

# APLICAÇÕES DO GPS EM FOTOGRAMETRIA

**Aluir Porfírio Dal Poz**  
**Paulo de Oliveira Camargo**  
**Universidade Estadual Paulista - UNESP**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT**  
**Departamento de Cartografia**  
**Rua Roberto Simonsen, 305**  
**19060-900 - Presidente Prudente - SP.**  
**E-mail: ueppr@eu.ansp.br**  
**E-mail: aluir@stetnet.com.br**

## RESUMO

Os objetivos deste artigo são os de apresentar, discutir e analisar o impacto das possíveis aplicações do GPS em Fotogrametria. Na literatura fotogramétrica são encontradas aplicações do GPS na determinação dos parâmetros de orientação exterior, na execução do voo (navegação e exposição) e na calibração de câmeras aéreas. De certa forma, também a utilização do GPS no estabelecimento do apoio de campo pode ser mencionado. Tendo em vista que a utilização do GPS na Fototriangulação não dispensa por completo o apoio de campo, neste trabalho também será discutido a importância do GPS na extração automática do apoio de campo, o que possibilitaria a completa automatização da Fototriangulação.

## ABSTRACT

The purposes of this paper are to present, discuss and analyze the impact of the possible applications of GPS in Photogrammetry. In the photogrammetric literature is found applications of GPS in the determination of exterior orientation parameters, execution of flight plan (i. e., navigation and exposure), and calibration of aerial cameras. The application of GPS in the ground control survey can also be mentioned. As the application of GPS in the Phototriangulation does not completely dispense the use of ground control, it will also be discussed the importance of GPS in the automatic extraction of ground control, which would make possible the total automation of the Phototriangulation.

## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação mais comumente encontrada na literatura fotogramétrica é a determinação das coordenadas do Centro Perspectivo (CP), visando introduzi-las como observações adicionais na Fototriangulação por Feixes de Raios ou Modelos Independentes. Com este procedimento, é possível reduzir a quantidade de pontos de apoio para um mínimo, suficiente para a definição do datum. O modelo matemático que permite a utilização das coordenadas do CP determinadas pelo GPS, na forma de equações de observação adicionais, será deduzido de forma rigorosa. Ao contrário da determinação da posição do CP, o estabelecimento

da atitude da câmera encontra dificuldades maiores. São raras as tentativas de determinação da atitude da câmera encontradas na literatura. Será mostrada a forma mais promissora de determiná-la e, também, como introduzi-la na Fototriangulação na forma de equações de observações adicionais.

Uma outra importante aplicação do GPS em Fotogrametria é na execução do voo fotogramétrico. Basicamente trata-se da navegação e controle da exposição da foto, em conformidade com o plano de voo. Um sistema para navegação e exposição bem sucedido é encontrado na literatura fotogramétrica, o qual será apresentado. Também, serão discutidas as vantagens oferecidas por este sistema.



Apesar de pouca explorada, uma outra aplicação de grande potencial está relacionada com a calibração de câmeras aéreas. Como as fotografias aéreas são aproximadamente verticais, é necessário um desnível considerável (aproximadamente 20% da altura de voo) para evitar a forte correlação entre alguns parâmetros de orientação interior e exterior. Portanto, se os parâmetros de orientação exterior determinados pelo GPS forem usados como observações adicionais, o mencionado problema de correlação pode ser significativamente minimizado. Em outras palavras, a existência de um relevo com, pelo menos, uma parte montanhosa para calibração de câmeras aéreas deixa de ser uma restrição.

Por último, será discutida a aplicação do GPS no problema de extração automática de apoio de campo.

