

Molina Blázquez, S., Redondo Fernández, J., Zamorano Páez, M.D., Hermosilla Carrasquilla, A., Caturla Montero, C. (2010): Producción de ortofotos expeditas de Andalucía en el marco PNOA. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 237-253. ISBN: 978-84-472-1294-1

PRODUCCIÓN DE ORTOFOTOS EXPEDITAS DE ANDALUCÍA EN EL MARCO PNOA

*Sergio Molina Blázquez¹, Jesús Redondo Fernández¹, M^a Dolores Zamorano Páez¹, Aurora Her-
mosilla Carrasquilla², Cristina Caturla Montero²*

(1) Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A, C/ Valentín Beato, 6. 28.037, Madrid. smb@tragsa.es.

(2) Instituto de Cartografía de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Vivienda. Junta de Andalucía. C/San Gregorio, 7. 41004, Sevilla. aurora.hermosilla@juntadeandalucia.es.

RESUMEN

El elevado grado de automatización de tareas en la actual producción de Ortofotos Digitales, y la disponibilidad de datos cada vez más precisos y actualizados, tanto derivados del vuelo, como de las bases cartográficas numéricas, permiten obtener soluciones más fiables y de mayor calidad, tanto a nivel métrico como radiométrico, en plazos muy reducidos de tiempo.

La utilización de tecnologías de última generación, como son las Cámaras Fotogramétricas Digitales de gran formato dotadas de dispositivos de navegación precisa y de orientación directa basados en sistemas GPS/INS, apoyada por la infraestructura GNSS y la Base Altimétrica de Modelos Digitales de Elevación y de Puntos de Apoyo que mantiene actualmente el ICA, y los sistemas de producción masiva de Fotogrametría Digital, han hecho posible obtener resultados hasta ahora complicados a nivel práctico.

En este artículo se describe el método de producción de Ortofotos Expeditas implantado en el ICA a partir de los vuelos de Andalucía 2008-2009 y los resultados obtenidos en los controles de calidad de las mismas en el marco del proyecto PNOA, que se ha realizado previa a la elaboración de las ortofotos rigurosas de acuerdo a las especificaciones del proyecto, con el fin de atender las necesidades perentorias de los usuarios.

Palabras Clave: PNOA, Ortofoto Expedita, Orientación Directa, Modelos Digitales, Puntos de Apoyo.

ABSTRACT

High standards in Tasks Automation required in current Digital Orthophoto Production, plus increasingly accurate and updated dataset availability, both derived from the flight itself and from available cartographic numeric datasets, enable obtaining short term trustworthy and quality solutions, regarding both metric and radiometric requirements.

The usage of last generation technologies, such as Large Format Digital Aerial Cameras, integrating built-in precise navigation and direct orientation devices based on GPS/INS systems, with the support of GNSS Network and Altimetric Database of Digital Elevation Models and Ground Control Points, currently under maintenance and update of the ICA, and Digital Photogrammetric Massive Production Systems, have made possible to obtain satisfactory outcomes in an- up to now- complex field from the practical and effectiveness perspective.

In this presentation we focus on the Expedite Ortho Production Method established in the ICA on the basis of 2008-2009 imagery Andalusian flights, and quality control outcomes obtained from them, in the context of PNOA Project, which has been previously held to the built up of rigorous orthophotos, according the Project specifications, in order to fulfil users' requirements.

Key Words: PNOA, Expedite/Rapid Ortho, Direct Orientation, DEM, GCP.

INTRODUCCIÓN

Desde el año 2001 la Junta de Andalucía lleva a cabo el Programa Andaluz de Ortofotografía cuyo objetivo es elaborar una ortofoto digital de la región que cubra las necesidades que se plantean desde sus distintas Consejerías. Dentro de este Programa la primera cobertura completa de la Comunidad se abordó en los años 2001-2002 a escala 1:5.000 a partir de un vuelo a escala 1/20.000 en B/N. Como continuación y entre los años 2004-2007 se realizó una segunda cobertura de similares características geométricas, en 2004/2005 a partir de un vuelo en infrarrojo falso color, como variante de valor añadido sobre el planteamiento inicial con película pancromática, y a partir de 2006, ya con tecnología digital, a partir de un vuelo multiespectral de 35 cm de resolución.

Con el objetivo de una mejor administración de los recursos y ante la demanda y creciente uso de esta información espacial por parte de distintos colectivos, entre los años 2004 y 2007, la Junta de Andalucía establece una colaboración con la Administración General del Estado representada por el Instituto Geográfico Nacional para el intercambio de información derivada de la producción los proyectos de ortofotografía.

Dicha colaboración se plasma en forma de un convenio que establece una serie de compromisos entre ambas Administraciones, y que se reflejó en una serie de trabajos complementarios que culminaron en el año 2007, y que se erigieron como los inicios de la participación de la Comunidad Autónoma de Andalucía en el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

En el año 2008 y ya dentro del ámbito del PNOA se plantea elaborar una nueva cobertura a 50 cm color en dos años. Suponía un importante reto puesto que se reducían los plazos de producción a la mitad. Ante esta situación y teniendo en cuenta la experiencia acumulada en los años anteriores, se decidió elaborar una ortofotografía expedita previamente a la rigurosa que garantizara disponer de la información con gran rapidez para preservar el valor añadido que supone la actualidad de los datos.

ESTADO DEL ARTE

El elevado grado de automatización de tareas en la actual producción de Ortofotos Digitales ha creado una gran confusión en el mercado de la Fotogrametría, al encontrarnos con un gran abanico de soluciones de aparentemente similares características técnicas y una amplia disparidad de precios y plazos "reales" de disponibilidad.

Con el fin de establecer una clasificación de Ortofotos en función de su grado de elaboración y revisión, y por tanto de su fiabilidad y calidad, tanto geométrica (general y local, relativa y absoluta) como radiométrica (continuidad y homogeneidad, interpretabilidad, realismo) así como de su grado de aplicabilidad o alcance a distintos propósitos (cartográficos generales, medioambientales, agrarios, cartográficos específicos, etc), se han agrupado los parámetros básicos que influyen en la producción de ortofotos, analizando cuales de ellos se cumplen en los distintos tipos de producto, de manera que el usuario final sea capaz de decidir si éste se ajusta o no a sus necesidades.

Actualmente las Ortofotos Digitales se pueden clasificar en tres categorías, independientemente de su resolución geométrica o espectral (clasificación PNOA):

- Ortofoto Expedita. (puede denominarse también Ortofoto Express) Emplea habitualmente el método de orientación directa, un modelo digital del terreno preexistente, un método automático de trazado de líneas de mosaico, y no aplica correcciones ni ajustes radiométricos a las imágenes. Se trata por tanto de una ortofoto que se puede producir en un periodo de tiempo muy corto, porque aprovecha mucha información preexistente y los parámetros de orientación que se derivan directamente del vuelo. Se puede generar como producto en sí mismo, en un proceso de producción de ortofoto rigurosa como un avance de resultados, o puede calcularse "On The Fly" con un Sw específico, con el inconveniente de que los modelos matemáticos empleados en estos casos no suelen ser rigurosos para simplificar los cálculos.
- Ortofoto Rápida. Aquella que utiliza el método de orientación indirecta, con puntos de apoyo y/o chequeo de archivo o nuevos, un modelo digital del terreno existente, un método automático de trazado de líneas de mosaico, y un ajuste radiométrico automático. Puesto que requiere de las fases de aerotriangulación y apoyo, se puede considerar como un subproducto resultante del proceso de producción que se adelanta al producto final. Puede igualmente considerarse un producto en sí mismo, y si se dispone

de puntos de apoyo y/o chequeo de archivo, el plazo de disponibilidad sigue siendo corto. La principal diferencia respecto a la anterior Ortofoto Expedita es que emplea información contrastada de orientación de imágenes obtenida mediante técnicas de aerotriangulación, en lugar de los datos de orientación directa derivados del sistema GPS/INS.

- Ortofoto Rigurosa. Aquella que utiliza el método de orientación indirecta, con puntos de apoyo y/o chequeo de archivo o nuevos, un modelo digital del terreno existente revisado o nuevo, un método automático de trazado de líneas de mosaico con revisión, y una corrección y ajuste radiométrico de las imágenes.

Evidentemente, esta es una primera clasificación que aún permite una gran diversidad de productos, sobre todo en lo que se refiere a ortofotos rigurosas, en función de las tolerancias técnicas exigidas (por ejemplo si se basan en normas ASPRS o en normas nacionales) y los subproductos o documentos solicitados.

En la tabla 1 se detallan las principales características de los productos descritos. Lo más destacable es el aumento de fiabilidad de producto a medida que se introducen procesos intermedios de revisión, lo que se traduce, por el contrario, en un retraso en el plazo de disponibilidad y un mayor coste de producción.

