

## O POTENCIAL DA FOTOGRAMETRIA NA UFRGS

Mário Luiz Lopes Reiss

*Instituto de Geociências, Departamento de Geodésia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. {mario.reiss@ufrgs.br;m2lreiss@hotmail.com}*

---

**RESUMO:** Este artigo aborda três exemplos de trabalhos desenvolvidos na área da Fotogrametria com o objetivo de mostrar as potencialidades de aplicação desta ciência no processo de medição de objetos por meio de fotografias. Estes três trabalhos foram desenvolvidos na UNESP, Departamento de Cartografia, com a participação do autor deste artigo, durante seus trabalhos de graduação, mestrado e doutorado, respectivamente. O primeiro deles trata da construção de um sistema móvel de mapeamento terrestre (SMMT) destinado ao mapeamento de rodovias e cidades. Neste sistema foi criada uma metodologia que permite o mapeamento topográfico pela integração de câmaras de vídeo, sistema de navegação GPS e uma unidade de processamento, todos embarcados em um veículo automotor. Com essa integração de equipamentos e uma metodologia de fototriangulação foi possível a construção do mapa topográfico de uma área teste sem a necessidade de pontos de apoio no terreno, e com todo o processamento de dados realizado em escritório. O segundo projeto de pesquisa, desenvolvido durante o mestrado, trata de um sistema fotogramétrico para a medição de superfícies planas com a vantagem de não precisar de pontos de apoio no espaço objeto, necessários na Fotogrametria convencional. Neste desenvolvimento foi criada uma metodologia nova que se utiliza das linhas verticais e horizontais para orientar as imagens em relação às rotações, e um telêmetro a laser acoplado à câmara para medir a distância câmara-objeto, e possibilitar a determinação da escala da fotografia. A aplicação inicial pretendida para este sistema foi a medição de áreas de anúncio de placas de propaganda (*outdoors*), entretanto, foi verificada a possibilidade de outras aplicações, como a medição de fachadas de edificações e outras superfícies planas que contenham linhas verticais e horizontais. A terceira pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema fotogramétrico para a reconstrução 3D de objetos a curta distância por luz estruturada. O sistema foi baseado em uma câmara e um projetor de padrões de luz estruturada, rigidamente fixado à câmara, de forma a estabelecer uma geometria que permitisse a reconstrução da nuvem de pontos de luz estruturada projetada. Por fim, serão apresentados os resultados destes trabalhos anteriores e as perspectivas trabalhos futuros na área de Fotogrametria na UFRGS.

**Palavras chaves:** Fotogrametria, Mapeamento Móvel, Restituição Sem Pontos de Apoio, Luz Estruturada.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Uma das tecnologias bastante consolidada para a medição de objetos com fins de mapeamento é a Fotogrametria. Ela propicia a obtenção de medidas tridimensionais de objetos por meio da utilização de fotografias tiradas destes objetos, e já possui uma história destacada como ferramenta para levantamentos com fins de mapeamento. Dentre as técnicas cartográficas utilizadas para a obtenção de dados e medidas, a Fotogrametria é a que mais se destaca, pois tem a vantagem de possibilitar a aquisição de um grande volume de feições da cena por meio das fotografias. É por isso que é a técnica mais utilizada no mapeamento sistemático. Outra grande vantagem é a possibilidade da medição de qualquer feição da fotografia a qualquer momento sem a necessidade de retorno ao local do levantamento, o que com outra técnica não é possível. Apesar de sua principal aplicação ter sido historicamente o mapeamento, os conceitos envolvidos na Fotogrametria permitem que qualquer tipo de objeto possa ser medido por meio de fotografias. Com isso, outras áreas de conhecimento passaram a utilizar esses conceitos para seus propósitos, criando interfaces entre a Fotogrametria áreas, como a Visão Computacional e a

Computação de Imagens. Por outro lado, a Fotogrametria também evoluiu com a utilização de conceitos destas áreas, que permitiram, dentre outras coisas, a automação dos procedimentos fotogramétricos. Neste artigo serão apresentados três exemplos de trabalhos desenvolvidos em aplicações distintas com a finalidade de dar uma pequena dimensão das potencialidades da Fotogrametria em procedimentos de medição de objetos. O primeiro deles é o desenvolvimento de um Sistema Móvel de Mapeamento Terrestre, com a finalidade de construir mapas a partir de imagens geo-referenciadas tomadas com câmaras de vídeo posicionadas em um veículo automotor. Este tipo de sistema está em ascensão atualmente, principalmente na obtenção de mapas para os sistemas de navegação GPS (*Global Position System*) para uso em automóveis, aparelhos celulares, e outras aplicações de urbano e rodovias.

O segundo trabalho a ser apresentado é um sistema de restituição inicialmente projetado para a medição da área de anúncio de placas de propaganda, mas que, no decorrer do seu desenvolvimento, mostrou potencialidades de emprego na medição de outros tipos de objeto, como fachadas de edificações. Este sistema, denominado de RESPA (REstituição Sem Pontos de

Apoio), se baseou nas linhas verticais e horizontais, presentes nas fotografias para a determinação das rotações da câmara no instante da tomada da foto, e um telêmetro a LASER para a medição da posição da câmara em relação ao plano do objeto fotografado.

O terceiro trabalho trata de outro emprego dos conceitos fotogramétricos em uma aplicação bastante diferente da de um mapeamento, a medição de objetos a curtíssimas distâncias, como peças industriais e partes do corpo humano. Ele é baseado na recuperação das coordenadas de pontos que são projetados na forma de um padrão de luz com um formato específico sobre os objetos. Cada ponto projetado forma uma coluna de luz que se estende desde a fonte, no centro de projeção, até a superfície do objeto. O projetor dos padrões é acoplado rigidamente à câmara e em relação a ela a fonte de luz é deslocada, formando uma geometria que permite o cálculo das coordenadas 3D ponto projetado por meio de intersecção de raios. Os resultados obtidos mostraram que este sistema é promissor como uma alternativa barata para a reconstrução de objetos, entretanto, alguns problemas foram detectados, necessitando melhorias no sistema. Com isso, uma proposta de continuidade deste sistema está em desenvolvimento na UFRGS, com apoio do CNPq.

A seguir será feita uma revisão dos principais fundamentos da envolvidos na Fotogrametria, antes de apresentar os detalhes destes três exemplos de emprego de sistemas fotogramétricos no processo de medição. Na seqüência, serão apresentadas também as possibilidades futuras de desenvolvimento de novos projetos ou de continuidade dos anteriores.