## 2 SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL

O NAVSTAR - GPS (NAVigation System with Time And Ranging - Global Positioning System) é um sistema de navegação, apoiada numa constelação de satélites artificiais, hoje mais conhecido por GPS, que proporciona ao usuário a sua posição tridimensional, além de informações sobre sua velocidade e sobre o tempo. Este sistema vem revolucionando todas as atividades que precisam de posicionamento, entre os quais destacam-se aqueles ligados as áreas de Cartografia e Agrimensura, monitoramento de obras de engenharia, além da navegação aérea, marítima e terrestre, etc. Dependendo da finalidade do trabalho, utiliza-se diferentes métodos de levantamentos e de processamento. Como poderá ser visto na seção 3, a Fotogrametria pode beneficiar-se em muito do sistema GPS.

## 3 APLICAÇÕES EM FOTOGRAMETRIA

A aplicação mais comum do GPS em Fotogrametria é no estabelecimento do apoio de campo para a Fototriangulação. No entanto, a seguir será mostrado que o potencial de aplicação do GPS em Fotogrametria vai bem além de sua aplicação no levantamento do apoio de campo.

### 3.1 Execução do Voo Fotogramétrico

O sistema de navegação que será apresentado abaixo foi desenvolvido no "National Land Survey of Sweden" (Andreasson, 1992). Os principais equipamentos que compõem este sistema são:

- . câmera aérea;
- . microcomputador equipado com um software de navegação; e
- . receptor GPS.

Uma visão esquemática do sistema de navegação e exposição é mostrada na figura 1.

As funções das partes do sistema de navegação são:

- . **Receptor e antena GPS:** permitem a obtenção da posição do centro de fase da antena GPS em intervalos de tempo pré-definidos. Geralmente os instantes de coleta de dados GPS não coincidem com os instantes de exposição das fotografias;
- . **Monitor de navegação:** apresenta dados numéricos e gráficos sobre a evolução do voo. Isto permite ao piloto o controle visual

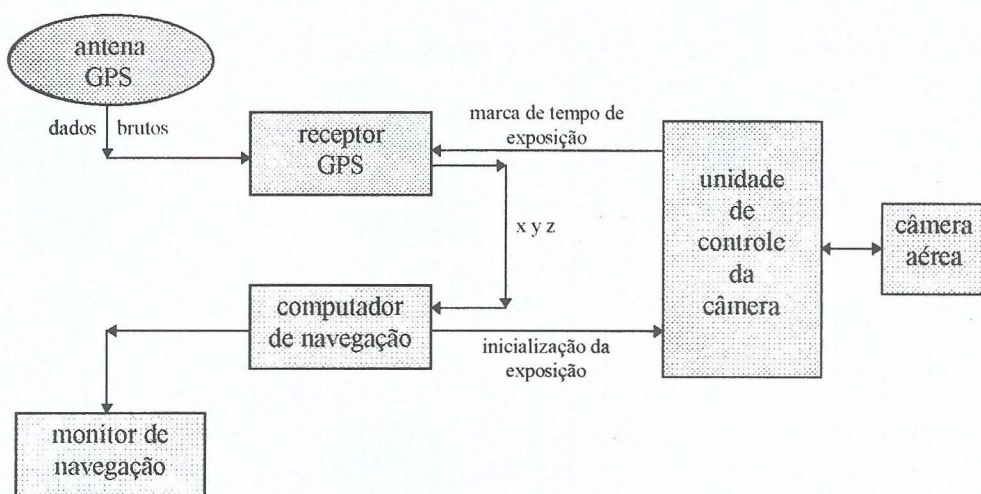


Figura 1- Sistema de navegação (adaptado de Andreasson, 1992)



do avião. É possível também a conexão do PC com o piloto automático para a navegação (e exposição) automática do avião:

**PC equipado com software de navegação:** o software de navegação envia informações ao monitor de navegação e à unidade de controle da câmera. Para o monitor são enviadas informações gráfica e numérica da posição e correções destas posições em relação às determinadas no plano de voo. Para a unidade de controle da câmera é enviado um pulso no instante em que um ponto de exposição pré-selecionado é alcançado. Portanto, o PC controla indiretamente a câmera aérea; e

**Unidade de controle da câmera:** Faz o controle da câmera e envia, no instante de tomada da foto, um pulso ao receptor GPS para obter uma marca de tempo precisa.

