

## RETIFICAÇÃO DE IMAGENS AÉREAS DIGITAIS COM USO DE EFEMÉRIDES PRECISAS

WANDERLEY KAMPA RIBAS  
ÂNGELA KUGLER

Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A.  
Departamento de Levantamentos Terrestres e  
Departamento de Fotogrametria  
[wanderley@esteio.com.br](mailto:wanderley@esteio.com.br)

**RESUMO** – As novas tecnologias incorporadas nas câmeras aéreas digitais estão permitindo utilizar as efemérides precisas e com isto otimizar as atividades relacionadas com os trabalhos de apoio de campo. A ESTEIO vem utilizando a técnica de posicionamento de ponto preciso (PPP) em aplicações na aerofotogrametria, através da câmara aérea digital ADS40. As efemérides precisas chegam a ser 100 vezes melhor que as efemérides transmitidas. O seu sistema de referência é o International Terrestrial Reference Frame, ITRF. O pós-processamento tem demonstrado precisões similares ao uso de uma estação de referência, desde que os dados coletados possuam alta qualidade e uma perda mínima dos sinais dos satélites.

**ABSTRACT** - The new technology incorporate into airborne digital camera are allowing use the precise ephemeris and this way can optimize and to reduce ground control points in the field. The Esteio company is using the Precise Point Positioning – PPP, applied in aerial photogrammetry through Airborne Digital Sensor ADS 40. The precise ephemeris are almost one hundred times more precise than broadcast ephemeris. The ITRF is your reference system. The pos-processing with PPP compared with traditional relative position had showed similar precisions, since that the collected data has high quality and minimum loss signals satellites.

### 1 INTRODUÇÃO

As Efemérides Precisas são controladas pela DMA (Defense Mapping Agency) e distribuídas por diversas agências, como a JPL (Jet Propulsion Laboratory), o CODE (Center for Orbit Determination in Europe), a NGS (National Geodetic Survey) e o IGS (International Geodynamics GPS Service). O Brasil está integrado à rede IGS através da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), e os dados das estações são repassados para um centro global da rede, situado no CDDIS (Crustal Dynamics Data Center), da NASA.

Enquanto a dupla diferença resolve posição por três componentes (X,Y e Z) o PPP calcula o valor de uma quarta incógnita, que é o relógio do receptor.

No processamento diferencial o erro da troposfera é eliminado, permanecendo apenas o erro relativo. Com o PPP o erro absoluto deve ser considerado, o qual é feito com o modelo de atraso zenital troposférico, com o filtro de Kalman.

A convergência é a chave do sucesso do PPP, e depende das medições de fase ininterruptas de muitos satélites, condição que só é possível em levantamentos aerotransportados. Para aplicações com muitas perdas de ciclo não é recomendado.

De toda forma recomenda-se que seja feito uma aquisição de dados antes da decolagem e uma aquisição depois da decolagem para que possa garantir a convergência.

O pós-processamento tem demonstrado precisões similares ao uso de uma estação de referência, desde que os dados coletados possuam alta qualidade e uma perda mínima dos sinais dos satélites. Existem vantagens e desvantagens na utilização das efemérides precisas. Como desvantagem está à demora da publicação dos dados mais refinados, que pode chegar a 13 dias. A grande vantagem deste método é a eliminação das estações de referência, onde observações simultâneas dos mesmos satélites são necessárias entre as estações (base e itinerante), eliminando assim o processamento diferencial.

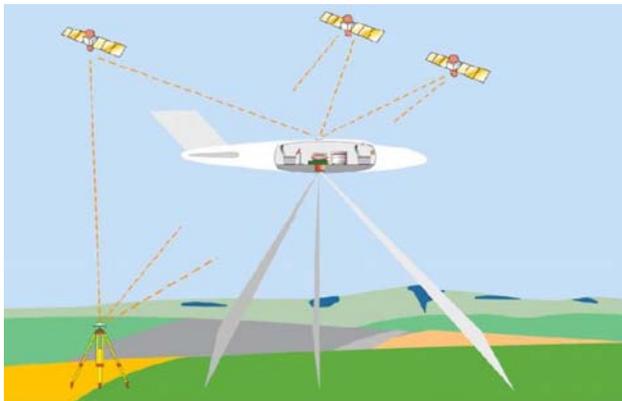


Figura 01: Sensor Digital ADS 40 com processamento diferencial

Fonte: Leica (manual ADS40)

Outra grande vantagem é o aumento das distâncias entre as estações, eliminando limites, pois no método diferencial devem obedecer distâncias de 50 Km para a câmara digital. Os vôos mais altos trarão maiores benefícios para a exata determinação das ambigüidades, pois muitas vezes no processo diferencial existe uma dificuldade imposta pela troposfera entre a altitude da aeronave e da base terrestre.