## 2. ALGUNS DOS FUNDAMENTOS BÁSICOS DA FOTOGRAMETRIA

### 2.1 Orientação das Imagens

Na realização de trabalhos Fotogramétricos, cuja finalidade é a extração de medidas precisas dos objetos contidos na cena por meio da utilização de fotografias, duas etapas de orientação são necessárias: a Orientação Interior (OI) e a Orientação Exterior (OE) (ANDRADE, 1998; MIKHAIL; et al 2001).

A OI em Fotogrametria é definida como a recuperação da geometria interna da câmara no instante da sua exposição para a tomada da fotografia (ANDRADE, 1998). Quando se está utilizando câmaras fotogramétricas convencionais a OI analítica é realizada, inicialmente, por meio de uma transformação geométrica das coordenadas do sistema de medição adotado (sistema do comparador) para sistema fiducial.. Ao se tratar de uma câmara digital, os parâmetros dessa transformação são conhecidos a priori, pois o conjunto sensor é considerado rígido, e livre de deformações (GALO, 1993). Assim, basta realizar uma transformação do sistema imagem para o sistema fotogramétrico, com uma translação dos eixos para o ponto principal, uma reflexão das coordenadas Y em torno do eixo X e a aplicação de um fator de escala às

coordenadas da imagem, correspondente ao tamanho do elemento sensor (GALO, 1993; REISS, 2002). Na seqüência, é feita a correção dos efeitos sistemáticos de formação da fotografia, com a correção das distorções das lentes. Na Fotogrametria terrestre, os efeitos de refração fotogramétrica e de curvatura terrestre, são desprezados por eles não serem considerados significativos uma vez que a distância câmara objeto é curta. Maiores detalhes sobre a OI podem ser encontrados em: BROWN (1971); GALO (1993); ANDRADE (1998); MIKHAIL, et al (2001).

Na OE são determinadas as posições e as rotações (atitudes) da câmara, referenciadas ao sistema de coordenadas do espaço objeto. Neste processo, são determinados seis parâmetros para cada estação da câmara, ou seja, para cada foto: três translações do centro perspectivo (CP) ( $X_{CP}$ ,  $Y_{CP}$  e  $Z_{CP}$ ), e três rotações ou ângulos de Euler (ANDRADE, 1998), representados pelas letras gregas  $\kappa$  (kapa),  $\varphi$  (phi) e  $\omega$  (omega).

A OE, na Fotogrametria convencional, pode ser determinada indiretamente por meio de um procedimento de fototriangulação de um conjunto de fotos (bloco ou modelo) ou pelo processo de ressecção espacial com cada foto de forma isolada. Estes procedimentos utilizam o modelo de colinearidade (1), que relaciona o ponto medido na imagem com o ponto no espaço objeto (ANDRADE, 1998) (Fig. 1).

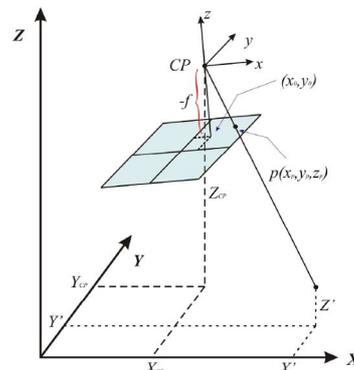


Fig. 1 - Geometria da Fotografia Positiva

$$\begin{aligned} x_p &= -f \cdot \frac{r_{11}(X - X_{CP}) + r_{12}(Y - Y_{CP}) + r_{13}(Z - Z_{CP})}{r_{31}(X - X_{CP}) + r_{32}(Y - Y_{CP}) + r_{33}(Z - Z_{CP})} \\ y_p &= -f \cdot \frac{r_{21}(X - X_{CP}) + r_{22}(Y - Y_{CP}) + r_{23}(Z - Z_{CP})}{r_{31}(X - X_{CP}) + r_{32}(Y - Y_{CP}) + r_{33}(Z - Z_{CP})} \end{aligned} \quad (1)$$

sendo:  $x_p$  e  $y_p$  as coordenadas do ponto imagem no sistema fotogramétrico;

$x'$  e  $y'$  coordenadas do ponto imagem no sistema fiducial PP;

$x_0$  e  $y_0$  coordenadas do ponto principal;

$X, Y$  e  $Z$  as coordenadas de pontos no sistema de referência do espaço objeto;

$X_{CP}, Y_{CP}$  e  $Z_{CP}$  as coordenadas do CP, no sistema de referência do espaço objeto;

$f$  é a focal calibrada da câmara;  
 $R$  a matriz de rotação entre os sistemas referenciais, aqui definida pela seqüência  $R_Z(\kappa) \cdot R_Y(\varphi) \cdot R_X(\omega)$ .

Se a finalidade é gerar modelos no referencial do espaço objeto, então os pontos de apoio precisam ser medidos para se determinar as orientações das imagens no referencial do espaço objeto (ANDRADE, 1998). Se o que se deseja são apenas modelos em escala, não importando o referencial adotado, então podem ser usadas alternativas. Uma delas é fixar a base entre duas fotos e orientar uma fotografia em relação à outra, gerando-se um modelo proporcional. Caso a base tenha sido arbitrada, pode-se depois medir uma distância no espaço objeto e sua homóloga no espaço do modelo para determinar o fator de escala entre o objeto e o modelo; ou ainda, medir uma distância câmara-objeto para se determinar o fator de escala.

No processo de Resseção Espacial os parâmetros de OE são estimados indiretamente por meio do Método dos Mínimos Quadrados (GEMAEL, 1994), sendo: o conjunto de parâmetros  $[\kappa, \varphi, \omega, X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}]$  as incógnitas;  $[x_p, y_p]$  foto-coordenadas observações;  $[X, Y, Z]$  coordenadas no espaço-objeto conhecidas; e a distância focal  $f$  é considerada como constante. A condição mínima necessária para determinar indiretamente a OE de uma foto isolada por resseção espacial é a medição de 3 pontos de apoio no referencial do objeto, obtendo-se solução única. Na prática, são medidos mais de 4 pontos para que haja superabundância e seja possível detectar eventuais erros grosseiros ocorridos na medição.

Outra equação de condição bastante utilizada na Fotogrametria é a coplanaridade (REISS, 2007). Existem vários outros modelos matemáticos que permitem a estimação da OI e da OE de uma imagem usando linhas retas. Na literatura são citadas várias vantagens da utilização de linhas ao invés de pontos. A mais proeminente delas é o alto potencial de automação do processo de extração e medição de linhas em imagens digitais (TOMMASELLI e LUGNANI, 1988; LIU e HUANG, 1988a e 1988b; HARALICK, 1989; TOMMASELLI e TOZZI, 1996; HEUVEL, 1997; TOMMASELLI e REISS, 2005; TELLES e TOMMASELLI, 2005; MEDEIROS e TOMMASELLI, 2006).