Resulta imprescindible realizar un control de calidad sobre cualquier producto, bien controlando cada una de las fases del proceso de producción individualmente, bien realizando un control sobre producto final. En cualquier caso, se considera que toda ortofoto debe ser acompañada de un informe técnico que cuantifique su precisión geométrica y su calidad radiométrica, pues en caso contrario, no existe ninguna garantía sobre sus características técnicas, con independencia de la denominación que se le otorgue.

Tabla 1. Características de producto:

FASE	Parámetro	Ortofoto Expedita	Ortofoto Rápida	Ortofoto PNOA (Rigurosa)
VF	GSD/ Escala de vuelo	22 ó 45 cm 1/18,000 ó 1/30,000	22 ó 45 cm 1/18,000 ó 1/30,000	22 ó 45 cm 1/18,000 ó 1/30,000
	Resolución radiométrica	RGB 24 bit	RGB 24 bit	RGBI 32 bit ó RGB (24 bit) - NIR (8 bit)
Orientación Sensor	Apoyo terrestre	NO	Archivo y nuevo	Archivo y nuevo
	Orientación Directa (GPS/INS)	SI	NO	NO
	AT Automática GPS / INS	NO	SI	SI
EL	Fuente del MDT Revisión	Archivo Sin revisión	Archivo Sin revisión	Archivo o nuevo Con revisión
	Resolución MDE	10 a 50 x GSD de Orto	10 a 50 x GSD de Orto	5 x 5 m
	Líneas de ruptura	NO	NO	Naturales y artificiales
	MDS	NO	NO	SI (MDT + LR)
	Precisión MDE	RMSE Z<2 m (OF 25 cm) RMSE Z<4 m (OF 50 cm)	RMSE Z<2 m (OF 25 cm) RMSE Z<4 m (OF 50 cm)	RMSE Z<1 m (OF 25 cm) RMSE Z<2 m (OF 50 cm)
	Emax Z en el 95% de los casos	No establecido	No establecido	2 m (OF 25 cm) 4 m (OF 50 cm)
	Emax Z	No establecido	No establecido	4 m (OF 25 cm) 8 m (OF 50 cm)

OF	Resolución geométrica	25 ó 50 cm	25 ó 50 cm	25 ó 50 cm
	Resolución radiométrica	RGB 24 bit	RGB 24 bit	RGB 24 bit - CIR 24 bit ó RGBI 32 bit
	Mosaico (líneas de costura)	Automático	Automático	Automático con revisión manual
	Balance cromático	Automático	Automático	Análisis estadístico y visual
	Geometría interna: Deformaciones	Apreciables a la escala de representación Localizables en: - Orografía acentuada - Elementos artificiales	Apreciables a la escala de representación Localizables en: - Orografía acentuada - Elementos artificiales	No apreciables a la escala de representación
	Geometría interna Desplazamientos	?	Puntuales < de 4 píxeles	< de 2 píxeles
	Escala de representación	1/5.000 (OF 25 cm) 1/10.000 (OF 50 cm)	1/5.000 (OF 25 cm) 1/10.000 (OF 50 cm)	1/2,500 (OF 25 cm) 1/5,000 (OF 50 cm)
	Precisión	RMS X,Y < ? (OF 25 cm) RMS X,Y < ? (OF 50 cm)	RMS X,Y < 1 m (OF 25 cm) RMS X,Y < 2 m (OF 50 cm)	RMSXY < 0,5m (OF 25 cm) RMSXY < 1 m (OF 50 cm)
	E _{max} X,Y en el 95% de los casos	?	2 m (OF 25 cm) 4 m (OF 50 cm)	1 m (OF 25 cm) 2 m (OF 50 cm)
	E _{max} X,Y	?	No establecido	2 m (OF 25 cm) 4 m (OF 50 cm)
	Fiabilidad	Baja	Media	Alta
Disponibilidad	Muy Alta	Alta	Baja	
MET	METADATOS	Mínimos	Mínimos	Completos

Las ortofotos planteadas por la Junta de Andalucía responden a la calidad de las ortofotos rigurosas PNOA de 50cm, que de acuerdo al planteamiento del proyecto, cubren las necesidades técnicas y los periodos de renovación de los principales usuarios de la Administración. No obstante, aunque los plazos de producción se ven reducidos con respecto a la anterior cobertura, la necesidad de disponer de datos cada vez más actuales para cubrir todo el espectro de aplicaciones, unido a las prestaciones que ofrecen los actuales sistemas de producción y la disponibilidad de datos de partida derivados de las coberturas anteriores y del propio vuelo, hacen posible plantear una ortofoto expedita como anticipo de la rigurosa.

ZONA DE ESTUDIO

La Ortofoto Expedita se plantea sobre todo el territorio de la Comunidad Autónoma de Andalucía, respetando los ámbitos definidos en las coberturas previas por cuadrantes, tal como se muestra en la Figura 1. En 2008 se realiza el vuelo de los cuadrantes SW y SE, mientras que en 2009 se realiza el vuelo de los cuadrantes NW y NE. Las ortofotos expeditas se realizan una vez finalizados los controles de calidad de los correspondientes vuelos.

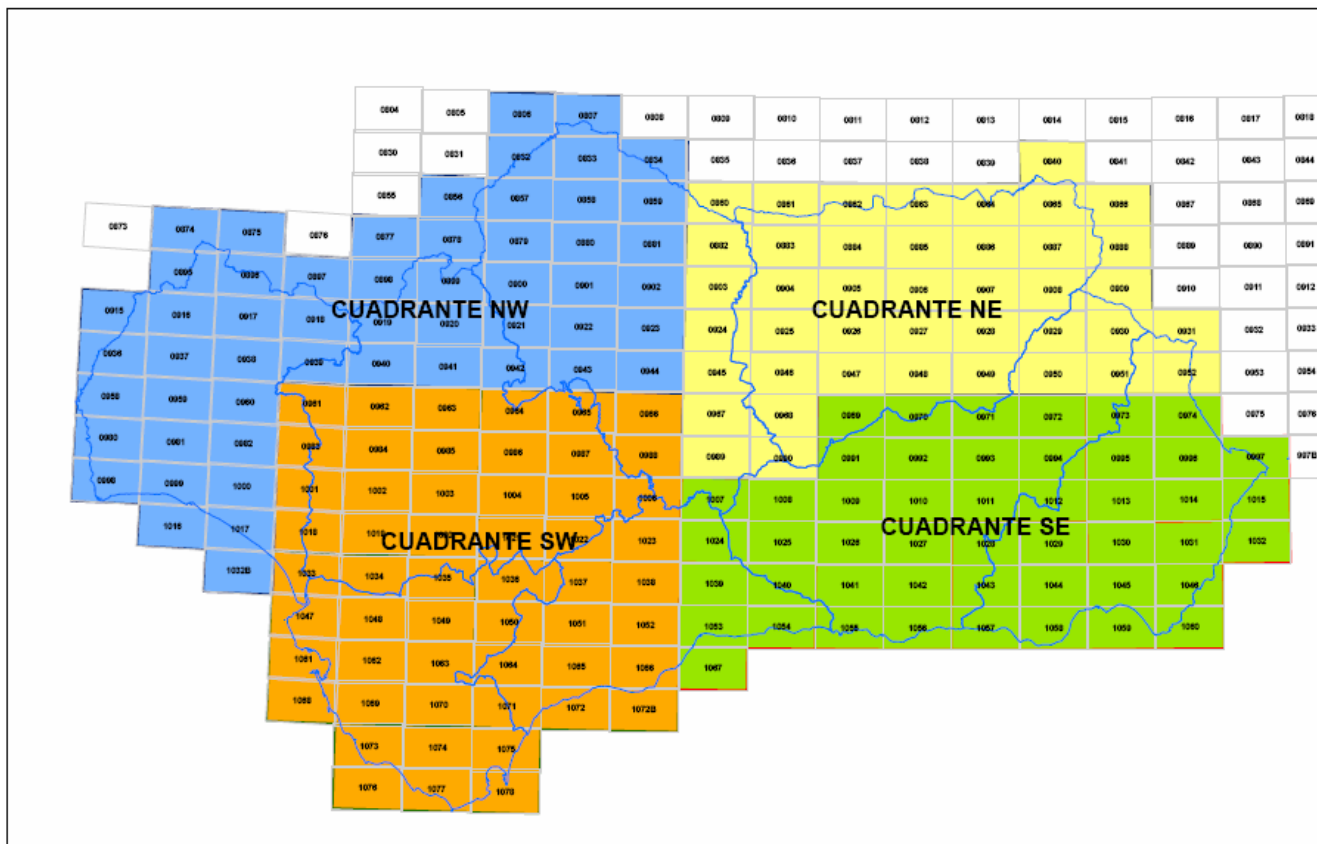


Figura 45. Coberturas de Ortofoto PNOA planificadas en la C.A de Andalucía. Los cuadrantes SW, SE corresponden al vuelo 2008, y los cuadrantes NW y NE al vuelo 2009.

