

EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN TRES AÑOS DE CAMPAÑAS CON CÁMARA DIGITAL EN EL ICC

R.Alamús, W.Kornus, M.Pla, J.Talaya
[\[ramon.alamus;wolfgang.kornus;maria.pla;julia.talaya\]@icc.cat](mailto:ramon.alamus;wolfgang.kornus;maria.pla;julia.talaya@icc.cat)
Institut Cartogràfic de Catalunya ICC
Parc de Montjuïc
08038 Barcelona (Spain)

Palabras clave: Fotogrametría aérea, valoración de precisión, cámara digital, análisis de precisión, auto calibración

Resumen

El Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) posee dos ZEISS/INTERGRAPH (Z/I) Digital Mapping Cameras (DMC), las cuales fueron adquiridas en diciembre 2004 (DMC1-0014) y noviembre 2005 (DMC1-0026), en este artículo se analiza y evalúa la precisión en aerotriangulación, restitución y generación de MED (Modelos de Elevación Digitales) basado en los tres años de experiencias en el ICC.

En una primera sección se discuten algunos aspectos relacionados con la aerotriangulación: la precisión en la identificación y la importancia de los parámetros de autocalibración. En relación a este segundo punto se presentan dos aproximaciones para lidiar con las distorsiones residuales en la imagen virtual de la DMC: i) determinación de una malla de calibración en un campo de comprobación/calibración, la cual es sistemáticamente usada para compensar las observaciones en el espacio imagen de las distorsiones de la imagen en el ajuste de haces, y ii) el uso de un conjunto apropiado de parámetros adicionales de auto calibración en el ajuste de haces. Se ha realizado comparación de ambos métodos y una evaluación de la precisión, en términos de precisión y exactitud en puntos de comprobación independiente, y analizado el papel de parámetros adicionales de auto calibración y la validez de una malla de distorsiones para la imagen virtual de la DMC como malla de calibración. A partir de este análisis inicial puede concluirse que para asegurar alcanzar los valores teóricos de precisión anunciados por el fabricante es necesario modelar las pequeñas, pero sistemáticas, distorsiones residuales en la imagen virtual de la DMC.

En segundo lugar, se ha llevado a cabo un análisis de la precisión a lo largo de tres años de experiencia con la DMC en la cadena de producción del ICC en cada paso de la línea de producción cartográfica: aerotriangulación, generación de MED y restitución. La evaluación en aerotriangulación y restitución en diversos proyectos DMC, los cuales tienen 45 cm y 7,5 cm de TMP (tamaño medio de píxel en el terreno), es analizada a través de los años 2005, 2006 y 2007 en puntos de comprobación independientes. Estos resultados de la precisión de la DMC en aerotriangulación y restitución son comparados con los obtenidos en el ICC usando imágenes analógicas en lugar de DMC en el 2004 (debe observarse que las imágenes analógicas fueron escaneadas a 15 μm , de manera que se alcanza el mismo GSD que con la DMC bajo las mismas condiciones de vuelo). La evaluación de la precisión para la generación de MED se lleva a cabo con conjuntos independientes de datos Lidar. El análisis de la fotointerpretación esta basado en las observaciones de operadores experimentados y bien entrenados.

1 Introducción

El Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) posee dos ZEISS/INTERGRAPH (Z/I) Digital Mapping Cameras (DMC) adquiridas en diciembre 2004 (DMC1-0014) y noviembre 2005 (DMC1-0026). Con ellas ha realizado desde 2005 la mayor parte de la cartografía oficial en Catalunya, como ha venido haciendo con anterioridad con cámaras analógicas. El ICC vuela anualmente en Catalunya 15 000 km^2 con imágenes de un tamaño medio del píxel (TMP) de 45 cm dentro del marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) y una superficie de más de 500 km^2 con un TMP de 7,5 cm para realizar cartografía urbana a escala 1:1 000.

Tras estos tres años de experiencias con la DMC y de adaptar el flujo de producción cartográfica a la tecnología actual es el objetivo de evaluar el rendimiento de la DMC a través de las experiencias acumuladas y compararlo con el rendimiento estándar alcanzado antaño con las cámaras analógicas.

1.1 Breve descripción de la cámara DMC

La cámara DMC captura simultáneamente una imagen de alta resolución pancromática de 13 824 x 7 680 píxeles (longitudinal y transversalmente a la dirección de vuelo respectivamente) de 12 μm de tamaño y cuatro imágenes multiespectrales (rojo, verde, azul e infrarrojo) de 3 072 x 2 048 píxeles. La imagen de alta resolución se forma a partir de cuatro imágenes capturadas con cuatro cabezales (cámaras) pancromáticos inclinados con focal de 120 mm. Cada uno de estos cabezales cubre una cuarta parte de la imagen final, llamada imagen virtual. Las cuatro imágenes multiespectrales de baja resolución son capturadas por cuatro cabezales adicionales de focal 25 mm y con un punto de vista nadiral, recubriendo la totalidad de la imagen virtual (véanse [3], [5] y [9]).

2 Notas sobre aerotriangulación

En esta sección se discuten algunos aspectos relacionados con la aerotriangulación de proyectos con imágenes de la DMC. Los dos aspectos fundamentales considerados en esta sección son: la precisión de la identificación de objetos en las imágenes DMC en comparación a las imágenes de origen analógico y el papel de los parámetros de autocalibración en un ajuste de haces en bloques fotogramétricos DMC.

2.1 Precisión en la identificación

El formato rectangular de la DMC implica una reducción en un factor dos de la razón base-altura (B/H) al comparar con imágenes de cámaras analógicas de formato cuadrado. Inicialmente era de esperar que una mayor calidad de la imagen DMC pudiera compensar esta reducción de la razón B/H. Para analizar esta conjetura y durante el proceso de validación de la adquisición de la primera cámara DMC en Diciembre del 2004 se realizó el proyecto Amposta datos sobre los que se ha comparado el rendimiento de la identificación en aerotriangulación.