## 2.2 Calibração de Câmaras

Outro processo bastante conhecido na área de Fotogrametria é a calibração de câmaras. Ela consiste em determinar, especificamente os parâmetros de orientação interna da câmara e os efeitos sistemáticos que distorcem a formação da imagem e degradam a qualidade das medidas se não forem corrigidos. Um dos métodos freqüentemente adotado para isso é o da Fototriangulação com parâmetros adicionais, por meio da equação de colinearidade, também denominado de

*calibração on job* (GALO, 1993). Neste método, são tomadas fotografias de um campo de calibração e é processada uma Fototriangulação usando as equações de colinearidade acrescidas dos efeitos sistemáticos de formação da imagem (deslocamento do ponto principal, distorções das lentes e parâmetros de afinidade). Outro parâmetro de OI que é determinado é a focal da câmara. Para a solução do sistema de equações, considerando 10 parâmetros de OI (GALO, 1993) são necessários, no mínimo, a tomada de duas fotografias com pontos de vistas diferentes e que sejam medidos, no mínimo, 6 pontos homólogos nas fotos, obtendo-se 2 graus de liberdade. Entretanto, para evitar singularidade no sistema de equações, além disso, é necessário que as imagens sejam todas com variação da distância câmara-objeto e a variação de rotação entre as imagens para eliminar a correlação entre os parâmetros. Quando o campo de testes é plano, pode-se utilizar tomadas convergentes para eliminar as correlações sendo este método denominado de “câmaras convergentes” (ANDRADE, 1998; MIKHAIL et al, 2001).

## 2.3 Restituição

Depois que cada uma das fotografias está orientada, tomando-se um par de fotos e seus respectivos parâmetros de OE, é executado o procedimento de restituição fotogramétrica. Ele consiste em que, com um mínimo de duas tomadas de um mesmo objeto, com pontos de vista diferentes, é possível se obter coordenadas tridimensionais medindo-se pontos homólogos nas duas fotos e aplicando um procedimento de intersecção de raios (Fig. 2).

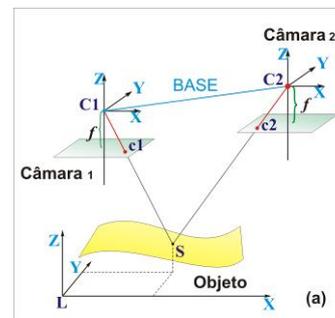


Fig. 2 – Geometria de reconstrução no sistema fotogramétrico.

Se a superfície de um objeto for plana e se a fotografia deste objeto estiver orientada, então não haverá a necessidade de duas fotografias para se extrair medidas do objeto, sendo possível a restituição monoscópica, ou seja, apenas uma fotografia (ANDRADE, 1998; MIKHAIL; et al 2001).

Estes são alguns dos procedimentos básicos do processo fotogramétrico de medição, que podem ser mais bem detalhados nas bibliografias citadas. Algumas variações nestes métodos são no sentido de que acrescentar melhorias aos processos de correspondência, orientação das imagens e extração de feições, visando automação. Estes fundamentos apresentados dão base teórica para

entendimento dos exemplos de projetos desenvolvidos na área de Fotogrametria que serão apresentados a seguir.

### 3. SISTEMA MÓVEL DE MAPEAMENTO TERRESTRE

A técnica fotogramétrica de imageamento eletrônico utilizada nos Sistemas Móveis de Mapeamento Digital, surgida no início dos anos 90, fora e continuam sendo testadas e empregadas em vários protótipos em âmbito mundial (NOVAK, 1992; BOSSLER et al, 1994; HE, 1996).

O Centro de Mapeamento da OSU (Ohio States University, Columbus, Ohio – USA) desenvolveu dois dos primeiros protótipos de sistemas de mapeamento móvel, o GPSVan e o MapCam. O GPSVan coleta dados e mapeia automaticamente estradas e seus arredores próximos na velocidade permitida pelas rodovias. Toda informação coletada pelo veículo é monitorada diretamente através de uma estação de trabalho (Workstation) com uma base de dados SIG (BOSSLER et al, 1994). O sistema de imageamento aéreo digital MapCam consiste de uma câmara CCD (Charge Coupled Device) digital destinado para mapeamento métrico ou de um sistema de câmara multi-espectral para aplicações de sensoriamento remoto. Os dados dos dois sistemas podem ser combinados para ampliar a extensão do mapeamento desde a apresentação de detalhes até o mapeamento básico de baixa altitude (GUARDIA et al 1999; OLIVERIA e SILVA, 1999).

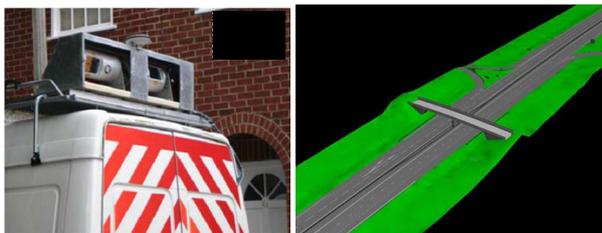


Fig. 3 – (a) Sistema StreetMapper com 2 escâneres a laser instalados; (b) Um modelo 3D adquirido com o sistema. Fonte: REDSTALL (2006)

Basicamente, todos os sistemas possuem configurações similares: uma integração de receptores GPS ou de métodos de posicionamento, câmaras de vídeo analógicas e/ou digitais e sistema de navegação inercial (INS) para a compensação das posições do veículo no caso de perda do sinal GPS. Os sistemas mais recentes contam também com escâneres a LASER, que, integrados com os sensores de navegação, fazem a obtenção do modelo digital de terreno em tempo real (REDSTALL, 2006).

A oportunidade de trabalhar no desenvolvimento de um sistema móvel de mapeamento terrestre (SMMT) se deu em 1999, durante a execução de um dos trabalhos de conclusão de curso na condição de graduando em Engenharia Cartográfica da UNESP. Naquele curso de graduação, os trabalhos de conclusão foram realizados

dentro do período de 12 meses, iniciando-se no último ano do curso. A equipe de trabalho foi formada por 3 estudantes graduandos e 2 professores do Curso (um orientador e outro co-orientador) e fez a primeira implementação do SMMT do Brasil (GUARDIA et al, 1999). Anterior a isso, em 1997 e 1998 realizaram-se dois trabalhos sendo um como tese de livre-docência (SILVA, 1997) e outro como trabalho de graduação (BATISTA et al., 1998), nos quais foram testadas as metodologias de caminhamento fotogramétricas através de um levantamento topográfico de áreas pilotos por simulação de um SMMT, mostrando a viabilidade desta metodologia. O caminhamento fotogramétrico é um método de levantamento baseado em estereopares de fotografias terrestres obtidas com a base perpendicular ao eixo do levantamento. A orientação exterior pode ser determinada por triangulação dos feixes de raios, sendo que as escalas das fotos diferem significativamente. A solução dos parâmetros pode ser simultânea ou seqüencial (SILVA, 1997).