O IGS disponibiliza três tipos de efemérides, ultra rápida, rápida e final, sendo que a final está disponível 13 dias após a observação, com precisão da órbita < 5 cm e < 0.1 ns do relógio do satélite.

Os produtos IGS apresentam precisões de poucos centímetros e são disponibilizados com intervalos de 15 minutos. Para a interpolação das órbitas dos satélites este intervalo é adequado, mas não é adequado para a correção dos relógios, por isto também são disponibilizados com intervalos de 30 segundos. As combinações das correções para os relógios dos satélites com as efemérides precisas proporcionam posicionamento por ponto utilizando apenas as pseudodistâncias de uma única época de observação, com precisão melhor que 1 metro. Para se manter a qualidade do ponto de alta precisão é fundamental trabalhar com receptores de dupla frequência.

O pós-processamento é realizado com o GrafNav, desenvolvido pela Novatel, que faz uso do PPP (Posicionamento de Ponto Preciso). Para que o processamento seja realizado com êxito existe a necessidade de alguns cuidados que devem ser tomados durante a coleta dos dados, como um período mínimo de rastreamento de 60 minutos e ângulo de corte do sinal do satélite de 10 graus, o que permite uma conversão mais rápida das ambigüidades. O programa faz a identificação dos dados brutos da aeronave e busca automaticamente os dados das efemérides precisas na agencia selecionada.

Os acelerômetros e os giroscópios do IMU registram o tipo e a direção do movimento, e que depois de processados permitem acompanhar a posição exata do objeto em movimento. O “IMU” detecta a taxa de aceleração, bem como as alterações na rotação, incluindo os movimentos de “pitch, roll e heading”.

Os dados do “GPS” e o do “IMU” são armazenados durante a aquisição da imagem e processados utilizando-se de uma estação de referência ou de efemérides precisas, para produzir coordenadas planialtimétricas para cada linha imageada:

- O sensor “GPS” gera uma posição absoluta em 2 Hz.
- O sensor “IMU” gera uma posição relativa e uma orientação precisa de pitch, roll e heading a 200 Hz.
- A trajetória dada pelo “IMU” é atualizada com a posição absoluta determinada pelo GPS.
- A trajetória pós-processada é interpolada para gerar posição e orientação em 800 Hz ou 1,25 ms intervalo.

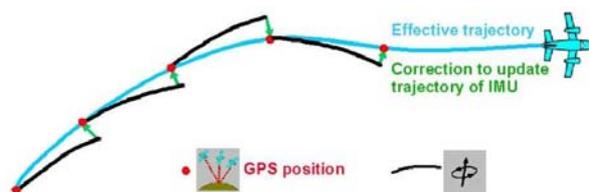


Figura 02: Trajetória da aeronave.

Fonte: Leica (manual ADS40)

## 2. PRINCÍPIOS DA CAMARA DIGITAL ADS 40

Diferente das câmaras analógicas a ADS40 não possui o “FMC (Forward Motion Compensation)”. O “FMC” é o sistema de tração contrária ao movimento da aeronave realizada no filme aéreo no instante de sua exposição compensando o deslocamento da imagem. O motivo é que a ADS 40 trabalha com o princípio do “Pushbroom” (varredura do terreno em linhas) e possui lentes telecêntricas simples. O sistema de lentes telecêntricas permite que os raios de luz tenham uma incidência vertical quando passa pelos filtros de interferência sobre a representação gráfica dos CCDs. Desta forma o desempenho espectral dos filtros é quase perfeita.

