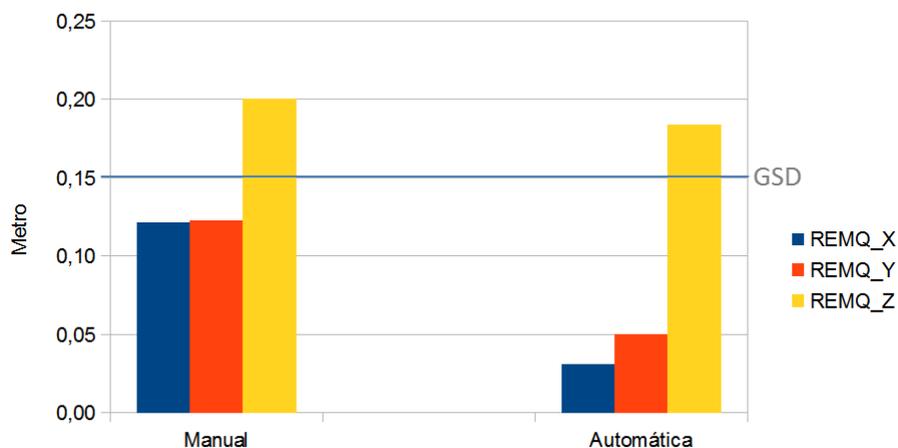


Figura 6 – REMQs resultantes do ajustamento nos cinco PVs no espaço objeto.

Em relação ao sigma *a posteriori* resultante do ajustamento do modelo, os valores foram 0,38 para a técnica manual e 0,36 para a técnica automática (adotando-se sigma *a priori* igual a 1).

Para a localização de pontos em imagem orbital, utilizou-se uma imagem Worldview-2 – DigitalGlobe com GSD de 50 cm. Neste caso, foi apenas testada a correlação de imagens em três PCs gerados automaticamente, o que também já indica a possibilidade de uso desta técnica para a medição de pontos de controle para a orientação e/ou correção geométrica de imagens de satélite.

A Figura 7 exemplifica um caso de correspondência estabelecida. É mostrado o recorte na imagem orbital com a posição de maior correlação, onde o recorte terrestre é efetivamente correspondido com a imagem orbital em nível subpixel.

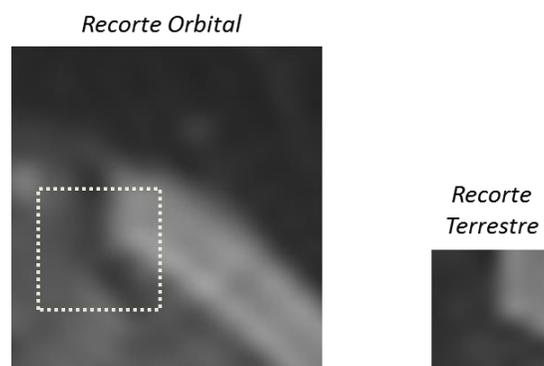


Figura 7 – Exemplo de um recorte da imagem orbital (21×21 pixels) indicando a janela de correspondência com o recorte terrestre (7×7 pixels).

A Tabela 1 mostra os resultados da similaridade medida pelo coeficiente de correlação normalizado nos três PCs considerados na imagem orbital. Cada PC foi automaticamente gerado pela técnica proposta e subamostrado para o mesmo GSD da imagem orbital para estabelecer correspondência.

Tabela 1 – Correspondência de três recortes terrestres com respectivas janelas orbitais.

Ponto	Tamanho recorte terrestre (pixel)	Coefficiente de correlação (ρ)
1	7×7	0,90
2	9×9	0,86
3	9×9	0,71

Como se verifica nos resultados, é possível obter correspondência entre imagens terrestres e orbitais com nível de similaridade acima de 70%, o que permite avaliar positivamente a viabilidade de uso desta técnica também para a correção geométrica de imagens orbitais.

4. Conclusão

Uma técnica em desenvolvimento foi apresentada para tratar da localização automática de pontos de controle em imagens aéreas/orbitais. A abordagem é baseada em imagens terrestres de áreas de apoio que são usadas na correspondência com imagens aéreas/orbitais para transferir e localizar a coordenada terrestre levantada. Assim, tanto a técnica de aquisição de imagens terrestres quanto à técnica automática para orientar e medir as coordenadas nas imagens foram testadas.

Os primeiros experimentos, baseados na orientação de um estéreo-modelo, demonstraram que as coordenadas levantadas em campo foram automaticamente localizadas nas respectivas imagens com a técnica proposta. Os resultados referentes a valores de REMQ indicaram maior precisão no ajuste dos PCs e maior acurácia na análise de discrepâncias em PVs em comparação com a medição manual utilizada.

Quanto à localização de pontos em imagens orbitais, aplicou-se um teste de correlação de imagens terrestres com uma orbital e constatou-se que a correspondência também pode ser estabelecida usando a técnica proposta.

A partir desses resultados, é possível concluir que coordenadas terrestres podem ser localizadas com precisão subpixel em imagens aéreas/orbitais sem haver uma interação manual, o que automatiza a fase de medição de pontos.

Em trabalhos futuros, experimentos adicionais deverão ser realizados para verificar a técnica automática em modelos com outros níveis de GSD e em blocos de imagens e, ainda, a localização de pontos envolvendo outras condições, como sombras ou variação na superfície.

5. Referências Bibliográficas

Brown, D. C. (1971). Close-range calibration. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*, 37(8), 855–866.

Garrido-jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J. & Marín-Jiménez, M. J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *PATTERN RECOGNITION*, 47(6), 2280 – 2292.

Gruen, A. (1996). Least square matching: a fundamental measurement algorithm. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Bristol: Whittle Publishing.

Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: geometry from images and laser scans* (2a ed.). Berlin: de Gruyter.

Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *INTERNATIONAL JOURNAL of COMPUTER VISION*, 60(2), 91–110.

Schneider, D., Schwalbe, E. & Maas, H. G. (2009). Validation of geometric models for fisheye lenses. *ISPRS JOURNAL of PHOTOGRAMMETRY and REMOTE SENSING*, 64(3), 259–266.

Tommaselli, A. M. G. & Berveglieri, A. (2014). Automatic orientation of multi-scale terrestrial images for 3D reconstruction. *REMOTE SENSING*, 6(4), 3020–3040.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem: ao Prof. Erivaldo Antônio da Silva pelo fornecimento da imagem orbital; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudo – Processo 2010/16954-5; ao CNPq (305111/2010-8); à SensorMap pelo fornecimento das imagens aéreas; ao Prof. José Marcato Junior pelo software de calibração – lente *fisheye* e aos alunos Marcus A. V. Moraes e Carlos R. T. Caldeira pela colaboração no levantamento de campo.