O desenvolvido do SMMT teve fomento da FAPESP, sendo construída de uma unidade de captura e metodologias de processamento. A unidade de captura foi batizada de UMMD (Unidade Móvel de Mapeamento Digital), e ela foi constituída na época por um veículo Kombi, um par de câmaras de vídeo digital, dois receptores GPS, um notebook e um sistema de sincronização sonora dos quadros de imagem (Fig. 4).



Fig. 4 – Composição UMMD desenvolvida na UNESP. Fonte: GUARDIA et al (1999).

Uma parede foi sinalizada com pontos de apoio determinados por topografia para a calibração das câmaras e da relação entre elas e o receptor GPS posicionados no teto da UMMD (Fig. 5).

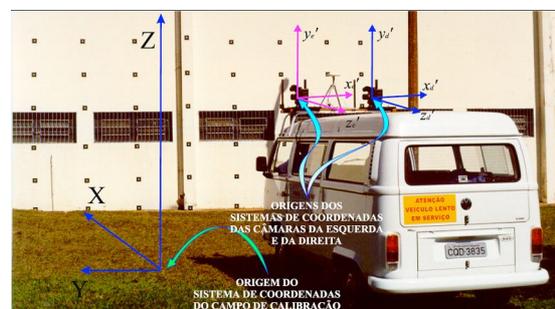


Fig. 5 – Parede de calibração de câmaras montada para o sistema. Fonte: GUARDIA et al (1999).

A metodologia de processamento foi composta por um conjunto de programas computacionais que processavam as informações capturadas com os

elementos sensores e as convertia em mapas. Alguns procedimentos como, o processamento dos dados GPS, a transferência, seleção e conversão das imagens digitais e edição dos mapas, foram feitas por programas comerciais ou livres. Outros programas foram construídos em C++ para sistematizar alguns dos procedimentos, como, a medição de fotocoordenadas nas imagens, o cálculo das coordenadas dos centros perspectivos (CP), e a integração dos dados oriundos da fototriangulação com as fotocoordenadas de feições medidas e o cálculo das coordenadas no terreno por intersecção fotogramétrica (REISS et al, 2000) (Fig. 6).

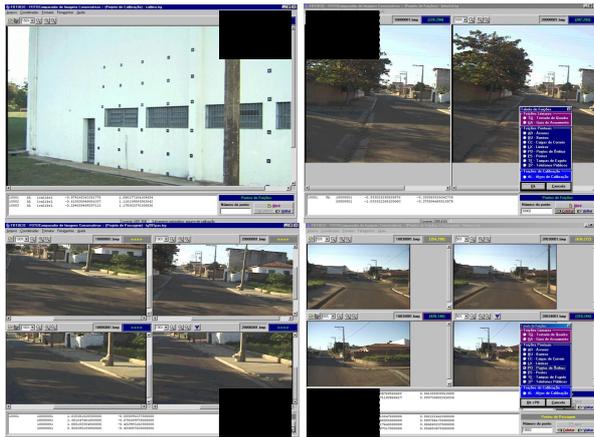


Fig. 6 – Interfaces dos programa FOTOCIC desenvolvido para a medição de fotocoordenadas nas imagens. (a) calibração de câmaras; (b) intersecção fotogramétrica; (c) fototriangulação; (d) operações (b) e (c) simultâneas. Fonte: REISS et al (2000).

Várias metodologias foram desenvolvidas na implementação deste SMMT que podem ser encontradas com detalhes em GUARDIA et al (1999) e REISS (1999 e 2000). Após implementação do SMMT foi escolhida uma área teste dentro do município de Presidente Prudente-SP, no Bairro Jardim Maracanã, e executado o levantamento topográfico da região (Fig. 7), sendo mapeadas várias feições, como: postes, guias das calçadas, a frente dos lotes, lixeiras, árvores, curvas de nível, e outras.

Foi executado um teste de qualidade final que mostraram que o mapa obtido tinha classe C do PEC, para a escala 1/2.000. Este resultado mostrou a viabilidade do sistema que, com algumas melhorias, poderia ser possível obter mapas para finalidades cadastrais. A grande vantagem deste sistema em relação aos similares da época, é que os equipamentos utilizados não eram de grande qualidade métrica, mas com a vantagem de ser de baixo custo. Vários avanços subsequentes foram desenvolvidos a partir destes realizados em GUARDIA et al (1999), acrescentando melhorias ao SMMT atual. O projeto recebeu um Prêmio de Melhor Pôster da Comissão II no Congresso da Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto realizado em Amsterdam, Holanda, em 2000. Outras informações adicionais sobre

o projeto podem ser encontradas no sitio <http://www4.fct.unesp.br/labs/lmm/>.

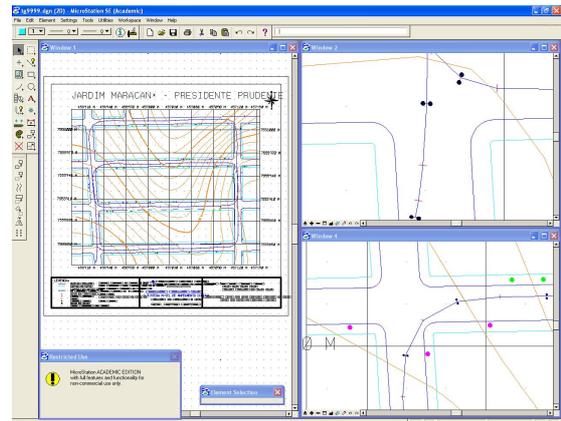


Fig. 7 – Mapa obtido com teste do SMMT desenvolvido. Fonte: GUARDIA et al (1999).

#### 4. SISTEMA RESPA

O RESPA (REstituição Sem Pontos de Apoio) foi um sistema desenvolvido como trabalho de mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP, entre 2000 e 2002, como consequência de resultados de trabalhos de iniciação científica desenvolvidos pelos mesmos autores desde 1998. Neste trabalho (REISS, 2002; REISS e TOMMASELLI, 2003; TOMMASELLI e REISS, 2005) foi criado um sistema para atender a demanda inicial de uma prefeitura da região de Presidente Prudente que queria uma metodologia para a medição da área de anúncio de placas de propaganda (*outdoors*). A solução deveria ser prática, rápida, e ao mesmo tempo precisa (com certa de 1% de erro em relação à área real), e que pudesse ser operada por um técnico não muito especializado.