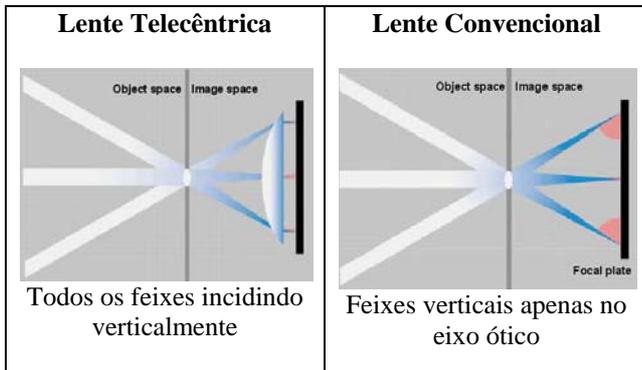


Figura 03: Sistema de lentes  
Fonte: Leica (manual ADS40)

As leituras no “CCD (Charge Coupled Device)” são muitíssimo mais rápidas do que um disparo em uma câmara analógica, chegando a 800 Hz ou 1,25 ms.

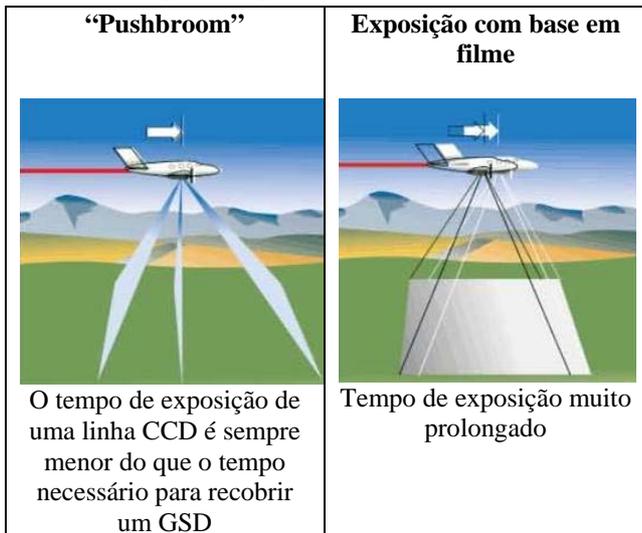


Figura 04: Varredura de vôo digital “pushbroom”  
Fonte: Leica (manual ADS40)

Cada matrix “CCD” tem 12.000 pixels. O pixel apresenta um tamanho de 6,5 µm na imagem.

Ground Sample Distance: termo utilizado para designar a precisão do mapa, estando associado a altura de vôo, ao tamanho das lentes focais e ao tamanho físico do pixel.

$$GSD = (h / f) * \mu$$

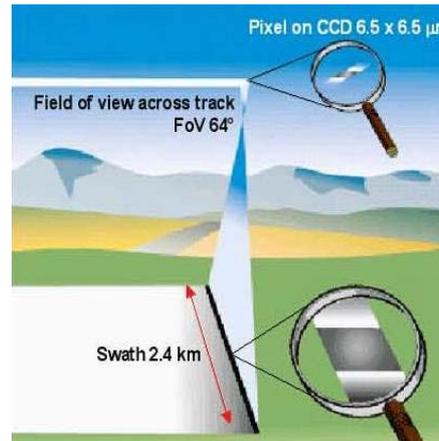


Figura 05: Dimensão do pixel e da linha de varredura  
Fonte: Leica (manual ADS40)

As imagens capturadas são classificadas em três níveis:

#### Nível L0

As imagens no nível L0 representam os dados brutos da imagem, apresentando deformações. Nesta fase as imagens são classificadas e os dados brutos organizados e os arquivos estruturados. No final do processamento L0 são gerados arquivos de dados para cada linha do sensor, contendo a posição e altitude de cada linha imageada.. O “IMU” registra instantaneamente mudanças na posição e altitude da câmara ADS40.

#### Nível L1

As imagens no nível L1 são obtidas após o processamento do GPS e “IMU” dando a posição e orientação das imagens, as quais já podem ser visualizadas em modo estéreo, processadas em sistemas de sensoriamento remoto e preparadas para serem aerotrianguladas, assim como a geração de modelos digitais e produtos. Corresponde a aproximadamente uma imagem georreferenciada.

A frequência de leitura do “IMU” é usada para verificar os dados do GPS e fornecer a posição instantânea de cada linha imageada. O “IMU” registra 200 linhas por segundo enquanto que o GPS registra duas amostras por segundo, por isto o “IMU” é usado para determinar a posição exata entre as amostras GPS. Os dados do GPS também são utilizados para corrigir as distorções e derivas do sistema inercial.

#### Retificação das imagens

Os movimentos do sensor (roll, pitch and heading) durante o vôo são corrigidos para cada linha imageada, permitindo a geração dos produtos.

