



Tesis Doctoral

**"Análisis de Modelos Digitales de Elevaciones
(MDE) generados con imágenes SPOT-HRV y
TERRA-ASTER"**

Desarrollada en el programa de Doctorado de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría del Dpto. de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría de la Universidad de Jaén.

TESIS DOCTORAL CODIRIGIDA POR
Dr. D. F. J. Ariza López, de la Universidad de Jaén y
Dr. D. A. M. Felicísimo Pérez, de la Universidad de Extremadura



DOCTORANDO
Aurora Cuartero Sáez

Cáceres, 17/06/2003

F.J. Ariza López

CU en la Universidad de Jaén
Departamento de Ingeniería Cartográfica,
Geodésica y Fotogrametría

A.M. Felicísimo Pérez

TU en la Universidad de Extremadura
Departamento de Expresión Gráfica

Hacen Constar

Que la memoria titulada: "Análisis de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados con imágenes SPOT-HRV y TERRA-ASTER" ha sido realizada por Dña. Aurora Cuartero Sáez bajo nuestra dirección en el Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, y que constituye la Tesis presentada para optar al grado de Doctor por la Univeridad de Jaén.

Cáceres, 17/06/2003

Fdo: F.J. Ariza López

Codirector de la Tesis

Fdo: A.M. Felicísimo Pérez

Codirector de la Tesis

*"Cuando una persona desea realmente algo,
el Universo entero conspira para que pueda realizar su sueño".*

(Paulo Coelho, 1996)

A todos los que forman parte de ese "Universo conspirador".

***Edita: Universidad de Extremadura
Servicio de Publicaciones***

Caldereros 2. Planta 3ª

Cáceres 10071

Correo e.: publicac@unex.es

<http://www.unex.es/publicaciones>

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis codirectores de Tesis Francisco Javier Ariza y Ángel Manuel Felicísimo su dedicación, iniciativas y empuje para realizar este trabajo. Además quiero darles las gracias no sólo por los esfuerzos relacionados con mi formación investigadora, también su confianza y apoyo. Tener a ambos como codirectores ha sido muy enriquecedor y un auténtico lujo.

Muchas gracias a Hans F. Mhol, Director de *International Advanced Training for Photogrammetry (IPO)*, por sus enseñanzas relacionadas con las estaciones fotogramétricas digitales, por poner a disposición durante el verano del 2002 los laboratorios de *Stuttgart University of Applied Sciences*, y por su dedicación y entrega en la presentación de numerosas personas que profesionalmente han sido de mucho interés.

Agradecer a Emmanuel Baltsavias, del *Institute of Geodesy and Photogrammetry* de Zurich, su opinión y sugerencias sobre la fotogrametría espacial y por su invaluable opinión y consejos para próximas publicaciones.

Gracias a todos los que han colaborado con la cesión de datos o aplicaciones facilitando la labor investigadora. Entre ellos están la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía por la cartografía digital de la zona de trabajo, AURENSA por la cesión de las imágenes SPOT-HRV, Chema Menchén de Dharma Ingeniería, S.L. por la licencia de evaluación de Geomatica 8.2 con OrthoEngine, y Noemí Sanchidrián y Alberto Teillechea por la licencia de evaluación de Erdas Imagine 8.5 con OrthoBase Pro.

Gracias a Pedro Llorens y Francisco Fernández de LH Systems por el buen servicio realizado en la Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura en el montaje del laboratorio de fotogrametría digital y por el continuo asesoramiento recibido en el manejo de Socet Set.

También quiero manifestar mis agradecimientos a todos los compañeros y amigos que desinteresadamente han participado en las diversas campañas de campo y muy especialmente a Pilar Belart y a José Luis García Balboa por estar siempre cuando se les necesita.

Muchas gracias a todos los compañeros del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría de la Universidad de Jaén que hicieron tan agradable mi incursión en la Universidad, en especial al Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica. Muchas gracias a Jorge Delgado y Carlos Pinilla por ser los primeros que me acercaron, muy acertadamente, al mundo de la Fotogrametría Digital y Teledetección.

Gracias a todos los compañeros del Departamento de Expresión Gráfica y de la Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura que han deseado y animado el éxito de este trabajo, y muy especialmente a Alicia Gómez Muñoz por realizar tan amablemente la última revisión, a Josefina García y a Manuel Torres.

Y finalmente, pero con igual intensidad, quiero agradecer a familiares y seres queridos que innumerables veces han oído hablar de esta Tesis como la causa de mis ausencias, y sus respuestas siempre han estado envueltas en paciencia y ánimo.

A todos ellos muchas gracias.

ÍNDICE

CAPITULO 1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1	INTRODUCCIÓN	9
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.3	OBJETIVOS	10
1.3.1	Objetivos generales	10
1.3.2	Objetivos específicos	10
1.4	ZONA DE ESTUDIO	11
	MATERIAL	14
CAPITULO 2	REVISIÓN CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES	15
2.1	CONCEPTO DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES, MDE	15
2.2	MDE, MDT Y MDS	15
2.3	ASPECTOS GEODÉSICOS	16
2.3.1	¿Qué es el geoide?	17
2.3.2	Altitud y tipos de altitudes	21
2.3.3	Sistemas de referencia y datum geodésico	26
2.3.4	Sistema de referencia de altitud y datum vertical	29
2.4	GENERACIÓN DE UN MDE	30
2.4.1	Modelos y estructuras de datos de los MDE	31
2.4.2	Obtención de los datos de elevaciones	32
2.4.3	Datos estereoscópicos espaciales	33
2.4.4	Generación automática de MDE mediante fotogrametría digital	39
2.4.5	Métodos de interpolación	50
2.4.6	Programas comerciales de fotogrametría digital aérea y espacial	52
2.5	IMÁGENES SPOT	53
2.5.1	Introducción	53
2.5.2	Geometría de las imágenes SPOT	55
2.5.3	MDE generados a partir de imágenes SPOT-HRV	59
2.5.4	Estudios realizados con imágenes SPOT	60
2.6	IMÁGENES ASTER	62
2.6.1	Introducción	62
2.6.2	Geometría de las imágenes ASTER	64
2.6.3	MDE generados a partir de imágenes ASTER	66
2.6.4	Estudios realizados con imágenes ASTER	68
2.7	CALIDAD DE LOS MDE	70
2.7.1	Introducción	70
2.7.2	Tipos de exactitud	71
2.7.3	Variables influyentes en el error de los MDE	71
2.7.4	Estadísticos para la medida del error	72
2.7.5	Fiabilidad y número de puntos de control	73
2.7.6	Normalización en la generación y exactitud de MDE	73

CAPITULO 3	OBTENCIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO Y CONTROL	76
3.1	MÉTODO DE MEDIDA: TÉCNICAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)	76
3.1.1	Fundamento de la metodología GPS	76
3.1.2	Captura de puntos de apoyo y control	76
3.1.3	Medidas realizadas	77
3.1.4	Vértices geodésicos	77
3.1.5	Cálculo y ajuste de los datos.....	78
3.2	DESCRIPCIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO Y CONTROL	80
3.3	OTROS DATOS.....	82
3.3.1	Cartografía de apoyo	82
CAPITULO 4	ANÁLISIS DE LAS VARIABLES INFLUYENTES EN LA GENERACIÓN DE MDE CON IMÁGENES SPOT-HRV	84
4.1	INTRODUCCIÓN	84
4.2	DATOS Y MATERIAL EMPLEADOS	84
4.2.1	Programas informáticos	85
4.2.2	Imágenes estereoscópicas SPOT	85
4.3	GENERACIÓN DE UN MDE CON DATOS ESTEREOSCÓPICOS SPOT-HRV.....	87
4.3.1	Generación de un MDE en Socet Set.....	89
4.3.2	Generación de un MDE en OrthoBase Pro	90
4.4	ANÁLISIS DE LAS VARIABLES INFLUYENTES	93
4.4.1	Introducción	93
4.4.2	Pruebas experimentales: descripción general	94
4.4.3	Prueba 1: número de puntos de apoyo	96
4.4.4	Prueba 2: distribución espacial de los puntos de apoyo.....	105
4.4.5	Prueba 3: estructura del MDE	110
4.4.6	Prueba 4: tamaño de malla.....	112
4.4.7	Prueba 5: algoritmo de correspondencia de imágenes	115
4.4.8	Prueba 6: coeficiente de correlación	119
4.5	CONCLUSIONES	124
CAPITULO 5	ANÁLISIS DE LAS VARIABLES INFLUYENTES EN LA GENERACIÓN DE MDE CON IMÁGENES TERRA-ASTER	128
5.1	INTRODUCCIÓN	128
5.2	DATOS Y MATERIAL EMPLEADO	128
5.2.1	Programas informáticos	128
5.2.2	Imágenes estereoscópicas ASTER	129
5.3	GENERACIÓN DE UN MDE CON DATOS ESTEREOSCÓPICOS ASTER-TERRA	130
5.3.1	Generación de un MDE en Orthobase Pro	130
5.3.2	Generación de un MDE en Geomatica OrthoEngine.....	135
5.4	ANÁLISIS DE LAS VARIABLES INFLUYENTES	140
5.4.1	Introducción	140
5.4.2	Pruebas experimentales: descripción general	140
5.4.3	Prueba 1: número de puntos de apoyo	141
5.4.4	Prueba 2: distribución espacial de los puntos de apoyo.....	151
5.4.5	Prueba 3: estructura del MDE	153
5.4.6	Prueba 4: tamaño de malla.....	153
5.4.7	Prueba 5: algoritmo de correspondencia de imágenes.	154
5.4.8	Prueba 6: coeficiente de correlación	157
5.5	CONCLUSIONES	160
CAPITULO 6	ANÁLISIS COMPARATIVO DE MDE-SPOT, MDE-ASTER-TERRA Y MDE GENERADOS A PARTIR DE CARTOGRAFÍA.....	162
6.1	INTRODUCCIÓN	162
6.2	MDE GENERADO A PARTIR DE IMÁGENES SPOT-HRV	162
6.2.1	Procesado de datos SPOT-HRV con Socet Set	162
6.2.2	Procesado de datos SPOT-HRV con OrthoBase Pro.....	164
6.3	MDE GENERADO A PARTIR DE IMÁGENES TERRA-ASTER.....	167
6.3.1	Procesado de datos Terra-Aster con OrthoBase Pro.....	167

6.3.2	Procesado de datos Terra-Aster con OrthoEngine	168
6.4	MDE GENERADO A PARTIR DE CARTOGRAFÍA TOPOGRÁFICA	171
6.5	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MDE-SPOT, MDE-TERRA Y MDE GENERADO A PARTIR DE CARTOGRAFÍA.	172
6.6	RESULTADOS.....	177
CAPITULO 7	DISCUSIÓN Y PROPUESTAS PARA EL FUTURO.....	180
7.1	DISCUSIÓN.....	180
7.2	PROPUESTAS PARA EL FUTURO	181
7.3	RESUMEN DE LAS PRINCIPALES APORTACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	183
ANEXOS:	187
	ANEXO 1: VÉRTICES GEODÉSICOS.....	188
	ANEXO 2: PUNTOS DE APOYO	194
	ANEXO 3: PUNTOS DE CONTROL	199
	ANEXO 4: GENERALIDADES SOBRE SPOT.....	210
	ANEXO 5: GENERALIDADES SOBRE ASTER.....	216
GLOSARIO Y ABREVIATURAS.....	218
ABREVIATURAS.....	220
BIBLIOGRAFÍA.....	224

Capítulo 1 Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Uno de los objetivos de la topografía es la construcción de modelos de la superficie terrestre; estos modelos pueden ser analógicos (como el mapa topográfico impreso) o digitales (modelos digitales de elevaciones o MDE).

Los modelos digitales de elevaciones (MDE) desempeñan un papel similar al mapa topográfico convencional: son la herramienta básica para la mayoría de los trabajos territoriales en ámbitos muy diversos. Es decisivo, por tanto, construir MDE de buena calidad para poder garantizar que los análisis realizados a partir de ellos generan resultados realistas. La simulación de procesos es uno de los tipos de análisis que puede realizarse a partir de los MDE, generalmente mediante herramientas incluidas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La generación de MDE mediante técnicas automatizadas surge con el gran desarrollo que experimenta la fotogrametría digital en los últimos años, tanto en el avance de los algoritmos como en la mejora de las propias estaciones fotogramétricas. Algunas investigaciones ya han demostrado que en fotogrametría aérea las técnicas automáticas mejoran el error del MDE ante las técnicas manuales ([Ackermann, 1996](#)).

La última revolución en la fotogrametría digital se ha producido por la disponibilidad de imágenes estereoscópicas procedentes de sensores transportados por satélites. Se trata de productos con muy amplia cobertura y ocasionalmente multiespectrales por lo que se añade una rica información radiométrica a los tradicionales productos pancromáticos. Las moderadas o buenas resoluciones espaciales (10 m en SPOT-HRV y 15 m en TERRA-ASTER, menos aún en otros sensores) unidas a la capacidad estereoscópica llevan a plantearse la posibilidad de utilizarlos para aplicaciones como la actualización de mapas, generación de MDE y ortoimágenes.

El programa SPOT (*Systeme Provatoire d'Observation de la Terre*), desarrollado por Francia con la colaboración de Bélgica y Suecia, cuenta en la actualidad con 4 satélites en órbita, lanzados respectivamente en los años 1986, 1990, 1993 y 1998. La principal novedad que introdujo el programa SPOT fue la posibilidad de realizar tomas oblicuas (hasta 27°) por parte de los sensores denominados HRV (*Haute Resolution Visible*) proporcionando información estereoscópica a través de imágenes pancromáticas con 10 m de tamaño de píxel.

ASTER es un sensor transportado por el satélite TERRA, lanzado en diciembre de 1999. El sistema ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) ha sido desarrollado en el programa EOS de la NASA. El principal objetivo de ASTER es obtener imágenes de la Tierra de alta resolución espacial y espectral (14 bandas espectrales). ASTER está compuesto por 3 subsistemas: VNIR (visible e IR próximo, con 15 m de resolución), SWIR (IR medio, con 30 m) y TIR (IR térmico, con 90 m). Una de las bandas del sistema VNIR dispone de un sensor de vista cenital y otro de vista oblicua (30.9°).

La validación de los MDE generados a partir de imágenes SPOT-HRV es una realidad desde hace algún tiempo ([Albertz & Wiedemann \(1996\)](#)). Pero aunque existen imágenes estereoscópicas desde 1986 aún no existe una metodología verificada donde se conozcan los valores óptimos de las variables influyentes en los procesos de generación del MDE. Lo mismo ocurre con ASTER, donde debe tenerse en cuenta, por añadidura, la mayor novedad del producto. Asimismo, aún no existen estándares sobre los métodos de análisis de la exactitud de los MDE generados a partir de datos espaciales. En este sentido, el origen de los datos de control es crítico ya que debe garantizarse que su exactitud sea suficiente para llevar adelante el proceso. Este requisito es difícil

de garantizar cuando los puntos de control se extraen de cartografía convencional preexistente (Mukai, 1990 y 1989) o de otros MDE construidos mediante la digitalización de mapas de curvas de nivel (Hae-Yeoun y col., 2000).

Generalmente en las investigaciones se analiza el error de los MDE con criterios muy diversos y con datos procedentes de distintas fuentes, y por tanto, los resultados de las exactitudes son heterogéneos. Por ejemplo, las referencias encontradas sobre la exactitud de los MDE generados con datos SPOT varían de 25-34 m (error medio cuadrático, Hae-Yeoun y col., 2000) a 3.3-6.7 m (Al-Rousan & Petrie, 1998). Ninguno los trabajos revisados sobre generación de MDE desde imágenes SPOT evalúa la fiabilidad del error en los análisis.