Amposta es un bloque consistente en 139 imágenes DMC distribuidas en cinco pasadas paralelas y dos pasadas transversales adicionales, volado a 800 m de altura sobre el territorio, por tanto con un tamaño de píxel de 8 cm, observaciones GPS/INS para las 139 imágenes y contiene siete puntos de apoyo y seis puntos de comprobación. Hay que destacar que este proyecto se había realizado en el año 2000 con cámara analógica.

En el vuelo analógico del 2000, escaneado a 15 μm , los puntos de apoyo y comprobación se han identificado manualmente, mientras que los puntos de enlace se han identificado semi-automáticamente. Del vuelo DMC se han realizado dos aerotriangulaciones: con identificación de puntos de enlace semi-automática y con puntos de enlace derivados automáticamente con el software de Inpho Match-AT, en ambas los puntos de apoyo y comprobación se han identificado manualmente.

	Analógico 2000 (semi-auto)		DMC 2004 (semi-auto)		DMC 2004 (Match-AT)	
	μm	pix.	μm	pix.	μm	pix.
x	4,83	0,32	2,85	0,24	1,23	0,10
y	4,27	0,29	2,35	0,20	1,12	0,09

Tabla 1: Residuos de las observaciones fotogramétricas en tres aerotriangulaciones: con imágenes analógicas e identificación semi-automática de puntos de enlace, con imágenes DMC e identificación semi-automática y con imágenes DMC con puntos de enlace derivados con Match-AT

En la tabla 1 se muestra que la precisión en la identificación en aerotriangulación mejora un factor 1,3 comparando los resultados con identificación semi-automática de la DMC con imágenes analógicas e incluso un factor 3 al comparar la identificación de Match-AT con datos DMC con la identificación semi-automática con imágenes analógicas (véase [1]).

2.2 Papel de los parámetros de autocalibración. Malla de calibración vs. Autocalibración.

En esta sub-sección se resume un análisis el papel de los parámetros de autocalibración en aerotriangulaciones con imágenes DMC, dado que varios autores han mostrado que las imágenes DMC no están exentas de errores sistemáticos (ver [1], [2], [6], [7] y [8]). Cuando estos errores no están adecuadamente modelados la orientación exterior estimada puede absorber los errores propagados en el ajuste de haces conjuntamente con los efectos de otras fuentes de error como observaciones GPS/INS pobres o una configuración de puntos de apoyo precaria (ver [1], [2] y [8]). Se ha analizado el rendimiento de dos aproximaciones diferentes para parámetros de autocalibración: i) usando un conjunto de parámetros de autocalibración en cada aerotriangulación, y ii) usando una malla de calibración de distorsiones. Ambas aproximaciones se han comparado con los resultados en aerotriangulaciones en las que no se ha usado ningún tipo de calibración o autocalibración adicional. Nótese que el conjunto de parámetros de autocalibración usado en este estudio consta de 4 grupos de 12 parámetros, uno por cabezal de alta resolución (véase [2] para más detalles).

Para proceder a este análisis se han usado cinco bloques con distintas características y configuraciones realizados en distintas fechas. Las principales características de estos bloques se describen en la tabla 2.

El procedimiento de análisis seguido es el siguiente: primero se calcula una malla de calibración de las distorsiones de la imagen virtual usando un “bloque de calibración” (en este análisis “Salou 60% \times 60%”) y en segundo lugar se compara el rendimiento, sobre puntos de comprobación, en cada uno de los cinco bloques de las tres configuraciones de ajustes de haces realizadas, a saber: i) sin aplicar malla de calibración ni parámetro adicional alguno, ii) corrigiendo las observaciones fotogramétricas según la malla de calibración determinada con anterioridad sin considerar parámetros adicionales, y iii) usando sólo parámetros adicionales de autocalibración, un grupo de 4 \times 12 parámetros de autocalibración.

	Salou 60%x60%	Salou 60%x30%	Vilafranca 60%x60%	Cervera	MTN 190
Cámara	DMC01-0014	DMC01-0014	DMC01-0014	DMC01-0014	DMC01-0014
Focal [mm]	120	120	120	120	120
Fecha vuelo	12/10/2007	02/07/2007	29/10/2007	09/08/2007	28/06/2007
Altura vuelo [m]	900	900	900	750	2200
TMP [m]	0,090	0,090	0,090	0,075	0,220
No. imágenes	230	112	175	123	595
No. pasadas (no. transversales)	10 (2)	5 (2)	5 (4)	4 (2)	10 (0)
No. puntos de apoyo	10	10	5	12	8
No. puntos de comprobación	40	40	11	7	11

Tabla 2: Principales características de los vuelos usados para evaluar las aproximaciones de calibración o autocalibración

La malla de calibración se ha derivado del bloque “Salou 60%x60%” usando una aerotriangulación con un número muy elevado de puntos de enlace (151 622 observaciones fotogramétricas en 230 imágenes correspondientes a 23 441 puntos en el espacio objeto). Se realiza un ajuste de haces sin usar parámetro adicional alguno y relajando la precisión *a priori* de las observaciones fotogramétricas. De este modo las posibles distorsiones de la imagen, juntamente, con errores de otro origen se proyectan en el espacio imagen en forma de residuos fotogramétricos. La malla de calibración se ha calculado como la media móvil ponderada (por al inversa de la distancia) de los residuos fotogramétricos en las direcciones longitudinal y transversal de la imagen. La malla generada tiene 321 x 577 nodos, correspondientes a las direcciones longitudinal y transversal del vuelo respectivamente. (Véase fig. 1a.)