As marcas de tempo GPS permitem a obtenção, a posteriori, através de algum método de interpolação, das coordenadas acuradas do centro de fase da antena GPS relativas a cada instante de exposição das fotos. Estas coordenadas são úteis para avaliar o controle do voo após a missão e para serem utilizados como observações adicionais na Fototriangulação. Isto será tratado na próxima seção.

### 3.2 Fototriangulação

A orientação de fotografias aéreas é um problema fundamental em Fotogrametria. Até recentemente, os procedimentos de orientação baseavam-se em métodos indiretos, através do uso de pontos de controle. No passado, foram várias as tentativas para medir diretamente, durante as tomadas das fotografias, os parâmetros de orientação exterior, sem, contudo, serem amplamente aceitas. Pode-se citar o Sistema Inercial de Navegação (SIN), o Estatoscópio e o APR ("Airborne Profile Recorder"). No que se refere a determinação da posição do CP, o uso do GPS é a mais bem sucedida tentativa. Por outro lado, o uso do GPS para determinar os elementos de atitude da câmera apresenta dificuldades maiores e, devido a alguns outros fatores, não despertou, em relação a determinação do CP, o mesmo interesse nos fotogrametristas.

#### 3.2.1 Uso das Coordenadas do CP na Fototriangulação

O modelo funcional para a introdução das coordenadas do CP na Fototriangulação, como equações de observações adicionais, será deduzida com base em Colomina (1989). A geometria para a dedução do modelo matemático é apresentada na figura 2.

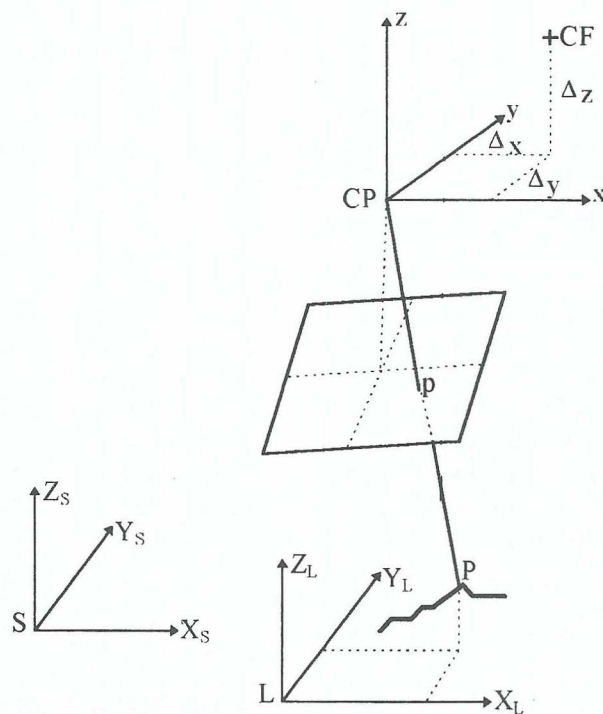


Figura 2 - Geometria básica para a dedução do modelo

Na figura 2:

- CP é o centro perspectivo;
- p e P são, respectivamente, o ponto-imagem e o ponto-objeto;
- CF é o centro de fase da antena;
- CPxyz é o referencial fotogramétrico;
- LXLYLZL é o referencial local, relativo ao datum local; e
- SXsYsZs é o referencial geocêntrico, relativo ao WGS84.

