

PERSPECTIVA DO GPS CINEMÁTICO PARA AEROTRIANGULAÇÃO

Autor: Prof.Dr.Fritz Ackerman Tradutor: Prof.Placidino Fagundes

1. Localização por GPS

1.1 O Sistema de Posicionamento Global Navstar (GPS) é um sistema baseado em satélite, o qual é admitido para posicionamento direto, praticamente em qualquer ponto da terra e a qualquer hora. O sistema foi iniciado pelo Departamento de Defesa americano, primordialmente para fins de navegação, isto é, para posicionamento em tempo-real. O sistema está, ainda, em fase pre-operacional, mas já pode ser usado para muitos fins. A conclusão da fase II está programada para 1994.

O GPS para navegação de veículos em movimento tem que ter capacidade de posicionamento em tempo-real, e o seu projeto, no começo, tinha prioridade sobre considerações de precisão. Entretanto, logo foi constatado que o GPS tem um potencial de precisão muito grande para posicionamento em combinação com métodos de pós-processamento os quais o tornam altamente interessante para aplicações geodésicas.

Também a Fotogrametria está reconhecendo o grande potencial que o GPS tem para aplicação em levantamentos aéreos. Nós distinguimos as aplicações fotogramétricas de três diferentes maneiras:

1. GPS para navegação em vôo foto e posicionamento de fotografias;
2. Posicionamento da câmara para uso em triangulação aérea (e talvez para orientação exterior, direta, das fotografias);
3. Posicionamento de Sensores (para rastreadores multiespectrais, perfilógrafos de RADAR ou LASER, câmaras de vídeo ou outros sensores aerotransportados para geofísica, meteorologia, etc).

Neste trabalho, não estamos preocupados com navegação em vôos de levantamento, nem com orientação de sensores não-imagiadores, mas sim concentrados no posicionamento por GPS, de câmaras de aerolevanteamento, em conexão com aerotriangulação.

1.2 Vamos relembrar, resumidamente, os princípios do posicionamento por GPS. Quando completado, o GPS consistirá de 24 satélites orbitando a 20.000 km de altitude. Cada satélite faz duas revoluções por dia, sendo o seu movimento aparente, no céu, relativamente lento. Eventualmente, haverá 5 a 10 satélites do GPS visíveis, a qualquer hora do dia e, praticamente, em qualquer ponto da Terra.

Todos os satélites emitem, continuamente, sinais para medição de distâncias. Os sinais consistem em duas ondas eletromagnéticas, portadoras, L1 e L2, com frequências de 1575.42 MHz e 1227.60 MHz, os quais correspondem a comprimentos de onda $\lambda_1=19\text{cm}$ e $\lambda_2=24\text{ cm}$, respectivamente. Ambas portadoras são moduladas por sequências de pseudo-ruídos (PN). São usados dois códigos: o código P (de precisão) e o código C/A (de aquisição grosseira). O código P é, em geral, acessível, mas pode-se esperar que seja deteriorado, de forma a reduzir a exatidão para os usuários em geral. A degradação intencional é, eufemisticamente, chamada de disponibilidade seletiva (SA). Atualmente, ela tem ocorrido ou não, em épocas irregulares. Maiores detalhes não são para serem discutidos aqui. É suficiente afirmar que os sinais do código P têm um comprimento de onda, equivalente, (sinal -) de 30m, e o código C/A, idem de 300m (sem SA). Em geral, pode-se esperar que um sinal possa ser medido a cerca de $\leq 1\%$ de seu comprimento de onda, o que é a base da exatidão potencial do GPS.

Há uma modulação adicional das ondas portadoras transferindo informações gerais sobre os números identificadores dos satélites, os dados da órbita (efemérides irradiadas), os erros do relógio, os parâmetros da atmosfera, informação sobre a "saúde" do satélite etc. O resultado é que nenhuma informação externa é requerida para processar os sinais.

1.3 É princípio básico do GPS, no que concerne a posicionamento, permitir medições simultâneas de distâncias a todos os satélites visíveis, a partir de um ou vários receptores que possam ser estacionários sobre a Terra ou em veículos em movimento. O princípio é da medição em um só sentido, ou seja, é medida a diferença entre a emissão e a recepção de um sinal.

Isto implica altíssima sincronização e precisão dos tempos medidos pelos respectivos relógios. Enquanto os satélites carregam relógios atômicos da mais alta precisão possível, os relógios de quartzo dos receptores são menos precisos. Erros de sincronização podem ser da ordem de milissegundos e assim, os erros de medição de distâncias podem ser da ordem de centenas de quilômetros. As distâncias medidas são, por isso, chamadas pseudo-distâncias, não pretendendo clamar por precisão de medição direta. Afora o mencionado erro do relógio, medições de pseudo-distâncias dão distâncias diretamente, sendo as precisões internas (erros padrões), respectivamente, da ordem de 0,3m (código P) e 3m (código C/A sem SA) ou $\geq 30\text{m}$ (código C/A com SA). O ponto essencial é que as pseudo-distâncias têm a possibilidade de medição em tempo-real.

Existe um segundo tipo de medição de distância baseado em medição interferométrica da fase das ondas portadoras entrantes, o qual opera, essencialmente, isento de código. Por causa dos curtos comprimentos de onda das ondas portadoras, a esperada precisão de 1% de λ é de cerca de 2mm. As medições de fase, entretanto, referem-se, apenas, ao último ciclo que entra de uma onda senoidal. O número total de ciclos inteiros, através dos quais o

sinal foi transportado, não é conhecido. Por isso, a ambigüidade da medição de fase é tratada como incógnita. Ele monta em, aproximadamente, 10^8 ciclos. É somente a ambigüidade de fase inicial, no começo de uma série de medições de fase, que tem de ser determinada e resolvida, por meio de uma incógnita adicional (por onda portadora do satélite). Depois disso, o receptor bloquearia o sinal e delinearía as contagens, até que uma interrupção pudesse ocorrer.

2. Posicionamento por GPS

2.1 O princípio do posicionamento por GPS, baseado em medições de distâncias, é muito simples. Se um receptor do GPS mede distâncias, simultaneamente, a pelo menos três satélites, sua posição pode ser calculada (por intermédio de distâncias/trilateração) desde que as posições dos satélites sejam conhecidas. Entretanto, como já vimos, o erro do relógio do receptor pode ser grande (e pode não ser constante). Por isso, ele é tratado como incógnita adicional em cada solução.

Em conseqüência, pseudo-distâncias simultâneas a, pelo menos, 4 satélites, são requeridas para determinar a posição do receptor (e seu momentâneo erro do relógio). Isto é a configuração padrão para o que é conhecido como a solução de navegação. É, também, válida para medições de fase, se a ambigüidade de fase inicial tiver sido resolvida separadamente (ver abaixo).

A solução de navegação, baseada em um receptor, estacionário ou volante, é, basicamente muito simples. Os receptores de navegação tem estado em uso por algum tempo, para processar as medições de posicionamento e cálculos em tempo-real. A precisão intrínseca é determinada pela precisão de medição de distância das pseudo-distâncias, no código P e no código C/A, e das observações de fase, respectivamente. Em termos de ajustamento por mínimas quadrados, representa o peso unitário σ_0 . A precisão (erro do ponto) da posição derivada é expressa por $PDOP \cdot \sigma_0$, sendo PDOP (diluição da precisão do ponto) = $\sqrt{Q_{xx} + Q_{yy} + Q_{zz}}$. Ela depende do número e da configuração geométrica dos satélites, exprimindo a rigidez geométrica da solução. Valores de PDOP bons ou aceitáveis são da ordem de 3 a 6.

2.2 O posicionamento por medições redundantes ou não-redundantes é bem familiar apenas para os topógrafos. Eles, também, sabem que os verdadeiros problemas são os erros sistemáticos. Isto é, particularmente, verdadeiro para o posicionamento por GPS. Os erros sistemáticos, no sistema, podem ser bem grandes. Eles dizem respeito às órbitas e às posições dos satélites, aos erros do relógio e aos erros de outros sinais do satélite, aos efeitos da refração na ionosfera e na troposfera, a possíveis efeitos de erros da antena e do receptor.

Os erros são muito grandes, comparados com a precisão da medição. Eles podem atingir dezenas ou centenas de metros, embora um sistema de rastreamento mundial monitore os

satélites, continuamente, e atualize os parâmetros do sistema a intervalos curtos. Correções finas podem ser obtidas, subseqüentemente, por pós-processamento refinado.

É evidente que o processamento preciso preocupa-se com a eliminação ou a modelagem de todos os erros sistemáticos respectivos. Existe um número de possibilidades as quais não podem ser discutidas, aqui, em minúcias.