Considerando-se as vantagens da utilização da Fotogrametria no processo de aquisição e medição de objetos decidiu-se por uma solução fotogramétrica utilizando-se de câmaras digitais. O fato de serem planas as placas de propaganda facilitou a decisão por uma solução monoscópica, uma vez que a utilização de várias imagens ocasionaria custo ao procedimento.

Com base nas restrições do cliente foi desenvolvida uma abordagem não convencional para o problema, que separa a determinação das rotações da determinação da posição da imagem, e elimina a necessidade de pontos de apoio no espaço objeto. O método de LIU e HUANG (1988a e 1988b) faz esta separação em duas etapas distintas, sendo esta característica a principal vantagem de seu método; as rotações são calculadas no primeiro estágio e as translações no segundo. Tratando apenas da determinação das rotações, no método de Liu e Huang, é essencial a existência de equivalência entre retas no espaço objeto e suas correspondentes no espaço imagem (Fig. 8).

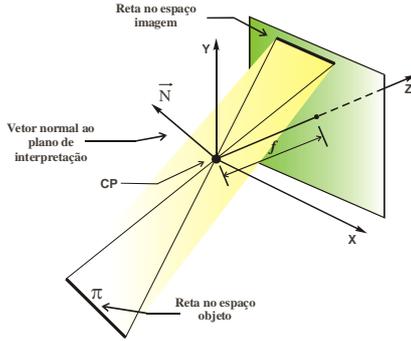


Fig. 8 – Representação da equivalência entre as retas no espaço imagem e no espaço objeto. Fonte: REISS (2002).

Na representação da Fig. 8,  $\vec{n}$  é o vetor das direções da reta no espaço objeto e  $\vec{N}$  é o vetor normal ao plano projetado do espaço imagem. Sendo  $\vec{N}$  ortogonal à linha reta no espaço objeto rotacionado, então:

$$\vec{n}^T \cdot \mathbf{R}^T \cdot \vec{N} = 0 \quad (2)$$

$\mathbf{R}$  é a matriz de rotação da imagem em relação ao espaço objeto (REISS e TOMMASELLI, 2003).

A partir de um vetor normal ao plano  $\pi$  (que contém a reta no espaço imagem, o CP da câmera e a reta homóloga no espaço objeto (Fig. 8)), foram realizadas particularizações do modelo de Liu e Huang para as rotações (2) (REISS e TOMMASELLI, 2003), obtendo-se um modelo formado por duas equações: uma para retas verticais e uma para as retas horizontais no espaço objeto:

$$\begin{aligned} F_H &: f \cdot \cos \theta \cdot r_{11} + f \cdot \text{sen} \theta \cdot r_{21} - \rho \cdot r_{31} = 0 \\ F_V &: f \cdot \cos \theta \cdot r_{12} + f \cdot \text{sen} \theta \cdot r_{22} - \rho \cdot r_{32} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

onde:  $F_H$  é a equação para a reta horizontal;  
 $F_V$  é a equação para a reta vertical;  
 $f$  é a distância focal calibrada da câmera;  
 $\theta$  e  $\rho$  são os parâmetros de representação das retas na sua forma normal, no espaço imagem;  
 $r_{ij}$  são os elementos da matriz de rotação  $\mathbf{R}$ , que poderá ser dada pela seqüência  $\mathbf{R}_Z(\kappa) \cdot \mathbf{R}_Y(\varphi) \cdot \mathbf{R}_X(\omega)$ .

São necessárias no mínimo 3 equações para estimar  $\kappa$ ,  $\varphi$ , e  $\omega$ , com pelo menos uma delas não paralela às demais. Observando que o modelo (3) é não linear e do tipo implícito, o método de ajustamento utilizado para estimar as incógnitas é o Combinado com iterações.

O segundo estágio da modelagem matemática desenvolvida por Liu e Huang, que trata da determinação das translações do referencial da imagem em relação ao referencial do objeto, foi substituído por um processo de medição direta. Assim, as translações do CP são determinadas usando a medida de distância entre a câmera e uma superfície plana do objeto fotografado que contenha as retas utilizadas na

determinação das rotações. Esta distância é obtida por um telêmetro a LASER acoplado à câmera (Fig. 9).



Fig. 9– CamDigTel: Integração Câmera Digital – Telêmetro

O cálculo das coordenadas do CP baseia-se nas relações entre dois sistemas referenciais: o do telêmetro e o do espaço objeto, que são dadas, genericamente, pela transformação de corpo rígido, que particularizada para o sistema RESPA, pode ser escrita como (REISS, 2002):

$$\begin{bmatrix} X_{CP} \\ Y_{CP} \\ Z_{CP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{31} \cdot d \\ r_{32} \cdot d \\ r_{33} \cdot d \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:  $d = -z$  é a distância medida com o telêmetro, livre do efeito da excentricidade;

$X_{CP}$ ,  $Y_{CP}$  e  $Z_{CP}$  são as coordenadas do CP da câmera em relação ao referencial do objeto;

$r_{ij}$  são os elementos da matriz de rotação determinados usando o modelo (3).

A distância medida pelo telêmetro LASER, no instante da tomada da imagem não corresponde a real distância entre o CP da câmera e o objeto fotografado, que é definida sobre o eixo óptico da câmera. Isto ocorre pelo fato de o CP da câmera e o centro de fase (CF) de medida do telêmetro não serem coincidentes fisicamente, existindo entre eles uma excentricidade e rotações entre os eixos. Considerando o eixo óptico da câmera paralelo com o eixo do raio laser, o que na prática é possível de ser feito na construção da integração entre os sensores, então esta excentricidade pode ser modelada pela seguinte equação:

$$Z_{CP} = d \cdot r_{33} - (r_{13} \cdot \Delta x + r_{23} \cdot \Delta y + r_{33} \cdot \Delta z) \quad (5)$$

onde:  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$  são as translações entre o CP da câmera e o CF do telêmetro.

As coordenadas  $X_{CP}$  e  $Y_{CP}$  não exercem influência sobre as medidas de áreas e distâncias que podem ser calculadas no espaço objeto a partir da imagem. No entanto, a posição  $Z_{CP}$  tem influência como um fator de escala.

Alguns programas de computador foram implementados com estas metodologias, os dois principais são para: (a) a determinação da excentricidade entre o telêmetro a

LASER e a câmara; e (b) a restituição com a metodologia da orientação por linhas verticais e horizontais (Fig. 10 a e b).

Foram realizados testes controlados com o sistema para verificar a sua funcionalidade e a exatidão de seus resultados. Os erros obtidos em relação à medidas reais foram inferiores a 1% para medidas de áreas, e 0,5% para medidas de distâncias.