Aerotriangulação

O sistema GPS e o sistema IMU estão rigidamente conectados ao plano focal e ao sistema de lentes do sensor ADS40.

Para alguns trabalhos esta orientação já é suficiente. Para trabalhos que envolvam captação fotogramétrica e geração de ortofotos é necessário que as imagens passem pelo processo de aerotriangulação. Para que seja possível realizar a aerotriangulação no sensor linear é necessário o uso de pelo menos três imagens diferentes obtidas pelo plano focal. Estas imagens devem estar posicionadas nas posições nadir, anterior e posterior, e o ângulo entre elas não pode ser igual. Durante o processo de aerotriangulação os dados do GPS e IMU são ajustados pelo princípio do ajustamento de feixes perspectivos (bundle adjustment). Para isto são utilizadas "orientações de correção" em intervalos regulares ao longo da linha imageada. Uma orientação de correção é a orientação do sensor em um determinado momento.

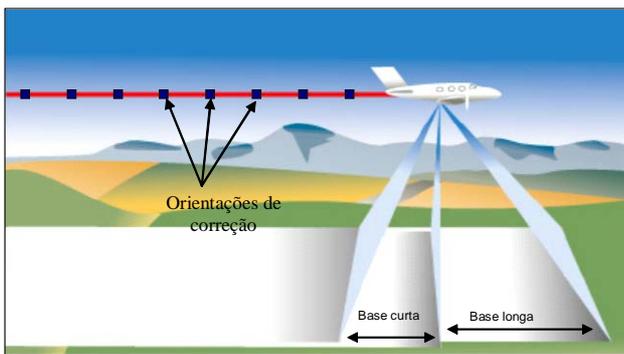


Figura 06: Orientações de correção  
Fonte: Leica (manual ADS40)

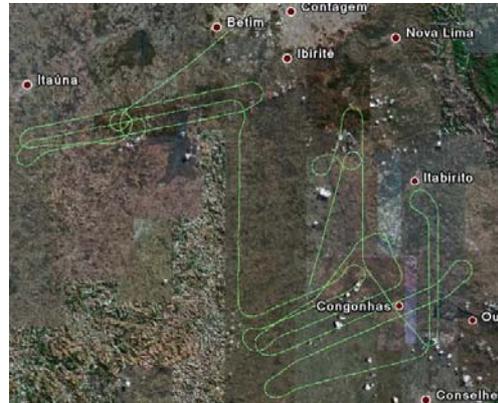
**Nível L2**

As imagens no nível L2 são utilizadas para geração de DTM (Modelo Digital do Terreno), ortofotos e mosaicos.

A Aerotriangulação para a ADS40 é necessária para compensar os efeitos sistemáticos, principalmente o desalinhamento entre o "IMU" e o eixo da câmara, assim como as diferenças entre as origens do GPS e "IMU" e o sistema de coordenadas com pontos de controle no terreno.

**3. LOCALIZAÇÃO**

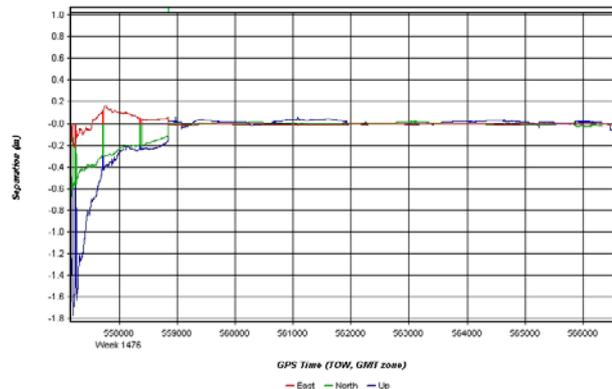
O recobrimento aerofotogramétrico foi realizado no estado de Minas Gerais na região de Congonhas. As linhas representam a trajetória da aeronave.