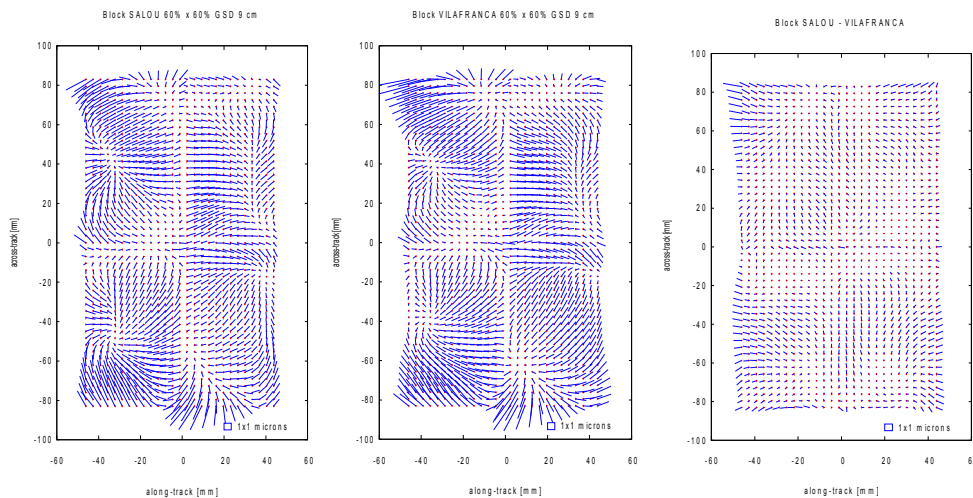


Figura 1: 1a) (izquierda) malla de calibración derivada a partir de “Salou 60%x60%”, 1b) (centro) malla de calibración derivada a partir de “Vilafranca 60%x60%” y 1c) (derecha) diferencia de las mallas de 1a y 1b

El mismo procedimiento se ha seguido con el bloque “Vilafranca 60%x60%”, similar en configuración al bloque “Salou 60%x60%”, obteniéndose una segunda malla de calibración (véase fig. 1b). En la fig. 1c se muestra la diferencia entre las dos mallas de calibración, probando que, a pesar del parecido de ambas mallas y de la pequeña diferencia de 17 días entre la adquisición de los dos conjuntos de datos existe una diferencia entre las mallas que es un indicio de la falta de estabilidad de la malla de calibración, o la limitación del método propuesto para determinarla.

En la tabla 3 se muestran los rendimientos de las tres configuraciones de ajuste de haces para los cinco bloques considerados. Nótese que los ajustes usando parámetros de autocalibración proporcionan mejor precisión que usando la malla de calibración en todos los bloques considerados, independientemente de la altura de vuelo (i.e. TMP) y de la época de vuelo respecto al bloque de calibración. Esta observación es más evidente en la fig. 2 dónde se muestra la razón entre el error medio cuadrático (RMS) de los errores en altura en los puntos de comprobación y la precisión teórica (0,05‰ de la altura de vuelo [3]) en función del tiempo desde la calibración de malla. Hay que remarcar que usando esta razón la precisión en altura es comparable independientemente de la altura de vuelo (i.e. TMP). Los resultados de las tres configuraciones de ajuste i) sin usar parámetros adicionales,

ii) usando malla de calibración y iii) usando parámetros adicionales de autocalibración corresponden respectivamente a los colores rojo, azul y verde.

Bloque	TMP [cm]	Tiempo desde calibración. [días]	No. puntos de comprobación		RMS sin ap [cm]	RMS malla [cm]	RMS 4 aps [cm]
Salou 60%x60%	9,0	0	40	X	9,9	4,9	3,5
				Y	10,3	6,0	4,8
				h	10,8	7,5	5,6
Salou 60%x30%	9,0	-71	40	X	3,2	3,0	3,2
				Y	6,4	4,1	3,0
				h	6,0	6,9	4,8
Vilafranca 60%x60%	9,0	17	11	X	5,6	3,3	3,9
				Y	7,7	4,0	3,7
				h	8,3	7,9	5,6
Cervera	7,5	-64	7	X	7,6	5,7	3,6
				Y	10,8	8,0	4,2
				h	5,7	4,5	3,1
190	22,0	-106	11	X	12,0	11,1	10,0
				Y	34,8	21,9	7,4
				h	16,9	15,3	14,8

Tabla 3: Error medio cuadrático (RMS) en los puntos de comprobación para las tres configuraciones de ajuste: sin usar parámetros adicionales (sin ap), usando malla de calibración (malla) y usando parámetros adicionales de autocalibración (4 aps)

Es de especial mención el hecho que para todos los conjuntos de datos el uso de parámetros adicionales de autocalibración proporciona una precisión en el nivel de la precisión teórica alcanzable en aerotriangulación con imágenes DMC (valores de la razón próximos a 1). La aproximación de usar una malla de calibración da resultados ligeramente inferiores al obtenido con parámetros de autocalibración.