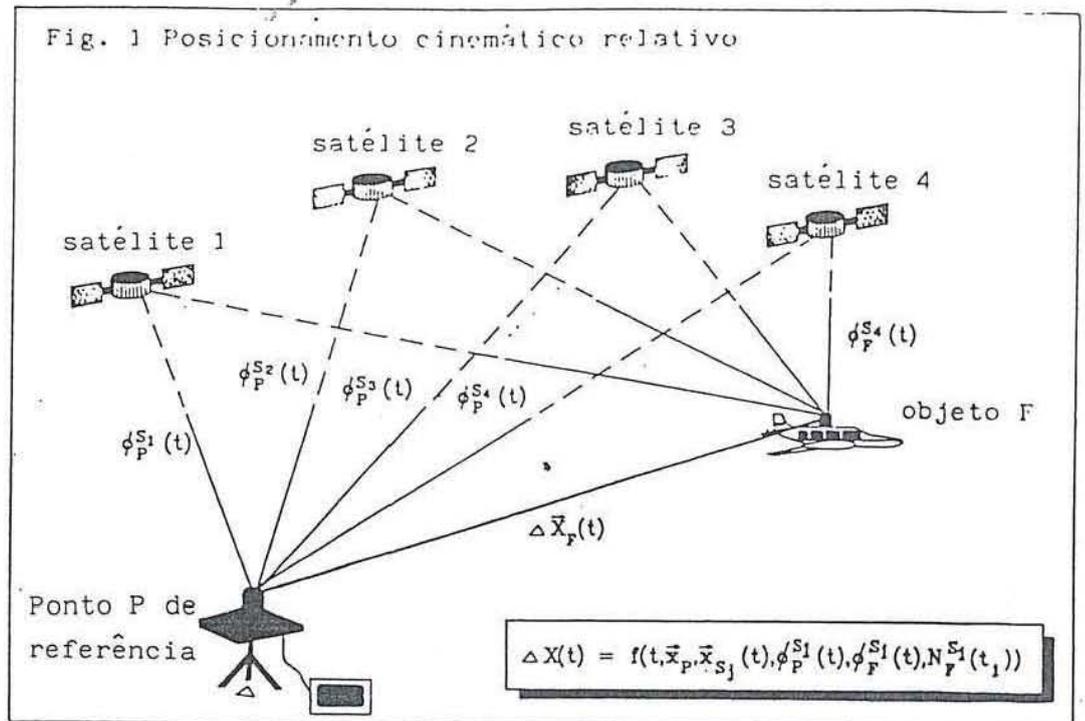
A principal estratégia para modelar, praticamente, todos os erros sistemáticos, incluindo correções de órbita, é uma combinação de dois princípios: (1) Observações estacionárias em pontos fixos durante períodos de tempo mais extensos (até uma hora), e (2) mudando de posicionamento absoluto para relativo, usando, simultaneamente, dois ou mais receptores. Usando diferenças simples ou duplas de observações simultâneas, é evidente que os erros comuns podem ser eliminados.

Essa modelagem dos erros sistemáticos repousa no pós-processamento, em combinação com os métodos de ajustamento. Soluções em tempo-real, como requeridas para fins de navegação, são menos capazes de completar uma modelagem dos erros.

Nas aplicações geodésicas para redes de GPS, têm sido elaborados métodos sofisticados de modelagem dos erros, muito refinados. Observações (de pseudo-distâncias ou de medição de fase) são feitas com 4 a 6 ou mais receptores, alguns estacionários e registrando, continuamente, outros volantes montados em veículos (modo cinemático), ocupando estações escravas também por algum tempo. Exatidões da ordem de 1 cm, para redes de GPS, têm sido obtidas. É, ainda, uma questão de pesquisa, quão extensas podem ser as redes e sobre que período de tempo são necessárias observações. Desempenho na faixa de mm de exatidão está sendo esperado para aplicações em levantamentos para engenharia ou em geofísica (isto é, para placas tectônicas).

A situação é menos favorável para a aerofotogrametria. O receptor, no avião em voo, está continuamente se movendo. Além disso, na época atual, por razões operacionais, considera-se somente um receptor estacionário, no chão. Assim, nós estamos preocupados com posicionamento cinemático relativo, restrito a dois receptores, como se infere da fig.1. Essa constelação especial de receptores limita a eliminação potencial de erros sistemáticos (por diferenciação simples ou dupla). Entretanto, o método ainda é considerado altamente eficaz, embora a distância entre os 2 receptores, a qual pode ser de várias centenas de quilômetros, e a duração do voo até de algumas horas, pode deixar alguns erros sistemáticos não compensados. Por outro lado, os requisitos de exatidão fotogramétrica, para posicionamento da câmara por GPS, não são muito sérios. Exatidões da ordem de vários decímetros ou metros são suficientes, em muitos casos, como será mostrado.

Fig. 1 Posicionamento cinemático relativo



3. Alguns Problemas Específicos

O posicionamento cinemático relativo, de uma câmara em um avião, envolve alguns problemas específicos os quais são aqui resumidos.

3.1 Excentricidade da Antena do GPS

O posicionamento por GPS refere-se à antena do GPS, montada na parte de cima do avião. A sua posição tem de ser reduzida ao centro perspectivo da câmara aérea. A excentricidade é descrita pelas componentes Δx , Δy e Δz , as quais são medidas diretamente no avião, pousado, e, subsequentemente, transformadas para o sistema de coordenadas-objeto. Para esse fim, a atitude do avião (da câmara) tem de ser aproximadamente conhecida, ou medindo inclinações diretamente (por SNI - Sistema de Navegação Inercial) ou extraíndo as inclinações após o ajustamento preliminar do bloco. É preciso cautela quanto à recolocação da câmara durante o vôo (ângulo de deriva, em particular).

3.2 Assincronismo dos Registros de Tempo

Normalmente, os receptores GPS fazem os registros em curtos intervalos regulares de tempo. Entretanto, nós queremos a posição da câmara no momento da exposição. Por conseguinte, a câmara tem de dar um sinal, a cada exposição, para ser registrado, no GPS, a hora exata. Então, a posição, por GPS, desses pontos, na hora exata, pode ser interpolada entre dois vizinhos mais próximos. Por essa razão, a taxa de medições do GPS tem de ser relativamente alta. Os receptores existentes ensejam medições a taxas de 1 a 3 segundos. O avião se desloca, em 1 seg, cerca de 50 a 100m.

Recentemente, alguns receptores ensejam observações do GPS que estão coincidindo, muito proximamente, com as exposições da câmara. Em tais casos, não ocorrem erros de interpolação.

3.3. Fluxos de Dados

A alta taxa de registros, para o posicionamento cinemático, implica um considerável volume de dados a serem registrados a bordo e no receptor estacionário, ao contrário das operações geodésicas. Durante uma missão de vôo fotográfico, o registro de dados do GPS e seu armazenamento podem montar em cerca de 20 ou mais Mbytes de dados.

3.4 Ambigüidade da Fase Inicial

Posicionamentos de precisão fazem uso de observações de fase. Há o problema da ambigüidade de fase inicial, o qual tem de

ser resolvido antes que o posicionamento cinemático possa começar. No nosso caso, o problema pode ser resolvido por meio de registros estacionários dos dois receptores antes da decolagem (e após o pouso). Há duas versões: ou começar por uma linha de base (ambos receptores instalados em pontos de GPS conhecidos), ou determinar uma linha de base inicial, instalando o receptor de terra em um ponto conhecido e o outro instalado no avião estacionado. As observações estacionárias simultâneas tem de continuar por cerca de 1 hora, a fim de obter a determinação de uma linha de base precisa. Em caso de tempos de registro mais certos, a linha de base e, conseqüentemente, a solução da ambigüidade, ainda terá algum erro que causará efeito de desvio no subseqüente posicionamento cinemático relativo. Se e até quanto esses desvios podem ser aceitos, será considerado abaixo.

3.5 Sistema Referencial de Coordenadas

Problemas de Datum

O posicionamento, por GPS, refere-se ao sistema de coordenadas WGS 84. Este é um sistema de coordenadas cartesianas, centrado no centro de massa da Terra. Se todos os pontos de apoio e todas as posições da câmara são determinados nesse sistema, não há problema de datum na aerotriangulação. Os resultados serão referidos ao WGS 84.

Entretanto, resultados fotogramétricos são, normalmente, desejados com referência a um sistema geodésico nacional. O meio mais fácil de obter tais resultados, com aerotriangulação apoiada em GPS, será pedir alguns pontos de apoio a serem, geodésicamente, fornecidos, tanto no WGS 84 como no sistema nacional de coordenadas (como o UTM), a fim de proceder à transformação do datum subseqüente ou incluí-la no ajustamento combinado do bloco. Pode haver problemas relativos ao datum vertical, para os quais o geóide ou uma aproximação deste, tem de ser dado.

3.6 Perda de Ciclos, descontinuidades

Observações de fase tem de ser contínuas durante todo o voo (incluindo os registros estacionários antes da decolagem e após o pouso), para calcular a trajetória do voo. Infelizmente, há vários tipos de interrupção a serem levados em conta, conhecido como (1) interrupções do sinal, (2) perdas de ciclos e (3) alterações da constelação:

- (1) Interrupções do sinal. Pode acontecer que o sinal de um satélite seja interrompido, sendo cortado pelas asas do avião durante uma curva, por exemplo. Especialmente, durante uma curva de 180°, com grande ângulo de inclinação;
- (2) Perdas de ciclo. Acontece, às vezes sem causa aparente, durante observações de fase, que a contagem de ciclos completa pode ser perdida, no receptor, por uns poucos ou até por milhares de ciclos, embora as observações de fase ainda

pareçam ser contínuas, à primeira vista . Os resultados das perdas de ciclos são saltos na trajetória . Perdas genuínas de ciclos são uma questão de projeto do receptor e podem, também, ser causadas por efeito de múltiplos passos, ou por descontinuidades na ionosfera. Elas, normalmente, não deviam mais acontecer, mas, aparentemente, elas ainda acontecem. Temos observado perdas de ciclos mesmo nos receptores estacionários.

