

Fundamentos del AU3-Win

por Henri Audirac, Juan Carlos Villegas y Edgar Pérez

TEORÍA

Visión estereoscópica en computadoras

Hasta mas o menos recientemente, el hombre no se había percatado que la sensación de profundidad proviene de una visión estereoscópica. A través del tiempo, gente como Euclides y Leonardo entendieron que percibimos vistas diferentes con cada ojo, pero fue Charles Wheatstone quien en 1838 explicó con la ayuda de su estereoscopio, que hay una sensación única de profundidad como resultado de la disparidad ocular. Euclides, Kepler y otros se preguntaban como es que no vemos una imagen doble del mundo. Wheatstone explicó como el problema es realmente la solución, demostrando como la mente fusiona las dos imágenes planas que se forman en la retina de cada ojo, en una sola estereoscópica. A este proceso lo llamó estereopsis o "visión sólida". La visión estereoscópica es pues un sistema óptico, en el cual el último componente es la mente humana.

En el AU3-Win hemos escogido el sistema denominado arriba – abajo, que aprovecha la frecuencia de barrido vertical del monitor para en la primera mitad del ciclo mostrar la



imagen izquierda y en la segunda mitad la imagen derecha, a un observador provisto de lentes con obturadores sincronizados a dicha frecuencia.

La figura 2 muestra el sistema para la visión estereoscópica CrystalEyestm fabricado por la firma Stereographics. Consta de unas gafas con obturadores de cristal líquido que se sincronizan a la frecuencia de barrido vertical del monitor a través de una señal infrarroja del emisor que se muestra también.



Figura 2. Sistema CrystalEyes para la observación estereoscópica en computadoras

Fundamentación matemática del AU3-Win

El primer paso en el diseño del restituidor digital AU3-Win consistió en la formulación de las ecuaciones que permiten resolver de manera analítica cada una de las etapas de la fotogrametría tradicional. Es decir:

Orientación interna

Orientación relativa

Orientación absoluta

Exploración del modelo estéreo

En éste sentido se trata de una solución rigurosa que ofrece la funcionalidad y precisión de un restituidor analítico.

A continuación se describe cada uno de estas etapas.

Orientación interna

La orientación interna consiste en la primera transformación de coordenadas de imagen (columna, línea) expresadas en pixeles, a coordenadas foto expresadas en milímetros y referidas a un sistema x,y

cuyo origen está al centro de la foto. La transformación se hace siguiendo la técnica de mínimos cuadrados y se apoya sobre las coordenadas calibradas de las marcas fiduciales de la cámara aérea. La transformación es conforme y ortogonal siguiendo la siguiente relación:

$$x = aX + bY + c$$

$$y = aY - bX + d$$

donde: a,b,c,d son los coeficientes a determinar

x,y son coordenadas foto en mm.

X,Y coordenadas imagen en pixeles.

También durante esta etapa se aplica una corrección a las coordenadas foto para eliminar la distorsión radial del objetivo de la cámara aérea, siguiendo el siguiente polinomio:

$$x_p = x [1 - (a_1 + a_2r + a_3 r^2 + a_4r^3 + a_5r^4)]$$

$$y_p = y [1 - (a_1 + a_2r + a_3 r^2 + a_4r^3 + a_5r^4)]$$

donde:

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 son los coeficientes de la curva de distorsión del objetivo

X_p, Y_p coordenadas foto corregidas

r es la distancia radial dada por $(x^2 + y^2)^{1/2}$

Orientación relativa

La orientación relativa es la etapa conocida también como de eliminación de paralajes. Se resuelve de manera clásica utilizando la condición de coplanaridad la cual refiriéndonos a la figura 2 puede enunciarse como sigue: a cada punto P del terreno cuyas imágenes p1 y p2 aparecen en dos fotografías adyacentes, las líneas conjugada C1p1 y C2p2 deben estar en el mismo plano. Matemáticamente esta condición puede escribirse como:

ecuación 1

$$A1 \cdot (B \times A2) = 0$$

Donde: A1, B, A2 son vectores

x es el producto cruz

· es el producto punto

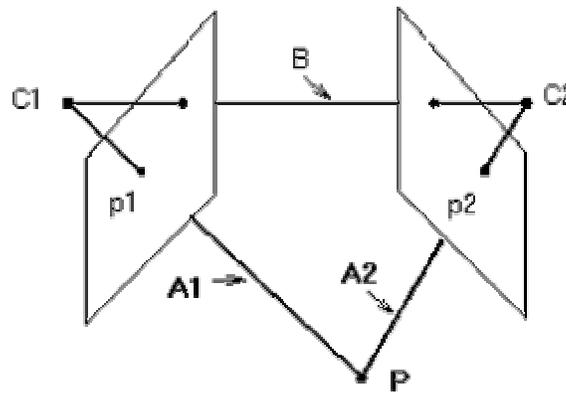


Figura 3. Condición de coplanaridad

Orientación Absoluta

La orientación absoluta se resuelve mediante la ecuación:

ecuación 2

$$X_T = I \cdot M \cdot x + X_0$$

Donde:

X_T : las coordenadas terreno

x : las coordenadas modelo

X_0 : las traslaciones que hacen corresponder el origen del sistema x con el del sistema X_T

I : el factor escala

M : matriz de rotación ortogonal

Al igual que la orientación relativa, la solución es un proceso iterativo en el que se parte de valores aproximados.

Exploración del modelo

Durante la exploración del modelo se requiere calcular la paralaje y (P_y) y su eliminación, de manera que el observador tenga una imagen estérea en todo momento.

Otro problema que se plantea durante la exploración del modelo es la elevación del cursor en coordenadas terreno la cual debe mantenerse constante mientras no se mueva el control de Z del cursor. Este algoritmo se traduce en una corrección de paralaje x (P_x)

La exploración del modelo se lleva a cabo siguiendo la serie de transformaciones siguientes:

**Coordenadas imagen -> Coordenadas foto -> Coordenadas modelo ->
Eliminación de P_y ->**

Coordenadas terreno -> Corrección de P_x

Para obtener movimientos suaves estos cálculos están optimizados en los algoritmos correspondientes.

Despliegue de vectores sobrepuestos

Una ventaja que tienen los sistemas fotogramétricos digitales son el poder mostrar sobre el modelo estéreo los vectores correspondiente a la restitución. Es decir, poder ver en tres dimensiones elementos gráficos tales como caminos, ríos, curvas de nivel, etc. que corresponden precisamente al trabajo de compilación.

Para implementar esto se requiere que los puntos X_T, Y_T, Z_T del terreno se proyecten en x,y para cada una de las dos fotos que forman el modelo, utilizando la conocida ecuación de colinearidad:

ecuación 3

$$x = \frac{(X_T - X_o)a_{11} + (Y_T - Y_o) a_{12} + (Z_T - Z_o) a_{13}}{(X_T - X_o)a_{31} + (Y_T - Y_o) a_{32} + (Z_T - Z_o) a_{33}}$$
$$y = \frac{(X_T - X_o)a_{21} + (Y_T - Y_o) a_{22} + (Z_T - Z_o) a_{23}}{(X_T - X_o)a_{31} + (Y_T - Y_o) a_{32} + (Z_T - Z_o) a_{33}}$$

donde:

f: es la distancia focal con signo negativo

a11, a12 ...: son los elementos de la matriz de orientación

Xo, Yo, Zo: son las coordenadas del centro de proyección

x,y: coordenadas foto

X_T, Y_T, Z_T: coordenadas terreno

Para resolver esta ecuación se requieren determinar los elementos de orientación y las coordenadas del centro de proyección, a partir de las coordenadas terreno de por lo menos tres puntos de los cuales se conozcan sus coordenadas foto y terreno. En el caso de tener mas de tres puntos, se obtiene una solución por mínimos cuadrados y los residuales respectivos que dan una idea de la precisión de la resección espacial.

Desarrollo del AU3-Win

El AU3-Win se desarrolló en los dos últimos años en nuestras oficinas. El código esta escrito en C++.

En cada etapa de su diseño se consideró construir un sistema para la restitución fotogramétrica comercial, con las siguientes características:

- Precisión igual o superior a la de un instrumento analítico de primer orden
- Funcionamiento en computadoras personales estándar.
- Alta productividad
- Confort para el operador
- Bajo costo.