O centro de fase (CF) não coincide com o centro perspectivo (CP) da câmera. Em decorrência disto, o GPS fornece uma posição excêntrica (CF) em relação ao CP. Sendo  $\Delta = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$  a posição do CF no referencial fotogramétrico,  $CP = (X_L, Y_L, Z_L)^T$  a posição do CP no referencial local,  $CF_L = (X_{LCF}, Y_{LCF}, Z_{LCF})^T$  a posição do CF (no instante da definição do CP) no referencial local e  $R = R_k \cdot R_\phi \cdot R_\omega$  a matriz de rotação do sistema fotogramétrico em relação ao sistema local, tem-se:

$$CF_L = CP + R \cdot \Delta \quad (1)$$

Supondo-se agora que os sistemas de referência local e geocêntrico se relacionam através de uma transformação de similaridade, pode-se escrever:

$$CF_S = \Delta_{LS} + \lambda \cdot R_{LG} \cdot CF_L \quad (2)$$

ou,

$$CF_S = \Delta_{LS} + \lambda \cdot R_{LG} \cdot (CP + R \cdot \Delta) \quad (3)$$

onde:



- $CF_S(X_{S_{CF}}, Y_{S_{CF}}, Z_{S_{CF}})$  é a posição do centro de fase no referencial geocêntrico, relativo ao instante de exposição do CP;
- $\lambda$  é o fator de escala entre os sistemas local e geocêntrico;
- $\Delta_{LS}(\Delta X_{LS}, \Delta Y_{LS}, \Delta Z_{LS})$  é a translação entre os sistemas local e geocêntrico; e
- $R_{LG}$  é a matriz de rotação entre os sistemas local e geocêntrico.

Vale ressaltar que a equação 3 (ou 2) foi obtida unicamente através de relações geométricas (figura 2). Se esta equação for usada para determinar o centro de fase ( $CF_S$ ) para um determinado instante de tomada de uma foto, vai-se verificar que elas vão discrepar sistematicamente das correspondentes obtidas pelo GPS. Isto ocorre devido aos erros sistemáticos não modelados oriundos do posicionamento GPS, os quais se relacionam com (Burman, 1992):

- deslocamento do satélite da órbita predita; e
- distúrbios dos sinais entre os satélites e o receptor (influência atmosférica, erros do relógio, etc).

Estes erros sistemáticos podem ser modelados por seis parâmetros:

- $A = (a_1, a_2, a_3)^T$  é a correção da posição GPS, a qual pode ser interpretada como uma translação; e
- $B = (b_1, b_2, b_3)^T$  é a correção da posição GPS, a qual pode ser interpretada como velocidade de deterioração da posição GPS.

Desta forma, estes parâmetros são introduzidos na equação 3 como segue (Colomina, 1989):

$$CF_S = \Delta_{LS} + \lambda \cdot R_{LG} \cdot (CP + R \cdot \Delta) + A + B \cdot (t - t_0) \quad (4)$$

onde  $t_0$  é o instante em que cada grupo de parâmetros A e B são adotados, normalmente no instante de tomada da primeira foto de cada faixa, e  $t$  é o instante de tomada de uma determinada foto na mesma faixa.

A equação 4 é o modelo completo para introduzir as coordenadas observadas do centro de fase ( $CF_S$ ), como equações de observações adicionais, na fototriangulação por feixes de raios ou modelos independentes. Este modelo matemático relaciona 3 observações com 22 parâmetros, sendo que vários desses últimos são bastante correlacionados. Pode-se citar (Colomina, 1989) as correlações entre os parâmetros contidos em  $\Delta_{LS}$  e A e entre os contidos em CP e  $\Delta$ . Na prática este problema pode ser contornado, pois:

- os parâmetros de transformação de datum são conhecidos a priori; e
- a posição do centro de fase ( $\Delta$ ) no referencial fotogramétrico pode ser medido a priori.

Portanto, levando-se em conta os parâmetros conhecidos a priori, os quais podem ser considerados como constantes, a equação 4 se reduz a uma do tipo:

$$CF_S = F(CP, R, A, B) \quad (5)$$

A estimação dos parâmetros contidos em A e B no ajustamento simultâneo enfraquece a geometria do bloco. Portanto, para evitar problemas de singularidade, é necessário a utilização de alguns pontos de apoio nos cantos do bloco (Blankenberg & Øvstedal, 1992). Baseado em estudos simulados, Ackerman (1992) concluiu que o uso de pontos de apoio nos cantos do bloco combinado com 2 faixas transversais, no início e no fim do bloco, garante a estimação com precisão satisfatória dos parâmetros contidos em A e B. Vale ressaltar que são adotados um grupo de parâmetros A e B para cada faixa do bloco.