1.2 Planteamiento del problema

Como veremos más adelante, las variables que intervienen en los procesos de generación de MDE por técnicas automatizadas son diversas y su influencia potencial frecuentemente desconocida. En efecto, en la revisión de la bibliografía existente sobre generación de MDE con datos espaciales se ha detectado un vacío, tanto en cuanto los criterios a seguir, como en la determinación de los valores más adecuados para obtener un producto de máxima calidad.

Se ha detectado, asimismo, que la generación de MDE con imágenes espaciales se aborda exportando directamente las técnicas más tradicionales aplicables a imágenes aéreas, cuya naturaleza es claramente diferente. Las aplicaciones fotogramétricas siguen esta tendencia e intentan adaptar las técnicas clásicas al caso de imágenes espaciales.

En función de esta situación, se planteó la búsqueda de los valores idóneos para las variables potencialmente influyentes en la generación de los MDE sin caer en prejuicios y sin aceptar necesariamente los usos y costumbres heredados de la fotogrametría aérea. Entre estas variables destacan el número de puntos de apoyo y su distribución, el tamaño de malla del MDE, el algoritmo de correlación empleado, etc. Inevitablemente van surgiendo otras cuestiones a lo largo del trabajo: significación del coeficiente de correlación en el ajuste de imágenes, influencia de la estructura del MDE resultante, etc.

La línea de investigación del presente trabajo se centra, en síntesis, en el estudio de la explotación de los datos espaciales SPOT-HRV y ASTER-VNIR para la generación de MDE, en el análisis de los parámetros más influyentes en los procesos de generación y depuración de los MDE, en la propuesta de los valores idóneos para obtener el mejor MDE que los datos espaciales permitan, en los métodos de control del error, y en el análisis comparativo de los MDE resultantes con otros generados a partir de cartografía convencional.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

El objetivo general es estudiar las mejores técnicas de explotación de los datos estereoscópicos espaciales SPOT-HRV y ASTER-TERRA para la generación de MDE mediante técnicas automáticas de correlación.

1.3.2 Objetivos específicos

Objetivo 1

Obtener los mejores valores de los parámetros influyentes en la generación de

MDE a partir de imágenes estereoscópicas SPOT-HRV y TERRA-ASTER en el sentido de optimizar la información altimétrica en exactitud y en resolución espacial. El uso de aplicaciones informáticas diferentes permitirá analizar en profundidad dichos parámetros y generalizar los resultados con independencia del software que se utilice. Los parámetros estudiados serán:

- Número y distribución de los puntos de apoyo utilizados en las orientaciones de las imágenes.
- Resolución espacial del MDE; en el caso de estructuras raster (matrices) la resolución viene determinada por el tamaño de malla y en el caso de estructuras vectoriales (TIN) por la densidad media en la distribución espacial de los puntos.
- Naturaleza del algoritmo de correlación empleado en el proceso de ajuste y extracción de datos.
- Disponibilidad o no de un modelo geométrico genérico o específico para el sensor utilizado en la toma de datos.

Objetivo 2

Revisar los métodos empleados en el control de los MDE, así como la diferencia de los resultados en función de la metodología empleada y el tamaño de la muestra de puntos de control empleados en los tests estadísticos. Analizar el error de los MDE generados a partir de las imágenes espaciales.

Objetivo 3

Realizar un análisis comparativo de los MDE generados con datos espaciales SPOT-HRV y ASTER-TERRA con MDE generados a partir de datos cartográficos convencionales.

1.4 Zona de estudio

Para cubrir los objetivos se buscó un zona de estudio sobre la que se desarrollaron los sucesivos trabajos, tanto de obtención de medidas por técnicas GPS para la generación de los MDE como para controlar la calidad de los mismos. La elección del área de estudio fue en función de una serie de criterios y limitaciones que acotaron la zona de trabajo. La principal restricción fue la disponibilidad de imágenes estereoscópicas SPOT, que fue el primer marco geográfico de trabajo. Estas imágenes recogen el área de Granada y Sierra Nevada .

Una vez revisada el área estereoscópica de las imágenes, para asegurar la correcta generación de los MDE, se buscó una zona que cumpliera una serie de requisitos de carácter topográfico basada principalmente en la variabilidad altimétrica de la zona.

Finalmente, como resultado de los criterios de selección, la zona de estudio ha sido la cuenca correspondiente al Embalse de los Bermejales, subcuenca del río Cacán, en el occidente de la provincia de Granada, enclavada en el llamado "surco intrabético" (Figura 1).

El acceso a dicha zona elegida se encuentra a 37 Km. de Granada, por la carretera A338 de Granada a Alhama de Granada junto al embalse de Los Bermejales.



Figura 1. Localización de la provincia de Granada y de la zona de trabajo en el Sureste de la Península Ibérica.

Sobre las características topográficas del terreno (Figura 2) se puede destacar que contiene zonas de relieve muy variado, desde una topografía llana a moderada en la zona norte de la cuenca, a zonas bastante más abruptas al Sur. La altitud del terreno comprende entre los 300 y los 2800 m sobre el nivel del mar, siendo la altitud media de unos 1060 m.

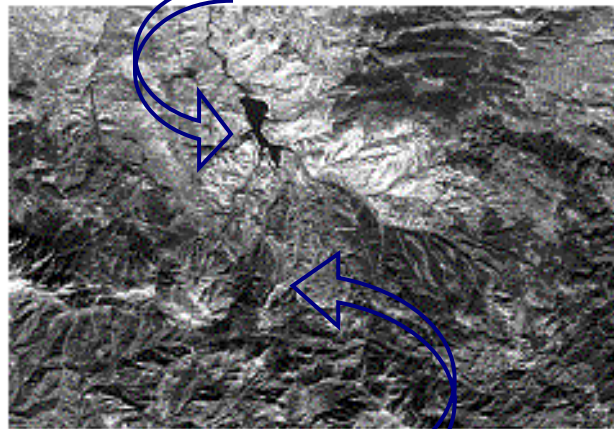
Las coordenadas de las esquinas de la zona son las siguientes:

- esquina superior izquierda :X = 407.800 m Y = 4.100.000 m
- esquina inferior derecha: X = 445.600 m Y = 4.076.700 m



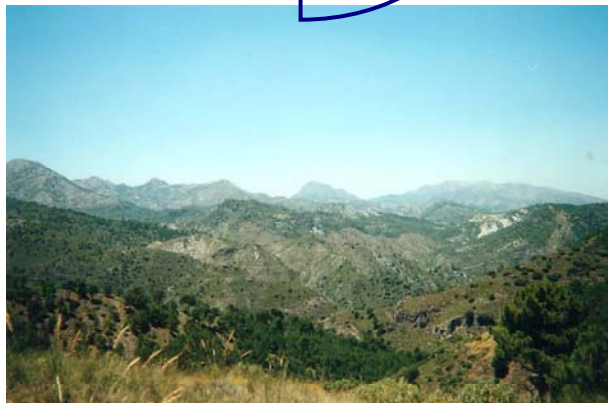
Embalse de los Bermejales (Zona Norte).

X= 407.800 m
Y = 4.076.700 m



Zona de trabajo.

X= 445.600 m
Y = 4.100.000 m



Zona Sur de Estudio.

Material

Para llevar a cabo este trabajo se dispone de datos procedentes de los sensores SPOT-HRV y ASTER-TERRA. En el primer caso se trata de datos estereoscópicos pancromático que cubren una zona de 60x60 km (ver zona de estudio), en el segundo se cubre una zona ligeramente más amplia.

Para construir los MDE se han utilizado las siguientes aplicaciones: Socet Set® (Leica Geosystems, <http://www.gis.leica-geosystems.com/>), Erdas Imagine® 8.5 con OrthoBASE Pro (Leica Geosystems) y Geomatica™ 8.2 con OrthoEngine (PCI Geomatics, <http://www.pcigeomatics.com/>). Para otras operaciones se ha utilizado el sistema de información geográfica ArcView 3.2 (ESRI, <http://www.esri.com/>) y la aplicación de proceso de imágenes ENVI 3.4 (Research Systems, <http://www.rsinc.com/>).

Capítulo 2 Revisión conceptual y antecedentes

2.1 Concepto de modelo digital de elevaciones, MDE

Partiendo de una definición clásica de modelo: "una representación simplificada de la realidad en la que se representan algunas de sus propiedades" ([Joly, 1988](#)), pueden diferenciarse dos tipos de modelos:

- Modelos analógicos: contruidos mediante mecanismos físicos que replican propiedades del objeto real (una maqueta, un mapa impreso).
- Modelos digitales: codificados en cifras, lo que permite su manejo con medios informáticos.

En [Felicísimo \(1994\)](#) se definen los MDE como una estructura (informática) de datos que representa la elevación de la superficie del terreno. En este caso se diferencian claramente los MDE de los MDT (modelos digitales del terreno), que suelen usarse como sinónimos. En el anterior trabajo los MDT son una categoría genérica donde se puede representar cualquier propiedad del terreno. Los MDE son MDT donde la variable representada es la elevación (ver Apartado 2.2).

Teniendo en cuenta esta salvedad de nomenclatura, podemos localizar referencias antiguas como la de [Miller y Laflamme \(1958\)](#), donde se reconoce a la fotogrametría como la principal herramienta en la generación de MDT, cuyas principales aplicaciones estarían en la ingeniería civil para el diseño de obras lineales (generalmente carreteras y autovías).

Otra referencia clásica es la de [Mark \(1978\)](#) que propone una clasificación sobre la estructura de datos que forma el MDE. Mark diferencia los MDT representados mediante superficies definidas matemáticamente y los MDT representados mediante puntos o líneas. Divide los métodos matemáticos usados para generar los MDT en globales y locales. Los métodos globales están basados en el ajuste de la superficie mediante funciones continuas tridimensionales, capaces en principio de adaptarse a las formas complejas de la superficie terrestre. Los métodos locales dividen la superficie en pequeñas celdas de forma regular, generalmente cuadrada, o en elementos irregulares de área aproximadamente uniforme.

Podemos ver en estas propuestas el antecedente directo de los modelos de datos usados actualmente (vectorial y raster), aunque la representación de la topografía mediante funciones globales se ha abandonado por la dificultad de ajustarlas a formas complejas.

Una característica fundamental de los MDE es su carácter digital frente al analógico de los mapas habitualmente empleados en Cartografía. Tal diferencia implica la necesidad de una codificación que lleva a la representación numérica de la variable a representar; en este sentido, los MDE pueden considerarse la versión digital de los mapas topográficos clásicos ([Moellering, 1983](#)).

2.2 MDE, MDT y MDS

Como ya se ha sugerido antes, existen numerosas definiciones de MDE y MDT, ocasionalmente confusas. Por ejemplo, en la referencia de [Miller y Laflamme \(1958\)](#) se definen los MDT como "una representación estadística de la superficie continua del terreno por un gran número de puntos seleccionados con coordenadas X , Y , Z conocidas

en un sistema arbitrario de coordenadas".

El US Geological Survey¹ (USGS) define los MDE como archivos de datos que representan digitalmente información cartográfica en un formato raster, es decir que la representación de la elevación del terreno es a intervalos de espaciado regulares en las direcciones X e Y, y se referencia el valor de Z a un datum vertical común. Posiblemente debido a esta definición y a la comercialización de los MDE del USGS como productos cartográficos, muchos autores asocian el término MDE con una estructura raster ([Maune, 2001](#)), lo cual no es correcto.

En este trabajo se acepta la propuesta de [Felicísimo \(1994\)](#) donde se plantea lo siguiente:

“Un **modelo digital de elevaciones** es una estructura de datos numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un terreno real puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua $z = \xi(x, y)$, donde z representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas (x, y) y ξ es una función que relaciona la variable con su localización geográfica. En un modelo digital de elevaciones la función anterior se aplica sobre un dominio espacial concreto, D. En consecuencia, un MDE puede describirse genéricamente como $MDE=(D, \xi)$.”

En la práctica, la función no es continua sino que se resuelve a intervalos discretos, por lo que el MDE está compuesto por un conjunto finito y explícito de elementos. Esta generalización implica una pérdida de información que afecta al error del MDE y, en consecuencia, se propaga a los modelos derivados que se construyan a partir de él.

Siguiendo con las propuestas del anterior autor, un **modelo digital del terreno** (MDT) sería una categoría más genérica de modelos digitales y se definiría como “una estructura de datos numérica que representa la distribución espacial de una propiedad de la superficie del terreno”.

¿Qué elevación se representa en un MDE? Se acepta que se trata de la elevación de la superficie del terreno por lo que deberíamos obviar estructuras como edificios o elementos como árboles. En el caso de incluir estos elementos, se suele hablar de **modelos digitales de superficie** o MDS. Este término se está usando cada vez con mayor frecuencia debido a que algunos nuevos métodos de captura de datos de elevación (LIDAR, por ejemplo) incluyen todos los elementos superficiales, sin aislar el terreno del resto de estructuras.

2.3 Aspectos geodésicos

Un MDE es una estructura de datos de “elevaciones” por lo que es importante analizar conceptualmente el significado de esta magnitud y sus posibles variantes (altitud dinámica, ortométrica y normal). Se puede generar un MDE con unas altitudes arbitrarias, pero generalmente la realidad es que las altitudes representadas en los MDE son altitudes ortométricas y, por definición, dicha altitud está referida a una superficie equipotencial: el geoide.

Caben aquí algunos interrogantes básicos: ¿por qué altitud ortométrica y no otro tipo de altitud? ¿por qué no emplear sencillamente desniveles medidos entre los puntos? ¿por qué se emplean superficies equipotenciales (geoméricamente irregulares) como

¹ http://rmmcweb.cr.usgs.gov/elevation/dpi_dem.html

nivel de referencia?. En este punto revisaremos una serie de conceptos geodésicos necesarios para responder a estas cuestiones.

Asimismo, ya que cada dato en un MDE tiene una localización planimétrica (X,Y), revisaremos conceptos sobre sistemas de referencia y datum geodésico. Para mayor detalle sobre estos temas se pueden consultar las obras de [Heiskanen y Moritz \(1967\)](#) y [Días y Mezcua \(1986\)](#).

2.3.1 ¿Qué es el geoide?

Antes de llegar a la definición de geoide es conveniente rescatar nociones físicas sobre la gravedad y el potencial gravitatorio de un punto.

Gravedad

La Ley de la Gravitación Universal dice que "todos los cuerpos se atraen con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas y en razón inversa del cuadrado de sus distancias". La fuerza de gravedad que se ejerce sobre un punto es el resultado de la atracción universal ejercida por la Tierra y de la fuerza centrífuga debida a la rotación terrestre sin considerar el mar. Se representa mediante el vector \vec{g} de aceleración de la gravedad, cuya dirección es la vertical y cuyo módulo, designado g , disminuye cuando aumenta la altitud. En el nivel del mar, g varía en función de la latitud desde $9,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ en el ecuador a $9,83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ en los polos. Para una latitud y una altitud dada, g depende de la distribución de masas en el interior de la Tierra.