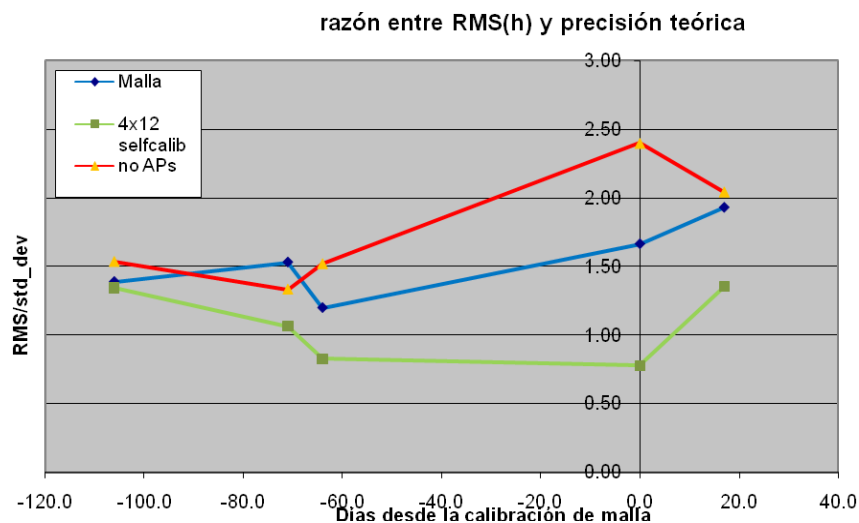


Figura 2. Razón entre el RMS en altura y la precisión teórica en altura (0.05‰ de la altura de vuelo) en puntos de comprobación independientes para todos los bloques de la tabla 1. En rojo, azul y verde se muestran los resultados correspondientes a las configuraciones de ajuste i) sin usar parámetros adicionales, ii) usando malla de calibración y iii) usando parámetros adicionales de autocalibración respectivamente

3 Evaluación de la precisión en aerotriangulación

La evaluación de la precisión de las aerotriangulaciones se ha realizado mediante la comparación de las coordenadas ajustadas en aerotriangulación contra las coordenadas de puntos de comprobación identificados en las imágenes. Estos puntos de comprobación se han determinado en el campo y son objetos fácilmente identificables en las imágenes. En el análisis se distinguen dos casos en virtud de la escala de vuelo, y equivalentemente del tamaño medio del píxel (TMP) en el terreno: pequeña y gran escala, que se corresponden a TMP de 45 i 7,5 cm respectivamente. Cada uno de estos casos se analiza en las siguientes dos sub-secciones.

3.1 Proyectos de pequeña escala

En el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) el ICC ha realizado el vuelo fotogramétrico y aerotriangulación de la mitad de Cataluña anualmente con un TMP de 45 cm, que, aproximadamente, corresponde a 5 000 imágenes DMC anuales. En el cuatrienio 2004-2007 se han procesado unas 20 000 imágenes distribuidas en 50 bloques de aerotriangulación.

El análisis del rendimiento de la DMC en aerotriangulación en comparación con el rendimiento de cámaras analógicas se realiza con el conjunto de imágenes adquiridas en el cuatrienio 2004-2007 dentro del marco del PNOA y en el entorno de producción propio del ICC. En el 2004 las imágenes usadas eran exclusivamente analógicas mientras que los datos usados en los años 2005-2007 fueron adquiridos por cámaras DMC.

En la tabla 4 se resumen las precisiones alcanzadas con las cámaras analógicas y digitales en el periodo de estudio. Hay que destacar que las precisiones alcanzadas son del mismo orden e incluso ligeramente mejores con las cámaras DMC que con las analógicas mejorando aproximadamente un 5% en todas las componentes tanto planimétricas como de altura en el promedio de los tres años de producción digital.

	RMS X [m]	RMS Y [m]	RMS H [m]	no. puntos de comprobación
Cámara analógica	0,22	0,20	0,28	90
Cámara DMC	0,21	0,19	0,26	280

Tabla 4: Precisiones alcanzadas en aerotriangulación con cámara analógica y DMC en el cuatrienio 2004-2007 en el marco del PNOA de TMP de 45 cm

En la fig. 3 se puede apreciar la evolución del tránsito analógico a digital en el ICC. Hasta el año 2004 la línea de producción cartográfica en el ICC era enteramente analógica. A partir de la adquisición de la primera cámara DMC (diciembre del 2004) se puede apreciar una evolución de la precisión que se asume al período de adaptación, aprendizaje y reajuste de la línea de producción a la nueva situación. Cabe destacar que las precisiones alcanzadas en el año 2007 son de 0,16, 0,17 y 0,25 metros para X-UTM, Y-UTM y altura respectivamente. Lo que supone una mejora del 25%,15% y 11% respectivamente para X-UTM, Y-UTM y altura al final del periodo 2004-2007.

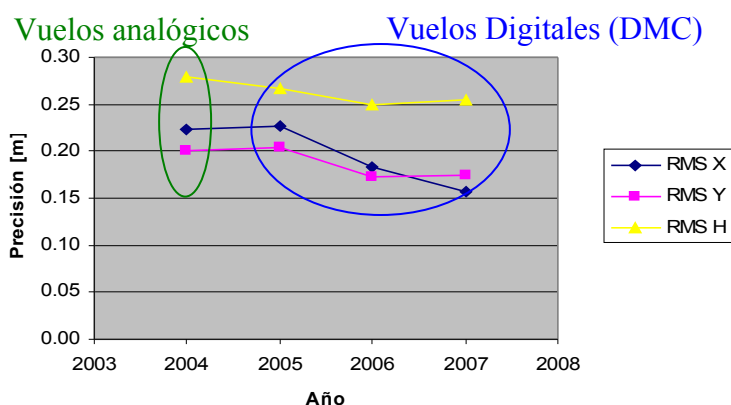


Figura 3: Evolución de la precisión en aerotriangulación en el tránsito de la producción analógica a digital

Ha de mencionarse que los puntos de comprobación han sido identificados manualmente, a menudo con visión estereoscópica, razón por la cual no se puede obtener el máximo provecho de la mayor precisión en la identificación de puntos derivados por métodos automáticos o semi-automáticos, basados en correlación de imágenes, por lo que el aumento de precisión no es tan grande como la mejora en la precisión en la identificación (ver tabla 1, sección 2.1).

3.2 Proyectos de gran escala.

El análisis de los vuelos de gran escala se ha realizado usando 25 bloques de aerotriangulación distintos realizados con MTP de 7,5 cm, correspondientes a 25 proyectos de cartografía urbana entre proyectos realizados con cámara analógica y DMC.