### 3.2.2 Determinação e uso da Atitude na Fototriangulação

Como foi mostrado na seção anterior, as coordenadas excêntricas do CP, determinadas pelo GPS, permitem uma drástica diminuição dos pontos de apoio necessários. Contudo, devido a precisão teórica da atitude obtida pelo GPS estar entre 0.05 a 0.2 graus decimais, não é possível usar estes dados para substituir parte do controle de campo ou melhorar a geometria do bloco (Frieß, 1987, Schade, 1992). De acordo com Schade (1992), esses dados podem ser usados, por exemplo, na geração de ortofoto digital e na fototriangulação com baixa exigência de precisão. Tendo em vista a pequena expectativa de aplicação na fototriangulação, a determinação da atitude através do GPS, e seu uso na fototriangulação serão apresentados brevemente.

Uma configuração típica de antenas GPS para a determinação da atitude é mostrada na figura 3.

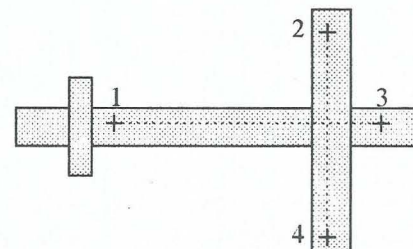


Figura 3 - Configuração típica de antenas GPS

Como mostra a figura 3, os três ângulos de rotação do avião em relação ao referencial terrestre ficam definidos através das linhas 1-3 (antenas 1 e 3) e 2-4 (antenas 2 e 4). Para possibilitar a determinação da atitude da câmera aérea, esta é instalada solidariamente ao avião. Portanto, é conhecido, a priori, a orientação da câmera em



relação ao avião, o que possibilita determinar a atitude da câmera através dos pontos 1, 2, 3 e 4.

Sendo  $A^{GPS} = (\kappa^{GPS}, \phi^{GPS}, \omega^{GPS})^T$  a atitude determinada através do GPS para uma determinada exposição e  $A = (\kappa, \phi, \omega)^T$  os respectivos parâmetros a serem estimados no ajustamento em bloco, pode-se escrever a seguinte equação de observação:

$$A^{GPS} = \quad (6)$$

A equação 6 permite a introdução da atitude determinada pelo GPS através de injunções relativas.

### 3.3 Calibração de Câmeras Aéreas

Os métodos analíticos para calibração de câmeras aéreas baseiam-se nas equações de colinearidade estendida com o modelo de erro. Este último modela os erros sistemáticos relativos ao deslocamento do ponto principal e distorções das lentes. Na solução do problema pelos mínimos quadrados (MMQ) são estimados os parâmetros usuais da fototriangulação simultânea por feixes de raios, as coordenadas do ponto principal, a distância focal e os parâmetros relativos às distorções das lentes. No entanto, a solução deste problema não é trivial, pois existe uma forte correlação entre alguns parâmetros de orientação interior e exterior (a coordenada  $x_o$  do ponto principal com a coordenada  $X_o$  do CP, a coordenada  $y_o$  do ponto principal com a coordenada  $Y_o$  do CP e a distância focal ( $f$ ) e a coordenada  $Z_o$ ) na presença da seguinte situação (Olivas, 1980):

- . terreno "plano"; e
- . fotos aproximadamente verticais.

Um método comumente utilizado em aerofotogrametria para contornar os problemas de correlação é o Método dos Campos Mistos (Olivas, 1982). Este método exige que pelo menos uma parte do relevo fotografado seja montanhosa, de tal forma que permita a existência de desníveis da ordem de 20% da altura de voo.