Fig. 10 – Medição com o sistema RESPA: (a) Programa RESPA em medição monoscópica; (b) RESPA em medição estéreo; (c) fachada do Museu Municipal de Presidente Prudente; (d) fachada medida com o programa RESPA.

Uma metodologia para a medição de fachadas tridimensionais foi criada com este sistema (Fig. 10 b), e se baseia na utilização de um plano de referência para as medidas e orientação e na tomada de duas imagens em pontos de vista diferentes do objeto que contém esse plano. Assim, as imagens foram orientadas em relação a esse plano e um ponto homólogo nas duas imagens foi tomado como as coordenadas X e Y nas duas imagens. Depois das imagens terem sido orientadas, foram medidos pontos homólogos em ambas as imagens e por intersecção fotogramétrica foram determinadas as coordenadas 3D de pontos que definem algumas feições da fachada do Museu. Os pontos 3D restituídos foram introduzidos em um programa CAD (*Computer Aided Design*), sendo ligados por linhas para dar forma ao desenho das feições restituídas (Fig. 10 d). Com estes procedimentos foram verificadas as potencialidades do sistema RESPA em medições de fachadas de edificações tanto quando para placas de propaganda. Estes resultados podem ser encontrados em detalhes em REISS (2002) ou em TOMMASELLI e REISS (2005). Uma versão deste sistema está em desenvolvimento na Universidade de Vigo para aplicações no setor de construção civil (ARIAS et al, 2008), mostrando a potencialidade da metodologia desenvolvida para o RESPA.

## 5. SISTEMA Scan3DSL

O outro desenvolvimento na área de Fotogrametria que será apresentado trata de um sistema de reconstrução 3D

de objetos a curta distância por meio de luz estruturada, elaborado como trabalho de doutorado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP, entre 2002 e 2007, como consequência de outros trabalhos precedentes (TOMMASELLI, 1998a e 1998b). Este trabalho (REISS, 2007; REISS, TOMMASELLI e KOKUBUM, 2005) se baseou em padrões que são projetados sobre a superfície do objeto e um instrumento sensor captura a imagem dos padrões que acompanham o relevo da superfície de projeção (Fig. 11).

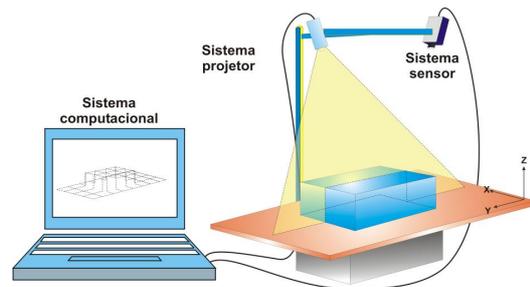


Fig. 11 – Sistema de reconstrução por luz estruturada.

Dos trabalhos apresentados até o momento, este foi o que mais envolveu complexidade no seu desenvolvimento, pois envolveu várias áreas do saber, como: a Fotogrametria, a Visão Computacional, Computação Gráfica, Processamento Digital de Imagens, e outras. Nestes sistemas de reconstrução, um projetor é fixado a certa distância do instrumento sensor (câmara), possibilitando a determinação da orientação relativa entre eles, semelhante ao uso de duas câmaras. Sendo o projetor fixado à câmara cria-se uma geometria que possibilita determinar a coordenada do ponto na superfície por meio de um processo de intersecção. De acordo com alguns autores (ROCCHINI et al, 2001; ZHANG e WEI, 2002; SALVI et al, 2004), os sistemas baseados em luz estruturada são fundamentados em três problemas principais: (a) Codificação dos padrões; (b) Calibração do sistema; e, (c) Unidade de captura.

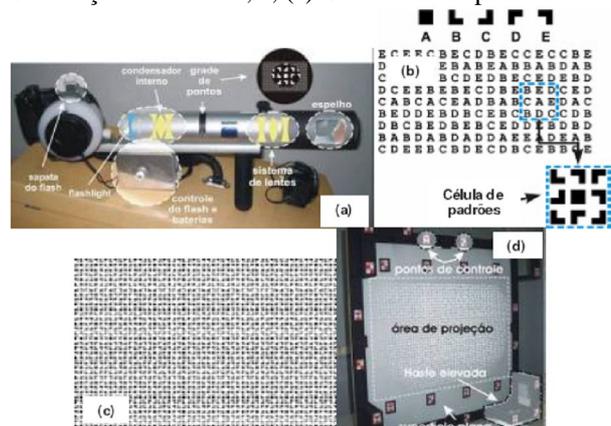


Fig. 12 – Sistema de reconstrução por luz estruturada: (a) Unidade de captura; (b) Codificação de Padrões; (c) Matriz de padrões codificados; (d) Placa de Calibração de Câmaras e do Projetor. Fonte: REISS (2007).

A codificação dos padrões organiza os padrões de luz estruturada projetados sobre a imagem para a sua posterior decodificação; ou seja, para que depois seja possível determinar cada ponto de luz estruturada dentre os demais e atribuir a eles os parâmetros geométricos que permitem a reconstrução do ponto tridimensionalmente. A calibração visa determinar os parâmetros da geometria de projeção do ponto de luz estruturada indexado. O terceiro aspecto, a unidade de captura, diz respeito à ferramenta física de projeção e imageamento dos padrões de luz estruturada, e é construído de acordo com as características do tipo de padrão a ser projetado. A metodologia desenvolvida, denominada Scan3DSL (Scanner 3D by Structured Light) abrange estes três aspectos; ou seja, a construção de uma unidade de captura (Fig. 12 a), um método de calibração e um esquema de codificação de padrões.

Foi desenvolvida uma codificação de padrões baseada em um conjunto de elementos pontuais em uma grade ou matriz com cada forma tendo características distintas. As formas utilizadas continhas quinas objetivando aumentar o número de pontos, além dos centros de massa. Foram consideradas então 5 formas (padrões) (Fig. 12 b e 12 c), e para cada uma delas, podem ser associadas letras que correspondem à classe que cada forma pertence.

Foram utilizadas técnicas de processamento digital de imagens para segmentar os padrões capturados e foram criados métodos de análise de vizinhança para o reconhecimento automático de cada padrão (REISS e TOMMASELLI, 2007). Um detector de quina também foi utilizado para medir as quinas dos padrões capturados, aumentando assim a densidade de pontos na reconstrução.

Uma das contribuições deste trabalho de REISS (2007) foi o desenvolvimento de um método de calibração do sistema câmara-projetor de forma rápida, fácil, com a possibilidade de tomada de planos convergentes. O procedimento se resume a tomar imagens convergentes de uma placa de calibração, especialmente desenvolvida para sistema (Fig. 12 d) e processar um programa calibração contendo a modelagem de calibração também especialmente desenvolvida. Outra contribuição importante foi o desenvolvimento de uma metodologia de reorientação relativa entre o projetor e a câmara, para corrigir mudanças possíveis com o manuseio do equipamento (REISS, 2007). A Fig 13 apresenta alguns objetos reconstruídos com o sistema.