- (3) Alterações da Constelação. Durante os períodos de observação, de até várias horas, alguns satélites saem do campo de vista; enquanto outros entram. Em consequência, o número e a constelação dos satélites observados estão sempre mudando. Normalmente, várias dessas alterações podem acontecer durante uma missão de voo. Infelizmente, devido a problemas do receptor, já houve casos em que até centenas de alterações de constelação foram observadas, saltando os sinais do satélite para dentro e para fora, quase aliatoriamente.

O programa de computador para o GPS tem de tratar dessas perturbações. O problema não é tão sério se, pelo menos, 4 ou 5 satélites permanecem inalterados e, assim, permitem re-bloquear os sinais interrompidos. O principal problema é, sempre, o fato de que as ambigüidades de fase tem de ser reavaliadas. Existe um certo número de conceitos para resolver o problema, dependendo das informações remanescentes. Se apenas 2 ou 3 satélites ou nenhum, permanecem inalterados, o problema é mais sério. Pode acontecer que a ambigüidade de fase não possa ser exatamente bloqueada após uma interrupção. Temos experimentado vários casos em que o aparelho receptor não foi capaz de superar as descontinuidades. Isto mostra que o problema é sério, pedindo um programa mais sofisticado, especialmente em conexão com o posicionamento cinemático da câmara e a determinação de trajetórias precisas da aeronave. Estamos preparando, em Stuttgart, um robusto programa capaz de tratar, praticamente, de todas as perturbações que possam ocorrer.

4. Exatidão empírica do posicionamento por GPS cinemático relativo.

- 4.1 Nós nos referimos, de início, à elevada exatidão potencial do posicionamento por GPS, especialmente à base de observações de fase, de código-livre, das ondas portadoras. Permanece, entretanto, por ser investigado através de experiências, qual a precisão de desempenho que o posicionamento por GPS cinemático relativo atinge, realmente, nas aplicações práticas. A seguir, serão apresentados alguns resultados empíricos do posicionamento cinemático relativo, pós-processado, de uma câmara em voo. Nós nos referimos, aqui, ao teste contratado "Flevoland", o qual ainda parece ser um dos pouquíssimos testes inteiramente investigados, atualmente disponíveis. Outros testes confirmam, em parte, os resultados do "Flevoland", e, em parte, não tiveram completo êxito, uma vez que é muito crítico fornecer valores de teste

suficientemente precisos para as verdadeiras posições da câmara.

O teste do GPS fotogramétrico "Flevoland" foi organizado pelo "Rijkswaterstaat" da Holanda, em 1987. O vôo foi feito pela KLM Aerocarto e foi, independentemente, processado e investigado no Instituto de Fotogrametria da Universidade de Stuttgart. Dois receptores SERCEL, de 5 canais, foram usados, sendo o estacionário posicionado em um ponto de apoio na área-teste. Foram determinados 48 pontos de apoio e de controle por GPS geodésico. Todos os dados estão referidos ao WGS 84. Assim, nenhuma transformação de datum foi necessária. A área-teste cobrindo cerca de 2 x 4km², foi coberta por 10 faixas (fotos na escala de 1:3800, câmara Wild RC-10, distância focal - 210mm, altura de vôo h=800m). Todos os pontos de apoio e alguns pontos de amarração foram sinalizados. As superposições das fotos foram um pouco irregulares, com a longitudinal p = 60 a 70% e a lateral q = 50 a 60%. O bloco, consistindo em 184 fotografias, foi aerotriangulado por medições em monocomparador e ajustamento em bloco, com parâmetros adicionais. Sua única finalidade foi a de obter coordenadas independentes para todas as posições da câmara (centros perspectivos de todas as fotografias) as quais, subsequentemente, foram usadas como pontos de controle a serem comparados com as posições da câmara por GPS.

O ajustamento do bloco por mínimos quadrados, deu para precisão (não ponderada) das coordenadas-imagem $\sigma = 5$ m e, por propagação de erros, para a exatidão, no campo-objeto, das coordenadas das estações da câmara, $\sigma_{x,y} = 4.0$ cm e $\sigma_z = 2,8$ cm, respectivamente.

Os registros foram processados por diferenças primeiras às coordenadas da antena do GPS. Então, a respectiva distância S, a cada estação "verdadeira" da câmara, foi calculada e comparada com a verdadeira distância S entre a antena do GPS e a câmara, tal como medida diretamente no avião. Dessa forma, os efeitos das inclinações não perturbaram as comparações.

4.2 A análise da precisão interna dos dados do GPS deram um desvio padrão, para as distâncias, de $\sigma_0 = 1.4$ mm (observações de fase) e de $\sigma_0 = 1.14$ m para as pseudo-distâncias, no código C/A (sem SA). Os valores correspondem a $0.7\% \lambda$ e $0.4\% \lambda$, respectivamente, os quais são ainda melhores do que a expectativa inicial de 1%. Por isso, com PDOP=5, a precisão interna de posição deveria ser de cerca de 7mm e 5.7m, respectivamente. A análise empírica do ruído deu, realmente, 1cm e 3-5m, respectivamente. Assim, os valores empíricos estão, se não em total concordância com a expectativa teórica, pelo menos muito próximos. De qualquer forma, os erros acidentais das posições da câmara, da ordem de 1cm, estão muito abaixo do nível de preocupação fotogramétrica no sentido de garantir qualquer investigação mais rigorosa.

4.3 A questão realmente interessante é a exatidão externa de posicionamento da câmara a GPS cinemático. No teste de "Flevoland" a exatidão absoluta foi estimada, como explicado,

comparando os resultados do GPS com as "verdadeiras" estações da câmara, obtidas a partir do ajustamento do bloco fotogramétrico, ou melhor, por comparação das distâncias verdadeiras S, medidas diretamente, entre a câmara e a antena do GPS, com a distância S calculada a partir das respectivas coordenadas WGS 84.

Antes de serem apresentados os resultados do teste de "Flevoland", alguns fatos adicionais devem ser mencionados.

Não foi possível obter registros contínuos de todos os dados do GPS. O voo realizou-se em dois dias. Houve, também, algumas interrupções adicionais, resultando, ao todo, em 5 conjuntos separados de dados registrados continuamente, estendendo-se, respectivamente, sobre 1/2 a 4 faixas. O PDOP foi 5, exceto para duas constelações muito ruins, com 4 satélites, apenas, na faixa 2 (PDOP=30) e na faixa 3.1 (PDOP=57).

Essas faixas teriam, normalmente, de ser excluídas.

Não se sabia, então, que a solução da ambigüidade inicial requeria 1 hora de registros do estacionário.

Assim, as soluções de ambigüidades foram apenas aproximadas e alguns erros de desvio, remanescentes, tiveram de ser esperados, a despeito de se trabalhar com diferenças primeiras. (Foi mostrado que a dupla diferenciação dá, exatamente, os mesmos resultados que as diferenças primeiras, nos casos que temos em mãos).

Os principais resultados da investigação da exatidão acham-se resumidas na Fig. 2.4. Os erros de S, resultantes da comparação direta das coordenadas da antena do GPS, com as estações "verdadeiras" da câmara, acaham-se mostradas na Fig 2. (Aqui, os erros de S são equivalentes aos erros de Z, porque a antena do GPS aconteceu ter sido montada diretamente acima da câmara). Os resultados diretos não são muito conclusivos. Alguns conjuntos de dados obtêm, diretamente, precisão do GPS de vários centímetros. Outros, parece apresentarem erros linearmente crescentes. As constelações de satélites ruins das faixas 2 e 3.1 são refletidas em erros médios quadráticos bem grandes, de até 86 cm. A análise mais rigorosa confirmou que todos os dados do GPS contêm erros sistemáticos, isto é, erros linearmente crescentes com o tempo. Em outras palavras, o posicionamento por GPS está sujeito a erros sistemáticos residuais ou erros de desvio, os quais parece serem lineares, em primeira aproximação. A validade desta conclusão foi totalmente confirmada pela aplicação de correções suplementares de erros sistemáticos. Se os erros sistemáticos são removidos, primeiro aplicando deslocamentos constantes e segundo,

Vôo de Teste "Flevoiland" - Exatidão do GPS cinemático

Fig. 2 E.M.Q. de DS com relação ao "Valor Verdadeiro"