DATOS DE PARTIDA

El vuelo de 2008 se realiza con un GSD de 22,5 cm para el cuadrante SE, y con un GSD de 45cm para el cuadrante SW, respondiendo al planteamiento PNOA de obtener una cobertura de 25cm cada 4 años completando la cobertura del territorio cada dos años con una ortofoto rápida de 50cm. Este planteamiento, que no satisfacía las necesidades de la Junta, se abandona rápidamente completando la cobertura de vuelo en 2009 con un GSD de 45 cm, y generando todas las ortofotos a 50 cm, tanto en su versión rigurosa, como en la versión expedita. En la Figura 2 se muestra el gráfico de fechas de los distintos vuelos.

El vuelo lo realizan tres compañías con distintas cámaras, una de ellas emplea la UltraCam D de la firma Vexcel, mientras que las otras dos emplean DMC de Intergraph. Las especificaciones técnicas exigidas en el vuelo se establecen en base a criterios normalizados PNOA, con las particularidades de Andalucía respecto a la red permanente de posicionamiento y a productos específicos.

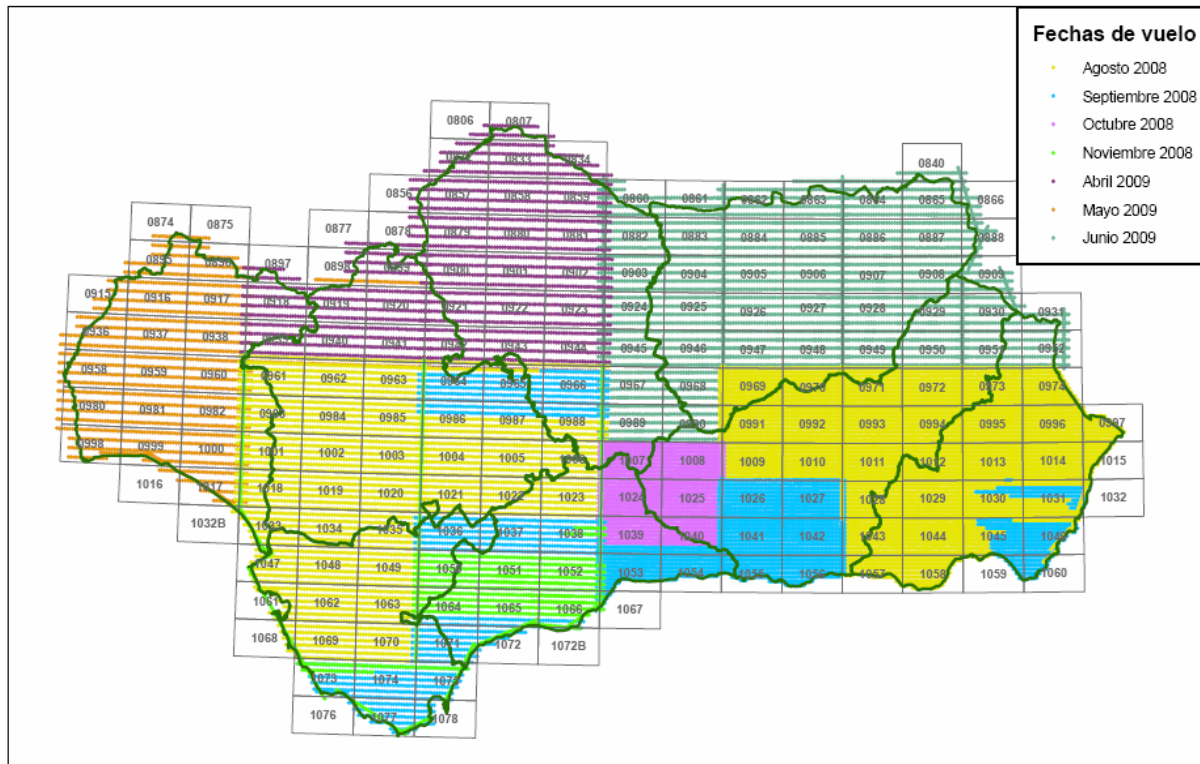


Figura 2. Gráfico de fechas de vuelo correspondiente a las coberturas 2008 y 2009.

En las Tablas 2 y 3 se resumen, por cuadrante, los datos básicos de entrada/salida necesarios para administrar la información y dimensionar los equipos para la producción de la cobertura de ortofoto expedita.

Tabla 2. Datos de vuelo por cuadrante

CUADRANTE	AÑO DE VUELO	CÁMARA	GSD	Nº IMÁGE-NES	TAMAÑO TIFF RGB (Tb)
SW	2008	UCD	45 cm	8.278	1,95
SE	2008	DMC	22,5 cm	22.126	6,41
NW	2009	DMC	45 cm	4.351	1,26
NE	2009	DMC	45 cm	5.152	1,49

Tabla 3. Datos de Ortofoto por cuadrante

CUADRANTE	Nº ORTOS (CORTE 1/10.000)	TAMAÑO OF TIFF RGB Gb
NW	684	297.8
NE	588	242.9
SW	790	344.4
SE	687	286.5

METODOLOGÍA

La metodología definida parte de una validación inicial de los datos de orientación directa de las imágenes aéreas obtenidos del procesado del vuelo desde las estaciones de la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP). Para garantizar la precisión de estos datos se han planteado vuelos de calibración del conjunto Cámara-GPS/INS. Los imprevistos surgidos en la orientación directa del vuelo han sido salvados mediante técnicas de Aerotriangulación Automática Asistida y ocasionalmente con el empleo de puntos de apoyo de calidad previamente contrastada.

El proceso de producción de las ortofotos expeditas se ha centralizado en un servidor (Dell Poweredge R900) de 16 núcleos y 16 Gb de Ram virtualizado en 4 máquinas de idénticas prestaciones, con 5 Tb de capacidad de almacenamiento con conexión mediante fibra óptica, suficiente para albergar todas las imágenes aéreas de 45 cm de GSD de un cuadrante del territorio de Andalucía, sus correspondientes modelos digitales de elevación y las ortofotos generadas. Solo en el caso de Andalucía SE fue necesario dividir el vuelo en dos bloques, debido al elevado número de imágenes aéreas obtenidas con GSD 22,5 cm.

El cálculo se ha realizado de manera desatendida paralelamente por bloques de vuelo distribuidos por máquina virtual, generando en un único paso las líneas de mosaico, la corrección radiométrica (esta se activó únicamente en el último cuadrante producido, el NE) y las ortofotos según el corte PNOA50 por hojas 1/10.000, incluso en el caso del SE.

Por cada bloque de vuelo, se importaron las imágenes originales (RGB) en formato TIFF con los parámetros de orientación directa proporcionados por la empresa de vuelo. Solo el cuadrante SE superó el proceso de validación de los datos de orientación directa, al comprobarse por una parte la ausencia de y-paralajes, y por otra, que la precisión de los puntos de chequeo no excedía de las tolerancias exigidas (las tolerancias aplicadas son las del PNOA50, esto es, los residuos máximos no deben ser superiores a $1,5 \times \text{GSD}$, siendo el RMS en planimetría y altimetría menor que $1 \times \text{GSD}$, siendo el $\text{GSD}=0,45 \text{ cm}$).

Para los cuadrantes SW, NW y NE, debido a la disparidad de resultados obtenidos por día de vuelo en el control de calidad, y no detectándose problemas en el cálculo de excentricidades ni en los vuelos de calibración, se optó por realizar una aerotriangulación automática, que posteriormente revelaría los problemas encontrados.

Los bloques se dividieron en unidades de producción menores (hojas MTN50) para aumentar los rendimientos en el cálculo de las ortofotos. Hay que tener en cuenta que los rendimientos suelen caer con el incremento del número de imágenes y las dimensiones del MDT y de la ortofoto. Respetando el bloque original del vuelo y de la AT (entre 2×2 y 3×3 hojas MTN50), preparando los MDT's por hojas MTN50 rectangulares, y generando las ortofotos por corte 1/10.000, se consigue un balance adecuado entre número de ficheros y rendimientos de cálculo (20 min aprox. para los vuelos de 45cm, 30 min. para el de 22,5 cm).