Potencial gravitatorio

La gravedad deriva de un potencial, es decir, existe una función $W(M)$ en la que, en un punto M , \vec{g} es el gradiente:

$$\vec{g} = \overrightarrow{\text{grad}} W \quad (\text{Ecuación 1})$$

En una referencia ortonormal (OXYZ), las componentes de \vec{g} son las derivadas parciales de W :

$$\vec{g} = \begin{pmatrix} \frac{\partial W}{\partial x} \\ \frac{\partial W}{\partial y} \\ \frac{\partial W}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (\text{Ecuación 2})$$

La diferencia de potencial entre dos puntos P_O y P_N es igual al trabajo para desplazar una unidad de masa de un punto al otro siguiendo un camino continuo:

$$W(P_N) - W(P_O) = \int_{P_O P_N} \vec{g} \cdot d\vec{l} = - \int_{P_O P_N} g \cdot dh \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde:

$$d\vec{l} = \text{vector desplazamiento}$$

dh' = componente vertical de $d\vec{l}$

Las operaciones de nivelación (Figura 3) junto con los datos de gravimetría permiten la determinación de las diferencias de potencial al menos encima de los continentes; de forma discreta, la integral de la ecuación 3 queda de la siguiente forma:

$$W(P_N) - W(P_o) = - \sum_{k=0}^{N-1} g \partial h'_k \quad (\text{Ecuación 4})$$

La diferencia de potencial es independiente del camino seguido, mientras que la suma de los desniveles acumulada $\sum \partial h'_k$ si depende de dicho camino.

El potencial de gravedad de la Tierra puede expresarse analíticamente con distintos ordenes de aproximación. En la aproximación de orden cero la Tierra es considerada una esfera y en la aproximación de primer orden, un elipsoide. En el exterior de la Tierra, el potencial de gravedad de un punto cumple la ecuación de Laplace por lo que puede ser desarrollado en armónicos esféricos mediante sumatoria de polinomios de Legendre; cada término más que se considere en el desarrollo de dichos polinomios aumenta el orden de la aproximación del potencial gravitatorio. La expresión en primera aproximación es:

$$W = \frac{GM}{r} \left(1 - \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n P_{n,m}(\cos \theta) (J_{n,m} \cos m\lambda + K_{n,m} \sin m\lambda) \right) + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \theta \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde:

G : es la constante de gravitación universal

M : la masa de la Tierra

r, θ, λ : son las coordenadas esféricas (radio vector, colatitud y longitud)

a : es el radio ecuatorial de un elipsoide de referencia

$\bar{P}_{n,m}$: las funciones de Legendre normalizadas de primer grado ([Heiskanen et Moritz, 1967](#))

$J_{n,m}$ y $K_{n,m}$: los coeficientes normalizados del desarrollo (en la misma referencia)

Estos coeficientes pueden ser deducidos de medidas geoespaciales (telemetría láser, geodesia Doppler, etc.), de altimetría por satélite o de gravimetría; numerosos organismos de investigación publican estos conjuntos de coeficientes los cuales son conocidos con el nombre de "modelo global de potencial" (OSU91, EGM96, GRIM4, etc.).

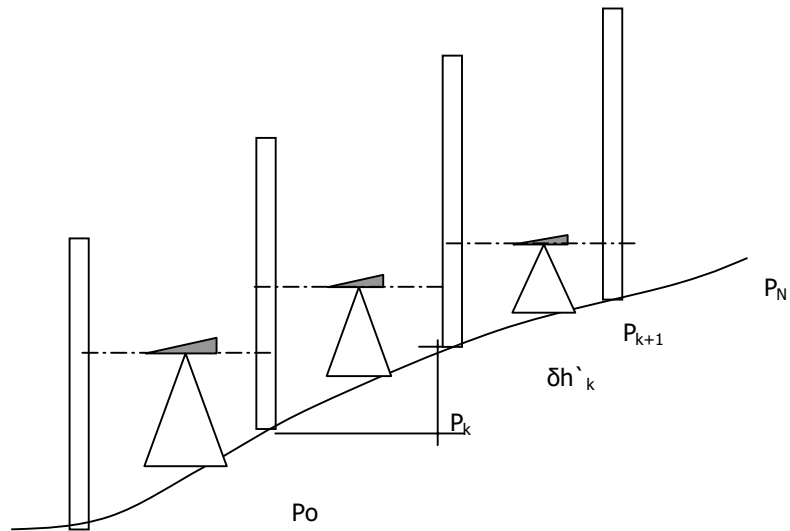


Figura 3. Nivelación geométrica entre puntos.

Superficie equipotencial y geoides

Una superficie equipotencial es el conjunto de puntos en los que el potencial toma un mismo valor. Una parte de una superficie equipotencial puede ser representada mediante un líquido en equilibrio bajo la única acción de su peso. La Tierra no es una esfera homogénea y, además, las superficies equipotenciales no son paralelas (Figura 4, el Δh no es constante).

Una línea de fuerza es una curva que en cada uno de sus puntos es ortogonal a las superficies equipotenciales, es decir, sus tangentes son verticales (Figura 4).

El *geoides* es la superficie equipotencial del campo gravitatorio coincidente con el nivel medio de los océanos. Sin embargo, por razones de corrientes marinas, de los vientos dominantes y variaciones de salinidad y de la temperatura del agua del mar, la superficie media de los océanos no coincide exactamente con el geoides.

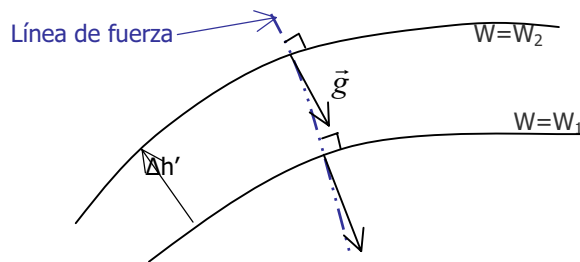


Figura 4. Superficies equipotenciales y línea de fuerza.

Campo gravitatorio normal

En el siglo XIX, los elipsoides de revolución se emplearon como modelos de la Tierra en geodesia. Es posible extender el uso de los modelos al dominio de la geodesia física definiendo una función $U(M)$, modelo de $W(M)$, y un potencial normal:

- Se elige un elipsoide geodésico E, generalmente egocéntrico.
- Se supone que este elipsoide gira sobre sí mismo como hace la Tierra, a la velocidad angular ω .
- La masa M del elipsoide es la de la Tierra.
- El elipsoide es una superficie equipotencial del campo normal, y el potencial normal sobre el elipsoide es igual al potencial real W_0 sobre el geode:

$$\mathbf{U}(\mathbf{M}) = \mathbf{W}_0 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Si se fija la forma del elipsoide, el valor de GM de la constante geocéntrica de gravitación y la velocidad de rotación de la Tierra, el potencial normal es una función que perfectamente determinada las coordenadas de M. Es entonces posible calcular el gradiente $\vec{\gamma}(M)$, que es el modulo del vector gravedad \vec{g} . Se llama gravedad normal a $\vec{\gamma}$ y su módulo sobre el elipsoide viene dado por la fórmula de Somigliana:

$$\gamma_0 = \frac{a\gamma_e \cos^2 \varphi + b\gamma_p \sin^2 \varphi}{(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde a y b son los semiejes mayor y menor del elipsoide, γ_e y γ_p representan la gravedad normal ecuatorial y polar en el elipsoide, y φ es la latitud geográfica (Figura 5).

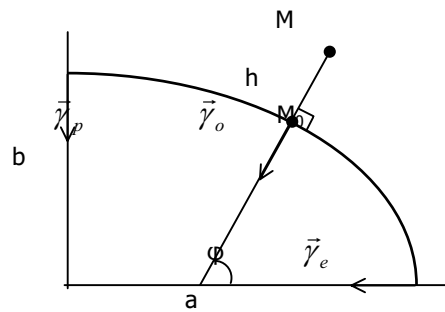


Figura 5. Gravedad normal sobre el elipsoide.

A la altura h por encima del elipsoide, el modulo de la aceleración normal se calcula a partir de γ_0 por la ecuación 10:

$$f = \frac{a-b}{a} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{2}{a} \left(1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi \right) h + \frac{3}{a^2} h^2 \right) \quad (\text{Ecuación 10})$$

donde f es el aplanamiento del elipsoide.

Estas fórmulas se emplean en los cálculos de algunos tipos de altitudes y para la realización de geoides gravimétricos.

2.3.2 Altitud y tipos de altitudes

De una forma general, la altitud de un punto M es su distancia a una superficie de referencia próxima al geode. Como se dijo anteriormente, la técnica de nivelación utilizada para deducir el desnivel entre dos puntos depende del camino seguido. Solamente la diferencia de potencial entre dos puntos es invariante. Esto conduce a adoptar la definición general de altitud de un punto de la siguiente forma:

$$H_{(M)}^{(*)} = \frac{W(A) - W(M)}{\gamma^{(*)}(M)} \quad (\text{Ecuación 11})$$

A es el punto de referencia donde la altitud es convencionalmente nula, por ejemplo en España este punto está en Alicante y es donde se registra el nivel medio del mar con un mareógrafo. El símbolo * distingue los diferentes tipos de altitudes. $\gamma^{(*)}(M)$ es una función de un punto, M, que tiene como valor una aceleración. Como la diferencia de potencial no depende del camino seguido, la Ecuación 11 garantiza una definición correcta y sin ambigüedades ni equívocos en la medida de altitudes.

La elección de la función $\gamma^{(*)}(M)$ determina el tipo de altitud. En particular, si el valor de $\gamma^{(*)}(M)$ es próximo al valor de la gravedad entre M y el geode, $H_{(M)}^{(*)}$ es próximo a la altura M por encima del geode.

Esta es la principal razón por la que es necesario relacionar la noción de altitud con la de potencial. Para establecer un marco de nivelación de gran extensión donde se cubran zonas montañosas, hay que tener en cuenta las variaciones de g y determinar las diferencias de potencial y no solamente los desniveles medidos por técnicas topográficas.

Altitud dinámica

Las altitudes dinámicas $H^{(D)}$ son definidas eligiendo para $\gamma^{(*)}(M)$ una constante llamada

$\gamma^{(D)}$ igual a la gravedad normal sobre el elipsoide a una latitud de 45°. $\gamma^{(D)}$ se calcula por la fórmula de Somigliana (Ecuación 7). Las altitudes dinámicas tienen un interés específico evidente: son directamente proporcionales a las diferencias de potencial y su interpretación física es muy simple. Sin embargo, pueden apartarse de las alturas por encima del geode en un 0.25%, lo que no es tolerable para numerosas aplicaciones donde el aspecto geométrico prevalece sobre el físico. Las redes de nivelación de grandes extensiones (nacionales o continentales) son fáciles de ajustar en altitudes dinámicas, pasando a continuación la transformación a las altitudes usuales. La referencia teórica de las altitudes dinámicas es el geode.

Altitud ortométrica

La altitud ortométrica se simboliza por $H^{(o)}$. Idealmente, la altitud ortométrica de un punto M es la longitud de la línea de fuerza del campo de gravedad por encima del geode (M M₀ como se aprecia en la Figura 6 es curvilínea). Este tipo altitud es la más

próxima a la altitud definida como "altura por encima del nivel medio del mar".

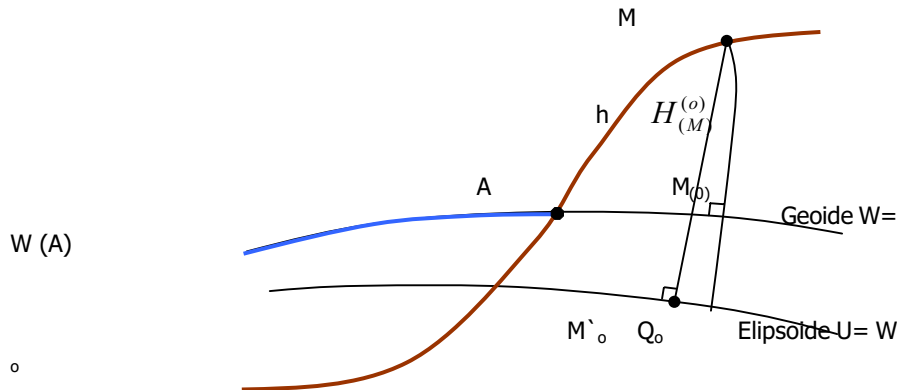


Figura 6. Altitud ortométrica.

El valor medio de g sobre el arco de la línea de fuerza $M M_0$ es:

$$\tilde{g} = \frac{1}{H_{(M)}^{(o)}} \int_{M_0 M} g ds \quad (\text{Ecuación 12})$$

ds es la diferencia de la abscisa curvilínea y la longitud de la línea de fuerza. La altitud ortométrica de M es entonces:

$$H_{(M)}^{(o)} = \frac{W(A) - W(M)}{\tilde{g}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Una fórmula práctica se obtiene reemplazando \tilde{g} por el valor de g en el punto medio entre M_0 y M , a la altitud de $\frac{H_{(M)}^{(o)}}{2}$, obtenida por el desarrollo limitado:

$$H_{(M)}^{(o)} = \frac{W(A) - W(M)}{g(M) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial g}{\partial H} \right)_{\text{medio}} \times H_{(M)}^{(o)}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

$\left(\frac{\partial g}{\partial H} \right)_{\text{medio}}$ es el gradiente medio de la gravedad entre los dos puntos M y M_0

$g(M)$ es la gravedad real en M sobre la superficie topográfica.

El cálculo de $H_{(M)}^{(o)}$ a partir $W(A) - W(M)$ es interactivo pero puede ser reemplazado por:

$$H_{(M)}^{(O)} = \frac{W(A) - W(M)}{g(M)} \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial g}{\partial H} \right)_{\text{medio}} \frac{W(A) - W(M)}{(g(m))^2} \right)$$

(Ecuación 15)

La modelización de $\left(\frac{\partial g}{\partial H} \right)$ es delicada, existen numerosas elecciones posibles y, por tanto, numerosos tipos de altitudes ortométricas. Para las altitudes ortométricas de Helmert, se emplea la fórmula de Bruns:

$$\frac{\partial g}{\partial H} = -2gJ + 4\pi G\rho - 2\omega^2 \quad (\text{Ecuación 16})$$

J es la curvatura media del geoide en el punto M_0 , ρ es el volumen de masa de la corteza terrestre. Se aproxima la curvatura del geoide por la del elipsoide, g por la aceleración normal y se toma por ρ un valor medio de $2670 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Esto da el gradiente de Poincaré-Prey:

$$\left(\frac{\partial g}{\partial M} \right)_{\text{media}} = -0,848 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} = -0,0848 \text{ mGal} / \text{m}$$

(Ecuación 17)

La referencia ideal de las altitudes ortométricas de Helmert es el geoide, en la posición donde la masa volumétrica real de la corteza terrestre está bien representada por el valor medio adoptado.

Para las altitudes llamadas ortométricas normales, se reemplaza el gradiente medio en la Ecuación 14 por el gradiente medio de la gravedad normal. Por tanto, la referencia ideal de altitudes ortométricas normales no es entonces exactamente el geoide.

Relación entre altitud ortométrica y altura elipsoidal

La línea de fuerza del campo de gravedad (MM_0) y la normal al elipsoide (MM_0') no se diferencian apenas por la curvatura de la línea de fuerza y la desviación de la vertical (Figura 7), por tanto se puede aproximar una altitud ortométrica de Helmert en altura elipsoidal por:

$$\mathbf{h} \approx \mathbf{N} + \mathbf{H}^{(O)} \quad (\text{Ecuación 18})$$

donde N es la altura del geoide sobre el elipsoide, también llamada ondulación del geoide.

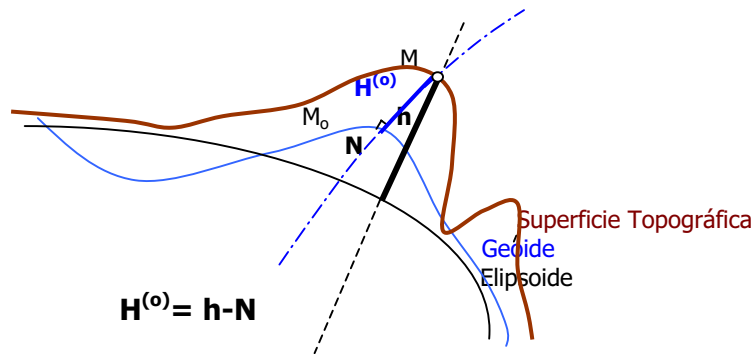


Figura 7. Relación entre altura ortométrica y elipsoidal.