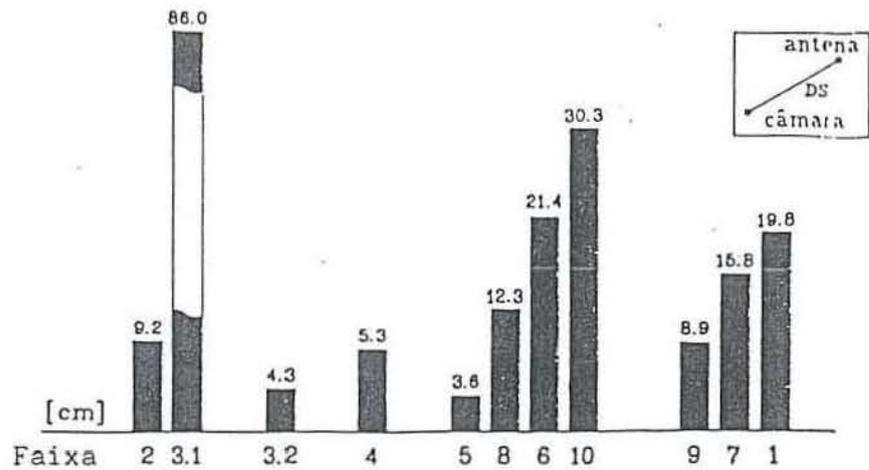


Fig. 3 E.M.Q. de DS com relação aos valores médios por faixa

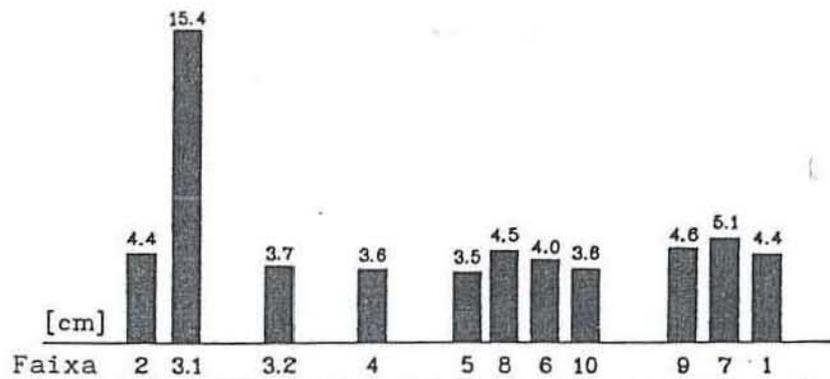
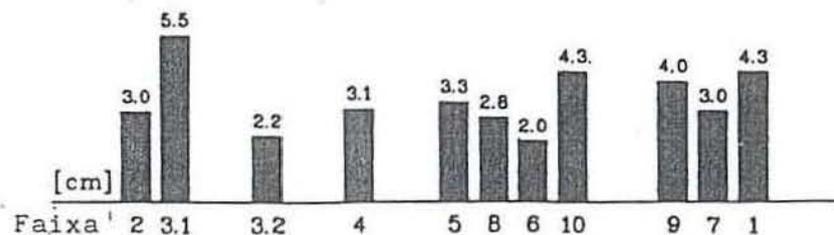


Fig. 4 E.M.Q. de DS com relação à Regressão Linear



aplicando correções lineares, os resultados obtidos são bem significativos, como mostram as figuras 3 e 4. O erro médio quadrático reduz-se a 3.5 cm. Mesmo as faixas com fraca geometria ajustam-se muito bem neste cenário. A fraca geometria, aparentemente, não afetou a precisão interna mas, em vez disso, causou consideráveis erros de desvio, em primeira instância. Deve-se notar, já aqui, que a pós-correção de erros de desvio linear será possível, em relação com o ajustamento combinado do bloco, como será demonstrado abaixo.

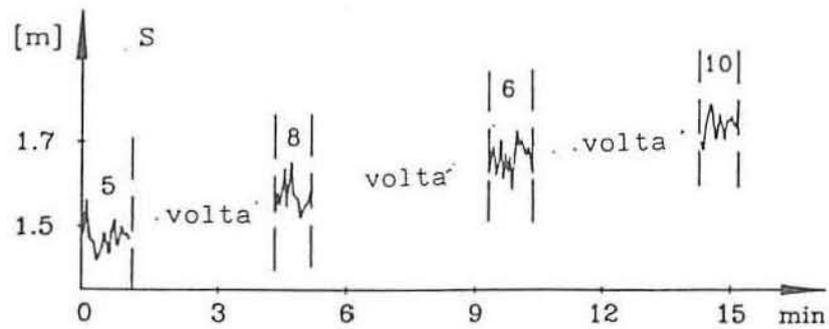
A precisão resultante de 3.5cm (e.m.q) para dS pode ser, ainda, reduzida a um valor menor, uma vez que ela contém os erros das estações "verdadeiras" da câmara, derivadas da triangulação aérea do bloco, afora os erros de interpolação do GPS, os quais ainda são incluídos. Se os erros médios quadráticos em Z , das estações da câmara, montando em 2.8cm, são subtraídos e se apenas o posicionamento a GPS, com 5 satélites, é levado em consideração, a precisão remanescente de posicionamento da câmara pelo GPS (em Z), após correções lineares para os erros sistemáticos, é de 1,5 cm.

Os principais resultados do teste de Flevoland podem ser resumidos como segue:

- (1) Se os erros sistemáticos são suprimidos ou eliminados, então a exatidão do posicionamento por GPS cinemático, de sensores aerotransportados, é da ordem de uns poucos centímetros. Considerando que os resultados de Flevoland se referem a 5 ou 4 satélites apenas, e que eles ainda contêm os erros de interpolação e outros erros menores, os quais são, efetivamente, da ordem de cm de magnitude, pode-se afirmar que os resultados experimentais são muito próximos da expectativa teórica, embora apenas uma limitada modelagem do erro tenha ocorrido. Em termos de fotogrametria aérea, deve-se observar que a maioria das aplicações em mapeamento não requererá posicionamento da câmara mais preciso. Assim, a precisão interna do posicionamento da câmara por GPS atende, plenamente, os requisitos fotogramétricos imediatos.
- (2) O segundo resultado é que todas as trajetórias da câmara posicionadas a GPS mostram erros que, dentro de períodos de até 15 minutos, são lineares, em primeira aproximação (ver fig. 5). Isto é um ponto de considerável controvérsia entre os geodestas. Eles sustentam que é possível uma completa modelagem dos erros até que não restem erros de desvio. Embora isto não seja posto em dúvida, a questão permanece, se a modelagem completa dos erros é possível, sob as restritas condições operacionais das missões de vôo fotogramétrico, e se é necessária ou não. Uma missão pode levar até 5 ou 6 horas, a área da missão pode cobrir milhares de km² ou pode combinar vários projetos menores um tanto distantes um do outro, e o receptor estacionário do GPS pode ser colocado a várias centenas de kms de distância. Ademais, somente um receptor estacionário é usado e alguns tipos de receptores registram, apenas, a frequência L1. As circunstâncias práticas das

Fig. 5 Teste "Flevoland", faixas 5,8,6,10 - erro de desvio linear

e.m.q. ds = 19,6 cm
e.m.q. ds = 3,6 cm
contra regressão linear



operações de campo podem impor restrições adicionais. Somente 4 ou 5 satélites podem ser visíveis e a janela de visibilidade pode ser estreita. Conseqüentemente, as determinações da linha de base inicial e as soluções de ambigüidades de fase podem não ser suficientemente precisas. E, finalmente, podem ocorrer interrupções de sinal completas ou parciais. Além disso, existe a consideração completamente independente de que muitas aplicações de aerolevantamentos não requerem grande exatidão do posicionamento da câmara por GPS. E, também, considerações de ordem operacional e econômica podem justificar manter as operações de campo do GPS tão simples e tão rigoroso quanto possível, para obter uma certa precisão, com uma despesa aceitável. Assim, é uma conclusão, certamente válida, admitir que possam ocorrer erros de desvio, excepcionalmente ou regularmente. Se, e até que ponto, erros de desvio são aceitáveis, depende do pretendido uso dos dados do GPS e da possibilidade de correção subsequente. É importante notar, neste contexto, que os erros lineares de desvio do GPS podem ser corrigidos em combinação com a triangulação aérea, desde que certas precauções sejam tomadas e seja aplicado o ajustamento em bloco combinado.

5. Ajustamento em Bloco Combinado com Dados do GPS

5.1 Nós, agora, voltamos para a utilização, em aerotriangulação, das estações aéreas da câmara, determinadas por GPS. Os dados de posição do GPS, após redução da excentricidade da antena e do tempo, referem-se às coordenadas dos respectivos centros perspectivos das fotografias aéreas. Eles representam observações para os parâmetros de posição dos elementos de orientação exterior da câmara. É, por conseguinte, uma abordagem conveniente tratar os dados de posicionamento da câmara por GPS, como observações adicionais, e conjugá-los, devidamente ponderados, com os dados da triangulação aerofotogramétrica, em um ajustamento em bloco combinado. É, essencialmente, a mesma abordagem que, anteriormente, era referida como ajustamento em bloco com dados auxiliares (de orientação da câmara). As observações da aerotriangulação fotogramétrica são admitidas como sendo as mesmas que na aerotriangulação convencional, com distribuição de pontos de amarração normais. Efeitos vantajosos, antecipados, dizem respeito à exatidão e à confiabilidade dos blocos ajustados, assim como, ao apoio terrestre muito mais reduzido, como será mostrado.