Inicialmente, se planteó lanzar el proceso por bloques de aerotriangulación en un único servidor potente dotado de un sistema de almacenamiento masivo de 20 Tb con conexión por fibra, mediante una secuencia batch estándar que generase las ortofotos 1/10.000 correspondientes a cada hoja MTN50 (ver Figura 3). Para mejorar las prestaciones de cálculo, y dado que el Sw no hacía uso de todos los recursos del sistema, se optó por la solución de virtualizar el servidor, pasando de un único servidor de 16 procesadores y 16 Gb de Ram, a cuatro máquinas virtuales de 4+4. Esta solución permitió lanzar en paralelo el proceso desde cada servidor virtual, aumentando la productividad, pero provocó la división del sistema de almacenamiento a unidades de 5 Tb independientes para mantener la conexión por fibra con cada servidor virtual, descartándose las soluciones de red.

La solución finalmente planteada solo ha sido aprovechada en el cuadrante SE, debido a que la cadencia de producción en la fase de AT era más lenta que en la fase de cálculo de la ortofoto. No obstante, ha posibilitado trabajos desatendidos en horarios fuera de oficina.

El Sistema de referencia establecido en el proyecto ha sido el ETRS89, siendo la Proyección Cartográfica: UTM en Huso 30 extendido. El MDT empleado pertenece a la cobertura 2004-2007 mantenido por la Junta de Andalucía, referido a ED50 y con paso de malla 10×10 metros. La conversión a ETRS89 se ha realizado empleando la rejilla oficial del IGN (sped2et.gsb).

Las ortofotos expeditas se han generado con un GSD de 50 cm en color natural (RGB), se han mosaicado mediante el método *Seam Radiometric* minimizando las diferencias radiométricas en las uniones de las imágenes, y se han cortado por hojas 1/10.000 de acuerdo al RD1071/2007 siguiendo el criterio PNOA.

Finalmente, la información ha sido validada de acuerdo a los estándares de precisión definidos para el producto (ver tabla 1) con el empleo de los puntos de control y la base de cartografía autonómica, antes de ser publicada y distribuida.

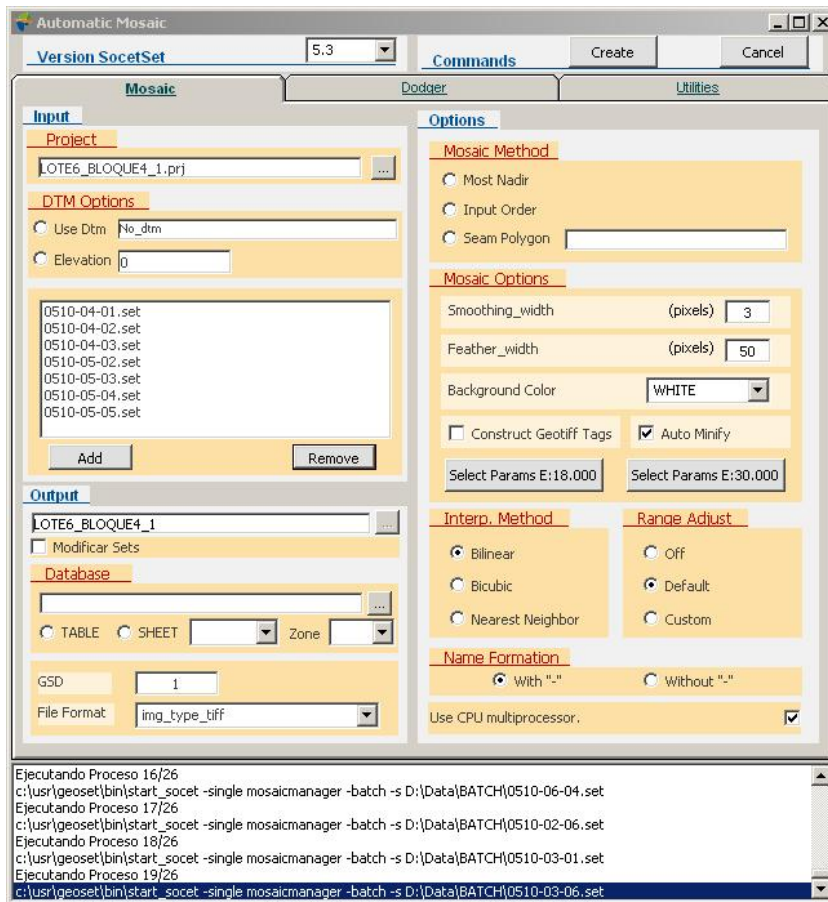


Figura 3. Proceso Batch estándar. Aplicación latente vinculada al administrador de tareas de Windows

Alternativas de cálculo

La última versión del Sw empleado en la producción de Ortofotos presenta integrado el sistema Cónдор como alternativa a los procesos batch estándares secuenciales. Cónдор es un Sw de procesamiento distribuido que aumenta el rendimiento al permitir el procesamiento en paralelo en múltiples máquinas. La principal ventaja sobre la metodología seguida es que Cónдор gestiona la carga de trabajos, mientras que los procesos batch lanzados en paralelo los gestiona el administrador del sistema.

Con el sistema Cónдор se dispone de un mecanismo de colas de trabajo, con posibilidad de programar políticas, prioridades, seguimiento y gestión de recursos. El propio sistema elige el momento y lugar donde se ejecutarán los procesos, informando al usuario sobre el estado de los mismos. Cónдор es un producto gratuito del "Proyecto Cónдор" de Investigación de la Universidad de Wisconsin-Madison (<http://www.cs.wisc.edu/condor/>), y fue instalado por primera vez como un sistema de producción en la década de los 90. Cónдор no proporciona una interfaz gráfica de usuario (GUI), sin embargo, existen soluciones gratuitas (ver Figura 4).

Los trabajos actuales se basan ya en tecnología Cónдор, con la ventaja añadida de que no solo se emplearán las máquinas virtuales, en una de las que residirá el control general de la aplicación, sino que podrán emplearse como nodos de cálculo todos los recursos del Departamento (estaciones de trabajo Fotogrametría), en este caso necesariamente empleando una solución de red.

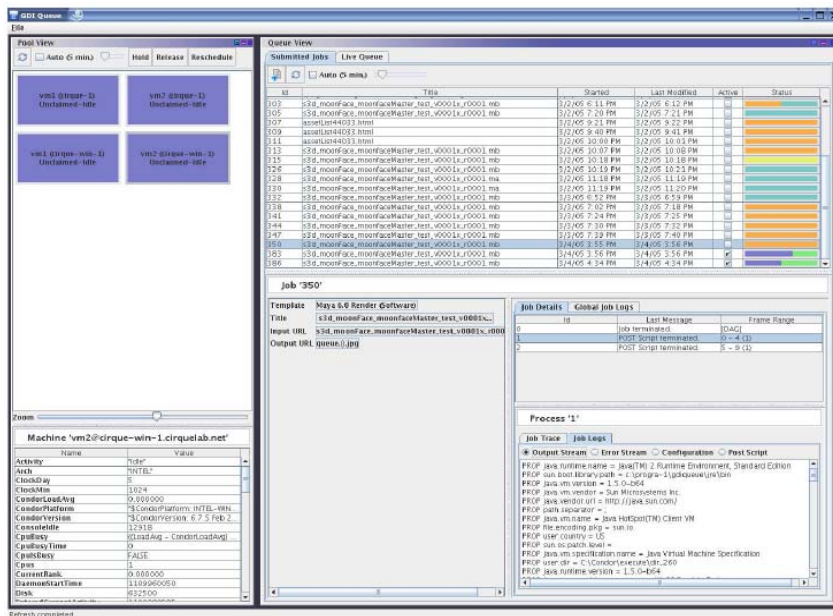


Figura 4: Interfaz de control de Códor: GDI|Queue Pool and Job View.
 <<http://www.cirquedigital.com/products/gdiqueue>>

Problemas encontrados en la Orientación Directa

Este apartado describe los problemas prácticos surgidos en el uso de la tecnología GPS/INS para la Orientación Directa de los Vuelos Fotogramétricos Digitales de Andalucía, que han condicionado la producción de la Ortofoto Exedita en los cuadrantes SW, NW y NE, siendo necesario introducir en ellos la fase de aerotriangulación, aproximándose de esta manera a la solución de una ortofoto rápida. Esto ha repercutido negativamente no solo en la calidad de los datos derivados del vuelo, sino en el posterior desarrollo de los trabajos. Sin embargo, la disponibilidad de información de puntos de apoyo/chequeo de archivo, así como la contrastada calidad del MDE actualizado en las distintas coberturas desde su constitución, unido a las altas prestaciones de los sistemas de Aerotriangulación Automática, han hecho finalmente posible obtener el producto en un plazo de tiempo muy corto (3 semanas por cuadrante).