H: altura ortométrica, **h:** altura elipsoidal, **N:** ondulación del geode (distancia entre el geode y el elipsoide).

Altitud normal

La superficie esferopotencial de un punto M es la superficie equipotencial del campo normal, donde el potencial normal es igual al potencial real de M (Figura 8). El punto Q es la intersección de la superficie esferopotencial y la línea de fuerza. La altitud normal de M es la altura Q_0Q de la superficie esferopotencial por encima del elipsoide, tomando la longitud de la línea de fuerza del campo normal. El arco de línea comprendido entre Q y M es la anomalía de la altitud, ζ .

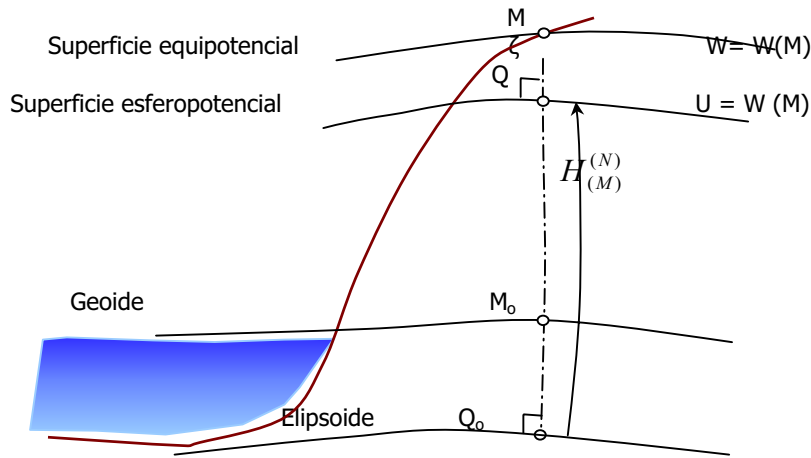


Figura 8. Altitud normal.

La aceleración normal media sobre el arco de la línea de fuerza del campo normal Q_0Q , $\tilde{\gamma}$, es:

$$\tilde{\gamma} = \frac{1}{H_{(M)}^{(N)}} \int_{Q_0Q} \gamma(h) \cdot d(s) = \frac{U(Q_0) - U(Q)}{H_{(M)}^{(N)}} = \frac{W(A) - W(M)}{H_{(M)}^{(N)}}$$

(Ecuación 19)

donde $d(s)$ es la diferencia entre la abscisa curvilínea de la línea de fuerza del campo normal.

Por tanto:

$$H_{(M)}^{(N)} = \frac{W(A) - W(M)}{\tilde{\gamma}} \quad \text{(Ecuación 20)}$$

En la práctica, la fórmula empleada para la altitud normal es:

$$H_{(M)}^{(N)} = \frac{W(A) - W(M)}{\gamma_o} \left(1 + (1 - f + m - 2f \sin^2 \varphi) \frac{W(A) - W(M)}{a\gamma_o} - \left(\frac{W(A) - W(M)}{a\gamma_o} \right)^2 \right)$$

(Ecuación 21)

donde γ_o está dada por la fórmula de Somigliana (ecuación 7) y m por la ecuación 9.

Contrariamente a las altitudes ortométricas, las altitudes normales son dependientes de una fórmula de gravedad normal, en medida válida o certera, de la elección de un sistema de referencia. Por el contrario, la altura normal no es dependiente de la distribución de masas en la corteza terrestre.

Quasigeoide. Relación entre altitud normal y altitud elipsoidal.

El quasigeoide es la superficie de altitud normal nula. Dicha superficie se obtiene, en cada punto, trasladando hacia la parte inferior de la superficie topográfica su altitud normal (Figura 9).

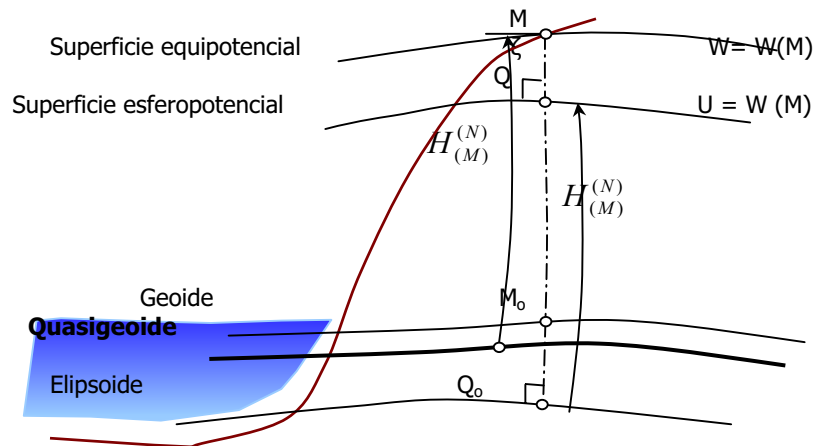


Figura 9. Altitud normal y quasigeoide.

Para pasar de una altura normal a una altura elipsoidal, no se comete un error superior a 1 mm de la normal en el elipsoide y la línea de fuerza del campo gravitatorio. Se obtiene entonces una relación entre la altura elipsoidal, la anomalía de altitud y la altitud normal:

$$h \approx \zeta + H^{(N)} \quad \text{(Ecuación 22)}$$

La diferencia entre la anomalía de altitud y la altitud del geoide es:

$$N - \zeta = H^{(N)} - H^{(o)} = \frac{\tilde{g} - \tilde{\gamma}}{\tilde{\gamma}} H \quad (\text{Ecuación 23})$$

donde $H^{(o)}$ designa la altitud ortométrica de Helmert y H designa indiferentemente la altitud normal o la altitud ortométrica. Se emplea la ecuación 16 y son equivalentes para la gravedad normal:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial H} = -2\gamma J_0 - 2\omega^2 \quad (\text{Ecuación 24})$$

J_0 es la curvatura media del elipsoide. Estas dos fórmulas permiten el cálculo de $\tilde{g} - \tilde{\gamma}$ a partir de los valores en la superficie de g y γ :

$$\tilde{g} - \tilde{\gamma} = g - \gamma - 2\pi G \rho H + \gamma(J - J_0)H \quad (\text{Ecuación 25})$$

Los tres primeros términos del segundo miembro, tras una pequeña corrección, representan la anomalía de Bouger (Δg_B). El siguiente término que contiene la curvatura del geoide es más difícil de evaluar pero es muy pequeño. Generalmente se realiza la siguiente aproximación:

$$H^{(N)} + H^{(o)} \approx \frac{\Delta g_B}{\tilde{\gamma}} H \quad (\text{Ecuación 26})$$

Esta ecuación permite convertir las altitudes de Helmert en altitudes normales.

2.3.3 Sistemas de referencia y datum geodésico

Se denomina *sistema de referencia* a un conjunto de parámetros cuyos valores, una vez definidos, permiten la referenciación precisa de localizaciones en el espacio.

A este conjunto de parámetros también se le suele llamar "datum geodésico". El término aislado "datum" se refiere a un punto concreto, localizado sobre la superficie terrestre y que, determinado mediante observaciones astronómicas, sirve de origen al sistema de coordenadas que se utilice; este punto se denomina "punto fundamental" o "punto astronómico fundamental".

Los sistemas de referencia pueden ser bidimensionales o tridimensionales, cartesianos o elipsoidales, locales o globales (Figura 10).

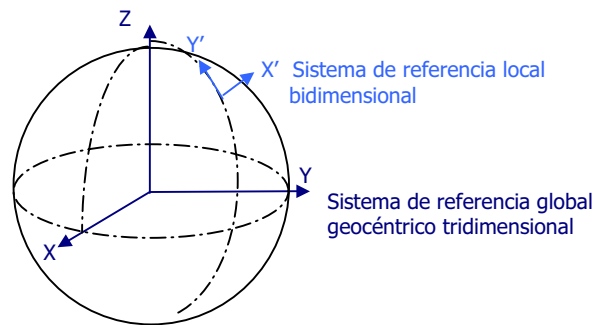


Figura 10. Sistemas de referencia local y global geocéntrico.

El más utilizado de los sistemas globales es un sistema tridimensional elipsoidal que define unas líneas de referencia (meridianos y paralelos) sobre un elipsoide y cuyo

origen está en el centro de masas de la Tierra. La referencia a un punto sobre la superficie terrestre se realiza mediante la localización respecto a los meridianos (longitud, λ), a los paralelos (latitud, ϕ) y mediante una altura, h , medida sobre la línea recta normal al elipsoide. Por tanto, la expresión de una localización en este sistema se realiza mediante la terna de valores (λ , ϕ , h) o coordenadas geográficas.

Un proceso básico en cartografía es realizar la transformación de un sistema de referencia tridimensional y global, como el anterior, a un sistema bidimensional, frecuentemente local. En esta transformación, llamada proyección geográfica, no es posible conservar simultáneamente todas las propiedades métricas (distancia, acimut y superficie) lo cual supone una pérdida de información y, en el aspecto de la representación gráfica, una distorsión más o menos notable.

El sistema de referencia local se diseña habitualmente buscando que la proyección suponga la mínima deformación espacial o, dicho de otro modo, la mínima pérdida de información espacial. La definición de un sistema local se realiza mediante la determinación de las dimensiones y posición de un elipsoide de referencia, de un modelo de gravedad, un punto astronómico fundamental y un sistema cartesiano de coordenadas.

Un sistema de referencia global se define, además de los parámetros anteriores, con otros como la constante de gravitación (GM), el coeficiente de forma dinámica² (J_2) y la velocidad angular de la Tierra (w). Ejemplos de datum globales son el WGS84 (*World Geodesic System* del año 1984) y el GRS80 (*Geodesic Reference System* del año 1980).

La representación sobre el terreno de un sistema de referencia se realiza mediante hitos o señales físicas (vértices geodésicos) con coordenadas conocidas en dicho sistema. La colección de vértices se denomina "marco de referencia geodésico".

Desde 1988, el sistema de referencia internacional es el denominado ITRS (*International Terrestrial Reference Systems*). Como los marcos de referencia cambian debido a la dinámica terrestre, el marco de referencia del ITRS (ITRF, *International Terrestrial Reference Frame*) se recalcula cada año. Los resultados son hechos públicos³, así como los parámetros de transformación entre los ITRS de cada año.

La importancia de los sistemas de referencia es enorme en Cartografía, donde la mayoría de los procesos emplean dichos sistemas.

Los dos sistemas utilizados en esta tesis son el empleado en la cartografía oficial española: ED50 (*European Datum 50*), sistema local que mide la elevación sobre el geoide, y el WGS84, sistema utilizado por el GPS (*Global Positioning System*), que mide elevaciones sobre el elipsoide WGS84. Sus características principales se comentan a continuación.

2.3.3.1 Sistema de referencia ED50

El sistema de referencia geodésico oficial español es el *European Datum 50* establecido como oficial en el Decreto 2303/1970. El ED50 es un sistema de referencia local basado en el elipsoide internacional de Hayford de 1924 y cuyo sistema de representación plano es la proyección conforme Universal Transversa de Mercator (UTM).

El Sistema ED50 sobre el cual se apoya la Red Geodésica Nacional Española se compone de los siguientes parámetros:

² El coeficiente de forma dinámica (J_2): es uno de los coeficientes fundamentales en geodesia cuyo valor es:

$$J_2 = \frac{C - A}{a^2 M}$$

donde C es el momento de inercia respecto al eje de rotación y A es el momento de inercia al eje ecuatorial; M es la masa de la Tierra; a es el radio ecuatorial.

³ URL: <ftp://lareg.ensg.ing.fr/pub/itf/ITRF.TP>

- Datum o punto fundamental: Torre de Helmert (observatorio de Potsdam, Alemania); este punto se eligió en los años 50 por estar centrado en la zona Europea de aplicación
- Elipsoide Internacional Hayford, elipsoide de revolución definido por los parámetros:
 - Semieje mayor (a) = 6 378 388 m
 - Semieje menor (b) = 6 366 992 m
- Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
- Las coordenadas son positivas en latitud al Norte desde el Ecuador y para la longitud al este del meridiano de Greenwich. Las cotas están referidas al nivel medio del mar en Alicante.

Existen otros datum posteriores definidos sobre el mismo punto fundamental (ED79 y ED87) pero no han llegado a emplearse en la cartografía española.

2.3.3.2 Sistema de referencia WGS84

El sistema de referencia WGS84 es el sistema utilizado por la técnica de posicionamiento de GPS. Es un sistema global geocéntrico (el origen de coordenadas es el centro de masas de la Tierra) y está definido por los siguientes parámetros:

- Origen: centro de masas de la Tierra.
- Sistemas de coordenadas:
 - Eje Z: dirección del polo de referencia del IERS — *The International Earth Rotation Service*— coincidente con la dirección del Polo Terrestre convencional del BIH — *Bureau International de l'Heure*— dado en 1984 (incertidumbre de 0.005").
 - Eje X: intersección del meridiano origen definido en 1984 por el BIH y el plano del Ecuador (incertidumbre de 0.005").
 - Eje Y: eje perpendicular a los dos anteriores y coincidentes en el origen.
- Elipsoide WGS84, elipsoide de revolución definido por los parámetros:
 - semieje mayor (a) = 6 378 137 m
 - semieje menor (b) = 6 356 752 m
- Constante de gravitación terrestre:

$$GM = (3\,986\,004,418 \pm 0,008) \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$
- Velocidad angular:

$$W = 7\,292\,115 \cdot 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$$
- Coeficiente de forma dinámica:

$$J_2 = -484,166\,85 \cdot 10^{-6}$$

2.3.3.3 Cambio de sistema de referencia

Algunas técnicas de medición (como GPS) y la cartografía oficial existente no emplean el mismo sistema de referencia. Como ya se ha dicho, en la técnica de medición GPS se usa el sistema global WGS84 y en la cartografía oficial española se emplea el sistema local ED50. Por tanto, es necesario resolver el problema del cambio de sistema de referencia de las coordenadas medidas con GPS para hacerlas compatibles con el sistema ED50.

El cambio de sistema de referencia se realiza mediante la aplicación de unos parámetros de transformación calculados mediante un conjunto de puntos cuyas coordenadas en ambos sistemas de referencia se conocen. Estos puntos son generalmente vértices

geodésicos. Los parámetros necesarios para convertir coordenadas de un sistema de referencia a otro son:

- Tres parámetros de traslación: ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)
- Tres parámetros de rotación: (θ, φ, ω)
- Un factor de escala: K

El sistema de ecuaciones para calcular los parámetros de transformación necesita un mínimo de tres puntos, pero generalmente se emplean más y se resuelve el problema por métodos de ajuste de mínimos cuadrados. La expresión matemática que relaciona ambos sistemas es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} + K \cdot R(\theta, \varphi, \omega) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 27})$$

donde:

$X_c Y_c Z_c$ son las coordenadas de un punto en el sistema WGS84

$X_o Y_o Z_o$ son las coordenadas del origen del sistema local en el sistema WGS84, o lo que es lo mismo los parámetros de transformación de translación.

$X Y Z$ son las coordenadas de un punto en el sistema local.

2.3.4 Sistema de referencia de altitud y datum vertical

Se llama "datum vertical" a una referencia objetiva para la medida de altitudes en un sistema de referencia local. El datum vertical también se denomina "sistema de referencia de altitudes".

Un sistema de referencia altimétrico debe estar definido por:

- Un tipo de altitud.
- Una unidad de medida.
- Las constantes relativas al tipo de altitud ($\gamma^{(D)}$ para la altitud dinámica, constantes del elipsoide para la altitud normal, etc.).
- Un punto fundamental y su altitud.