Para la observación estérea se analizaron y estudiaron los sistemas siguientes:

- Imágenes desplegadas en colores complementarios y su observación estérea con anaglifos de color verde y rojo.
- Imágenes desplegadas en el formato entrelazado y observación con Simul-Eyes de Stereographics.
- Imágenes desplegadas en el formato arriba y abajo y observación mediante gafas 60 GX con obturadores de cristal líquido sincronizados de NuVision.
- Imágenes desplegadas en el formato de páginas alternas implementado en OpenGL, y observación mediante gafas Crystal-Eyes Wired con obturadores de cristal líquido sincronizados de Stereographics.

De los cuatro sistemas se seleccionó el tercero por consideraciones de costo, desempeño y facilidad de implementación en equipos estándar. Los requerimientos de hardware para operar el AU3-Win son:

- Computadora Intel Pentium III 800 MHz con 256 Mbytes de RAM
- Monitor que permita 1600 x 1200 pixeles a 120 Hz de frecuencia de barrido vertical.
- Mouse Intellimouse u otro mouse provisto de scroll
- Controlador estereoscópico y gafas NuVision de MacNaughton Inc.

Diálogos del Programa

Como se señaló, el AU3-Win funciona en el ambiente de Windows, con opción de diálogos en español o en inglés. A continuación se muestran algunos diálogos que ilustran la operación del AU3-Win

Datos de Calibración de la Cámara

Constantes de Calibración de Cámaras

Nombre de la Cámara:

Ubicación de las Fiduciales: Esquinas Lados

Ubicación de Panel de Datos: Arriba Derecha Abajo Izquierda

Coordenadas de las (MF) Marcas Fiduciales en mm.
MF1 X: -106 Y: 106.006
MF2 X: 106.009 Y: 106.002
MF3 X: 105.995 Y: -106.001
MF4 X: -106.008 Y: -106.001

Distancia Focal: mm.

Figura 4. Diálogo para introducir las constantes de calibración de la cámara fotogramétrica.

Orientación Interna

Orientación Interna - C:\lithos\stereo\stafe102t.tif

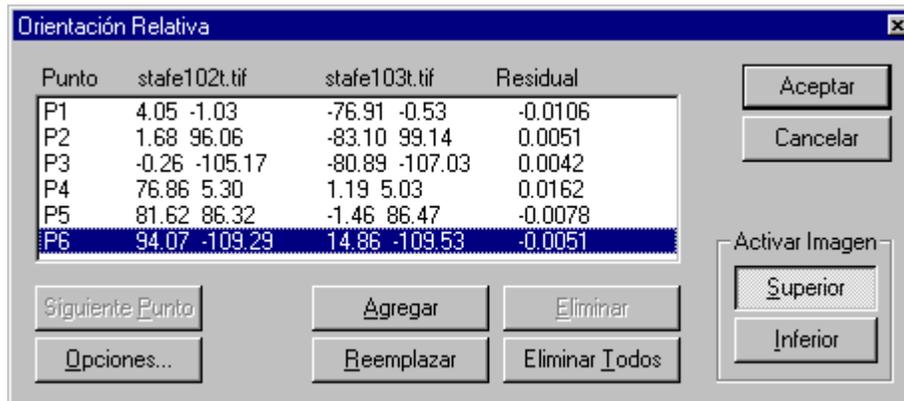
Orientación de la foto: Arriba Derecha Abajo Izquierda

Coordenadas de las (MF) Marcas Fiduciales en pixeles
MF1 X: 7543.06 Y: 375.103 << Introducir
MF2 X: 7515.49 Y: 7439.49 << Introducir
MF3 X: 451.505 Y: 7411.56 << Introducir
MF4 X: 480.130 Y: 346.083 << Introducir

Residuales (x,y)
-0.0204 0.0005
-0.0012 -0.0018
0.0025 -0.0198
0.0191 0.0211

Figura 5.- Resultados de la orientación interna mostrando residuales en mm.