El método de Orientación Directa (OD) de sensores aéreos mediante GPS/INS se puede considerar hoy en día un proceso consolidado que incrementa notablemente la productividad de la ortofoto. Sin embargo, los resultados obtenidos en los distintos proyectos desde que se viene exigiendo esta tecnología, generan cierta desconfianza que recomiendan cuando menos un riguroso procedimiento de validación de los datos de orientación, una comprobación de los vuelos de calibración, y finalmente si se confirman problemas de fiabilidad de los datos, de montaje de los sensores, de observación o de procesado, una Orientación Indirecta (OI) mediante técnicas de Aerotriangulación Automática.

Las fuentes típicas de error en orientación directa, que pueden limitar o incluso invalidar la calidad de los datos de un Vuelo Fotogramétrico, son:

- La falta de rigidez del conjunto de los sensores.
- Variaciones del offset de la antena GPS causadas por las limitaciones mecánicas angulares de la plataforma de estabilización o por errores de lectura del gimbal.
- Errores de sincronización o retrasos no compensados del sensor, por ejemplo, el retardo de evento o diferencia de tiempo entre el instante de orden de activación y el instante de la obturación de la cámara.

- Errores de calibración del offset de la antena y los ángulos de boresight (desalineamiento entre el sistema Cámara-INS) o la no aplicación de estos parámetros correctamente.
- Errores en el procesado de los datos GPS/INS, por ejemplo, en relación con el modelo de errores sistemáticos en la IMU, o con la conversión de parámetros de orientación.
- El uso de parámetros incorrectos del Sistema Geodésico de Referencia, de la Proyección Cartográfica empleada, del Modelo de Geoide, o la no aplicación de errores.

Los errores más comunes suelen ser de procesado, debidos a una mala interpretación de los resultados de la calibración, una aplicación incorrecta del offset de la antena, o una transformación incorrecta de los parámetros de orientación, inicialmente calculados en un sistema de referencia tridimensional cartesiano geocéntrico, y habitualmente solicitados en proyección UTM y alturas elipsoidales u ortométricas.

Hay que tener en cuenta el esfuerzo, hablando en términos de tiempo y recursos, que puede suponer analizar en profundidad el origen de los problemas, frente a una solución automática de aerotriangulación, que en la mayoría de los casos, podrá aprovechar la información procedente del vuelo empleando métodos de cálculo específicos (activando por ejemplo el desalineamiento o los drift parameters), y que además servirá para controlar la totalidad de los resultados de orientación directa, mejorar las orientaciones relativas de las imágenes, y corregir posibles errores sistemáticos.

El análisis que se presenta es el resultado de comparar los datos obtenidos mediante técnicas de aerotriangulación, con el empleo de puntos de apoyo y chequeo, frente a los datos de la orientación directa aportados por las empresas de vuelo. Ha sido necesario activar en el cálculo los parámetros de deriva y desalineamiento por sesión de vuelo, cuando lo ideal hubiera sido, si los datos de calibración y excentricidades se hubieran aplicado correctamente, mantenerlos desactivados.

Como puede observarse en las tablas 4, 5 y 6, uno de los problemas existentes en los datos de orientación aportados reside en la no aplicación de la calibración del sistema Cámara-INS, apareciendo un desalineamiento sistemático en ω de aproximadamente 0.02° para el cuadrante SW (ténganse en cuenta las precisiones angulares exigidas de 0.005° en Roll, Pitch y 0.008° en Heading) y 0.014° en ϕ para las sesiones realizadas en noviembre. En el cuadrante NE, el desalineamiento aparece tanto en ϕ como en K en ambos casos de aproximadamente 0.02° . En el cuadrante NW, si bien en las sesiones realizadas en mayo pueden detectarse sistematismos, los resultados no son tan claros en las sesiones de abril, en las que la empresa de vuelo reportó un problema con el registro de los ángulos del gimbal, lo que provocó un exceso de ruido en el cálculo de las trayectorias reducidas y su integración con los datos de la IMU (ver Figura 8).

Tabla4. Diferencias en los parámetros de orientación directa vs obtenidos por AT, cuadrante NE

ZONA NE						
FECHA	Dif_X	Dif_Y	Dif_H	Dif_OM	Dif_PHI	Dif_K
01/07/2009	0.249	0.181	1.608	0.000516	0.018438	0.024074
02/07/2009	0.112	0.130	2.449	0.002006	0.020009	0.018127
03/07/2009	0.373	0.098	2.008	0.001428	0.021370	0.018964
04/07/2009	0.132	0.502	2.658	0.000601	0.019969	0.018181
05/07/2009	0.547	0.401	3.146	0.000383	0.020018	0.019315
09/07/2009	0.603	0.288	2.047	0.001648	0.020938	0.020361
10/07/2009	0.132	0.502	2.658	0.000601	0.019969	0.018181
11/07/2009	0.487	0.417	2.831	0.002456	0.020801	0.019940
12/07/2009	1.180	0.206	2.899	0.000730	0.021289	0.018052
15/07/2009	0.069	0.061	2.473	0.000913	0.019332	0.017664

Del análisis de las diferencias en posición se desprende que no han sido aplicados correctamente los vectores de excentricidad considerando los ángulos del gimbal, observándose sistematismos en H. Incluso puede concluirse para el cuadrante NE que la excentricidad ha sido aplicada en sentido contrario. Esto provoca errores residuales, al igual que en el cuadrante NW, incluso para una misma línea de vuelo (ver Figura 5), aunque hay que considerar en

estos gráficos que la AT también introduce errores residuales, por lo que no todas las diferencias representadas se pueden atribuir a la orientación directa.

Tabla 5. Diferencias en los parámetros de orientación directa vs obtenidos por AT, cuadrante NW

ZONA NW						
FECHA	Dif_X	Dif_Y	Dif_H	Dif_OM	Dif_PHI	Dif_K
21/04/2009	0.634	0.436	1.067	0.001618	0.004002	0.004257
23/04/2009	0.246	0.040	0.064	0.004778	0.006049	0.003589
16/05/2009	0.637	0.690	2.218	0.009615	0.009184	0.011274
17/05/2009	0.388	0.330	0.558	0.014849	0.007163	0.019217
18/05/2009	0.468	0.981	0.903	0.013589	0.005008	0.006688

Tabla 6. Diferencias en los parámetros de orientación directa vs obtenidos por AT, cuadrante SW

ZONA SW						
FECHA	Dif_X	Dif_Y	Dif_H	Dif_OM	Dif_PHI	Dif_K
13/08/2008	0.221	0.228	1.198	0.015211	0.003677	0.006182
14/08/2008	0.176	0.462	0.866	0.018497	0.003574	0.004177
15/08/2008	0.158	0.053	0.542	0.018759	0.002052	0.003025
16/08/2008	0.362	0.257	0.247	0.019979	0.003726	0.007974
17/08/2008	0.578	1.247	0.017	0.007632	0.002925	0.008781
18/08/2008	0.472	0.239	0.401	0.017636	0.002549	0.006675
19/08/2008	0.395	0.651	0.192	0.065536	0.028346	0.074142
20/08/2008	0.193	0.206	0.042	0.016517	0.004753	0.005713
21/08/2008	0.443	0.063	0.312	0.016674	0.004566	0.007619
23/08/2008	0.146	0.105	0.454	0.017326	0.005181	0.008408
13/09/2008	0.125	0.053	0.503	0.018416	0.007177	0.004873
14/09/2008	0.395	0.212	0.129	0.018628	0.002502	0.007018
15/09/2008	0.250	0.212	0.933	0.017835	0.004587	0.004684
16/09/2008	0.169	0.186	0.578	0.016854	0.005845	0.005440
09/11/2008	0.145	0.139	0.204	0.017707	0.016800	0.003218
13/11/2008	0.128	0.267	0.299	0.020591	0.015877	0.004535
14/11/2008	0.211	0.260	0.458	0.020179	0.013188	0.005696
15/11/2008	0.055	0.324	0.392	0.018943	0.012497	0.005742

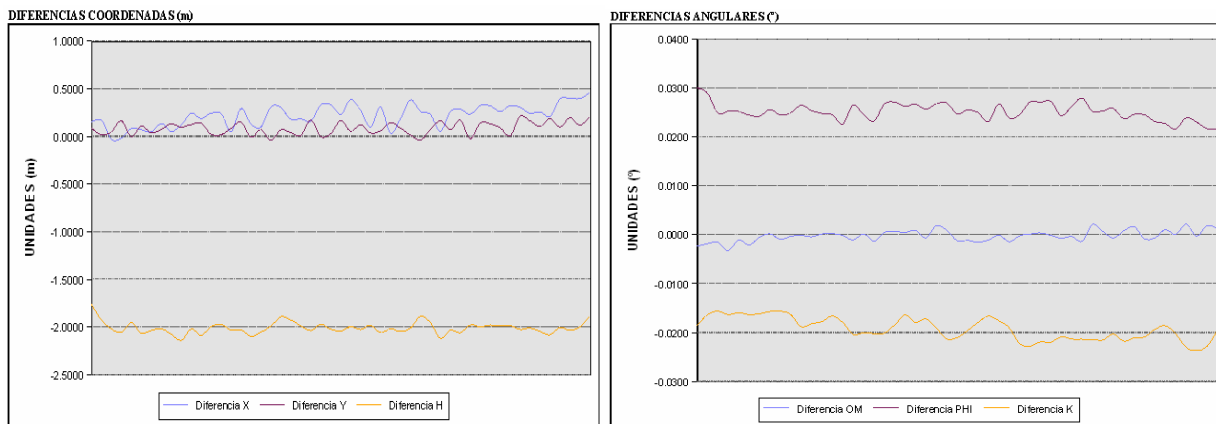


Figura 5: Diferencias entre OD vs OI para el día 3/07/2009 pasada 1113A, Bloque NE.