Segundo Xiuxiao (1996), a restrição do campo montanhoso no Método dos Campos Mistos pode ser removida. Para avaliar esta expectativa teórica, foram realizados quatro casos (Xiuxiao, 1996):

- a- resseção espacial com uso dos dados de calibração da câmera e sem os dados GPS;
- b- resseção espacial com as coordenadas do ponto principal e distância focal como incógnitas e sem usar dados GPS;
- c- como no caso b, mas com os dados GPS; e
- d- ajustamento simultâneo por feixes de raios, com as coordenadas do ponto principal e distância focal como incógnitas e com dados GPS e quatro pontos de controle nos cantos do bloco.

Foram encontrados os seguintes resultados (Xiuxiao, 1996):

- . no caso b, as correlações entre  $x_o$  e  $X_o$ ,  $y_o$  e  $Y_o$  e  $f$  e  $Z_o$  foram muito elevadas, o que levou a um sistema de equações normais mal condicionado;
- . no caso c, observou-se que:
  - . os coeficientes de correlação entre  $x_o$  e  $X_o$ ,  $y_o$  e  $Y_o$  e  $f$  e  $Z_o$  são muito pequenos;
  - . a precisão dos elementos de orientação exterior está muito próxima da obtida para o caso a.
- . no caso d, foram obtidos elementos de orientação interior bastante precisos e são compatíveis com os obtidos no caso c. Contudo, a necessidade de pontos de apoio é bem menor para este caso.

Portanto, conforme os experimentos realizados por Xiuxiao (1996), os dados GPS removem a restrição da existência de uma área montanhosa na região de trabalho e, como na fototriangulação convencional, reduzem drasticamente a necessidade de pontos de controle.

### 3.4 Extração Automática de Apoio de Campo

Segundo Schade (1992), sistemas sensores (GPS, APR, giroscópios, etc) podem fornecer conhecimento a priori para automatizar vários processos fotogramétricos ou, até mesmo, possibilitar o surgimento de novas aplicações fotogramétricas.

Um processo fotogramétrico difícil de ser automatizado é a extração automática de apoio de campo em imagens digitais. Este é um problema ainda aberto em Fotogrametria e, em decorrência, nenhum Sistema Fotogramétrico Digital comercialmente disponível incorporou esta facilidade. Uma solução para este problema foi investigado em Dal Poz (1996). O método desenvolvido baseia-se no processo de correlação estrutural e usa apenas feições retas como controle de campo. Pontos de apoio podem ser facilmente introduzidos no método. Apesar do método ter se mostrado robusto quanto aos parâmetros de orientação exterior aproximados, quanto melhor for o conhecimento desses parâmetros, melhor será a eficiência do método. Portanto, os parâmetros de orientação exterior determinados pelo GPS forneceriam informações a priori para a extração automática do apoio de campo (por exemplo, armazenadas numa base de dados criteriosamente estruturada) necessário para automatizar completamente a fototriangulação.

## 4 CONCLUSÕES

Diferente de outras experiências similares no passado, envolvendo a utilização de outros sistemas sensores, tais como o APR e o Giroscópio, o GPS vem



se consolidando em várias aplicações em Fotogrametria. Além disso, o impacto sobre a área é considerável. Isto pode ser justificado a partir dos seguintes pontos:

- a aplicação na navegação permite um melhor controle do voo e da exposição das fotografias;
- a aplicação na Fototriangulação permite uma redução drástica do número de pontos de apoio de campo, implicando numa grande redução dos trabalhos de campo. Por sua vez, isto implica numa grande economia em projetos fotogramétricos. Além disso, a diminuição de pontos de apoio a serem considerados num bloco possibilita o aumento da confiabilidade da Fototriangulação, bem como a redução dos trabalhos de planejamento e execução da Fototriangulação;
- as informações GPS podem auxiliar na automação da extração de apoio de campo necessário na Fototriangulação. Isto possibilitaria a completa automação da Fototriangulação;
- a aplicação do GPS na calibração de câmeras aéreas permite a remoção da restrição da existência de uma área montanhosa na região de trabalho. Com isso, é possível incorporar a calibração de câmeras aéreas em processos rotineiros de Fototriangulação.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMAN, F. Operational rules and accuracy models for GPS-aerotriangulation. **ISPRS**, Commission III, Washington, p.691-700, 1992.
- ANDREASSON, J. Experiences from the use of computer aided aerial photography with GPS at the national land survey of Sweden. **ISPRS**, Commission I, Washington, p.237-240, 1992.
- ÅS, A. Experience with kinematic GPS during aerial photography in Norway. **Proceeding of 42<sup>nd</sup> photogrammetric week of Stuttgart University**, Stuttgart, p. 299-312, 1989.
- BLANKENBERG, L. E., ØVSTEDAL, O. Block adjustment with GPS - results from test flight FREDRIKSTAD. **Proceeding of 44<sup>th</sup> photogrammetric week of Stuttgart University**, Stuttgart, p.85-96, 1993.
- BURMAN, H. Block adjustment including GPS observations of the photo stations. **ISPRS**, Commission I, Washington, p.278-282, 1992.
- CHIKATSU, H.; KASUGAYA, N.; MURAI, S. An adjustment of photogrammetry combined with the deogetic data and GPS. **ISPRS**, Commission III, Kyoto, p. 110-121, 1988.
- COLOMINA, I. Combined adjustment of photogrammetric and GPS data. **Proceedings of 42<sup>nd</sup> photogrammetric week of Stuttgart University**, Stuttgart, p. 313-328, 1989.
- DAL POZ, A. P. **Correlação estrutural aplicada à extração automática de apoio de campo para imagens digitais**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP, 182p. 1996.
- DEREN, L.; SHAN, J. Quality analysis of bundle block adjustment with navigation data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 55, n. 12, p. 1743-1746, 1989.
- EBNER, H. Combined adjustment of photogrammetric and non-photogrammetric information. **ISPRS**, Commission III, Kyoto, p. 130-138, 1988.
- FRIEß, P. The NAVSTAR Global Positioning System for aerial triangulation. **Proceeding of 41<sup>st</sup> photogrammetric week of Stuttgart University**, Stuttgart, p. 33-45, 1987.
- HEIN, G. W. Precise kinematic GPS/INS positioning: A discussion on the application in aerophotogrammetry. **Proceeding of 42<sup>nd</sup> photogrammetric week of Stuttgart University**, Stuttgart, p. 261-282, 1989.
- HINTZ, R. J.; ZHAO, M. Z. Considerations in the implementation of aerotriangulation with GPS derived exposure station position. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 55, n. 12, p. 1731-1735, 1989.
- KEEL, G.; JONES, H.; LACHAPPELLE, G.; MOREAU, R.; PERRON, M. A test of airborne kinematic GPS positioning for aerial photography. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 55, n. 12, p. 1727-1730, 1989.
- KINLYSIDE, D. Some aspects on using GPS for airborne photogrammetric control. **Australian Journal of Geodesy Photogrammetry and Survey**, n. 49, p. 55-72, 1988.
- OLIVAS, M. A. A. **Calibração de câmaras fotogramétricas**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. UFPR, 1980.
- SCHADE, H. Integrated sensor systems for digital photogrammetry. **Proceeding of 44<sup>th</sup> photogrammetric week of Stuttgart University**, Stuttgart, p.63-72, 1993.
- VEGT, H. J. W. GPS test flight flevoland. **Proceeding of 42<sup>nd</sup> photogrammetric week of Stuttgart University**, Stuttgart, p. 285-298, 1989.
- YUAN, X. GPS-supported determination of interior orientation of aerial camera. **ISPRS**, Commission I, Vienna, p.213-217, 1996.