En la tabla 5 se resumen los resultados de este análisis, dónde se puede apreciar que en el nuevo flujo digital se mantienen las mismas precisiones que se han alcanzado regularmente con bloques de la misma escala adquiridos con cámara analógica: 3-4 cm de error medio cuadrático (rms) en las componentes horizontales y 6 cm de rms en la componente vertical. Nótese que la precisión relativa de los puntos de comprobación es del orden de los 2 cm,

y, por tanto, parte del rms mostrado en la tabla 5 puede estar afectado de forma significativa por la precisión misma de los puntos de comprobación.

	RMS X [m]	RMS Y [m]	RMS H [m]	no. puntos de comprobación
Cámara analógica	0,032	0,050	0,059	19
Cámara DMC	0,035	0,041	0,058	117

Tabla 5: Precisiones alcanzadas en aerotriangulación con cámara analógica y DMC en proyectos de TMP de 7,5 cm

4 Evaluación MED automático

En esta sección se discute sobre la precisión de Modelos de Elevación Digitales (MEDs) derivados de forma automática a partir de las imágenes aéreas analógicas y DMC de la misma zona. Se han generado tres MEDs distintos a partir de tres vuelos con distintas características. Los tres conjuntos de datos se han adquirido con una diferencia de tres años: un vuelo con cámara analógica (RC30) y TMP de 45 cm, un vuelo con DMC y TMP de 45 cm y un tercer vuelo con la DMC y TMP de 20 cm. En la tabla 6 se resumen las principales características de estos tres vuelos. Los MEDs se han generado mediante el paquete de software comercial Match-T de Inpho Company.

Cámara	RC 30	DMC	DMC
Año de vuelo	2004	2006	2007
Altura de vuelo [m]	4700	4500	2000
Focal [mm]	153	120	120
TMP [cm]	45	45	20
No. de imágenes	136	326	234
No. de pasadas	7	8	10
Recubrimiento longitudinal / transversal [%]	60 / 25	60 / 25	60 / 25

Tabla 6: Parámetros básicos de configuración de bloques

Los tres MEDs, correspondientes a cada uno de los tres conjuntos de datos, se han generado usando Match-T V 5.0 configurando el paso de malla recomendado de 30 píxeles aproximadamente, i.e. 15 m para los proyectos de TMP de 45 cm y 7,5 m para el proyecto de 20 cm de MTP. Se ha escogido la opción de suavizado ligero del MED para que esta superficie sea próxima a la nube de puntos de correlación. Durante la fase de evaluación se recibió una nueva versión de Match-T (la versión 5.1), la cual permite reducir el paso de malla del MED a 10 píxeles aproximadamente e incluso menos. Usando esta nueva versión se han generado MEDs adicionales con un paso de malla de 10 m para los proyectos de TMP de 45 cm y de 5 m y 2 m para el proyecto con TMP de 20 cm. Para la comparación sólo se han tenido en cuenta los puntos “buenos”, que son los que no han sido considerados por Match-T como puntos con baja redundancia o mala precisión.

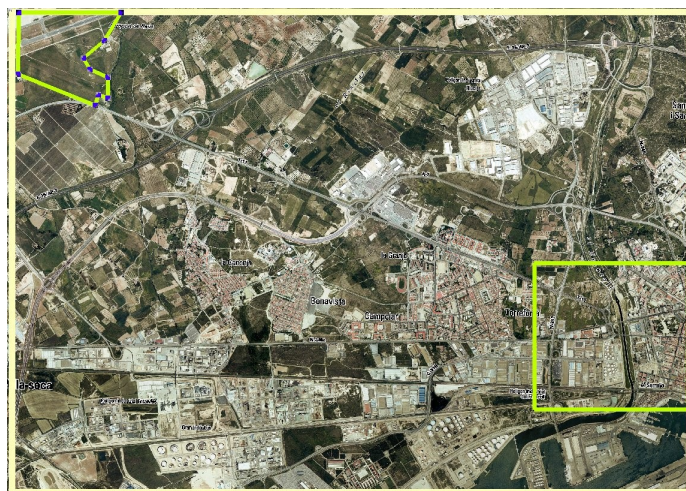


Figura 4: Área del análisis (7,6 x 5,4 km²) incluyendo las dos zonas de comprobación: la zona plana sin edificios ni vegetación alta TS_flat (arriba a la izquierda) y la zona urbana TS_urban (abajo a la derecha)

Un conjunto de datos LIDAR se ha usado como referencia independiente. Estos datos fueron adquiridos en Enero del 2007 con un sistema LIDAR OPTECH ALTM 3025 a 2 250 m de altura sobre el terreno. Este vuelo consiste

de pasadas paralelas con un 20% de recubrimiento (lateral) y una densidad media de puntos del 0,33 puntos/m² en las zonas en que no hay solape entre pasadas. Tras la clasificación de puntos del terreno “ground” se ha convertido en conjunto de datos en un MED regular con paso de malla de 2 m y con una precisión decimétrica.

La zona donde se ha realizado este análisis es una región de 7,6 x 5,4 km² cercana a la ciudad de Tarragona (ver fig. 4). La cual contiene un área de comprobación de 0,8 km² en terreno llano (TS_flat) sin edificios ni vegetación alta y otra área de 2,8 km² de zona urbana en la ciudad de Tarragona (TS_urban).

Los puntos de la malla de cada uno de los MEDs derivados de los tres conjuntos de imágenes (analógicas y DMC) se han comparado con el MED LIDAR. Los resultados están representados gráficamente en la fig. 5. Los descriptores de la figura 4_no_2 indican con el prefijo *ana* o *dig* si se trata del DEM derivado de imágenes analógicas o digitales, seguido del TMP en centímetros (45 ó 20) seguido del carácter “_”, el paso de malla del MED (15, 10 y 5 m para TMP de 45 cm y 7,5, 5 y 2 para TMP de 20 cm) y, finalmente, el sufijo “_v51” para los MEDs generados con la versión 5.1 del Match-T y sin sufijo alguno para los MEDs generados con la versión 5.