Generalmente este punto está próximo al mar y se calcula su altitud mediante mediciones con un mareógrafo.

- Una superficie de referencia fijada por una constante de W_0 .

Para las altitudes dinámicas y ortométricas la superficie de referencia ideal es el geoide. Para las alturas normales la superficie de referencia ideal es el quasigeoide.

Un sistema de altitudes se realiza mediante una red de señales materializadas en el terreno y a las que se les ha asignado una altitud. Para el cálculo de dichas altitudes son necesarias nivelaciones de precisión y medidas gravimétricas.

La diferencia entre la superficie de referencia altimétrica realizada diferirá de la superficie ideal en razón de los errores de medida y, para las altitudes ortométricas, en razón de los defectos de modelización del gradiente de gravedad. Por tanto, la calidad

de una referencia de altitudes es directamente función de la calidad de realización de la red que, a su vez, depende de la extensión geográfica (local, regional, nacional,...), de la exactitud de las observaciones, de la fiabilidad de la red y de la estabilidad de la señalización.

La definición de un datum vertical es compleja debido a que la forma de la Tierra y especialmente el nivel de mar no es estable. En los EEUU, la solución a este problema se buscó en 1929 con la definición de un "nivel de referencia geodésico vertical nacional" (NGVD'29). Este nivel de referencia es un plano horizontal calculado a partir de 21 medidas realizadas en los propios Estados Unidos y 5 en Canadá.

Desde 1933, el *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL⁴) mantiene una extensa red de instrumentos con los que mide, analiza e informa del nivel medio del mar. El PSMSL es un miembro de la *Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services* (FAGS) establecido por el *International Council of Scientific Unions* (ICSU).

En 1954, la Asociación Internacional de Geodesia (AIG), en un congreso en Roma, decidió que los cálculos de las redes nacionales de nivelación se realizaran con cotas geopotenciales y que cada país tuviera su propio sistema de altitudes.

Actualmente el Datum Vertical oficial en España es la Red de Nivelación de Alta Precisión (NAP), con 12000 km de desarrollo, y cuyo punto origen es Alicante. En Europa, el Datum Vertical es el EUVN cuyo punto origen es Ámsterdam.

2.4 Generación de un MDE

La generación de MDE se fundamenta en la obtención de los datos de elevación. Existen numerosos métodos de obtención de dichos datos, cuya precisión condicionará, al menos parcialmente, la exactitud del MDE. Además de la exactitud del dato, existen más características que particularizan cada uno de los métodos de obtención de elevaciones como son la densidad y estructura de los datos, el tiempo de obtención, etc.

Dependiendo del método empleado en la obtención de las elevaciones, el conjunto de datos obtenidos puede ser todo el conjunto completo de los puntos que componen el modelo (como es el caso de las técnicas fotogramétricas automáticas), o sólo una parte de los datos de elevación cuya densidad se aumentará posteriormente mediante técnicas de interpolación (caso de las técnicas topográficas). Cuando existen MDE con distintos procesos hasta la obtención de las elevaciones, es decir que unos datos son elevaciones obtenidas directamente y otros datos son elevaciones interpoladas, el error en los datos no puede considerarse homogéneo al mezclarse datos primarios u originales con datos interpolados.

En la presente tesis, la generación del MDE se realiza mediante técnicas fotogramétricas automáticas. Las coordenadas de puntos de los puntos de apoyo (PA), obtenidas mediante técnicas de GPS, son empleadas en la orientación de dichas imágenes en el proceso previo a la generación del MDE, es decir posicionar y escalar las imágenes para poder medir o extraer información sobre ellas. Para tener una perspectiva global de los numerosos métodos existentes, en el apartado 2.4.2 se realiza una breve revisión de los métodos de obtención de elevaciones; previamente, en el apartado 2.4.1 se clasifica los MDE por su estructura y en el apartado 2.4.3. se realiza una revisión de los métodos de interpolación empleados en la generación de MDE. La obtención de los datos de elevación por técnicas fotogramétricas automáticas puede realizarse a partir de diferentes datos estereoscópicos que son revisados en el apartado 2.4.4. Los principios básicos en los que se apoya las técnicas fotogramétricas automáticas se explican en el apartado 2.4.5 y los programas comerciales existentes para realizar fotogrametría aérea y espacial en el apartado 2.5.6.

⁴ <http://www.pol.ac.uk/psmsl/>

2.4.1 Modelos y estructuras de datos de los MDE

El conjunto de datos de elevaciones que forman el MDE puede organizarse de diferentes formas dentro de dos modelos de datos básicos: vectorial y raster. El modelo de datos vectorial utiliza el vector como unidad de información y los estructura de formas diversas para conseguir una representación adecuada de la variable. En el modelo de datos raster, el territorio se interpreta como un mosaico formado por teselas; cada tesela es la unidad de información y recoge el valor de la variable en la superficie que representa. En la Tabla 1 se muestra un esquema de las distintas estructura de datos en los MDE tal como se expone en [Felicísimo \(1994\)](#).

Las dos estructuras vectoriales más empleadas son las que representan las curvas de nivel y la estructura TIN (*Triangulated Irregular Network*, [Peucker y col., 1978](#)) formada por un conjunto de triángulos irregulares que se esquematizan al terreno.

En la estructura de contornos, la representación de la variable se realiza mediante vectores que describen la trayectoria de líneas isométricas que, en el caso de los MDE, son las curvas de nivel o isohipsas. La red de triángulos irregulares se construye habitualmente a partir de cotas previas mediante el procedimiento de triangulación de Delaunay.

La estructura raster más habitual es la matriz regular (URG, *uniform regular grid*) donde las celdas o teselas son cuadradas y de tamaño uniforme. La estructura matricial regular fue empleada ya desde la década de los 50 ([Chapman, 1952](#)). Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda; podemos hacer la salvedad de que la posición de las celdas está implícita en la propia estructura ya que el tamaño de malla es constante y la matriz regular.

Las matrices regulares emplean una cantidad de información constante por unidad de superficie, independientemente de la complejidad de la superficie a describir. Para solucionar este problema se propuso una estructura jerárquica denominada *quadtree* ([Samet y col., 1984](#)) donde cada celda o tesela puede ser la unidad de información o estar formada a su vez por una matriz de 2x2 de menor tamaño. La adaptabilidad de la estructura a la complejidad del relieve permite, en principio, una mayor eficacia en la representación del terreno ya que el tamaño de las teselas se hace mayor en zonas homogéneas y menor en zonas de mayor variabilidad.

Tabla 1. Modelos y estructuras de datos en los MDE (de Felicísimo, 1994).

VECTORIAL	CONTORNOS	curvas de nivel: líneas que unen puntos con la misma cota.
	TRIÁNGULOS	red de triángulos irregulares (TIN).
RASTER	MATRICES	regulares: teselas cuadradas de tamaño uniforme sobre una estructura de filas y columnas.
	MATRICES JERÁRQUICAS	<i>quadtrees</i> : matrices imbricadas que permiten una resolución espacial variable.

A pesar de estas alternativas, la capacidad cada vez mayor de los ordenadores y la simplicidad algorítmica ha hecho que, en la práctica, sólo se utilicen dos estructuras en las aplicaciones fotogramétricas y en los sistemas de información geográfica: TIN y matrices regulares.

2.4.2 Obtención de los datos de elevaciones

Para la obtención de las elevaciones del terreno existen diferentes técnicas, las cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos: directas e indirectas. Las primeras capturan los datos, como su nombre indica, directamente sobre el terreno, mientras que las segundas usan documentos preexistentes (cartografía, fotogramas, ...) para generar la información altimétrica.

Entre los métodos directos podemos mencionar los altímetros, los métodos GPS y los levantamientos topográficos. Entre los indirectos están la fotogrametría (que usa imágenes captadas previamente), la interferometría radar o la digitalización de mapas topográficos convencionales. Lógicamente, cada técnica de adquisición de elevaciones posee diferentes propiedades que condicionan la exactitud de cada dato.

Métodos directos

Los levantamientos topográficos son uno de los múltiples trabajos realizados en las tomas de datos topográficos. Principalmente se basan en la obtención de las coordenadas de los puntos más significativos del terreno, para su posterior representación. Se considera una técnica muy precisa pero los altos niveles de exactitud se consiguen con una elevada inversión en recursos por lo que este método suele limitarse a proyectos específicos de gran escala (1/50, 1/100, 1/500, 1/1000) sobre extensiones limitadas, como en arquitectura e ingeniería civil para el diseño y realización de obras.

Generalmente los equipos empleados son estaciones totales, aunque se están implantando cada vez más las técnicas GPS a pesar de sus limitaciones: dificultad de toma de datos en zonas arboladas o con edificaciones elevadas, que condicionan la cobertura y la calidad de la señal.

El método LIDAR mide de una forma directa puntos del terreno con densidad muy elevada, dependiente de parámetros como la altura de vuelo, frecuencia de barrido, etc. Estos sistemas, generalmente aerotransportados, combinan la utilización de sistemas láser de alta frecuencia con sistemas de posicionamiento global (GPS) y sistemas inerciales (INS) para la localización de la plataforma y la estabilidad del instrumento. Una ventaja importante de esta técnica es la posibilidad de medir en zonas de vegetación debido a la moderada capacidad de penetración del láser ([Kraus y Pfeifer, 1998](#); [Petzold y col., 1999](#)).

Métodos indirectos

El primero de los métodos indirectos para la obtención de elevaciones para MDE ha sido la digitalización de las curvas de nivel de mapas topográficos, muy empleado hasta hace poco para la codificación de los datos altimétricos en formato digital y para la construcción posterior del MDE. Su principal inconveniente es que la fuente de datos de partida, la cartografía, no suele tener una exactitud controlada; asimismo, el propio proceso de digitalización introduce distorsiones métricas que pueden ser directamente inaceptables. Por estos y otros motivos, como la disponibilidad de técnicas alternativas, el método de digitalización se emplea cada vez menos y va dejando lugar a técnicas más adecuadas.

Las técnicas fotogramétricas son, en la actualidad, las más empleadas para la generación de MDE. En 1980, la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección, ASPRS, incluyó en su definición de fotogrametría el uso de datos espaciales, además de las imágenes fotográficas convencionales ([Slama, 1980](#)).

La fotogrametría se basa en la medida sobre pares estereoscópicos. Se puede distinguir entre las técnicas fotogramétricas analíticas y las técnicas fotogramétricas digitales en función del sistema fotogramétrico empleado, analítico (óptico-mecánico asistido por ordenador) o completamente digital. Paralelamente, el formato de las imágenes

puede ser de naturaleza analógica (fotogramas o negativos fotográficos convencionales) o digital (donde se incluyen las imágenes tomadas desde satélites).

La principal ventaja de los sistemas fotogramétricos digitales frente los sistemas analíticos es la posibilidad de introducir automatismos en algunas fases del proceso. De las distintas tareas que realizan los sistemas fotogramétricos digitales (orientaciones, triangulación, restitución, generación de MDE y ortoimágenes) no todas son completamente automáticas. Los sistemas fotogramétricos digitales se diferencian, entre otras cosas, por el grado de automatismo que permiten en cada fase del proceso, así como por la capacidad de procesamiento, ajuste de las imágenes y capacidad de visión estereoscópica. Las grandes diferencias de precios de los programas se justifican principalmente en estas capacidades. En el apartado 2.4.6 se realiza una revisión de los programas fotogramétricos para estaciones digitales disponibles en la actualidad.

El objetivo que se plantea en la generación de un MDE es obtener una adecuada representación de la superficie topográfica del terreno buscando un equilibrio entre la cantidad de datos y la generalización inherente al proceso de modelado. En el caso de matriz regular la información obtenida se completa con información de líneas de ruptura y otros elementos geomorfológicos. Cuando la captura se realiza de forma manual mediante un sistema analítico, el procedimiento es más lento y costoso. No obstante, se considera un procedimiento de una elevada efectividad y con una gran precisión, basado en el principio de pocos puntos pero bien seleccionados. La generación automática de MDE se desarrolla con más profundidad en el apartado 2.4.5 por ser la metodología empleada en la presente tesis.

La interferometría SAR (*Synthetic Aperture Radar*) y los altímetros láser o radar son métodos que pueden alcanzar precisiones elevadas. La interferometría radar es una técnica que usa las diferencias de fase entre dos imágenes radar para determinar la distancia entre la superficie y la plataforma aérea (satélite o avión). El interferograma resultante de la comparación de dos imágenes de fase tomadas desde diferentes puntos de vista permite restituir el relieve de la superficie. La distancia entre tomas debe estar dentro de unos rangos determinados para evitar una pérdida total de coherencia entre las imágenes; esta distancia crítica depende de la aplicación y se ha valorado para el ERS-1 en unos 150-300 m para la construcción de MDE (Solaas, 1994; Mercer, y col. 1998). Para descripciones más detalladas de la interferometría radar existen muchos trabajos relativos a esta técnica⁵.

2.4.3 Datos estereoscópicos espaciales

Los pares estereoscópicos han sido hasta hace pocos años exclusivamente fotogramas aéreos, tomados por cámaras de gran formato desde aviones en vuelo a diferentes altitudes. Estas cámaras garantizan un control estricto sobre las condiciones de la toma en varios aspectos: planeidad del negativo, localización exacta en el plano focal, conocimiento preciso de las características del objetivo (longitud focal, aberraciones de las lentes), altura del vuelo en el momento de la toma, etc.

Actualmente han cambiado algunas cuestiones que hasta ahora se habían mantenido inmutables. Por ejemplo, en la fotogrametría "convencional" los ejes de la toma son verticales (perpendiculares al terreno), paralelos y las imágenes se toman desde aviones mediante cámaras métricas analógicas sobre película fotográfica de gran formato (23x23 cm). Lógicamente, entre tomas consecutivas existe un solapamiento o recubrimiento que permite la estereoscopia. Este recubrimiento suele ser de 2/3 del nega-

⁵ Existe una completa recopilación de referencias sobre interferometría en la dirección: <http://www.jpl.nasa.gov/srtm/interferometrybibliography.html>

tivo. La película debe someterse a un proceso de revelado para poder utilizarse en las estaciones fotogramétricas analíticas y debe ser digitalizada mediante un escáner para utilizarla en las estaciones digitales.

Los cambios más recientes afectan a todo el proceso, tal como se expone a continuación.

Toma normal y toma oblicua

El primer cambio afecta a la concepción de la toma. Se denomina toma normal a la toma de imágenes donde los ejes ópticos son paralelos y aproximadamente perpendiculares a la superficie analizada. En el caso de la fotografía aérea, la cámara estaría orientada según la vertical y las fotografías se toman secuencialmente según avanza el avión cuidando que el recubrimiento o solape sea suficiente (Figura 11).

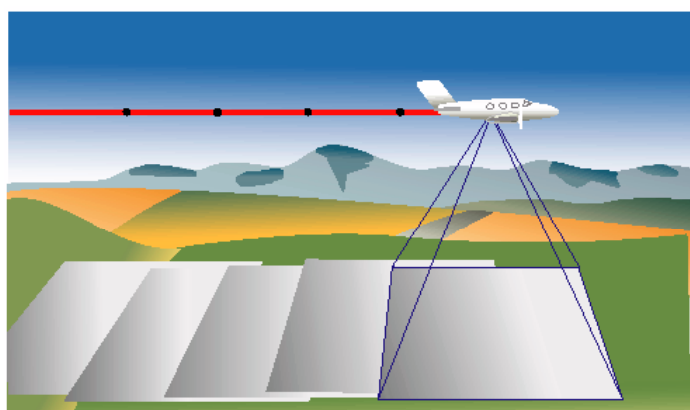


Figura 11. Esquema de una toma normal con solape longitudinal en fotografía aérea.