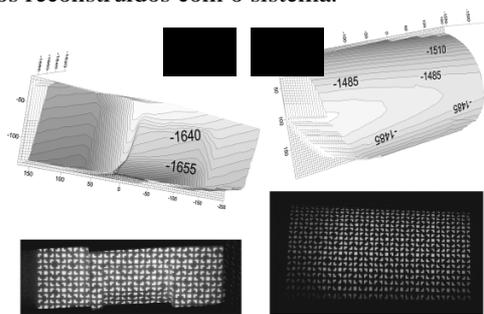


Fig. 13 – Objetos reconstruídos: (a) relevo irregular; (b) parte de um cilindro. Fonte: REISS (2007).

Dos resultados obtidos com testes deste sistema foram observadas precisões melhores que 0,2mm para a reconstrução em Z de um objeto de aproximadamente 1m<sup>2</sup> à uma distância câmara-objeto de aproximadamente 2m. Com os resultados obtidos constatou-se a potencialidade deste sistema vir a se tornar um produto alternativo e barato para a reconstrução 3D de objetos para fim industriais e biomédicos. Isto levou à elaboração de um projeto CNPq – Edital Universal 2007, em colaboração com a Universidade Estadual Paulista, Departamento de Cartografia, e a Universidade de Calgary, Departamento de Engenharia Geomática, Grupo de Pesquisa em Fotogrametria Digital.

Neste projeto será desenvolvida uma abordagem usando duas câmaras e uma codificação de padrão baseada em uma grade de pontos e linhas verticais. A ferramenta terá como vantagens ser mais barata e mais prática em relação a alguns similares desenvolvidos e utilizados no mercado, buscando uma precisão da ordem de 0,01 mm. Os padrões projetados não serão usados apenas como textura para gerar a correspondência entre as câmaras. Eles terão seus parâmetros diretores calibrados, de forma a permitir a reconstrução apenas com a relação entre uma câmara e o projetor, para o caso em que o padrão não apareça com homólogos nas duas imagens. Quando o padrão aparecer nas duas imagens, a reconstrução poderá ser realizada considerando o trio formado entre as duas câmaras e o projetor, dando maior precisão ao ponto reconstruído. Isto dará também maior robustez aos métodos de reconhecimento dos padrões projetados, principalmente em regiões de oclusão.

Vislumbram-se alguns interesses comerciais para o sistema, como por exemplo, o de pequenas empresas produtoras de moldes da região de Sorocaba-SP e do Rio Grande do Sul.

## 6 CONCLUSÕES

Um dos objetivos da apresentação destes projetos de pesquisa foi criar no leitor o interesse pela Fotogrametria. Para isso foi dada uma amostra da versatilidade da Fotogrametria no processo de medição de objetos, desde sua aplicação original, o mapeamento topográfico em uma aplicação terrestre, até a medição de objetos industriais, fazendo interfaces com outras áreas do saber.

Além das aplicações da Fotogrametria para o mapeamento e as mostradas neste artigo, há também várias outras, dentre as quais vale destacar:

- A restituição fachadas e de monumentos históricos e de sítios arqueológicos com fins de registro, restauração, e análise arquitetônica;
- Levantamentos para controle de qualidade de edificações e outras obras de engenharia, pela comparação entre os elementos contidos nos projetos e os efetivamente realizados (no inglês, *as built*);

- Restituição de superfícies anatômicas com finalidades médicas;
- Controle de qualidade de peças em linhas de produção industriais;
- Aplicações em robótica para a localização e visão de máquina;
- Medições de rochas para aplicações geológicas;

### 6.1 Perspectivas Futuras

Há perspectivas de a Fotogrametria vir a ter um grande desenvolvimento dentro da UFRGS nos próximos anos. Um dos motivos é o desenvolvimento deste primeiro projeto Universal do CNPq, para a continuidade do desenvolvimento de um sistema de reconstrução 3D por luz estruturada, com o qual já se conseguiu recursos suficientes para a montagem de um Laboratório de Pesquisas em Fotogrametria, ainda inexistente na Universidade. Como consequência deste projeto, e para apoiá-lo, foram conseguidas duas bolsas de iniciação científica, uma da BIC-FAPERGS e outra BIC-UFRGS. Outro motivo é a realização, por parte da Prefeitura Municipal, de um levantamento Aerofotogramétrico para mapeamento cadastral do Município de Porto Alegre. Neste levantamento, que ocorrerá entre 2008 a 2011, haverá a participação da UFRGS em um convênio com a Prefeitura local, no qual será feito o estabelecimento de critérios para o controle de qualidade do aerolevanteamento, e será executada a fiscalização de uma empresa que será contratada para a fazer do controle de qualidade dos produtos gerados. Com esse convênio também haverá o envolvimento de alunos bolsistas nos procedimentos da fiscalização e a aquisição de equipamentos, que se somarão aos já adquiridos, tornando a área de Fotogrametria na UFRGS mais consistente.

Como consequência destas perspectivas e para apoiar o desenvolvimento científico foi criado o primeiro Grupo de Pesquisa em Fotogrametria no Estado do Rio Grande do Sul com registro no CNPq e autenticação da UFRGS. Acredita-se que esta variedade de aplicações e perspectivas futuras possa ser motivadora para o desenvolvimento e expansão da Fotogrametria na UFRGS, onde há um Curso de Engenharia Cartográfica, que completa 10 anos de existência, e que se utiliza de suas técnicas como um dos troncos de sua formação profissional.

### AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer aos professores: Dr. João Fernando Custódio da Silva, do Departamento de Cartografia da UNESP, pela oportunidade de fazer parte de sua equipe no desenvolvimento de seu projeto do SMMT, no trabalho de graduação; Dr. Antônio Maria Garcia Tommaselli, pela orientação e apoio no desenvolvimento dos trabalhos de mestrado e doutorado do PPGCC.

Agradecimentos também ao apoio:

- Da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) por: (a) a concessão recursos em forma de projeto de pesquisa para o professor João Fernando Custódio da Silva, para o trabalho do SMMT; (b) a concessão de bolsa de mestrado e doutorado, para o desenvolvimento dos projetos RESPA e Scan3DSL, respectivamente.
- Do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo concessão de um Projeto Universal para o desenvolvimento de um sistema de reconstrução 3D por luz estruturada;
- Da FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul), BIC-UFRGS, pela concessão de bolsas de iniciação científica para apoiar o mesmo projeto.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J.B. **Fotogrametria**. 1. ed. Curitiba: SBEE, 1998.