Orientación Relativa

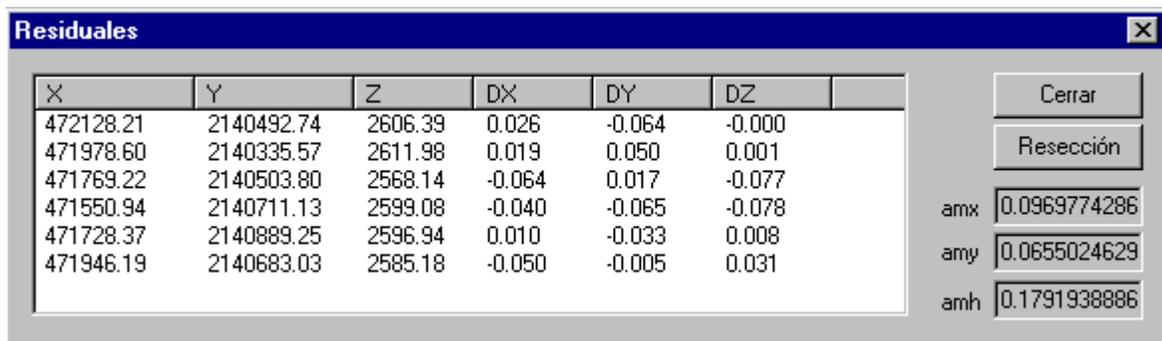


The screenshot shows a dialog box titled "Orientación Relativa" with a table of points and residuals. The table has columns for "Punto", "stafe102t.tif", "stafe103t.tif", and "Residual". The points are P1 through P6. The residual for P6 is highlighted. There are buttons for "Aceptar", "Cancelar", "Siguiente Punto", "Opciones...", "Agregar", "Eliminar", "Reemplazar", "Eliminar Todos", and "Activar Imagen" with sub-buttons "Superior" and "Inferior".

Punto	stafe102t.tif	stafe103t.tif	Residual
P1	4.05 -1.03	-76.91 -0.53	-0.0106
P2	1.68 96.06	-83.10 99.14	0.0051
P3	-0.26 -105.17	-80.89 -107.03	0.0042
P4	76.86 5.30	1.19 5.03	0.0162
P5	81.62 86.32	-1.46 86.47	-0.0078
P6	94.07 -109.29	14.86 -109.53	-0.0051

Figura 6.- Resultados de la orientación relativa mostrando la Py residual en mm, y las coordenadas foto de los puntos observados.

Orientación Absoluta



The screenshot shows a dialog box titled "Residuales" with a table of residuals and control points. The table has columns for "X", "Y", "Z", "DX", "DY", and "DZ". The residuals are listed for five points. There are buttons for "Cerrar", "Resección", and input fields for "amx", "amy", and "amh".

X	Y	Z	DX	DY	DZ
472128.21	2140492.74	2606.39	0.026	-0.064	-0.000
471978.60	2140335.57	2611.98	0.019	0.050	0.001
471769.22	2140503.80	2568.14	-0.064	0.017	-0.077
471550.94	2140711.13	2599.08	-0.040	-0.065	-0.078
471728.37	2140889.25	2596.94	0.010	-0.033	0.008
471946.19	2140683.03	2585.18	-0.050	-0.005	0.031