Tratando os dados de posição da câmara como observações adicionais, levanta-se o problema de sua relação com o sistema de coordenadas de referência fotogramétricas, isto é, se o desvio ou as correções de datum devem ser consideradas. Em vista da discussão acima, sugere-se levar em consideração as correções lineares do GPS, cujos parâmetros são tratados como incógnitas e resolvidos no ajustamento em bloco combinado. As correções lineares podem ser interpretadas como erros de desvio ou como

correções do datum. A formulação deverá ser tal que 3 casos possíveis possam ser distinguidos: (1) as correções podem não ser usadas, (2) ser usado um conjunto de correções para todo o bloco, (3) serem usados diversos conjuntos isolados de correções para várias sub-unidades de um bloco, no caso extremo de que cada faixa seja tratada separadamente, como possa ser requerido pelos dados. Compreende-se que a abordagem é pretendida como medida de segurança a ser usada, caso necessário, isto é, a fim de não perder vãos, no caso de ocorrerem interrupções dos dados do GPS.

5.2 As equações de observação para as observações de estação da câmara, reduzidas, escreve-se, por conseguinte, assim:

$$\begin{aligned} X_j^{GPS} + V_{xj} &= X_{0j} + (a_0 + a_1 t_j)_k \\ Y_j^{GPS} + V_{yj} &= Y_{0j} + (b_0 + b_1 t_j)_k \\ Z_j^{GPS} + V_{zj} &= Z_{0j} + (c_0 + c_1 t_j)_k \end{aligned} \quad (1)$$

As incógnitas principais são as coordenadas X_0 , Y_0 , Z_0 dos centros perspectivos j ; elas se relacionam, diretamente, com as incógnitas do ajustamento do bloco de feixes perspectivos ou do ajustamento do bloco por modelos independentes. Os termos $(a_0, a_1, b_0, b_1, c_0, c_1)$ representam os parâmetros desconhecidos do desvio linear ou do datum, admitidos como constantes para qualquer conjunto K de dados desejado. Os casos a serem distinguidos para K referem-se a: um conjunto - 0 (nenhum parâmetro), um conjunto para todo o bloco, conjuntos para grupos de faixas ou para faixas, individualmente. É conveniente expressar as correções como funções do tempo t do GPS, começando por cada conjunto K em um ponto de tempo t_0 , ao qual serão referidos os desvios a_0, b_0, c_0 .

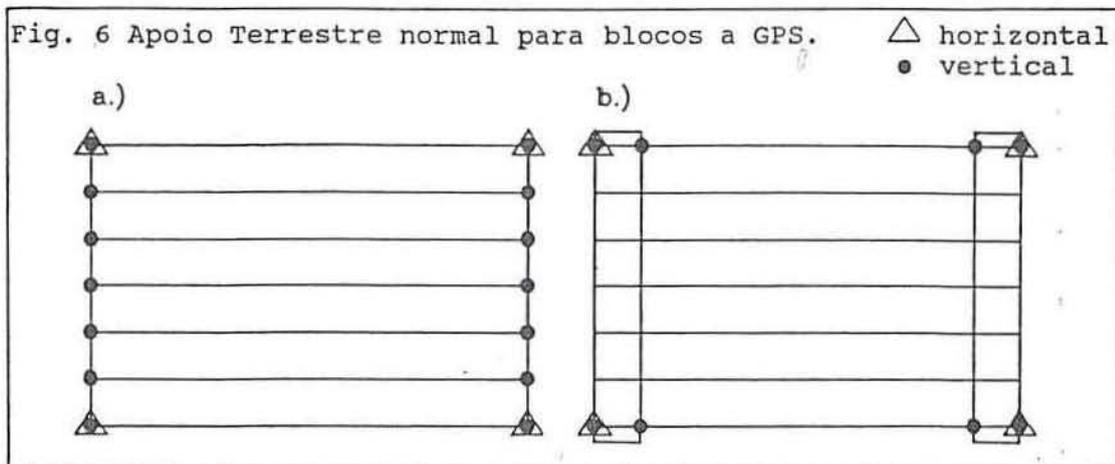
A programação e a execução do ajustamento em bloco não apresenta quaisquer problemas especiais. As equações normais podem ser subdividas nos vários grupos de incógnitas, conduzindo às bem conhecidas equações normais, reduzidas a uma banda limitada. Por conseguinte, podem ser usadas as técnicas de solução existentes. O caso do ajustamento em bloco, combinado com dados do GPS, tem sido tratado na literatura publicada. Por isso, ele não é tratado aqui com maior profundidade.

5.3 Somente os parâmetros de desvio desconhecidos é que requerem alguma consideração especial. Eles podem não ser determináveis, em geral, por causa das singularidades (deficiências de alinhamento), no ajustamento combinado do bloco, a menos que sejam tomadas certas precauções. O caminho mais conveniente e mais seguro de cuidar das deficiências de alinhamento, em blocos fotogramétricos, é o uso de pontos de apoio terrestre.

É possível, em princípio, ajustar os blocos combinados com o GPS sem quaisquer pontos de apoio terrestre. O slogan "Aerotriangulação sem apoio terrestre" tem chamado considerável atenção e parece ser altamente atrativo. Entretanto, os resultados

do ajustamento do bloco referem-se, neste caso, ao WGS 84, restando, ainda, por fazer, uma subsequente transformação de datum, para o sistema nacional de coordenadas geodésicas.

Constitue prática corrente, em fotogrametria, integrar a transformação do datum ao ajustamento em bloco, fazendo uso de pontos de apoio terrestre. Parece conveniente, por razões de ordem prática, aplicar o mesmo princípio, também, aos blocos combinados com o GPS. Uns poucos pontos de apoio terrestre são suficientes para proporcionar a transformação do datum. Para esse fim, é sugerido, como esquema normal, colocar pontos de apoio mais ou menos nos cantos do bloco. Neste caso, pode ser aplicado e determinado, de acordo com as equações (1), um conjunto de parâmetros de correção linear, desde que os registros do GPS não sejam interrompidos. Quatro pontos de apoio não são suficientes, entretanto, para um bloco com a superposição lateral normal de 20%, para determinar todos os parâmetros de desvio, se a cada faixa é atribuído um conjunto separado de parâmetros.



Tanto duas cadeias de pontos de apoio vertical adicionais, como duas faixas transversais devem ser adotadas, nesse caso, tal como esquematizado na fig. 6. Sugere-se, no momento, usar sempre, na prática, uma das duas opções (a ou b) da fig. 6, por questão de segurança.

Nesse caso, o bloco combinado com GPS pode ser seguramente ajustado, mesmo que ocorram descontinuidades ou interrupções do sinal do GPS, o que, infelizmente, não pode, antecipadamente, ser excluído de cogitação.

6. Exatidão dos blocos ajustados com GPS

6.1 Os efeitos gerais das estações da câmara, posicionadas pelo GPS, sobre os resultados do ajustamento combinado do bloco, são mais favoráveis, uma vez que podem ser, facilmente, antecipados. Esquecendo o desvio do GPS e os erros de datum, no momento, pode-se afirmar que o posicionamento das estações aéreas da câmara é muito preciso; mais preciso do que realmente requer um mapeamento fotogramétrico. O resultado é equivalente a ter um ponto de apoio em cada estação aérea, ou a ter 3 parâmetros de posição dos 6 elementos da orientação exterior, de cada fotografia, medidos direta e precisamente. Assim, efetivamente, os blocos são extremamente bem apoiados. Pode-se, antecipar, portanto, que os blocos apoiados pelo GPS quase não terão propagação de erro, nos elementos de orientação, ficando a precisão resultante do bloco próxima da mera precisão de interseção dos raios. Pode-se, também, concluir que a precisão será muito pouco dependente do tamanho do bloco. E, mais importante, pontos de apoio terrestre convencionais não são mais, de todo, requeridos por razões de precisão, isto é, para assegurar ou estabilizar a precisão dos blocos ajustados, uma função, que é, efetivamente, assumida pelo posicionamento da câmara por GPS. A função dos pontos de apoio terrestre será restrita à transformação do datum e, possivelmente, à correção de deficiências adicionais de alinhamento.

Estas considerações gerais, por si só, tornam a aerotriangulação, em combinação com o posicionamento da câmara por GPS, extremamente interessante, com grande perspectiva de econômica. Os pormenores precisam ser estudados, como é feito abaixo. As questões primordiais são os efeitos dos dados das estações da câmara, fornecidos pelo GPS, sobre o ajustamento do bloco, e em quanto os parâmetros adicionais de desvio do GPS enfraquecerão a estabilidade geométrica de um bloco e reduzirão as características geralmente mais favoráveis dos blocos com apoio a GPS.

6.2 Existem, raramente, até agora, quaisquer blocos reais, apoiados por GPS, que seriam adequados para completa investigação, dentro das várias características de precisão de

blocos apoiados por GPS, após ajustamento combinado do bloco. Seus comportamentos quanto à precisão foram estudados, até a data, principalmente por simulação, em computador e propagação teórica dos erros. Tais estudos são um tanto esquemáticos. Não obstante, eles fornecem um vislumbre dos efeitos da variação dos parâmetros do projeto. Também, neste trabalho, somente estudos teóricos da precisão serão discutidos. Pode ser mencionado, entretanto, que o bloco de Flevoland, apoiado por GPS (em verdade uma seleção de 7 faixas, formando um bloco com superposições normais), foi ajustado com base em apoio terrestre, de acordo com a Fig.6a, e com parâmetros lineares aplicados por faixa. Os resultados da precisão pelo erro médio quadrático do ajustamento combinado do bloco, derivado de 41 pontos de controle horizontal e 35 verticais, foram: $\mu_{x,y} = 2.1\text{cm}$, $\mu_z = 4.1\text{cm}$. Esses valores empíricos, pelo menos, confirmam, independentemente, que os blocos apoiados por GPS, ajustados, com um mínimo de apoio, realmente atingiram o alto nível de precisão esperado.