El comportamiento gráfico del desalineamiento y la excentricidad para una misma pasada resulta constante, obviando los errores residuales del cálculo de las trayectorias GPS/INS y los residuos de la AT, tal como se observa en la Figura 5. Para una misma sesión de vuelo, se puede observar el comportamiento simétrico alterno del ángulo ϕ (Figura 6) y ω (Figura 7) en función del sentido de la pasada, lo que confirma que los ángulos vienen referidos a la IMU, en lugar de referirse a la Cámara.

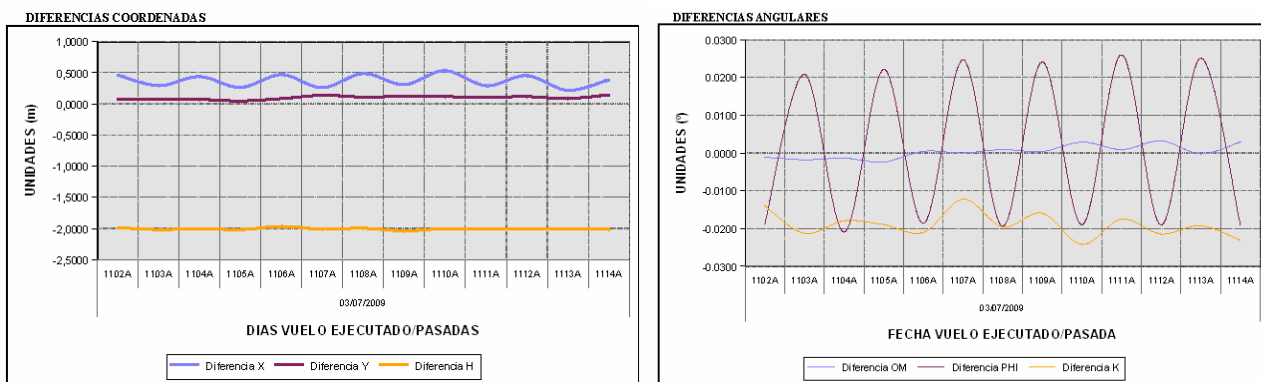


Figura 6: Diferencias entre OD vs OI para el día 3/07/2009 por pasada, Bloque NE.

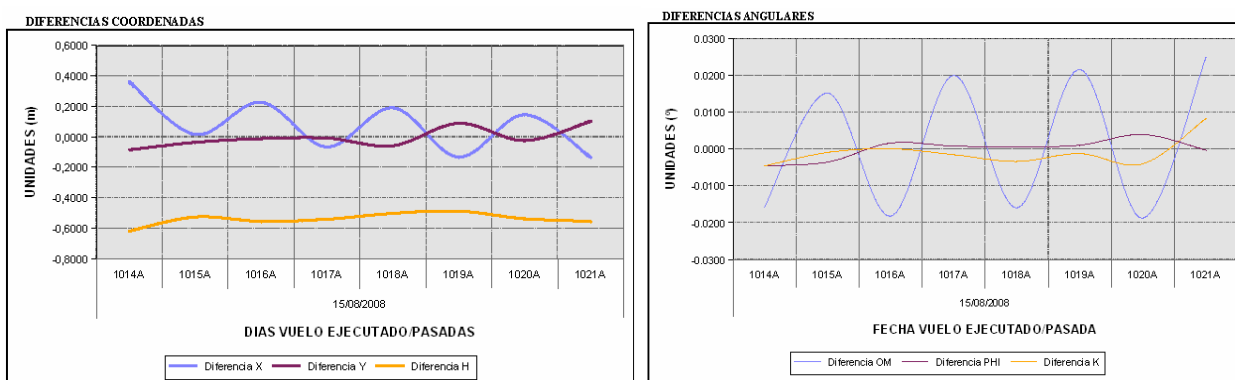


Figura 7: Diferencias entre OD vs OI para el día 15/08/2008 por pasada, Bloque SW.

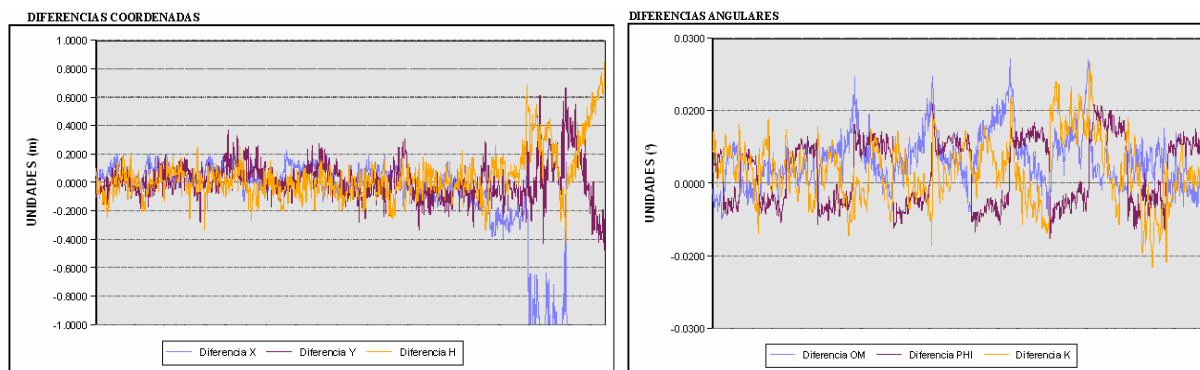


Figura 8: Diferencias entre OD vs OI para el día 23/04/2009 por pasada, Bloque NW.

RESULTADOS

Con el objetivo de valorar la calidad de las ortofotos expeditas/rápidas y cuantificar la precisión geométrica de las mismas, se ha llevado a cabo un control de calidad sobre el producto final. Se ha comprobado tanto la precisión relativa como la absoluta. Asimismo, se han revisado las ortofotos internamente con el fin de detectar las posibles incidencias del MDT y de la perspectiva (arrastres de imagen y oclusiones), habitualmente consideradas en un proceso convencional de producción de ortofotos rigurosas, con el fin de acompañar las ortofotos de un documento técnico detallado de control de calidad que permita emplearlas con plenas garantías en cualquier aplicación, sin que los errores encontrados repercutan en los productos cartográficos derivados de su uso.

Control sobre la geometría externa de las ortofotos expeditas/rápidas

El control de geometría externa garantiza la integración de las ortofotos, a nivel general, con otros productos cartográficos. Se lleva a cabo mediante la medición sobre las ortofotos de una serie de puntos de control bien definidos en la imagen, que han sido levantados previamente en campo en diferentes campañas, mediante tecnología GPS.

Una vez medidos los puntos de control sobre las imágenes se calculan las diferencias entre las coordenadas medidas en campo con las obtenidas sobre la ortofoto. Con estas diferencias se determinan los promedios, RMSE y Stdv de las diferencias. Aunque las tolerancias establecidas en PNOA solo fijan valores para el RMSE y los errores máximos (al 95% y 100%), es importante analizar también los valores de la media, que pueden aportar información relevante acerca de la presencia de sistematismos.