Figura 7.- Resultados de la orientación absoluta

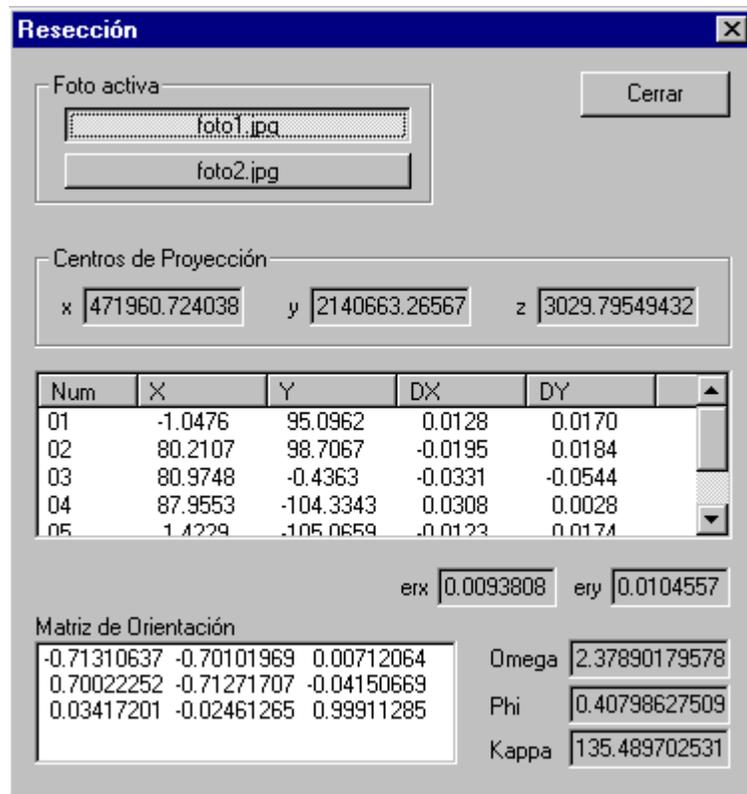


Figura 8.- Resultados de la resección inversa en el espacio, mostrando el centro de proyección y demás parámetros de orientación para la foto de la izquierda.