Estudos preliminares de simulação, em 1986, já exibiram o alto nível de precisão dos blocos apoiados por GPS, ajustados. Foi mostrado, então, que a precisão resultante do bloco é da ordem da magnitude da medição fotogramétrica (σ_0 transformada em unidades terrestres), no caso da precisão do GPS ser da mesma ordem. Foi, também, mostrado que o tamanho do bloco é de pouco efeito e que o ajustamento do bloco é possível sem qualquer apoio terrestre, desde que as medições por GPS cinemático não sejam interrompidas.

No parágrafo seguinte, são apresentados alguns resultados de investigações teóricas, baseados na inversão das matrizes dos coeficientes das equações normais, do ajustamento combinado do bloco, por mínimos quadrados. As investigações levam em consideração condições realísticas e se concentram nos efeitos da modelagem linear dos erros de desvio do GPS ou erros do datum. As investigações teóricas, realmente, se referem à escala da foto de 1:30.000, ao tamanho do bloco de $6 \times 21 = 126$ fotos (6 x 20 modelos) e ao apoio, de acordo com a Fig. 6; a precisão das coordenadas-imagem medidas, a qual representa a unidade de peso, é admitida como sendo $\sigma_0 = 10\mu\text{m}$. Os parâmetros de exatidão, levados em conta, são:

- (1) o desvio padrão das coordenadas do apoio terrestre (σ_{CP}).
- (2) o desvio padrão das medições fotogramétricas (na foto) dos pontos de apoio terrestre ($\sigma_{CP'}$).
- (3) a exatidão das coordenadas das estações da câmara obtidas por GPS (σ_{GPS}).

Deve-se relembrar que as verdadeiras magnitudes dos erros padrão não são essenciais, uma vez que somente as relações de pesos atuam no ajustamento por mínimos quadrados. Os resultados podem, portanto, ser transferidos para outros casos.

Fig. 7 Efeitos dos erros do apoio terrestre (σ_{CP} , $\sigma_{CP'}$) sobre blocos combinam com GPS.

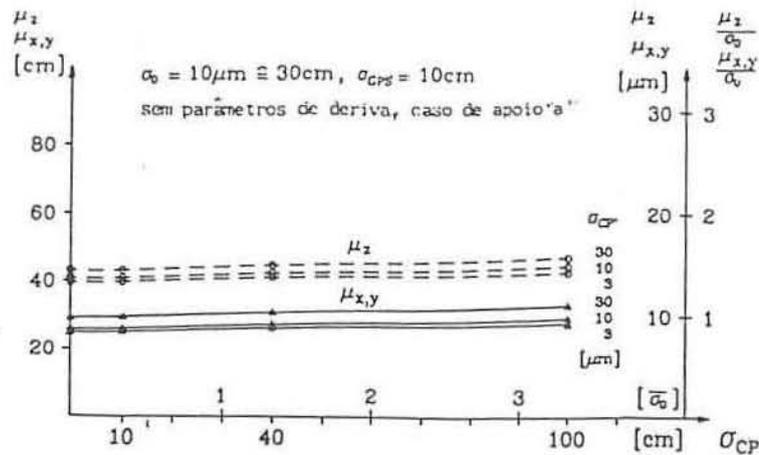
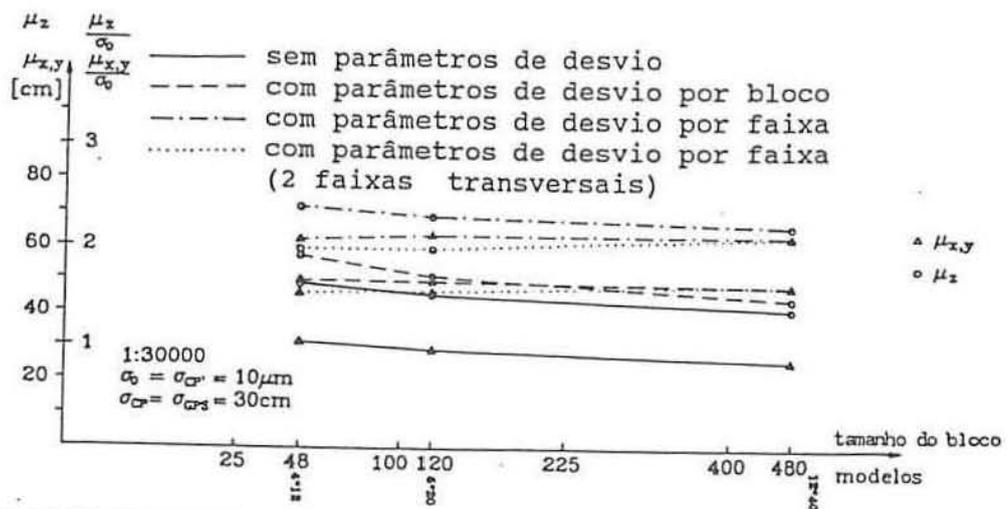


Fig.8 Influência do tamanho do bloco, na exatidão dos blocos combinados com GPS.



O ajustamento combinado do bloco é baseado no método do feixe de raios e leva em conta a opção de modelagem dos erros por parâmetros lineares de desvio, de acordo com as equações (1).

Vamos considerar, primeiro, o caso do ajustamento, combinado do bloco, sem parâmetros de desvio. A Fig.7 mostra que a variação dos desvios-padrão do apoio terrestre (σ_{cP} e $\sigma_{cP'}$) têm pouca influência sobre a precisão dos blocos ajustados, quase independente do fato de ser a exatidão do posicionamento da câmara (σ_{GPS}) muito alta, como mostrado na Fig.7, ou não. A Fig.8 mostra, igualmente, que a exatidão dos blocos ajustados é quase independente do tamanho do bloco, com ou sem a aplicação de parâmetros adicionais de desvio. Pode-se concluir que os resultados da exatidão das investigações subseqüentes, as quais se referem, todas, a um bloco de 6 x 20 pares estereoscópicos, podem ser tomadas como representativas para outros blocos, dentro de +- 10%, referindo-se os sinais a blocos menores ou maiores, respectivamente.

A pouca influência dos desvios-padrão dos pontos de apoio terrestre, de acordo com a Fig.6, justifica a introdução de algumas assunções generalizantes, as quais não são, de forma alguma, limitativas. Nós especificamos que a precisão das medições fotogramétricas de todos os pontos-imagem (pontos de amarração e pontos de apoio) é a mesma. Ademais, os erros-padrão das coordenadas-terreno, reduzidas para a escala das fotos, não devem ser maiores que os erros-padrão das coordenadas-imagem, uma assunção que é bem realística e em concordância com a prática corrente. Assim, com $\sigma_c = \sigma_{cP} = \sigma_{cP'} / s$ (sendo s o denominador da escala das fotos), as investigações de exatidão podem ser restringidas a considerar apenas a exatidão (σ_{GPS}) do posicionamento da câmara por GPS e as várias opções para correções de desvio e de datum, como principais parâmetros, em combinação com os dois casos normais de apoio terrestre, de acordo com a Fig. 6. Os resultados acham-se resumidos na Fig.9 (exatidão horizontal) e na Fig.10 (exatidão vertical).

As figuras 9 e 10 mostram a exatidão teórica dos blocos ajustados com GPS (cobrindo 6 x 20 pares estereoscópicos) como uma função da exatidão (σ_{GPS}) do posicionamento da câmara por GPS. A precisão resultante, após o ajustamento combinado do bloco, é expresso pelos valores dos erros médios quadráticos $\mu_{x,y}$ e μ_z dos erros-padrão das coordenadas horizontais e verticais, respectivamente, de todos os pontos de amarração ajustados. Os valores da precisão são dados em centímetros, referidos à escala de 1:30.000 das fotos. Eles são, também, convertidos a múltiplos de σ_0 , que tornam os resultados válidos para qualquer outra escala de foto. Os gráficos mostram, em primeira instância, 3 diferentes casos de correções de desvio pelo ajustamento do bloco, em combinação com os 2 casos normais sugeridos para o apoio terrestre (Fig.6). São eles:

- (1) sem parâmetros de desvio.
- (2) um conjunto de parâmetros de desvio para o bloco completo.
- (3) um conjunto, independente, de parâmetros de desvio para cada

- faixa, separadamente; caso do apoio da Fig.6a.
 (4) parâmetros de desvio por faixa; caso do apoio da Fig.6b.