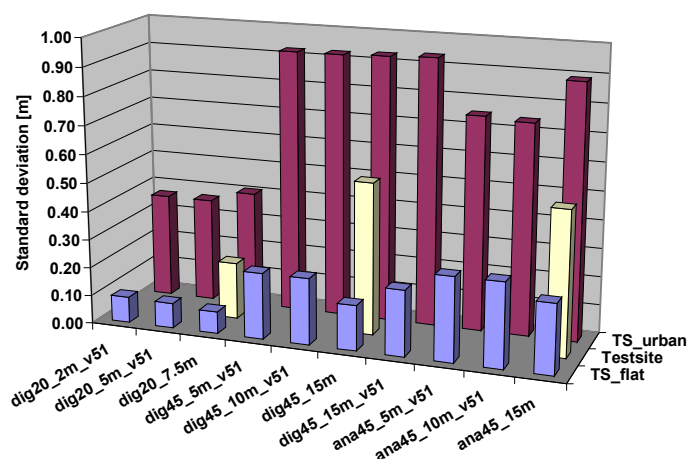


Figura 5: Precisión de los MEDs en las distintas áreas de comprobación tomando como referencia el MED LIDAR de paso de malla de 2 m.

Los MEDs derivados para toda el área de análisis i para la zona TS_flat se ha comparado con el MED regular de espaciado de 2 metros derivado del LIDAR, representando la superficie del terreno sin vegetación ni edificios. El MED calculado en la zona urbana (TS_urban) se ha comparado con la nube de puntos sin clasificar del LIDAR incluyendo de este modo también la vegetación y los edificios. Los resultados en las tres áreas representan tres niveles distintos de precisión. La desviación estándar representada en la fig. 5 se ha obtenido tras filtrar todas las diferencias cuyo valor excediera de 3-σ. En la zona TS_flat un 1-2%, mientras que en las otras zonas se ha filtrado un promedio de un 15% de las diferencias.

Los resultados más precisos se obtienen en la zona TS_flat, donde el MED LIDAR de referencia es prácticamente el terreno y los errores de interpolación son mínimos i por tanto la comparación más fiable. Los MEDs derivados de imágenes analógicas y digitales de TMP de 45 cm proporcionan el mismo nivel de precisión (1/2 píxel en el terreno aproximadamente) siendo ligeramente mejor en el caso de la DMC. La precisión alcanzada con el MED derivado de las imágenes DMC de TMP de 20 cm es de 8-9 cm, siendo esta la precisión del los datos LIDAR. Nótese que la variación del paso de malla del MED, analizada en este trabajo, no tiene un impacto significativo en la precisión del producto final.

En la zona urbana (TS_urban) los puntos de malla del MED se han comparado con los puntos sin clasificar del LIDAR. Especialmente en áreas urbanas las diferencias son mucho mayores dado que los puntos de malla del MED no pueden representar fielmente discontinuidades en altura en las aristas de edificios u otros objetos hechos por la mano del hombre. En la fig. 6 se ilustra este hecho, mostrándose un perfil donde los puntos LIDAR sin clasificar (en blanco) y los puntos de malla del MED con un espaciado de 1 m derivado de imágenes DMC con TMP de 20 cm (en rojo) difieren en las aristas de las edificaciones debido a las propiedades intrínsecas de los MEDs calculados por correlación entre imágenes, detalles que pueden resolverse con LIDAR pero no con técnicas de correlación de imágenes. Las precisiones obtenidas con TMP de 45 cm con imágenes analógicas son ligeramente mejores. Sin embargo los MEDs de paso de malla de 10 y 5 m (derivados de imágenes analógicas) muestran huecos dónde la mayor parte de los puntos han sido clasificados de baja redundancia o mala precisión. En cambio, los MEDs de paso de malla de 10 y 5 m derivados de imágenes DMC de TMP de 45 cm han podido extraerse sin problemas.

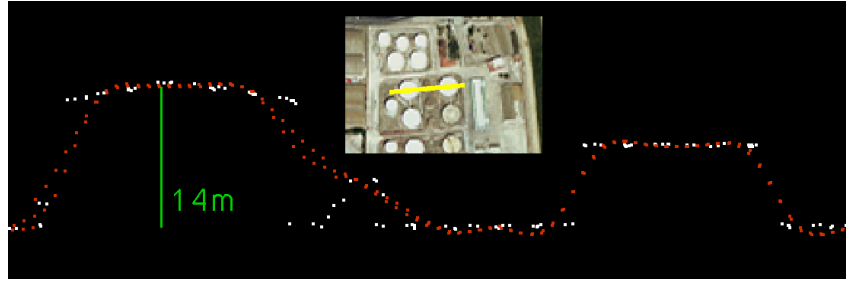


Figura 6: Perfil de las diferencias entre puntos LIDAR (en blanco) y puntos de la malla de un DEM derivado de imágenes DMC (en rojo)

Finalmente se ha calculado un MED comprendiendo toda la zona y se ha comparado con el MED LIDAR regular de paso de malla de 2 m. En este caso la desviación estándar alcanzada, después del filtrado de diferencias que superan el límite de $3\text{-}\sigma$ (en su mayoría puntos en edificios o vegetación), corresponde aproximadamente al TMP.

5 Evaluación de la precisión en restitución

Como en el caso de la aerotriangulación, en la sección 3, la evaluación de la precisión en restitución se ha evaluado mediante la comparación las coordenadas de puntos de comprobación medidos usando una estación estéreo digital de restitución con las coordenadas de estos puntos determinadas en el campo independientemente de la aerotriangulación.