En total se han podido medir 1485 puntos de control, 802 para las ortofotos de la zona SW, 506 para las ortofotos de la zona SE, 85 para el NW y 92 para el NE. Los resultados obtenidos en el control geométrico externo se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Control geométrico externo OF Expedita/Rápida Andalucía

CUADRANTE	Nº PUNTOS CHEQUEO	RMSEX/RMSEY	STDVX/STDVY	MEANX/MEANY
SW	802	0.420 / 0.462	0.414 / 0.462	-0.068 / 0.006
SE	506	0.694 / 0.684	0.693 / 0.683	-0.039 / 0.046
NW	85	0.650 / 0.785	0.644 / 0.778	-0.111 / -0.135
NE	92	0.542 / 0.570	0.542 / 0.563	0.057 / 0.108

Como puede observarse, los resultados obtenidos no solo entran dentro de la tolerancia de las ortofotos rápidas de 50cm (RMSEX,Y < 2m, valor considerado de referencia al no establecerse tolerancia para la ortofoto expedita), sino que cumplen con las tolerancias de la ortofoto rigurosa de 50 cm (RMSEX,Y < 1m). Sin embargo, no cumplen

con todos los criterios geométricos, al encontrarse con errores máximos de hasta 5 m en X (ver Tabla 8, máximo permitido en PNOA50 rigurosa de 4m), aunque si cumplen con el error máximo establecido al 95% (2m).

Tabla 8. Control geométrico externo OF Expedita/Rápida Andalucía

CUADRANTE	ERROR MAXIMO		ERROR MAXIMO AL 95%	
	X	Y	X	Y
SW	2.897	2.875	0.852	0.975
SE	5.373	3.209	1.334	1.526
NW	2.339	2.032	1.319	1.501
NE	1.568	2.604	1.188	1.239

En la Figura 9 se representan gráficamente las diferencias entre las coordenadas de los puntos de control obtenidas en campo y las medidas sobre las ortofotos. Obsérvese la presencia de errores aleatorios con una mayor dispersión en los cuadrantes SE (donde se empleó el método de orientación directa), NW y NE.

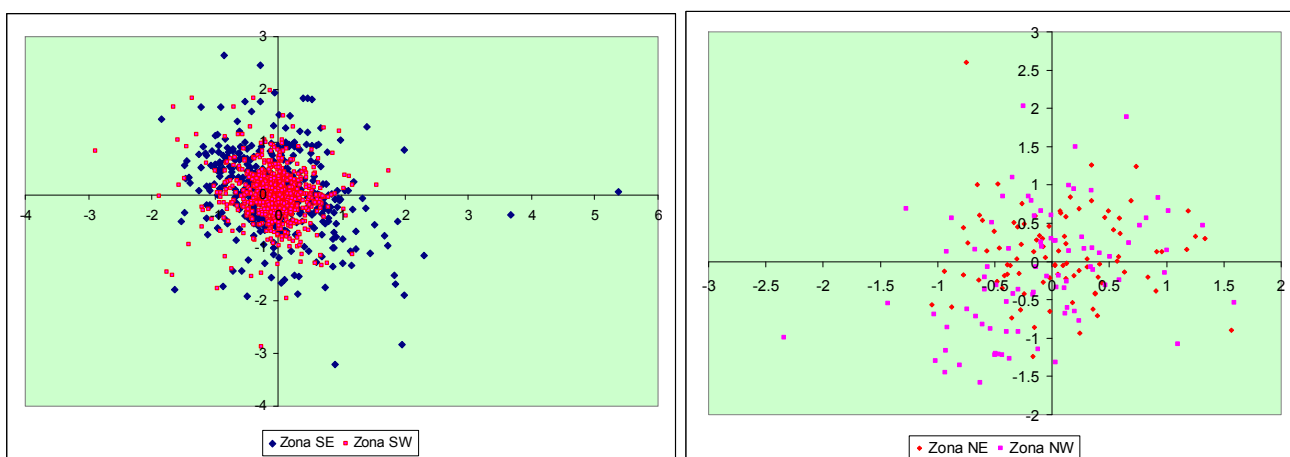


Figura 9: Gráfico de dispersión de errores planimétricos para las coberturas SE-SW 2008 (izquierda) y NE-NW 2009 (derecha)

Control sobre la geometría interna de las ortofotos expeditas/rápidas

Se engloba en este apartado tanto el control de la geometría interna de las ortofotos, como el control de geometría relativa. Los controles de la geometría interna pretenden garantizar la integración de las ortofotos, a nivel de detalle, con otras fuentes de información geográfica, comprobando que no existan deformaciones ni desplazamientos en elementos geográficos. Este control ha consistido en la realización, en tiempo de ejecución, de un barrido de todas las ortofotos que se han generado, localizando en una cobertura gráfica (shp) las incidencias detectadas. El parámetro que establece la tolerancia en geometría interna para este tipo de ortofotos es su apreciación a la escala de representación, fijada en 1/10.000, mientras que en geometría relativa, no se permiten desplazamientos relativos superiores a cuatro píxeles (frente a la escala 1/5.000 y los desplazamientos relativos de dos píxeles de las ortofotos rigurosas).

En la Figura 10 se representan las incidencias tolerables que aparecen en las ortofotos generadas. Las incidencias no tolerables, fundamentalmente debidas a la falta de actualización del MDT (grandes infraestructuras), han sido puntuales y se han corregido en producción.

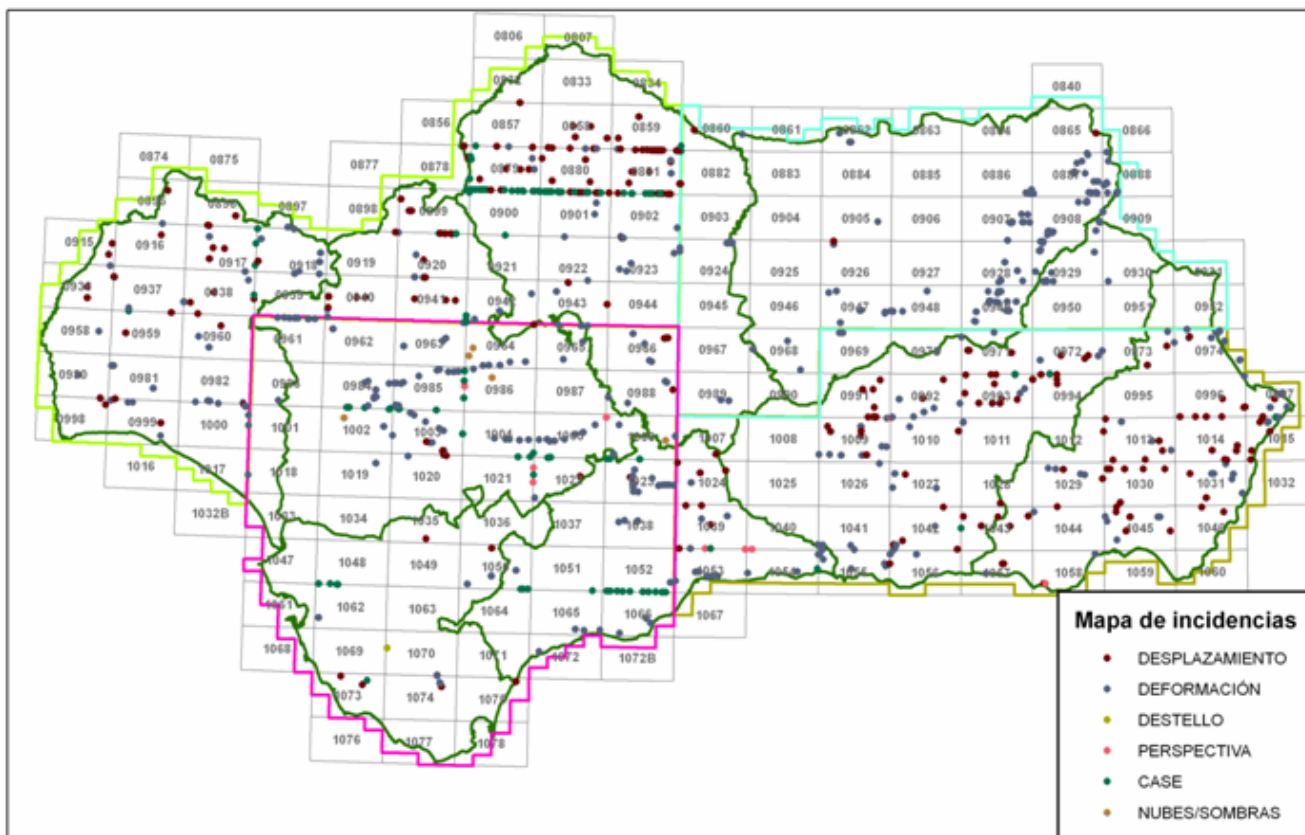


Figura 10 Gráfico de incidencias tolerables de la OF Expedita/Rápida de C.A de Andalucía (Cobertura 2008/2009)

DISCUSIÓN

Las Ortofotos Rigurosas PNOA tienen unas especificaciones técnicas que las hacen compatibles con la mayoría de los proyectos, superando ampliamente los requerimientos de muchos de ellos. Si se han obtenido en un proceso de trabajo en el que se hayan realizado controles de calidad de producto, la conclusión final es que pueden ser incorporadas con plenas garantías en cualquier proyecto.