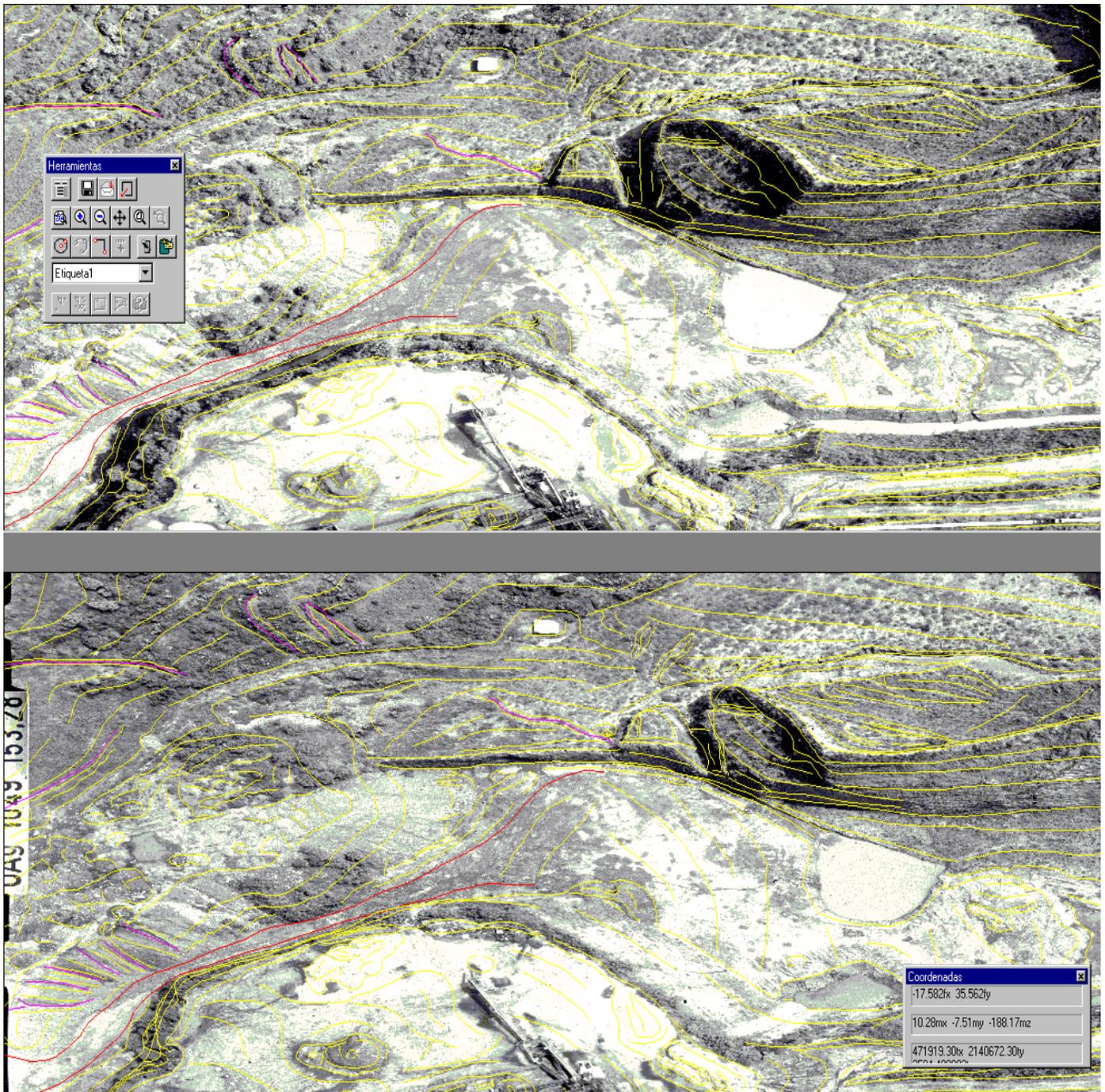


Figura 9.- Aspecto del monitor mostrando la foto izquierda (arriba) y la foto derecha (abajo) junto con los vectores sobrepuestos. Para observar el modelo en 3 dimensiones, ambas imágenes se regeneran una sobre la otra al incrementar la velocidad de barrido vertical del monitor mediante la caja de control de Crystal-Eyes. Nótese el menú flotante de comandos gráficos.

Experiencias prácticas

A fin de evaluar las posibilidades prácticas del AU3-Win como restituidor fotogramétrico en un ambiente de producción, se implementó una prueba utilizando un modelo de fotografías a escala 1:5,000 . La comparación se estableció restituyendo el modelo en tres equipos básicamente diferentes: un restituidor analógico Wild B-8, un restituidor analítico Wild AC-1 y finalmente el restituidor digital AU3-Win. Las diapositivas se escanearon en un escáner Zeiss-Intergraph a 21 mm de resolución, resultando en archivos TIFF de 120 MBytes.

Los resultados de la orientación interna, relativa y absoluta que se muestran a continuación permiten afirmar que estamos manejando precisiones semejantes a las de un equipo analítico de primer orden.

Precisión

Resultados de la orientación interna

InstrumentoResidual XResidual YB880180AC188AU3-Win57

Resultados de la orientación relativa

InstrumentoParalaje YB825AC15AU3-Win9

Resultados de la orientación absoluta.

Errores en metros.

InstrumentoResidual XResidual YResidual

ZB8.25.25.35AC1.15.18.15AU3-Win.09.06.19Otra de las pruebas de precisión del sistema formado por el escáner y el AU3-Win, consistió en escanear una cuadrícula de calibración de cristal, y constatar los errores residuales en la orientación interna y relativa, así como observar cualitativamente el modelo estéreo para determinar si existían puntos de paralaje X o Y residual. Los resultados obtenidos en ésta prueba métrica, son sumamente halagadores. En la orientación interna el error máximo fue de 10 micras, y el RMS de 2.3 y 1.5 micras en cada una de las fotos. La paralaje Y residual después de orientación relativa fue de 1.5 micras RMS.

Los resultados anteriores parecen sugerir que es posible alcanzar el mismo grado de precisión fotogramétrica considerando un factor de siete entre la escala de la foto y la del mapa. Las implicaciones prácticas de esto serían una reducción en los gastos de fotografía aérea y apoyo terrestre que se traducen en un ahorro en el costo total del proyecto del orden del 40%.

Comodidad óptica

Siendo el AU3-Win un instrumento para la producción cartográfica, es importante señalar algunos aspectos que deben tomarse en cuenta a fin de que un operador pueda trabajar cómodamente varias horas. Primeramente la resolución vertical del monitor debe ser de por lo menos 1024 líneas a 120 Hz. Debemos recordar que al entrar a modo esteresocópico, el monitor despliega en la pantalla dos imágenes de la mitad de resolución vertical y a la mitad de la velocidad de barrido vertical.

Facilidad de orientación y compilación

Una de las ventajas que ofrece un restituidor digital es que el paso de orientación del modelo se hace solamente una vez, mientras que en los equipos analógicos y analíticos hay que hacerlo cada vez que se cambian las fotografías, requiriendo de 25 a 45 minutos en un instrumento analógico y de 5 minutos en un instrumento analítico. Esto es especialmente interesante cuando se hace aerotriangulación analítica en un restituidor digital, puesto que una vez hecho el cálculo o ajuste, el operador no tiene mas que cargar el modelo que ya estará totalmente orientado.