A discussão e interpretação de parâmetros dos resultados podem ser distinguidas entre os caso de posicionamento da câmara por GPS, preciso ou menos preciso. Vamos observar, primeiro, as partes inferiores esquerdas das funções, nas figuras 9 e 10, representando o ajustamento do bloco com posicionamento preciso da câmara por GPS, especificado por $\sigma_{GPS}/s \leq \sigma_0$. Se os dados do GPS são absolutos, sem erros de desvio, as estações da câmara têm a exatidão absoluta determinada pelo GPS. Praticamente, não existe propagação de erros, no bloco, e a exatidão resultante é determinada, apenas, pelos meros erros de interseção dos respectivos raios, montando em $\leq 1.0\sigma_0.s$ e $\leq 1.5\sigma_0.s$, nas coordenadas X, Y e Z, respectivamente. Estes resultados ideais não podem ser mantidos se os parâmetros de desvio são aplicados no ajustamento do bloco, isto é; se os erros sistemáticos do GPS são para ser levados em conta e compensados pelo ajustamento combinado. Os parâmetros adicionais enfraquecem, de um grau considerável, a geometria do sistema. Os erros médios quadráticos das coordenadas horizontais μ_x, y são aumentados para $1.7\sigma_0.s$ e $2.1\sigma_0.s$, se é aplicada correção de desvio ao bloco ou às faixas, respectivamente, comparados com $1.0\sigma_0.s$, para o caso sem erros de desvio. Os valores respectivos, para μ_z , são $1.7\sigma_0.s$ e $2.3\sigma_0.s$, comparados com $1.5\sigma_0.s$.

Fig. 9 Influência da precisão do posicionamento da câmara, por GPS (σ_{GPS}), e dos parâmetros de desvio sobre a exatidão horizontal ($\mu_{x,z}$) dos blocos ajustados.

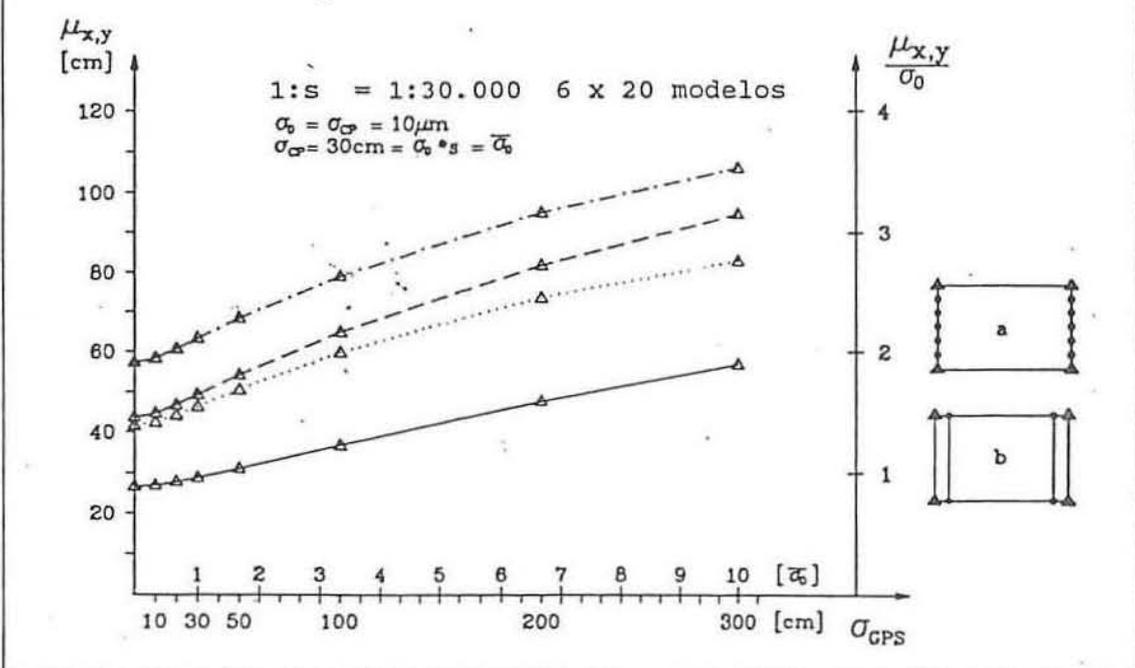
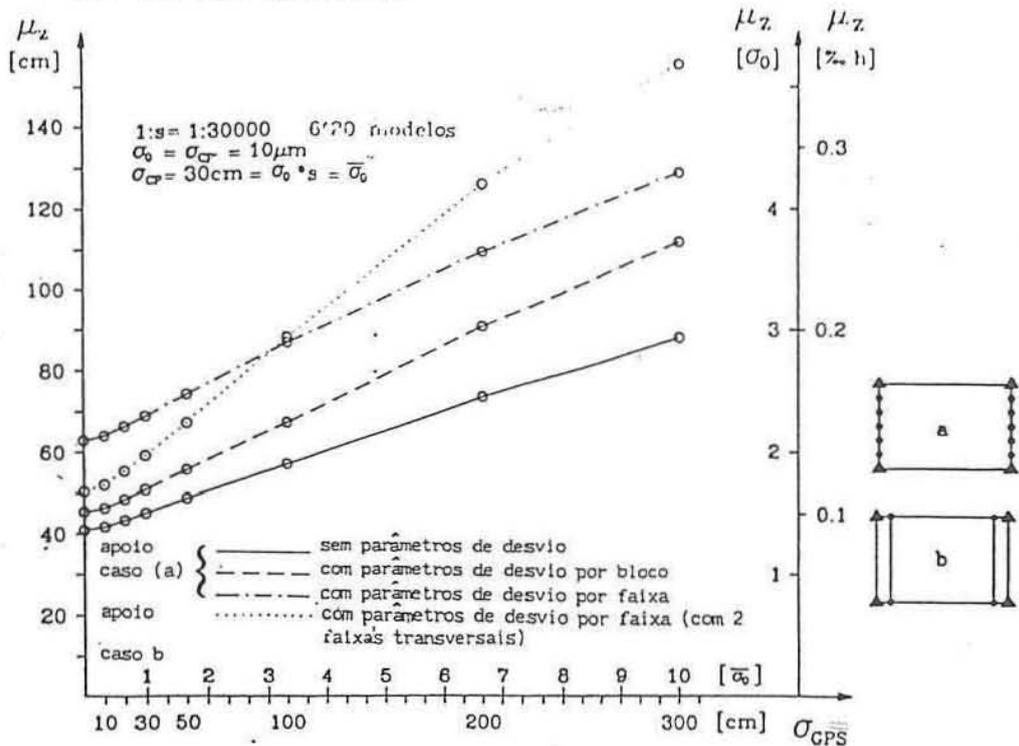


Fig.10 Influência do posicionamento da câmara, por GPS (σ_{GPS}), e dos parâmetros de desvio sobre a exatidão vertical (μ_z) dos blocos ajustado.



Os blocos com faixas transversais (apoio de acordo com a Fig.6b) e correções de desvio por faixas, ajustam-se muito favoravelmente e podem ser comparados àqueles com correções de desvio por bloco e padrão normal de distribuição do apoio da Fig.6a. Os resultados acham-se resumidos na Quadro 1, abaixo:

Quadro 1. Exatidão dos blocos ajustados por GPS; assunções padronizadas

casos de apoio a e b

Se,

$$\sigma_{CP} = \sigma_0 \cdot \sigma_{CP} \approx \sigma_0 \cdot s, \quad \sigma_{GPS} \approx \sigma_0 \cdot s \quad (s = \text{denominador da escala da foto})$$

então,

$\mu_{xy} \leq 1.0 \sigma_0 \cdot s$	$\mu_x \leq 1.5 \sigma_0 \cdot s$	(a, sem parâmetros de desvio)
$1.7 \sigma_0 \cdot s$	$1.7 \sigma_0 \cdot s$	(a, com parâmetros de desvio por bloco)
$2.1 \sigma_0 \cdot s$	$2.3 \sigma_0 \cdot s$	(a, com parâmetros de desvio por faixa)
$1.5 \sigma_0 \cdot s$	$2.0 \sigma_0 \cdot s$	(b, com parâmetros de desvio por faixa)

tamanho do bloco: 6 x 20 modelos

blocos menores: + 10%

blocos maiores: - 10%

Agora, vamos voltar os olhos para as funções de precisão das figuras 9 e 10, como elas reagem aos maiores valores de σ_{GPS} , isto é, como elas enfraquecem a precisão do posicionamento da câmara por GPS. Todas as relações crescem, monotonamente, com o σ_{GPS} , a taxas grosseiramente semelhantes (exceto para μ_z , caso b). O aspecto mais importante, entretanto, é que os erros médios quadráticos das coordenadas crescem mais lentamente, a uma taxa mais baixa que o próprio σ_{GPS} . Se a precisão do posicionamento da câmara por GPS chega até $\sigma_{GPS} = 10\sigma_0 \cdot s$, as magnitudes de $\mu_{x,y}$ e μ_z crescem apenas cerca de um fator 2 (exceto para μ_z , no caso das faixas transversais). A explicação tem relação com o bem conhecido efeito de tiragem da média, se um bloco tem muitos pontos de apoio. Assim, nós temos a bem favorável condição de que, até certo ponto, erros maiores do GPS podem ser tolerados, se a exatidão requerida para o bloco puder ser de, apenas, $2\sigma_0 \cdot s$ a $3\sigma_0 \cdot s$, em X e Y, ou 0,2% h a 0,3% h, em Z.