Este procedimiento no es el único posible: se habla de toma oblicua cuando el eje óptico no es perpendicular al terreno. En la Figura 12 se muestra un esquema donde hay tres tomas simultáneas: una vertical y dos oblicuas, hacia delante y hacia atrás. En esta figura aparece además otro concepto importante: no se realiza una toma instantánea sino un barrido continuo de la superficie terrestre. Este cambio tiene fuertes repercusiones en la geometría de las imágenes ya que se pasa de una perspectiva cónica, en el caso normal, a una cilíndrica en los sensores de barrido, pues la imagen se construye capturándola línea a línea mediante vectores de sensores CCD.

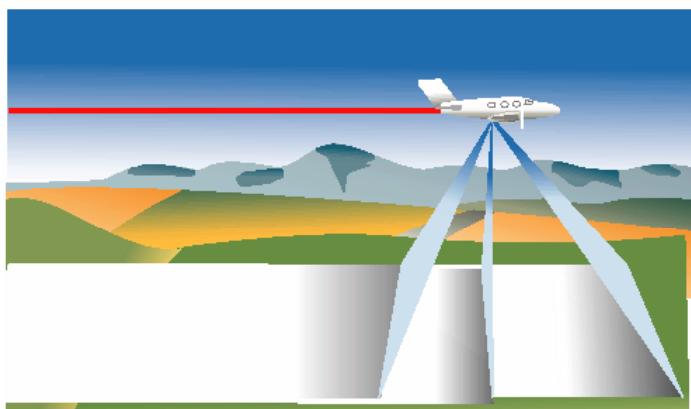


Figura 12. Esquema de una toma oblicua de barrido en fotografía aérea.

Fotogrametría aérea y fotogrametría espacial

La siguiente revolución ha venido dada por la incorporación de la capacidad estereoscópica a los sensores transportados por satélites. Aunque esto supone lógicamente una pérdida de resolución espacial debido a la altura de vuelo, la cobertura y la periodicidad de las tomas se hacen mucho mayores.

El primer satélite con capacidad estereoscópica fue SPOT, lanzado en 1986, que permitió obtener pares estereoscópicos mediante variaciones laterales en el ángulo de vista, programables desde tierra.

En la Tabla 2 se muestran los sistemas espaciales que proporcionan imágenes estereoscópicas. En este tipo de imágenes se pueden distinguir dos tipos fundamentales de estereoscopia (Figura 13):

- Estereoscopia lateral (*cross-track*): las imágenes se obtienen desde dos órbitas distintas; generalmente una imagen se toma desde un punto de vista cenital y normal a la superficie; la otra será oblicua, lo que implica que el sensor tendrá capacidad de giro lateral (perpendicular a la trayectoria orbital).
- Estereoscopia longitudinal (*along-track*): las imágenes son obtenidas desde posiciones sucesivas en la misma órbita. Como en el caso anterior, una de ellas será cenital y la otra oblicua, bien hacia adelante (*forward*), bien hacia atrás (*backward*) o ambos (Figura 13).

Un ejemplo del primer caso es el sistema HRV del SPOT-4, mientras que ASTER lo es de toma longitudinal (hacia atrás), lo mismo que MOMS-2 aunque aquí se realiza la toma desde tres posiciones simultáneamente (adelante, nadiral y atrás). La principal ventaja de la estereoscopia longitudinal frente a la lateral es que el periodo temporal entre imágenes es mínimo, mientras que en la estereoscopia lateral el periodo entre tomas puede ser de varios días, incluso hasta varias semanas, con las diferencias radiométricas que esto implica.

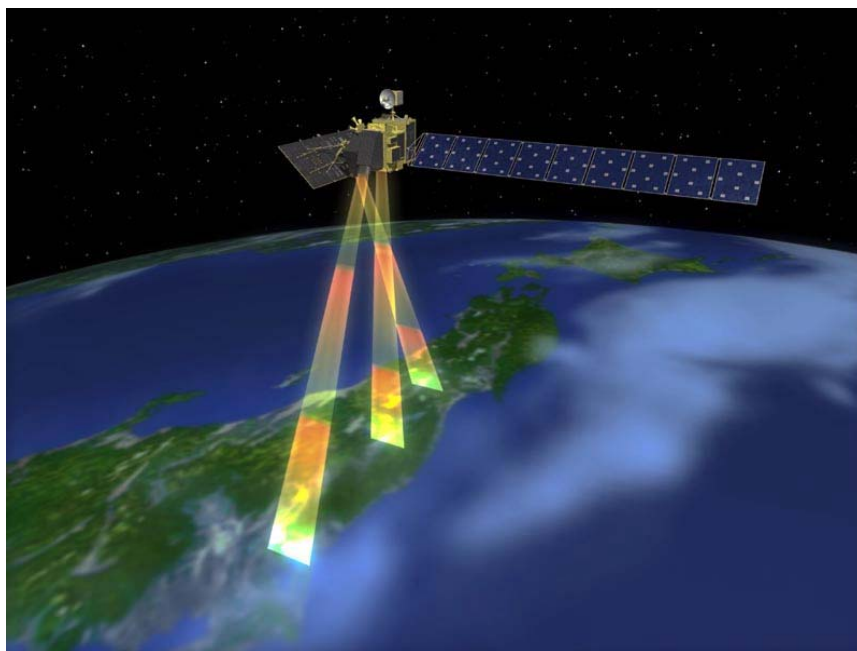


Figura 13. Esquema de las tomas vertical y oblicuas en el satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), cuyo lanzamiento está previsto para el año 2004. Los ángulos de las tomas oblicuas son de $\pm 24^\circ$ sobre la vertical.

Tabla 2. Sistemas espaciales con capacidad estereoscópica.

Sistema	País	SV	RE (m)	NB	C (km)	Fecha
CBERS	China-Brasil	Lateral	20	1/4	113	1993/4
EROS A1			1,8		13,5	1995
EROS B1			0,87	1/3	13	2004
IKONOS		Longitudinal	0,82	1/4	11	1999
IRS-P5	India	Longitudinal adelante/atrás	2,5	1	30	2003
KOMPSAT-1	Corea	Lateral	6,6	1	17	1999
MOMS-2	Alemania	Longitudinal adelante/nadir/atrás	4,5/13,5	7	37 x78	1993
OMI	Reino-Unido	Longitudinal adelante/atrás	5	1	60	1990
OrbView 3			1	1/4	8	2002
SPOT-HRV	Francia	Lateral	10	1/3	60 x 60	1986
TERRA-ASTER	USA-ESA-Japón	Longitudinal adelante/nadir	15	1/14	60	1998

SV: tipo de estereoscopía; **RE:** resolución espacial; **NB:** número de bandas espectrales; **C:** cobertura o superficie de recubrimiento de la imagen en el terreno; **Fecha:** fecha de lanzamiento.

Las principales características de estos sistemas se presentan a continuación:

CBERS (*China Brasil Earth Resources Satellite*) es un sistema multisensor (WFI, *Wide Field Image*; HRCCD, *High Resolution CCD*; IR_MSS, *Infrared Multispectral Scanner*) que captura datos a diferentes resoluciones (260, 20 y 80 m respectivamente).

En diciembre de 2000, ImageSat International⁶ lanzó el primer satélite **EROS** (*Earth Resources Observation Satellite*) a bordo del vehículo ruso Start-1. EROS A es el primer satélite de una constelación heliosincrónica de órbita polar que ImageSat planea desplegar a lo largo de esta década. El satélite EROS A destaca por la flexibilidad en la adaptación del plan de adquisición de imágenes ya que permite maniobrar para ajustarse a la configuración de la observación especificada por el usuario, tanto en la toma vertical como en tomas oblicuas de hasta 45°. EROS A orbita a 480 km de altitud y está equipado con una cámara cuyo plano focal de detectores CCD producen imágenes pancromáticas de 1,8 m de píxel y de 13,5 km de ancho en la toma vertical en el modo estándar (7043 píxeles por línea).

Se tiene previsto que entre el 2004 y 2005 se lanzará el satélite EROS B1. Este satélite será el primero del Programa Eros B que prevé un total de seis. Cada uno de ellos cruzará el ecuador a diferentes horas proporcionando una constelación con una revisita diaria de cualquier punto de la Tierra.

Los satélites EROS B estarán equipados con cámaras capaces de tomar imágenes pancromáticas y multiespectrales. En el modo llamado estándar el píxel medirá 0.87 m en pancromático y 3.28 m en multiespectral, con una anchura de 13 km en la toma vertical, con 20.000 píxeles por línea.

IKONOS 2 fue el primer satélite con píxel inferior al metro y fue puesto en órbita en septiembre de 1999. La capacidad multiespectral es de 4 bandas (azul, verde, rojo e infrarrojo próximo) con una resolución espacial de 4 m mientras que en pancromático es de 0.8 m. Los productos proporcionados por IKONOS⁷ de SpaceImaging EOSAT tienen distintos niveles de corrección y de exactitud, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Productos de IKONOS_2 comercializados por Space Imaging.

Productos GEO	Características	CE90 XY/Z
CARTERRA GEO	corrección geométrica y radiométrica	±50 m / ±50 m
Productos ortorrectificados		
REFERENCE	imágenes ortorrectificadas	±25,4 m
MAP	imágenes ortorrectificadas	±12 m
PRO	imágenes ortorrectificadas	±10 m
PRECISION	imágenes ortorrectificadas	±4 m
PRECISION PLUS	imágenes ortorrectificadas	±2 m

CE90: exactitud posicional expresada como intervalo de confianza circular al 90%.

Es importante resaltar que IKONOS no ofrece información orbital detallada y, por tanto, no permite una corrección directa de las imágenes, creando considerables dificultades en la explotación de las mismas para cartografía por técnicas fotogramétricas. [Toutin & Cheng \(2001\)](#)

⁶ <http://www.imagesatintl.com/aboutus/satellites/satellites.shtml#>

⁷ <http://www.spaceimaging.com/products/ikonos/index.htm>

analizan las imágenes IKONOS dejando constancia de los principales problemas de los productos GEOS:

- No proporciona los datos detallados de posición del satélite ni parámetros orbitales.
- Inherentemente, imposibilidad del usuario de procesar y ortorectificar las imágenes IKONOS GEO.
- Elevado coste, 5 veces mayor, de las imágenes corregidas y georreferenciadas (productos ortorectificados).

Una de las características importantes de las imágenes IKONOS es su capacidad de adquisición de imágenes estereoscópicas con dos o tres días de diferencia entre las tomas. [Li y col. \(2000\)](#) confirman la exactitud posicional de 4 m (CE 90%) asegurada por *Space Image* con imágenes IKONOS simuladas. [Toutin y col. \(2001\)](#) evalúan el error del MDE extraído de imágenes estereoscópicas IKONOS mediante métodos fotogramétricos; el resultado obtenido empleando 12 puntos de apoyo y 34 puntos de control es un ECM en la elevación de 3.6 m.

Los satélites **IRS** (*Indian Remote Sensing*) forman un sistema del NNRMS (*National Natural Resources Management Systems*) del Departamento del Espacio (DOS, *Department of Space*). Desde que en marzo de 1988 se lanzó IRS-1A hasta la actualidad se han puesto en órbita diversos satélites de muy diversas características: IRS-1A, IRS-1C, IRS-1D, aunque ninguno de ellos proporciona imágenes estereoscópicas. Pero se prevé que el siguiente satélite, IRS-P5, sí proporcionará datos estereoscópicos con una resolución espacial de 2,5 m. Está previsto su lanzamiento durante el presente año 2003.

El sensor alemán **MOMS-2** fue lanzado en 1993 dentro de la misión espacial Shuttle STS-55 y es uno de los primeros sensores diseñados para ser explotado por métodos fotogramétricos y para generar cartografía temática. Los datos estereoscópicos MOMS-2 son obtenidos por un sensor trilineal que recoge la información desde tres puntos de vista diferentes. MOMS-2 proporciona datos en 7 bandas de las cuales tres son pancromáticas con una disposición de una vertical y las otras dos oblicuas ($\pm 21,4^\circ$). El tamaño del píxel varía de 4,5 x 4,5 m en la posición vertical a 13,5 x 13,5 m en la posición más extrema. Los usos de los datos multiespectrales, de alta resolución y estereoscópicos han sido expuestos por [Lanzl y col., \(1995\)](#). Existen otros estudios sobre las posibilidades de combinación de los datos multiespectrales con los datos estereoscópicos ([Schneider y col., 1999](#)).

ORBIMAGE planifica una constelación de cinco satélites. OrbView-1, lanzado en 1995, proporciona imágenes con píxel de 10 km para aplicaciones atmosféricas; OrbView-2 proporciona imágenes multiespectrales del océano y de tierra con 1 km de resolución y fue lanzado en 1997. Finalmente **OrbView 3**⁸ toma imágenes de 1 m de píxel en modo pancromático y 4 m en modo multiespectral y fue lanzado en el año 2002. Este satélite recoge datos de una misma zona en un incremento de tiempo inferior a tres días con una posibilidad de desviar el ángulo de toma en 45° , permitiendo de esta forma la obtención de datos estereoscópicos.

El satélite **Kompsat-1**⁹ del *Korea Aerospace Research Institute* dispone de varios dispositivos para la obtención de datos: una cámara electro-óptica (EOC), un escáner de imágenes multiespectrales del océano (OSMI) y un sensor para mediciones físicas (SPS). La cámara electro-óptica (EOC) de Kompsat-1 está diseñada para la producción de cartografía a escala 1/25000 del territorio coreano. Dichas imágenes tienen 6.6 m de píxel y 17 km de ancho y pueden ser tomadas de forma oblicua con ángulos de $\pm 45^\circ$ para la obtención de datos estereoscópicos.

⁸ http://www.orbimage.com/prods/orbview_3.html

⁹ <http://spaceflightnow.com/taurus/kompsat/991220kompsat.html>

Es conveniente mencionar también los nuevos satélites llamados de alta resolución, como es el caso de QuickBird¹⁰. Este satélite, de la compañía norteamericana Digital-Globe, fue lanzado desde Vandenberg en octubre de 2001, a bordo de un cohete Delta-II. El satélite opera desde una órbita heliosincrónica a unos 450 km de altitud proporcionando dos tipos de productos: imágenes estándar (70 cm de píxel y datos pancromáticos) y 2.8 m (datos multiespectrales) e imágenes básicas (píxel de 61 cm y datos pancromáticos) y 2.44 m (datos multiespectrales). Cada imagen cubre una superficie de 16,5 por 16,5 km.

Esta nueva generación de satélites de alta resolución espacial está revolucionando los trabajos en las comunidades cartográficas y fotogramétricas. Pero por el momento, los principales usos de estas imágenes de alta resolución son la actualización de información planimétrica de cartografía ya existente y no la extracción de información altimétrica para la generación de MDE, como se ha visto en el caso de IKONOS ([Toutin & Cheng, 2000](#)).

En la actualidad, a pesar de la gran potencialidad que ofrecen estas imágenes de alta resolución, las cartografía de media y gran escala se sigue realizando con fotografía aérea principalmente por la falta de madurez de la metodología. El elevado coste de las imágenes estereoscópicas fue un motivo frecuentemente aludido pero existen ejemplos de datos a muy bajo coste: por ejemplo, ASTER (55 €) y MOMS-2 (128 € o gratuito si se contribuye con datos como puntos de apoyo).

En esta revisión se puede apreciar que existe ya una cantidad importante de datos espaciales con tendencia a mejorar tanto en resolución espacial como en posibilidades estereoscópicas. Esta situación plantea nuevos objetivos en el desarrollo de métodos de producción cartográfica, tanto en MDE y ortoimágenes, de las técnicas fotogramétricas automatizadas.