La compilación es una operación que requiere de dexteridad y práctica del operador. A fin de ofrecer varias posibilidades, además del Intellimouse, el AU3-Win puede equiparse con una mesilla digital (3D mouse) o manivelas conectadas a codificadores rotativos para los tres ejes.

Aerotriangulación analítica con el AU3-Win

Una de las ventajas de la fotogrametría digital con respecto al método tradicional es la simplificación del proceso de aerotriangulación analítica.

El proceso de aerotriangulación por modelos independientes y restitución en equipos analógicos y analíticos tradicionales es:

Preparación -> Marcado (PUG) -> Orientación del modelo -> Medición -> Cálculo ->

Orientación -> Compilación

Por otra parte el proceso de aerotriangulación por modelos independientes y restitución en equipos digitales es:

Preparación -> Orientación del modelo -> Medición -> Cálculo -> Compilación

El AU3-Win esta provisto de las herramientas para la aerotriangulación analítica por modelos independientes mediante el ajuste simultáneo del bloque por mínimos cuadrados.

Experiencias prácticas en el uso del AU3-Win

Llevamos un año utilizando el AU3-Win en proyectos de fotogrametría. Durante éste tiempo implementamos un sistema de retro-alimentación entre el grupo de ocho operadores, (algunos de ellos con más de 15 años de experiencia en equipos analógicos y analíticos) y el grupo de programadores. Esta estrategia de desarrollo del programa nos ha permitido implementar varias herramientas que hacen del AU3-Win un sistema que compite en desempeño con equipos tradicionalmente reconocidos por su productividad tales como el Wild B8.

Algunos de las funciones implementadas como resultado del proceso anterior son:

- Correlación automática de imágenes para mantener automáticamente la marca flotante en contacto con el terreno.
- Corrección automática del giro de la foto de la derecha, para eliminar el Kappa ocasionado por la deriva en el momento de la toma, o por un giro diferencial en el momento de escanear la foto.

- Ventana para mostrar en 2D la restitución al mismo tiempo que se muestra en 3D sobrepuesta al modelo estéreo.
- Funciones de edición en línea que permiten borrar y modificar parcialmente los vectores mientras se van compilando.
- Cargado de las coordenadas ajustadas en aerotriangulación para automatizar el proceso de orientación absoluta.
- Marca estérea que cambia de intensidad de acuerdo al nivel de gris o color de la fotografía de fondo.

Conclusión

Los resultados obtenidos en proyectos fotogramétricos empleando el AU3-Win demuestran que es una herramienta de producción y de calidad superior a los equipos analógicos tradicionales. Su precisión es comparable a la de los equipos analíticos de primer orden. La primera implicación práctica del uso de los sistemas fotogramétricos digitales es que para un mismo grado de precisión se puede recurrir a un vuelo un 40% más alto. Por ejemplo, con un vuelo a escala 1/7,000 restituyendo con el AU3-Win en principio se puede obtener una cartografía de la misma precisión que empleando un vuelo 1/5,000 compilado con un instrumento analógico tipo Wild B8 o Kern PG2.

Bibliografía

1966 M. Keller and G.C. Tewinkel *Space Resection in Photogrammetry* ESSA Technical Report Coast & Geodetic Survey Technical Bulletin No. 32

1972 Gagnon P.A. *Formation des coordonnées-bande à partir des données d'un monocomparateur*. Nota técnica 6. Universidad Laval. Québec Canada.

1980 Slama Chester C., Theurer Charles, Henriksen W. Soren Editors, *Manual of Photogrammetry. Fourth Edition*. American Society of Photogrammetry

1992 Woosung Cho, Toni Schenk Resampling Digital Imagery to Epipolar Geometry International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1992 Convention, Washington D.C.

1997 StereoGraphics Co. StereoGraphics Developer's Handbook

1999 Donald L. Light *C-Factor for Softcopy Photogrammetry Photogrammetric Engineering & Remote Sensing – Journal Volume 65, number 6 pg. 667* American Society for Photogrammetry and Remote Sensing