5.1 Proyectos de pequeña escala

La Base de datos Topográfica de Catalunya a escala 1:5 000 (BT-5M) está generada a partir de la restitución de vuelos de pequeña escala (formado por imágenes con TMP de 45 cm). La precisión de esta base de datos, de acuerdo a las especificaciones técnicas, es de 1 m y de 1,5 m en las componentes X e Y y en la componente H respectivamente, en el 90% de los puntos que pueden estar bien identificados en visualización estereoscópica. Los puntos de comprobación usados en la evaluación de la precisión de la BT-5M son puntos de apoyo en aerotriangulaciones de grandes escalas que no han sido usados en las aerotriangulaciones en que se basa la BT-5M.

	RMS X [m]	RMS Y [m]	RMS H [m]	no. puntos de comprobación
Cámara analógica	0,48	0,51	0,71	2178
Cámara DMC	0,52	0,49	0,82	101

Tabla 7: Precisión en restitución en puntos de comprobación independientes en imágenes de TMP de 45 cm

En la tabla 7 se resumen las precisiones alcanzadas con TMP de 45 cm tanto para cámaras analógicas como para la DMC. Nótese que las precisiones alcanzadas en las componentes horizontales son comparables entre las imágenes analógicas y DMC, y que hay una pequeña degradación de la precisión en altura que podría ser consecuencia de la peor relación B/H de las imágenes DMC. No obstante hay que remarcar que a pesar de esta pequeña degradación en la precisión altimétrica de la BT-5M las precisiones obtenidas están dentro de las especificaciones del producto, tal como está reflejado en la tabla 8.

	90% X [m]	90% Y [m]	90% altura [m]
Cámara analógica	0,80	0,83	1,17
Cámara DMC	0,85	0,81	1,36
Especificaciones BT-5M	1,00	1,00	1,50

Tabla 8: Precisión del 90% de los puntos y especificaciones requeridas para TMP de 45 cm

5.2 Proyectos de gran escala

La restitución de vuelos de gran escala (TMP de 7,5 cm) se usa principalmente para la generación de cartografía urbana a escalas de mapa 1:1 000. Las especificaciones técnicas requeridas a estas escalas son de 20 cm y de 25 cm para X e Y y para H respectivamente, en el 90% de los puntos que pueden estar bien identificados en visualización estereoscópica.

	RMS X [m]	RMS Y [m]	RMS H [m]	no. puntos de comprobación
Cámara analógica	0,105	0,097	0,062	27
Cámara DMC	0,087	0,091	0,103	29

Tabla 9: Precisión en restitución en puntos de comprobación independientes en imágenes de TMP de 7,5 cm

En la tabla 9 se resumen las precisiones alcanzadas con TMP de 7,5 cm tanto para cámaras analógicas como para la DMC. Nótese que, como en el caso de la pequeña escala, las precisiones alcanzadas en las componentes horizontales son comparables entre las imágenes analógicas y DMC, y que hay una degradación de la precisión en altura que podría ser consecuencia de la peor relación B/H de las imágenes DMC. No obstante, y como en la pequeña escala, las precisiones obtenidas están dentro de las especificaciones requeridas como está reflejado en la tabla 10.

Cabe remarcar que en el caso de las imágenes digitales la precisión vertical es sólo ligeramente peor que la precisión horizontal siendo ligeramente mejor que ésta en el caso de las imágenes analógicas. Se asume que este ligero deterioro de la precisión en altura es debido a la peor relación B/H de la DMC, que el caso de aerotriangulación tiene menor impacto al medirse, los puntos de comprobación, en tres o más haces mientras que en restitución las medidas son todas de sólo dos haces.

	90% X [m]	90% Y [m]	90% altura [m]
Cámara analógica	0,173	0,160	0,102
Cámara DMC	0,143	0,150	0,169
Especificaciones escala 1:1000	0,200	0,200	0,250

Tabla 10: Precisión del 90% de los puntos y especificaciones requeridas para TMP de 7,5 cm

6 Notas sobre fotointerpretación

Para analizar los cambios en fotointerpretación que se derivan del uso de imágenes DMC en el proceso de restitución se ha considerado la opinión de operadores expertos con más de cinco años de experiencia con imágenes analógicas. A continuación se presenta una lista de ventajas e inconvenientes en orden decreciente de importancia.

La primera ventaja a considerar es la mayor capacidad de distinguir objetos con menor contraste que se traduce en la mayor capacidad de distinguir objetos en zonas de sombra. La principal consecuencia de este hecho es que ha sido posible aumentar el periodo de vuelo a lo largo del año, incluyendo el invierno, dando mayor flexibilidad al flujo de trabajo para vuelos de gran escala orientados a cartografía de escala 1:1 000. En cambio en los vuelos de pequeña escala no se puede aumentar el periodo de vuelo debido a que los requerimientos en radiometría para generar ortofotos imponen que los vuelos se realicen de Mayo a Septiembre. En vuelos de gran escala la digitalización se completa con trabajo de campo para obtener la cartografía urbana requerida. Potencialmente y gracias a este mayor contenido de información en las imágenes, aunque no ha podido realizarse un análisis todavía, la digitalización de un mayor número de objetos en vuelos de gran escala podría reducir el trabajo de campo adicional necesario. No obstante esta reducción se estima no mayor al 4 ó 5 por ciento.

La segunda ventaja es que las imágenes de la DMC suelen ser más nítidas que las obtenidas con cámaras analógicas en cualquier escala de vuelo y, por tanto, la vectorización digital resulta más comfortable para los operadores.