6.3 A consideração feita acima é de significativa importância prática, com relação à aplicação da aerotriangulação com o GPS, para mapeamento em média e pequena escalas. Nestes casos, há uma considerável margem entre a verdadeira precisão das medições fotogramétricas e a exatidão requerida para o mapeamento. Os erros médios quadráticos aceitáveis $\mu_{x,y}$ e μ_z , dos blocos ajustados, podem ser maiores que $\sigma_0 \cdot s$. Pode-se concluir, portanto, que os erros-padrão (σ_{GPS}) aceitáveis para o posicionamento da câmara por GPS, podem ser consideravelmente maiores que $\sigma_0 \cdot s$.

Isto pode ser verificado invertendo as relações das figuras 9 e 10. Perguntamos, agora, que σ_{GPS} é requerido a fim de atender as especificações dadas para $\mu_{x,y}$ e μ_z ? Para este fim, as relações das figuras 9 e 10 são transferidas para diferentes escalas das fotos, levando em conta as relações de peso, enquanto mantendo a geometria dos blocos.

Os resultados acham-se resumidos no Quadro 2. As exatidões requeridas $\mu_{x,y}$ e μ_z , para os blocos ajustados, foram esquematicamente, especificadas ao se referir às razões convencionais entre as escalas da foto e do mapa, aplicadas na prática e expressas na bem conhecida regra de Gruber ($s_{pA} = c\sqrt{s_{map}}$), e admitindo as especificações normais de exatidão dos mapas (ver as primeiras 5 colunas da Tabela 2). As correspondentes precisões requeridas (σ_{GPS}), de posicionamento da câmara por GPS são dadas na Tabela 2. Os 4 casos diferentes dos parâmetros de desvio e do apoio terrestre são ali destacados.

Quadro 2. Blocos a GPS para mapeamento - Exatidão requerida do posicionamento da câmara por GPS													
escala do mapa	escala da foto	exatidão requerida do AT			σ_{GIS} requerido								
		$\mu_{x,y}$	μ_z	Intervalo de curva ΔH	(1)		(2)		(3)		(4)		
		m	m	m	x,y	z	x,y	z	x,y	z	x,y	z	
1:	1:	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	
100000	100000	5	4	20	39	16	21	11	19	8,5	27	8,2	
50000	65000	2,5	2	10	18	6,9	9,2	4,5	7,5	2,8	11	2,4	
25000	40000	1,5	1,0	5	11	2,8	5,4	1,8	4,4	0,7	6,8	0,9	
10000	25000	0,8	0,6	2,5	3,6	1,6	1,3	1,0	0,6	0,4	1,7	0,5	
5000	12000 SWA ¹⁾	0,3	0,25	1	1,8	0,3	1,0	0,2	0,3	-	0,9	0,05	

$\sigma_0 = 10 \mu\text{m}$.
¹⁾ $\sigma_0 = 12 \mu\text{m}$ para z;

(1) caso de apoio (a), sem parâmetros de desvio
 (2) caso de apoio (b), com parâmetros de desvio por bloco
 (3) caso de apoio (a), com parâmetros de desvio por faixa
 (4) caso de apoio (b), com parâmetros de desvio por faixa
 (2 faixas Transversais)

Os resultados mostram, claramente, que os requisitos de precisão do posicionamento da câmara por GPS não são de todo críticos, para mapeamentos em escalas médias e pequenas. Até a utilização de observações de pseudo-distâncias do código-P, ou do código-C/A poderiam ser suficientes, em alguns casos. Até mesmo o pior caso de parâmetros de desvio por faixa (3), atende os requisitos para mapeamento topográfico, até a escala do mapa de 1:25.000, sem exigir valores precisos de σ_{GPS} , cuja magnitude pode ser de 1m ou maior. Em geral, os requisitos para a precisão vertical do posicionamento a GPS são um pouco mais apertados do que para a precisão horizontal.

As especificações para mapeamento em escala grande tornam-se mais rigorosas a medida que as escalas aumentam. Não obstante, os resultados do GPS podem ainda atender as suas exigências, especialmente porque as áreas dos projetos são, em geral, pequenas e os tempos de voo mais curtos. A precisão do posicionamento por GPS, com observação relativa de fase, pode-se, realisticamente, esperar que seja da ordem de 10cm, nesses casos.

Resumindo os resultados da Tabela 2, pode-se, de uma maneira geral, concluir que o posicionamento da câmara por GPS e a sua combinação com o ajustamento em bloco pode atender a todas as exigências de precisão para mapeamentos fotogramétricos. Em particular, são, também, aceitáveis especificações de um mínimo de apoio terrestre e de correções de desvio do GPS, embora estas últimas enfraqueçam a estabilidade geométrica, especialmente se aplicadas por faixa. Somente os blocos de aerotriangulação para mapeamento em escala grande (1:1.000) e determinação de pontos fotogramétricos (1:1), por ajustamento de bloco combinado com GPS é que requerem investigações mais específicas do que as apresentadas aqui. Espera-se, também, que, em qualquer caso, o ajustamento fotogramétrico, em bloco, de alta precisão, seja grandemente beneficiado com o uso do posicionamento da câmara por GPS.

7. Resumo e Conclusão

7.1 Não há dúvida de que o posicionamento da câmara por GPS é do maior interesse e importância econômica para a aerotriangulação. Ele é aplicável e altamente eficaz sobre toda a gama de escalas do mapeamento fotogramétrico. Seu principal efeito é, em todos os casos, que o número de pontos de apoio terrestre, convencionalmente requeridos, pode ser grandemente reduzido, chegando a muito poucos pontos. O método está pronto para aplicação prática, no que concerne ao equipamento. Existe, no mercado, um bom número de receptores de alta qualidade. O desenvolvimento dos programas também está bem adiantado. Os programas, originalmente simples, para o processamento dos dados do GPS cinemático, tiveram que se fazer mais sofisticados, a fim de tratar de todas as perturbações, tais como, perdas de ciclo, interrupções, ambigüidades de fase, linhas de base imprecisas etc. Nosso grupo de especialistas, em Stuttgart, tem esses programas de

computador prontos para aplicação, assim como o pacote de programas para ajustamento de bloco combinado com GPS, incluindo a capacidade de correção de desvios.

7.2 Existe um bom número de tópicos de pesquisa em que se podem fundamentar outras investigações. É, especialmente, desejável que sejam feitas experimentações adicionais concernentes ao comportamento dos erros sistemáticos do GPS sobre longas distâncias, até várias centenas de quilômetros, e longos períodos de tempo, até várias horas. Além disso, o uso operacional de blocos apoiados por GPS tem de ser demonstrado por exemplos práticos. Presentemente, um número razoável de blocos de teste e de aplicações-piloto acham-se em estudo em vários países. Os resultados estarão disponíveis num futuro muito próximo. Além disso, o problema do datum necessita atenção adicional. A aerotriangulação, apoiada por GPS, requer, em princípio, um bom conhecimento do geóide local, embora aproximações sejam suficientes, em muitas aplicações de mapeamento. Com relação aos sistemas nacionais de coordenadas geodésicas (como o UTM), a solução ideal, antecipada, seria que as fórmulas de transformação absoluta pudessem transformar, diretamente, as coordenadas WGS 84 para a rede nacional, dentro de 10cm de precisão, sem contar com pontos de apoio comuns, na área do projeto. Finalmente, à aplicação na fotogrametria, em escala grande, de alta precisão, a qual requer exatidão do GPS de poucos centímetros, terá de ser dada uma atenção mais acurada.

Em vista da moderada exatidão do GPS, requerida para mapeamento, de acordo com a Tabela 2, nenhum dos itens de pesquisa, mencionados, é particularmente crítico. Por conseguinte, a aplicação prática do GPS não terá que esperar que se achem disponíveis os resultados de pesquisas adicionais.

7.3 O posicionamento cinemático, relativo, da câmara, tem sua pioneira aplicação em aerotriangulação. Além disso, existem vários prolongamentos e aplicações adicionais em vista, os quais são, agora, mencionados, aqui, sem maior elaboração:

- (1) O GPS pode ser usado, também, para determinação da atitude da câmara. A idéia é colocar 3 antenas de GPS nas asas e na fuselagem do avião para formar um triângulo maior possível. Por interferometria, as diferenças de coordenadas entre as 3 antenas podem ser estabelecidas com uma precisão de cerca de 1mm. Assim, os valores da atitude podem ser derivados com a precisão de 10^{-4} radianos ou 6mgon. O desenvolvimento de programas e investigações quanto à exatidão e ao uso potencial da determinação da atitude por GPS foi iniciado recentemente.
- (2) Com ou sem dados de atitude por GPS, será possível, para algumas aplicações, simplificar, até certo ponto, a aerotriangulação e ainda obter resultados suficientes para atender as especificações do mapeamento. Todavia, a medição direta e precisa de todos os seis parâmetros de orientação exterior, por GPS, está bem adiantada. Não obstante, pode-se

imaginar algumas aplicações em que a orientação por GPS poderia ser usada diretamente, evitando, completamente, o processo de aerotriangulação.

- (3) O posicionamento por GPS de sensores outros, que não a câmara, está ganhando importância. São exemplos, os posicionamentos dos rastreadores multi-espectrais, dos perfilógrafos de radar ou "laser" e das câmaras digitais de barrete eletrônico (do tipo MOMS). Já têm sido obtidos resultados muito encorajadores. Pode-se esperar que o uso do posicionamento relativo, por GPS cinemático, desenvolver-se-á muito mais além das aplicações presentemente arroladas.