2.4.4 Generación automática de MDE mediante fotogrametría digital

Ya se ha comentado la diversidad de datos y métodos que intervienen en la generación de los modelos digitales de elevaciones. En este apartado vamos a explicar concretamente las técnicas fotogramétricas automatizadas aplicadas a la generación de los MDE a partir de las imágenes SPOT y ASTER. Las etapas del proceso y los conceptos básicos implicados en cada una de ellas son las siguientes:

- Localización de las imágenes estereoscópicas y metadatos.
- Captura de puntos de apoyo para construir el modelo estereoscópico.
- Construcción del modelo estereoscópico.
- Estimación de los valores de paralaje.
- Estimación de los valores de elevación y construcción del MDE.
- Valoración y control del error.

Imágenes y metadatos

Los procesos automáticos se realizan en estaciones digitales donde las imágenes suelen estar digitalizadas en formatos estándar (TIF, por ejemplo) o formatos propios de las aplicaciones (IMG en Erdas, por ejemplo). En nuestro caso, las imágenes son digitales en origen debido a la forma de captura por lo que no es necesaria una etapa específica de digitalización mediante un escáner como ocurre en la fotogrametría analítica. Son frecuentes, sin embargo, la aparición de otros problemas como:

¹⁰ http://www.digitalglobe.com/?goto=products/qb_basic

- La transformación de los formatos de distribución de las imágenes a formatos legibles por las aplicaciones informáticas. Por poner un ejemplo, las imágenes ASTER se distribuyen en formato HDF (Hierarchical Data Format¹¹), no legible por muchas de las aplicaciones fotogramétricas y de teledetección. En algunos casos, el propio formato genera limitaciones como, por ejemplo, impedir la realización de mosaicos.
- Determinación de la información relativa a las características del sensor, parámetros orbitales y metadatos relacionados que serán necesarios para la construcción del modelo estereoscópico. Por ejemplo, SPOT contiene información en sus ficheros de cabecera que puede ser utilizada por los programas de fotogrametría, con lo que algunos procesos (orientación interna, por ejemplo) se realizan automáticamente. En cambio, otros datos (ASTER, por ejemplo) se suministran sin información detallada lo que dificulta las tareas posteriores.

La incompatibilidad de formatos es un problema que puede resolverse pero que genera un enorme volumen de trabajo improductivo. En nuestro caso, el formato HDF se interpreta y utiliza directamente en PCI, es necesario transformarlo en Erdas y es ilegible en Socet Set.

Captura de puntos de apoyo

Los puntos de apoyo son localizaciones identificables en las imágenes y con coordenadas conocidas. La construcción del modelo estereoscópico necesita un conjunto de puntos de apoyo bien determinados cuya influencia (número y distribución) en la calidad del MDE es uno de los parámetros analizados en este trabajo. Los puntos de apoyo pueden determinarse a partir de fuentes diversas como mapas preexistentes, pero sin duda la mejor opción es su medida mediante técnicas GPS. Este aspecto se desarrolla en el Capítulo 3.

Construcción del modelo estereoscópico

Esta fase se realiza en la estación fotogramétrica digital y se refiere esencialmente a lo que se ha denominado orientación de las imágenes, que suele dividirse en tres procesos:

- La *orientación interna* es una transformación que permite establecer la correspondencia entre las coordenadas de los píxeles de la imagen digital (fila, columna) y las coordenadas en un sistema cartesiano 3D que tiene su origen en el centro de proyección de la toma (sistema de coordenadas imagen). La orientación interna depende de factores como la distancia focal de la cámara y su localización, los parámetros de definen las distorsiones del objetivo, etc. Con las imágenes SPOT la orientación interna se realiza de forma automática ya que todos los parámetros mencionados son conocidos pero no es el caso de ASTER.

En la orientación interna se reconstruye el haz de rayos definidos por los puntos imagen y el centro de proyección. La operación matemática que realiza el proceso de OI es una transformación bidimensional afín (ver Figura 14).

Las ecuaciones matemáticas que resuelven esta operación son:

$$X_f = \lambda_X X_p \cos \alpha - \lambda_Y Y_p (\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta) + Tx$$

$$Y_f = \lambda_X X_p \sin \alpha + \lambda_Y Y_p (\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta) + Ty$$

¹¹ La información sobre este formato está disponible en el National Center for Supercomputing Applications, en la página <http://hdf.ncsa.uiuc.edu/>

(Ecuación 28)

donde:

λ_x = factor de escala del eje X_p con respecto al eje X_f .
 λ_y = factor de escala del eje Y_p con respecto al eje Y_f .
 β = ángulo entre el eje Y_p y la posición ortogonal teórica del mismo.
 α = giro entre el sistema comparador y el sistema fiducial.
 T_x = traslación de la componente X entre ambos sistemas.
 T_y = traslación de la componente Y entre ambos sistemas.

Se deben determinar seis incógnitas: a , b , c , d , T_x , T_y por lo que es necesario conocer un mínimo de tres puntos en ambos sistemas, con lo que se generan seis ecuaciones. Si se quiere redundancia en la resolución del sistema se necesitarán más puntos.

Los valores de las incógnitas a , b , c , y d son:

$$\begin{aligned}
 a &= \lambda_x \cos \alpha \\
 b &= \lambda_y (\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta) \\
 c &= \lambda_x \sin \alpha \\
 d &= \lambda_y (\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta)
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación 29}$$

Finalmente el valor de las nuevas coordenadas de un punto tras la transformación afín será:

$$\begin{aligned}
 X_f &= aX_p - bY_p + T_x \\
 Y_f &= cX_p + dY_p + T_y
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación 30}$$

- La *orientación relativa* relaciona geoméricamente las imágenes estereoscópicas entre ellas, formando el llamado "modelo estereoscópico". Esta orientación se realiza mediante la identificación de puntos homólogos en cada una de las imágenes.
- Finalmente, la *orientación absoluta* ajusta el modelo estereoscópico formado en el paso anterior a una escala real; es decir, calcula y asigna las coordenadas terreno de cada punto. Este proceso se realiza mediante la medida de puntos de apoyo, con coordenadas terreno conocidas, sobre las imágenes.

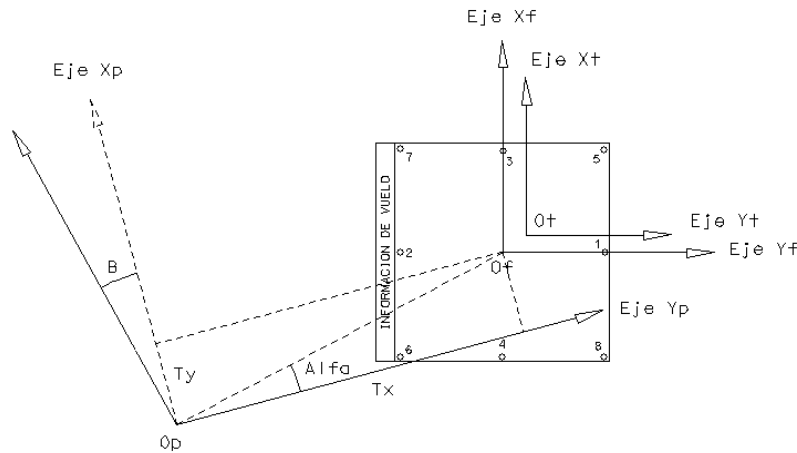


Figura 14. Esquema de una Transformación Afín Bidimensional.

En fotogrametría digital se realiza generalmente la orientación relativa y la orientación absoluta de forma simultánea, también denominada orientación externa. Por tanto, la orientación externa consiste en determinar la relación existente entre las coordenadas imagen y las coordenadas terreno. Existen diferentes métodos para resolver la orientación externa; en fotogrametría espacial la más empleada es el método denominado de "haces de rayos".

El método de los haces de rayos se resuelve matemáticamente por las ecuaciones de colinealidad. Estas ecuaciones no son lineales, por lo que se deben realizar la linealización de las mismas. Las expresiones de colinealidad son:

$$Fx = qx' + cr = 0; Fy = qy' + cs = 0 \quad (\text{Ecuación 31})$$

donde:

$$\begin{aligned} q &= m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0) \\ r &= m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0) \\ s &= m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0) \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 32})$$

m_{xy} = coeficientes de la matriz de rotación traspuesta

Despreciando los términos de segundo orden y aplicando el desarrollo en serie de Taylor a las ecuaciones se obtendrá:

$$\begin{aligned} Vx &= A_{11}dX + A_{12}dY + A_{13}dZ - A_{11}dX_0 - A_{12}dY_0 - A_{13}dZ_0 + A_{14}d\omega + A_{15}d\phi + A_{16}d\kappa + (Fx)_0 \\ Vy &= A_{21}dX + A_{22}dY + A_{23}dZ - A_{21}dX_0 - A_{22}dY_0 - A_{23}dZ_0 + A_{24}d\omega + A_{25}d\phi + A_{26}d\kappa + (Fy)_0 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 33})$$

donde los parámetros A_{xy} son valores resultado de las derivadas parciales de la ecuación de colinealidad con respecto a cada una de las incógnitas. El sistema de ecuacio-

nes tendrá la dimensión dependiendo del número de imágenes.

Estimación de los valores de paralaje

La medida del paralaje se realiza en el proceso digital mediante algoritmos automatizados de correspondencia de elementos, bien sean intensidades, entidades o relaciones entre objetos. Las terminologías inglesas de estos procesos son: "*intensity based matching*"; "*feature based matching*"; "*relational based matching*". Sólo una vez identificados estas entidades es posible calcular el desplazamiento en las imágenes, es decir, el ajuste de las imágenes, y aplicar la fórmula que nos estima la altura.

En estaciones analíticas la identificación de puntos homólogos se suele realizar por el operador de forma directa, mientras que en las estaciones digitales el problema se soluciona por métodos automáticos, proceso denominado por [Schenk \(1999\)](#) como "*matching*" de imágenes. De forma más general, [Heipke \(1996\)](#) definió el término como "el establecimiento de correspondencia entre diversos conjuntos de datos, que pueden ser imágenes, mapas, objetos o datos de un SIG". Más concretamente, el "*matching*" de imágenes digitales es el establecimiento automático de correspondencias entre entidades extraídas desde dos o más imágenes. Las entidades pueden ser "ventanas" o entornos de niveles de intensidad o elementos característicos (puntuales, lineales o zonales) extraídos de la imagen sobre los que se van a medir las correspondencias. Estas entidades pueden ser elementos predefinidos (marcas fiduciales) o representaciones del mundo real.

La traducción del término "*matching*" al español es tarea complicada porque hay que hacer referencia a diversos procesos fotogramétricos como la identificación de marcas fiduciales (en la orientación interna de una imagen); la localización de puntos homólogos (en la orientación relativa) para la formación del modelo estereoscópico; la extracción de información (la elevación en la generación automatizada del MDE), etc. Existen autores que lo han traducido como "correspondencia" ([Lerma, 2002](#)). Por tanto, en esta Tesis se acepta dicha traducción por no encontrar ninguna alternativa más correcta, aunque no llega a expresar el concepto con rigurosidad.

Para realizar estos procesos de correspondencias se han desarrollado técnicas diferentes; los tipos principales son:

- *Area Based Matching* (ABM), o correspondencia de área, basado en la búsqueda de similitudes radiométricas entre entornos o "ventanas" en cada imagen, normalmente de forma cuadrada y centrados en el píxel de interés. La similitud se evalúa calculando un coeficiente de correlación para diversos desplazamientos de las ventanas y la asignación se realiza para el valor máximo localizado. En función del tipo de correlación podemos distinguir:

- Correspondencia por correlación cruzada, donde se utiliza el coeficiente de correlación producto-momento, ρ , de Pearson ([Kreiling, 1976](#); [Hannah, 1988](#)):

$$\rho = \frac{\sigma_{rb}}{\sigma_r \sigma_b} \quad (\text{Ecuación 34})$$

donde σ_{rb} es la covarianza entre la ventana de referencia y la ventana de búsqueda y σ_r , σ_b son las desviaciones típicas de la ventana de referencia y la ventana de búsqueda respectivamente.

- Correspondencia por mínimos cuadrados (Least Squares Matchig, LSM), originalmente tratado por [Förstner \(1982\)](#). Este método se basa en la minimización de los cuadrados de las diferencias de los niveles digitales de grises entre la ventana de referencia y la de búsqueda. Una revisión sobre ventajas e inconvenientes del método puede encontrarse en [Ackermann \(1984\)](#) mientras que [Gruen \(1985\)](#) presenta una variante.

- Correspondencia adaptativa ([Gruen, 1985](#)), que combina la correspondencia por mínimos cuadrados y la condición de colinearidad¹². El término "adaptativo" indica la capacidad del algoritmo para restringir el tipo y número de parámetros de la modelización que dependerá de la superficie y de la textura de la imagen.
- Correspondencia multipunto (*Multipoint Matching*, MM) que se basa en el cálculo simultáneo de paralajes de los puntos los cuales son conectados por descripciones de funciones bilineales en la dirección de la línea epipolar ([Ronsenhol, 1987, 1988](#); [Rauhala, 1987](#); [Li, 1989](#)).

En general, en la calidad de los métodos de correspondencia de área influye una serie de parámetros complementarios como la localización y tamaño de las ventanas, tanto de referencia como de búsqueda, los valores umbrales adoptados en el criterio de aceptación y los valores de fiabilidad en la localización de las entidades conjugadas ([Schenk, 1996](#)).

- *Feature Based Matchig* (FBM) o correspondencia de elementos: se fundamenta en la extracción y asignación de entidades suelen ser puntos o líneas ([Barnard and Thompson, 1980](#); [Pollard y col., 1985](#)). El algoritmo comprende dos fases diferentes. En la primera se detectan los elementos de interés y sus atributos en todas las imágenes mediante operadores específicos¹³. En segundo lugar se determinan las correspondencias entre dichos elementos. Las entidades, además de su posición, se caracterizan por atributos como orientación, longitud, curvatura, gradiente de los borde, tamaño, brillo medio, etc.
- En la correspondencia mixta se emplean de forma alternativa los dos anteriores, ABM y FBM. Las precisiones de estos métodos fueron estudiadas por [Ackermann \(1994\)](#), el cual describió el LSM, *Least Squares Matching*, altamente preciso, con error de 0.1 píxeles, y al FBM menos preciso pero más rápido y robusto, con errores en el rango 0.3-0.4 píxeles.
- *Structural matching*, SM, o correspondencia estructural está basado en la detección topológica de estructuras y objetos definidos como nodos, conexiones de líneas y relaciones entre objetos ([Christmas, 1995](#)).

[Baltsavias \(1991\)](#) propone un nuevo método: *Multiphoto Geometrically Constrained Matching'* (MPGC) que fortalece en términos de precisión y fiabilidad las técnicas más convencionales. Además de realizar una completa revisión de los algoritmos de correspondencias desarrollados hasta el momento, la principal novedad de este trabajo fue la propuesta de un algoritmo que emplea la información geométrica conocida a priori y el uso simultáneo de más de dos imágenes.

Los problemas asociados a las técnicas de correspondencias son siempre aquellos que generan falsas correlaciones o impiden la identificación:

- Problemas radiométricos: resolución, reflectancia, iluminación, ruido.
- Problemas geométricos: desplazamiento por el relieve, áreas ocultas, variaciones de escala. En este sentido [Zheng \(1993\)](#) destaca el problema de que para un punto dado en una imagen, el punto conjugado puede no existir debido a un problema de oclusión, o bien pueden existir varios puntos posibles debido a problemas de estructuras repetitivas, etc.