Las Ortofotos Expeditas no tienen unas especificaciones técnicas predeterminadas ni se les exige habitualmente un control posterior que informe sobre sus características geométricas. En consecuencia, no deberían ser consideradas de utilidad para proyectos con requisitos de precisión geométrica, salvo que su aportación vaya acompañada de un informe técnico en el que proporcionen los datos reales estimados para su precisión geométrica y sobre sus incidencias. Los problemas encontrados en la producción de la cobertura de Andalucía 2008/2009 restan fiabilidad sobre las mismas, haciéndose extremadamente recomendable la utilización de técnicas de aerotriangulación para garantizar los resultados de orientación de las imágenes.

Respecto a las Ortofotos Rápidas, por sus características de producción se puede considerar un producto válido, pero asumiendo el riesgo de existencia de incidencias locales. Al igual que en el caso de las ortofotos anteriores, deberían tener un control de calidad o un informe técnico que cuantifique sus características geométricas e incidencias. Tienen el valor añadido de su rápida disponibilidad frente a las ortofotos rigurosas, que a parte de considerar mayores exigencias en cuanto a la calidad de los datos, generan productos derivados de interés general, como son los modelos digitales del terreno.

Los productos expeditos/rápidos y rigurosos pueden considerarse compatibles porque persiguen propósitos muy distintos. Para que no pierda interés el producto expedito/rápido, deberían tomarse medidas más rigurosas que eviten en la medida de lo posible problemas en la ejecución de los vuelos y que influyan en los plazos de disponibilidad de las ortofotos. Es inevitable que la mejora de la utilización de la tecnología, de las prestaciones en cálculo con soluciones informáticas avanzadas, y de la calidad y actualización de la información geográfica, haga aproximarse los

productos expeditos/rápidos a los rigurosos. De igual forma, que los rigurosos tiendan a aproximarse en plazo y coste a los primeros.

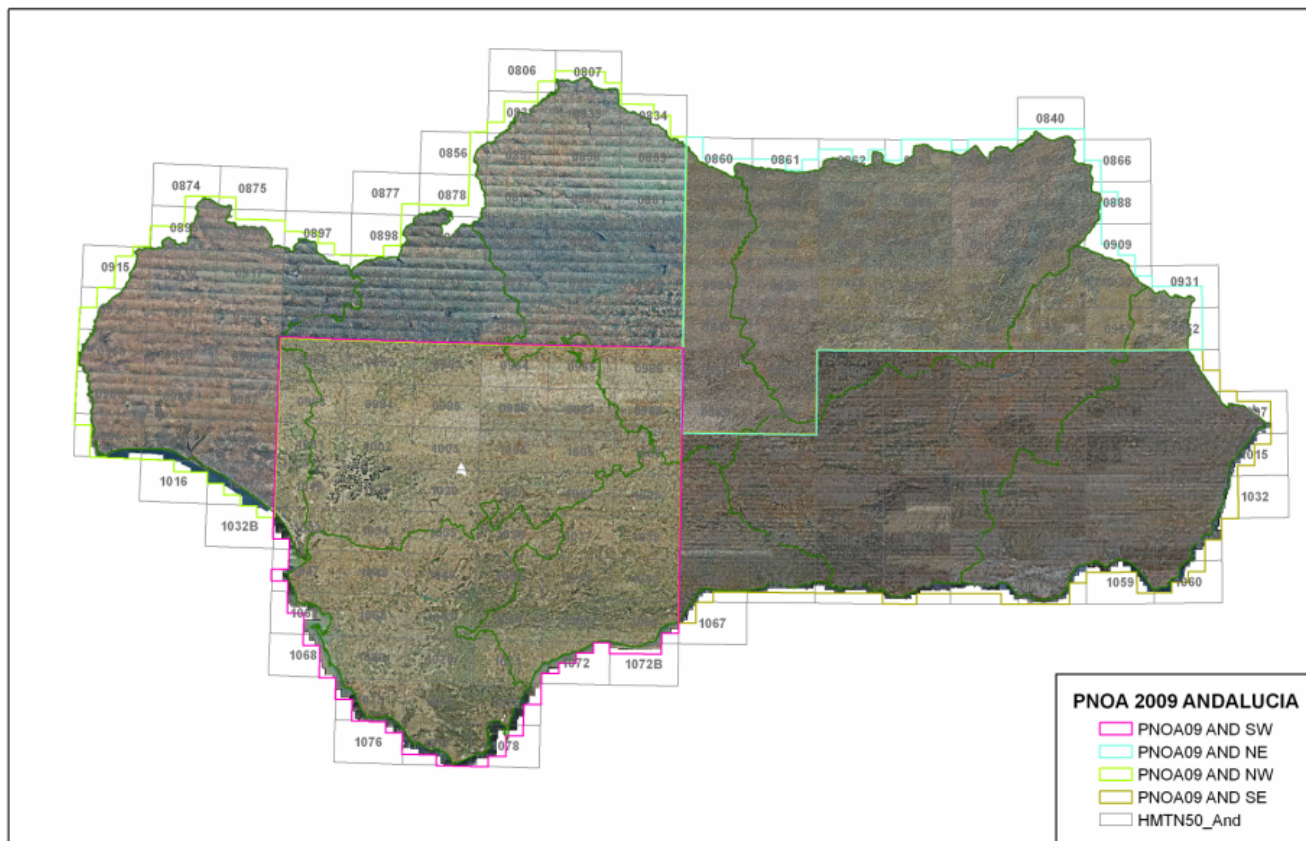


Figura 11: Mosaico de Ortofotos Expeditas/Rápidas de la C.A de Andalucía (Cobertura 2008/2009)

CONCLUSIONES

Las Ortofotos Expeditas/Rápidas de Andalucía correspondientes a la cobertura de vuelo 2008/2009 tienen una precisión general equivalente a las ortofotos rigurosas del PNOA50, y han sido generadas en un entorno de producción controlado. Pueden por tanto emplearse en distintos proyectos que requieran una capa de ortofoto con un elevado nivel de confianza en términos geométricos. No obstante, debido a la existencia de errores máximos puntuales fuera de su tolerancia, se recomienda analizar los gráficos de incidencias antes de su integración como soporte cartográfico de referencia para valorar la posible repercusión de las mismas en el proyecto en cuestión. Por otra parte, sería conveniente incorporar al proceso de producción un método riguroso de corrección radiométrica lo más automático posible, de manera que no influyendo en los plazos de generación, se consiga un producto que permita extender su utilización a aplicaciones cuyo objetivo principal sea el análisis tanto visual como cuantitativo de las imágenes.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados expuestos en este trabajo forman parte del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) 2008/2009, proyecto cofinanciado por la AGE y las CC.AA, coordinado por el IGN y dirigido por el ICA en la C.A de Andalucía. Los datos expuestos han sido cedidos por el ICA de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Colomina, I. (1999). T.O.P. concepts for sensor orientation. *ISPRS Workshop on Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientations, Barcelona, Spain, Nov 25-26*.
- Comisión Técnica PNOA (2004-2010). Especificaciones Técnicas para el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). <ftp://ftp.pnoa.ign.es/>.
- Cramer, M. (1999). Direct Geocoding – is Aerial Triangulation Obsolete?. In: *Proc. of Photogrammetric Week '99*. Fritsch, D. and R.Spiller, Eds. H. Wichmann Verlag, Huthig GmbH, Heidelberg, pp. 59–70.
- Dimitrios Kapnias, Pavel Milenov and Simon Kay (2007). Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery. *JRC Scientific and Technical Reports. Issue 3*.
- Klaus Legat et al. Reliability of Direct Georeferencing: A Case Study on Practical Problems and Solutions” *EuroSDR-Project Commission I: “Sensors, Primary Data Acquisition and Georeferencing”*
- Legat, K., 2006. Approximate direct georeferencing in national coordinates. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 60: 239-255*
- Novak, K. (1992). “Rectification of Digital Imagery”. *PE&RS 58(3), 339-344*.
- Skaloud, J., 2006. Reliability of Direct Georeferencing Phase 1: An Overview of the Current Approaches and Possibilities. *EuroSDR-Project Commission I: “Sensors, Primary Data Acquisition and Georeferencing”*
- Trevor Greening, W.J et al, 2000. The Proper Use of Directly Observed Orientation Data: Aerial Triangulation Is Not Obsolete. *2000 ASPRS Annual Conference, Washington, DC, May 22–26, 2000*.