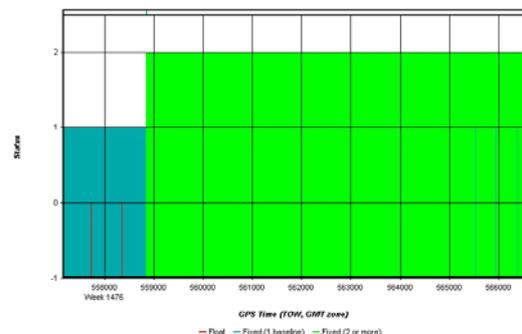
**4. SAÍDAS DO PROCESSAMENTO**

As figuras apresentam os resultados do processamento:

- a) Processamento Direto e Inverso (Separação) – dia 26/04/2008



- b) Determinação das ambigüidades – dia 26/04/2008



**5. TABELA COMPARATIVA**

As tabelas apresentam as diferenças de dois processamentos. A tabela 1 utilizando uma estação de referência e a tabela 2 utilizando as efemérides precisas (PPP). Em cada caso foi realizada uma leitura em ambiente estéreo com a imagem orientada a partir da solução GPS/IMU e a realização da aerotriangulação com os pontos do apoio de campo. O GSD das imagens é igual a 0,35 m.

TABELA 1												
COM BASE												
Apoio de campo (A)			Com Aerotri (B)			Difereças						
Ponto	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z			
QF-901	598779,161	7737427,944	914,510	598779,290	7737427,967	914,458	0,129	0,023	0,052			
QF-902	603885,837	7739259,131	843,494	603885,821	7739259,201	843,574	0,016	0,070	0,080			
QF-903	599209,414	7727723,210	917,409	599209,356	7727723,209	917,484	0,058	0,001	0,075			
QF-904	605174,630	7733447,578	890,482	605174,640	7733447,459	890,376	0,010	0,119	0,106			
QF-905	618395,591	7737246,338	890,216	618395,546	7737246,398	890,203	0,045	0,060	0,013			
QF-906	603059,606	7722675,416	921,572	603059,584	7722675,370	921,596	0,022	0,046	0,024			
QF-907	624068,260	7737684,907	1269,085	624068,329	7737684,885	1269,092	0,069	0,022	0,007			
QF-908	628031,854	7733611,900	997,837	628031,792	7733611,939	997,818	0,063	0,039	0,019			
Média							0,051	0,047	0,047			
Desvio Padrão							0,036	0,034	0,034			
TABELA 2												
COM EFEMÉRIDES PRECISAS												
Apoio de campo (C)			Com Aerotri (D)			Difereças						
Ponto	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z			
QF-901	598779,161	7737427,944	914,510	598779,167	7737428,043	914,562	0,006	0,099	0,052			
QF-902	603885,837	7739259,131	843,494	603885,832	7739259,128	843,460	0,005	0,003	0,034			
QF-903	599209,414	7727723,210	917,409	599209,459	7727723,039	917,362	0,045	0,171	0,047			
QF-904	605174,630	7733447,578	890,482	605174,744	7733447,661	890,505	0,114	0,083	0,023			
QF-905	618395,591	7737246,338	890,216	618395,483	7737246,525	890,186	0,108	0,187	0,030			
QF-906	603059,606	7722675,416	921,572	603059,576	7722675,384	921,581	0,030	0,032	0,009			
QF-907	624068,260	7737684,907	1269,085	624068,256	7737684,816	1269,069	0,004	0,091	0,016			
QF-908	628031,854	7733611,900	997,837	628031,842	7733611,831	997,874	0,012	0,069	0,037			
Média							0,040	0,092	0,031			
Desvio Padrão							0,043	0,059	0,014			
										Difereças (B - D)		
										0,123	0,076	0,105
										0,010	0,073	0,113
										0,103	0,170	0,121
										0,103	0,202	0,129
										0,063	0,127	0,016
										0,008	0,014	0,015
										0,074	0,069	0,023
										0,051	0,108	0,056
Média							0,067	0,105	0,072			
Desvio Padrão							0,043	0,060	0,050			
										Leituras de aerotriangulação		
										B - D =		

**4 CONCLUSÃO**

Conforme a tabela de diferenças (B-D), a média das diferenças das coordenadas planialtimétricas entre os levantamentos com estação de referência e com efemérides precisas (PPP) foi igual ou inferior a 0,105 m para planimetria e igual ou inferior a 0,072m para altimetria. O maior desvio padrão foi de 0,060m para planimetria e 0,050m para altimetria. Estes resultados apontam que para um vôo na escala considerada as efemérides precisas podem substituir a estação de referência sem interferir na qualidade da imagem.

**REFERÊNCIAS**

ADS40 Documentation. **User Manual**. V. 2.01-74, p. 118-196.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE. Disponível em <<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/index.html>>; <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>. Acesso: 20 maio 2008.