ARIAS, P., LORENZO, H., ORDÓÑEZ, C., Armesto, J. Calibration of a Photogrammetric System for Semiautomatic Measurement: CaM-DisT®, **Key Engineering Materials**, Trans Tech Publications, Switzerland Vols. 364-366 (2008) pp. 259-264.

BATISTA, J. C., OLIVEIRA, R. A e SILVA, A. R.. **Levantamento Topográfico por Caminhamento Fotogramétrico**. Trabalho de Graduação do Curso de Engenharia Cartográfica. Presidente Prudente, 1998. 80p.

BOSSLER, J. D. et al. Digital mapping on the ground and from the air. **GEO INFO SYSTEMS**, January, p. 44-48, 1994.

BROWN, D. Close-Range Camera Calibration, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 37, n. 8, p. 855-866, 1971.

GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**. 1993. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GEMAEL, C., **Introdução ao Ajustamento de Observações**: Aplicações Geodésicas, Curitiba: Editora UFPR, 1994.

GUARDIA, M.C., REISS, M.L.L. e SILVA, R.A.C.. **Levantamento Topográfico Usando o Sistema Móvel de Mapeamento Digital**. Trabalho de Graduação do Curso de Engenharia Cartográfica. Presidente Prudente, 1999. 111p

HARALICK, R.M.; Determining Camera Parameters From The Perspective Projection of a Rectangle. **Pattern Recognition**, Vol. 22, No. 3, pp. 225- 230, Great Britan, 1989.

- HE, G.. Design of a Mobile Mapping System for GIS Data Collection. In: International Congress of ISPRS, 18., 1996, Viena. **International Archives...**, ISPRS, 1996, v. 31, t. B2, p. 154-159.
- HEUVEL, F.A. Exterior Orientation using Coplanar Parallel Lines. Proceedings of the **10th Scandinavian Conference on Image Analysis**, Lappeenranta, ISBN 951-764-145-1, 1997, pp.71-78.
- LIU, Y.; HUANG, T.S. A Linear Algorithm for Motion Estimation Using Straight Line Correspondences. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, 44(1), pp. 35-57, October 1988b
- LIU, Y.; HUANG, T.S. Estimation of Rigid Body Motion Using Straight-line Correspondences, **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, v,43(1), pp. 37-52, July 1988a.
- MEDEIROS, N. G.; TOMMASELLI, A.M.G. Um modelo para orientação de imagens orbitais baseado em feições retas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, Pr, v. 12, n. 2, p. 175-194, 2006
- MIKHAIL, E.M.; BETHEL, J.S.; MCGLONE, J.C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, 2001
- NOVAK, K. Global Positioning with a stereo-vision system. In: International Geodetic Symposium On Satellite Positioning, 6., 1992, Columbus-OH. **Anais...**p.702-711.
- REDSTALL, M., 2006. **Accurate terrestrial laser scanning from amoving platform**. Geomatics World, July/August 2006, pp. 28-30.
- REISS, M.L.L. **Reconstrução tridimensional digital de objetos à curta distância por meio de luz estruturada**. 2007. 256 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- REISS, M.L.L. **Restituição Fotogramétrica Flexível de Imagens à Curta Distância: Estudo de Método e Desenvolvimento de Protótipo**. 2002. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- REISS, M.L.L.; GUARDIA, M.C.; SILVA, R.A.C.; SILVA, J.F.C.; CAMARGO, P.O.. Softwares de Processamento de Dados Obtidos por um Sistema Móvel de Mapeamento Digital. In: IV Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, II Encontro de Cadastro Técnico Multifinalitário para os Países do Mercosul, I Encontro de Cadastro Técnico Multifinalitário para Os Países do Conesul, 2000, Florianópolis. **Anais do IV COBRAC**. Florianópolis : UFRSC, 2000. v. 10.
- REISS, M.L.L.; TOMMASELLI, A.M.G.. Orientação de Imagens sem pontos de apoio para mensuração de superfícies planas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, Pr, v. 9, n. 1, p. 121-139, 2003.
- REISS, M.L.L.; TOMMASELLI, A.M.G... Reconhecimento de padrões para um sistema de reconstrução 3d por luz estruturada. In: II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2007, Presidente Prudente. **Anais do Evento**. Presidente Prudente : Universidade Estadual Paulista, 2007. v. 1. p. 664-673.
- REISS, M.L.L.; TOMMASELLI, A.M.G.; KOKUBUM, C.N.C. A Low Cost Structured Light System. In: W S C G ' 2005, The 13th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2005, 2005, Pilsen. **W S C G ' 2005 Poster Proceedings**, 2005m v. 1, p. 53-55.
- ROCCHINI, C.; CIGNONI, P.; MONTANI, C.; PINGI, P.; SCOPIGNO, R. A Low Cost 3D Scanner Base don Structured Light. IN: COMPUTER GRAPHICS FORUM, **Eurographics 2001 Conference Proceedings**. Manchester, v. 20 (3), 2001, p. 299-308,
- SALVI, J.; PAGES, J.; BATLLE, J. Pattern Codification Strategies in Structured Light Systems. **Pattern Recognition Society**, Elsevier Ltd, v. 37, p 827-849, 2004.
- SILVA, J.F.C. **Fototriangulação no Caminhamento Fotogramétrico**. Tese (Livre Docência) – Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 1997, 85p.
- TELLES, S.S.S; TOMMASELLI, A.M.G. Um modelo matemático para calibração de câmaras baseado em linhas retas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 57, n. 03, p. 180-188, 2005.
- TOMMASELLI, A, M, G.; TOZZI, C, L.; A Recursive Approach to Space Resection Using Straight Lines, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, January 1996, Vol 62, No, 1, pp, 57-66.
- TOMMASELLI, A, M, G; LUGNANI, J, B; An Alternative Mathematical Model to the Colinearity Equation Using Straight Features, **Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, Kyoto, 1988, Commission III, pp, 756-774.

TOMMASSELLI, A.M.G. **Caracterização geométrica de um sistema fotogramétrico digital para reconstrução de imagens de superfícies à curta distância.** 1998a. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

TOMMASSELLI, A.M.G. Geometric Accuracy of a Structured Light System. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING; **Proceedings**, 1998 Cambridge, United Kingdom, 1998b, p. 313- 319.

TOMMASSELLI, A.M.G; REISS, M.L.L. A Photogrammetric Method for Single Image Orientation and Measurement. **Photogrammetric Engineering And Remote Sensing**, v. 70, n. 12, p. 1-8, 2005.

ZHANG, G; WEI, Z. A Novel Calibration Approach to Structured Light 3D **Vision Inspection.** **Optics & Laser Technology**, Elsevier Ltd, vol. 34, p 373-380, 2002.