El principal inconveniente es la reducción de sensación de relieve debido a la menor relación B/H. En vuelos con TMP de 7,5 cm resulta difícil medir objetos de menos de 20 cm de altura, como por ejemplo aristas de bordillos o railes de ferrocarril. Este tipo de medidas de pequeña altura son posibles usando imágenes de cámaras analógicas. Esta pequeña imprecisión en altura introduce cierta sensación de inseguridad e incomodidad en el proceso de restitución.

Otro inconveniente es el gran contraste entre zonas oscuras y brillantes, que si el sistema fotogramétrico no incluye herramientas, más o menos, automáticas para efectuar mejoras radiométricas dinámicamente en restitución hace que el proceso de digitalización sea más costoso que usando imágenes de origen analógico.

El último inconveniente a mencionar es la menor superficie recubierta por un modelo DMC, que implica manejar el doble de archivos (imágenes) que en el caso de imágenes de origen analógico, representando un coste adicional en restitución si el sistema de restitución no dispone de herramientas para cambiar automáticamente de modelos estereoscópicos.

7 Conclusiones

En este artículo se ha evaluado la precisión en la identificación de objetos en la imagen en aerotriangulación, alcanzando el nivel de un décimo de pixel con métodos automáticos de generación de puntos de enlace. También se ha evaluado el uso de mallas de calibración en aerotriangulación en comparación con el uso de parámetros adicionales de autocalibración en su capacidad de manejarse con la propagación de errores causada por errores sistemáticos no modelados (en particular pequeños errores sistemáticos en el espacio imagen) en el ajuste de

haces. La malla de calibración, o el método propuesto para obtenerla, no es capaz de aislar distorsiones en la imagen de errores de distinto origen que intervienen en el ajuste de haces. Un conjunto de parámetros adicionales de autocalibración adecuado a las características geométricas de la DMC muestra una ligera superioridad, comparándolo con una malla de calibración, independientemente de altura de vuelo o el tiempo que ha transcurrido desde la determinación de la malla de calibración. Es de especial mención que con el uso de parámetros de autocalibración adecuados se alcanzan habitualmente las precisiones teóricas estimadas en aerotriangulación.

Tras tres años de producción con la cámara DMC se ha probado que se alcanzan rutinariamente en aerotriangulación precisiones de $\frac{1}{2}$ píxel en la componente horizontal y de $\frac{2}{3}$ de píxel en la componente vertical en puntos de comprobación independientes. También se ha probado que, a pesar de la reducción de la razón B/H, la precisión en altura mejora ligeramente en comparación a vuelos analógicos.

DEM generados automáticamente a partir de imágenes DMC y analógicas han probado alcanzar precisiones similares con pequeñas ventajas para los obtenidos de cámara digital. La comparación con datos LIDAR prueba que la precisión en altura alcanzable es de $\frac{1}{2}$ píxel en zonas planas sin vegetación ni edificios, llegando a degradarse hasta los 2 píxeles (aprox.) en zonas urbanas.

La mayor capacidad de extracción de información en los modelos estereoscópicos DMC (comparados con los analógicos) ha permitido extender el periodo de vuelo sin merma en el confort del proceso de restitución. Hay una reducción de la sensación de relieve y una ligera reducción en la precisión en altura debido a la reducción de la razón B/H, que, sin embargo, no compromete el cumplimiento de los requerimientos en precisión del producto final, alcanzándose de forma rutinaria en proyectos de producción precisiones de 1,1 píxeles en planimetría y 1,5 píxeles en altimetría. No obstante, más herramientas automáticas para la manipulación y visualización de imágenes y modelos son necesarias para optimizar el rendimiento en el proceso de restitución.

Agradecimientos

Es de merecido agradecimiento el costoso trabajo realizado por M. Cabré, J. Costa, J. Marimón y A. Serrano, entre otros compañeros, del ICC por la selección y medida de puntos de comprobación en la evaluación de la precisión de la DMC en aerotriangulación y restitución.

Referencias

- [1] Alamús, R., Kornus, K., Palà, V., Pérez, F., Arbiol, R., Bonet, R., Costa, J., Hernandez, J., Marimón, J., Ortiz, M.A., Palma, E., Pla, M., Racero, S. and Talaya, J., 2005. Validation process of the ICC digital Camera. ISPRS Hannover workshop 2005 on "High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information." 6 páginas (en CD-ROM).
- [2] Alamús, R., Kornus, W. and Talaya, J., 2006. Studies on DMC geometry. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60 (6): 375-386.
- [3] Dörstel, C., 2003. DMC - Practical Experiences and Photogrammetric System Performance. Photogrammetric Week 2003 (Ed. D. Fritsch). 292 páginas: 59-65.
- [4] Grün, A., 1979. Self-calibration versus Testfield calibration (Results from Jämijärvi, Willunga and Kapunda testfields). ISP Working group III/3. Aalborg /Denmark May 17-18. 24 páginas.
- [5] Hinz, A., 1999. The Z/I Digital Aerial Camera System. Photogrammetric Week 1999. (Eds. D. Fritsch and R. H. Spiller). 380 páginas: 109-115.
- [6] Honkavaara, E., Ahokas, E., Hyypä, J., Jaakkola, J., Kaartinen, H., Kuittinen, R., Markelin, L. and Nurminen, K., 2006. Geometric test field calibration of digital photogrammetric sensors. . ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60 (6): 387-399.
- [7] Honkavaara, E., Jaakkola, J., Markelin, L. and Ahokas, E., 2006. Theoretical and empirical evaluation of geometric performance of multi-head large format photogrammetric sensors. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (1): 56-61. 6 páginas (en CD-ROM).
- [8] Schroth, R.W., 2007. Large format digital cameras for aerial survey of geospatial information. FIG Working Week 2007. 15 páginas (en CD-ROM).
- [9] Zeitler, W., Dörstel, C. and Jacobsen, K., 2002. Geometric Calibration of the DMC: Method and Results. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34 (1): 324-333. 6 páginas (en CD-ROM).