¹² La condición de colinearidad es el modelo matemático base empleado en fotogrametría para calcular las coordenadas 3D. La colinearidad describe las relaciones espaciales entre coordenadas imagen, coordenadas de los centros proyectivos y coordenadas terreno.

¹³ los operadores (*interest operators*) son algoritmos matemáticos que permiten identificar entidades en una imagen; lo más frecuente es la extracción de entidades puntuales (operador de Förstner, de Moravec,...) o bordes (operador laplaciano, de la Gaussian, LoG).

- Problemas texturales: superficies sin rasgos distintivos, texturas repetitivas, varios niveles (árboles, edificaciones), objetos delgados.

Todos estos problemas pueden afectar a la generación automática de los MDE, además de la existencia de discontinuidades reales del terreno (líneas de ruptura, elementos geomorfológicos) que no son tenidas en cuenta inicialmente. Todo ello plantea la necesidad de una etapa de edición y revisión del MDE donde el operador introduce la información semántica en la interpretación de la imagen.

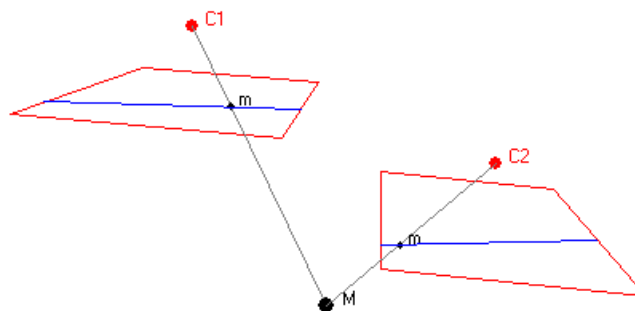
Estimación de los valores de elevación y construcción del MDE

El mayor interés de las estaciones digitales es la generación automática del MDE. Aunque existen variantes según las aplicaciones informáticas, la construcción del MDE se realiza mediante el cálculo del paralaje de una gran cantidad de puntos, para lo cual se aplica masivamente el proceso de correspondencia de imágenes. La selección de puntos puede realizarse por métodos diversos, eligiendo la estructura del MDE (raster matricial o TIN), determinando un umbral inferior al valor de correlación, etc.

La necesidad de cálculo masivo aconseja la transformación de las imágenes a una geometría epipolar o quasi-epipolar, donde sólo se conservan los paralajes en el eje X. Esta transformación simplifica los cálculos en el sentido de que reduce los espacios de búsqueda para la localización de puntos homólogos. Para lograr un rendimiento mejor del sistema se utilizan también otras estrategias como la construcción de "pirámides de imágenes".

De forma general, en fotogrametría digital es usual el proceso de normalización de las imágenes previamente a los trabajos estrictamente fotogramétricos. Las imágenes normalizadas deben cumplir dos requisitos: el primero es el de la geometría epipolar y el segundo es que las líneas epipolares de puntos homólogos sean coincidentes, es decir que si un punto está en la línea n de una imagen, su conjugado también esté en la misma línea de la otra imagen. De esta forma, el espacio de búsqueda para la identificación de puntos homólogos en imágenes normalizadas se simplifica enormemente (Cho y col., 1992).

En la Figura 15 se muestra el esquema de la geometría epipolar donde el plano epipolar se define por los centros de proyección C1 y C2 y por el punto M del terreno. Las líneas epipolares (en azul) se forman por la intersección del plano epipolar con los planos imagen. En la sección inferior de la Figura las imágenes han sido normalizadas de forma que los planos imagen son a su vez coplanares y las líneas epipolares coinciden.



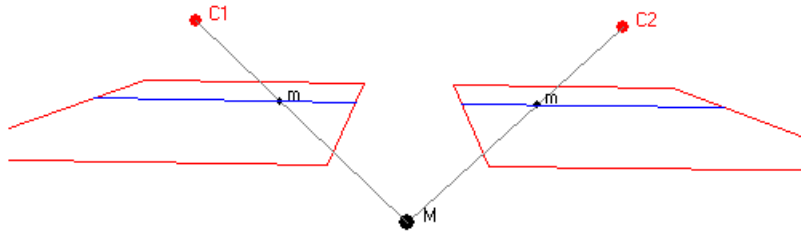


Figura 15. Geometría epipolar y normalización de imágenes (ver texto).

[Kim \(1999\)](#) ha probado que existe una geometría epipolar propia de los sensores de barrido lineales que es diferente a la utilizada en las imágenes perspectivas y mostrada en la figura anterior. La línea epipolar derivada del modelo de cámara de [Orun & Natarazan \(1994\)](#) y su formulación matemática es la siguiente:

$$y_d = \frac{A_1 x_i + A_2 y_i + A_3}{(A_4 x_i + A_5 y_i + A_6) \sin Q(x_d) + (A_7 x_i + A_8 y_i + A_9) \cos Q(x_d)} \quad (\text{Ecuación 35})$$

donde:

(x_i, y_i) coordenadas de los puntos de las imágenes izquierda

(x_d, y_d) coordenadas de los puntos de las imágenes derecha

A_1 hasta A_9 : parámetros del modelo

$Q(x_d)$ un polinomio cuadrático de x_d

La estrategia de construir la pirámide de imágenes es esencialmente la indexación espacial de la imagen original mediante *quadtrees*. Normalmente las imágenes de trabajo son grandes: un par de fotogramas aéreos escaneado a 20 μm , ocupa 126 Mb en tonos de gris 378 Mb en color; un par estereoscópico SPOT-HRV necesita unos 100 Mb. Para facilitar el manejo de estas grandes estructuras se genera a partir de la imagen original un conjunto de imágenes con una resolución progresivamente menor. Esta estructura, organizada jerárquicamente permite realizar las operaciones en el nivel de resolución que sea óptimo, reduciendo así el tiempo de cálculo.

La estructura de pirámide de imágenes permite que las primeras aproximaciones de los procesos y cálculos se realicen en los niveles de menor resolución y sólo las últimas iteraciones se realizan en los niveles inferiores de máxima resolución.

La construcción del MDE consiste en la identificación de puntos homólogos, cálculo del paralaje y estimación de la elevación. La estructura resultante depende de las características de la aplicación informática utilizada como se discutirá ampliamente más adelante. Las opciones básicas son dos: matriz regular (URG, *uniform regular grid*) y TIN. Algunas aplicaciones generan un TIN en primera instancia para después realizar un proceso de interpolación y construir la matriz. Los puntos del TIN son sólo aquellos para los cuales existe una seguridad razonable de que se han identificado correctamente los puntos homólogos; esta "seguridad" se determina a partir del coeficiente de correlación calculado por correspondencia de imágenes.

Valoración y control del error

A los efectos del presente trabajo podemos diferenciar entre tres tipos de errores en el producto final ([Tejero, 1986](#); [Thapa & Bossler, 1992](#)):

- Error grosero
- Error sistemático
- Error aleatorio

En el primer caso, se trata de grandes errores en su magnitud, de naturaleza local y con baja presencia. En el segundo son errores no aleatorios en el sentido de que presentan valores significativos de autocorrelación espacial. Finalmente, el error aleatorio se ajusta en su magnitud y frecuencia a una distribución normal o de Gauss.

El primer tipo de errores debe ser eliminado de la forma más exhaustiva y completa posible. Los errores sistemáticos pueden ser corregidos en algunos casos si se detecta la pauta espacial del error. En cambio, el error aleatorio sólo puede ser medido y su magnitud puede interpretarse como un estimador de la calidad del MDE.

La definición formal de los errores groseros debe ser estadística: se considerará como tal aquel conjunto de datos que estadísticamente puedan considerarse no pertenecientes a la población de errores. En nuestro trabajo con estaciones fotogramétricas, estos errores se producirán de forma característica por una detección errónea de puntos homólogos (correlaciones espurias) debida, por ejemplo, a la presencia de patrones repetitivos en las imágenes. Lógicamente, este factor dependerá de las características espectrales de la zona y de los métodos de correspondencia (algoritmo de correlación en concreto).

Para detectar estos errores se han planteado métodos diversos que se basan en la magnitud, localización, autocorrelación espacial, frecuencia, etc.

[Torlegard y col., \(1986\)](#) realizaron un estudio de los errores del MDE en seis tipos diferentes de terreno, desde un terreno muy suave hasta el más abrupto, deduciendo que los errores de las elevaciones en los MDE son debido a un gran número de errores sistemáticos, que los errores groseros generalmente varían entre el 0 y 3% y que la magnitud del error es independiente del tipo de terreno, aunque son más frecuentes en terrenos escarpados. Anteriormente, [Hannah \(1981\)](#) realizó una similar aproximación, detectando los errores mediante la aplicación de restricciones en las pendientes y en los cambios de pendientes en cada punto.

Algunas propuestas concretas son las de [López \(1997\)](#), [López \(2000\)](#) y [Felicísimo \(1994\)](#).

En el método propuesto por Felicísimo (1994) se asume que los errores groseros sólo tienen correlación local. En este método se calculan las diferencias, $d(i,j)$ entre el valor de elevación en cada punto $z(i,j)$ y un valor interpolado, $z'(i,j)$ obtenido mediante un operador de media sobre los vecinos más próximos. Se asume que la distribución de estas diferencias es gaussiana, con una media $\bar{\delta}$ y una desviación estándar de s_{δ} . Para validar la hipótesis que $d(i,j)$ pertenece a la población de desviaciones se aplica un test convencional de la t de Student: Para cada punto se calcula el estadístico

$$t_{i,j} = \frac{(\delta_{i,j} - \bar{\delta})}{s_{\delta}}$$

que puede ser considerado una desviación tipificada. Puesto que el

número de puntos es usualmente grande, podemos asumir una distribución $t_{\alpha[\infty]}$ para $t(i,j)$. Para $\alpha = 0.001$, el estadístico $t_{\alpha[\infty]}$ tiene un valor de 3,219 (test de dos colas) donde:

- La hipótesis nula es: $H_0: d(i,j) = \bar{\delta}$
- La hipótesis alternativa es: $H_0: d(i,j) \neq \bar{\delta}$

Los valores $z'(i,j)$ se obtienen mediante un operador de media ponderada de los 8 valores vecinos. A lo largo del borde se asume un espejo simétrico, y en las esquinas se

emplea una interpolación bilineal con los tres valores disponibles. Se señala como candidato para ser un error grosero a todo punto para el cual $|t_{i,j}| \geq 3,219$. El autor del método declara que un valor de $t_{i,j}$ significativo no implica necesariamente un error pero sí debe interpretarse como una señal de alarma. La corrección del error supone la sustitución del valor original por el valor de $z'(i,j)$.

Cuando un error es localizado y corregido, los estadísticos $\bar{\delta}$ y s_{δ} cambian y pueden aparecer nuevos valores candidatos. El método, por tanto, puede ser iterado pero debe comprobarse hasta qué punto es prudente seguir eliminando las mayores desviaciones.

En el método propuesto por López (1997) se subdivide el MDE en zonas rectangulares de n columnas y w filas donde $w \ll n$ (Figura 16). Cada zona se considera como un conjunto de puntos en el espacio R_w . Cada sección transversal se representa como un punto, en donde la elevación original establece las coordenadas w .

El procedimiento de localización del error analiza directamente la nube de puntos en R_w , despreciando todos los demás puntos. Esto es importante debido a que el concepto de autocorrelación espacial pierde totalmente el significado en la nube de puntos. Los perfiles adyacentes (de longitud n) no necesitan estar en un orden espacial porque están en ejes de coordenadas en el espacio R_w .

El empleo de la nube es una práctica común en estadística (Hadi 1992, Hawkins 1974, 1993a, 1993b), porque la noción de "autocorrelación espacial" tienen menos sentido en la mayor parte de datos tabulares.

El método se basa en el análisis de componentes principales (PCA), el cual procura encontrar la dirección e_1 del vector en el espacio R_w que minimice S , definido como la suma de distancias $M_k - H_k$ elevadas al cuadrado, obtenidas a lo largo de todo k , (Figura 16). El origen O es el centroide del grupo de puntos. (Por motivos de claridad, los puntos con coordenadas negativas no aparecen en la figura).

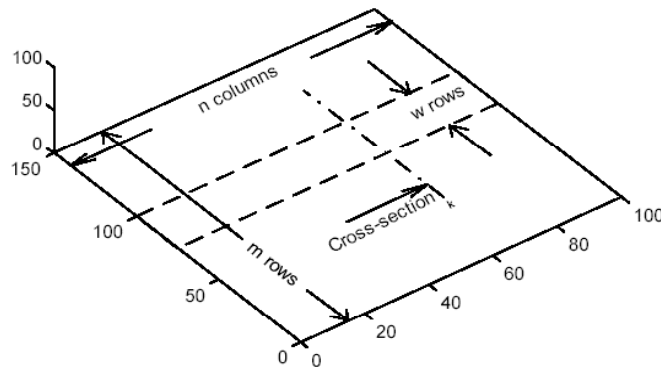


Figura 16. División del MDE en zonas para el análisis del error según el método de López (1997).

A la proyección OHK , que es también el producto escalar del vector $M_k - O$ por el vector unitario e_j , se le llama el resultado. Así $M_k - H_k$ es ortogonal a e_j . Existe un valor resultado asociado con el vector e_j para cada punto en R_w . También se asume que e_j

es único.

Si todos los valores $M_k H_k$ son cero, se reduce el problema de dimensión w , a una única dimensión. Todas las variaciones en las observaciones se explican a partir del vector e_1 . Si este no es el caso, se puede repetir el procedimiento con la variabilidad restante $M_k H_k$, que pertenece a un subespacio $(w-1)$ del espacio ortogonal R_w . Las medidas originales $M_k - O$ se pueden reemplazar por la diferencia $OM_k - OH_k$ (que es igual que $M_k - H_k$).

En la nueva nube debería haber un vector e_2 (ortogonal a e_1) que minimizase la distancia S en el espacio R_w . El proceso continúa hasta que se hayan creado los vectores w e_p , siendo cada vector e_p ortogonal al anterior. Los vectores e_p son los denominados componentes principales (PC).

Cada $M_k - O$ se expresa como una combinación lineal de los componentes principales:

$$M_k - O = a_1(k) * e_1 + a_2(k) * e_2 + a_3(k) * e_3 + \dots + a_w(k) * e_w$$

El análisis de componentes principales genera una secuencia de componentes principales, que explica la mayor parte (o todo, para $p=w$) de las variaciones de los datos. En la mayor parte de los casos se puede conseguir una buena aproximación de los datos para $p \ll w$. Como las componentes principales forman una base en el espacio R_w , pueden reproducir exactamente cualquiera de los n puntos del grupo, empleando los resultados como pesos. López (1997) afirma que algunos de los resultados contienen información esencial sobre la estructura de la nube, mientras que otros introducen ruido. [Hawkins \(1974\)](#) sugirió una regla para detectar los resultados ruidosos. Una vez identificados, estos resultados se emplean para señalar aquellos puntos en el espacio R_w que probablemente tienden a error.

Una vez que se selecciona un punto en el espacio R_w , la elevación (o elevaciones) que lo hagan inusual se deben indicar, para ello se realiza una suma ponderada de los cuadrados de los resultados que inducen a error. Estas medidas estadísticas fueron ideadas por Hawkins (1974). Es una semidistancia, similar a la distancia de Mahalanobis. Se calcula su sensibilidad en términos de los valores de elevación y aquellas elevaciones que generen la contribución mayor al valor de distancia se consideran error. Los cálculos se llevan a cabo independientemente de cada punto erróneo en el espacio R_w .

Este es el procedimiento para encontrar un error en una tira aislada. Dicho método se puede aplicar en todas las tiras que cubren el MDE. Los candidatos obtenidos se agrupan y se designan como una fila de candidatos. El mismo procedimiento se puede aplicar en tiras de columnas, y obtener un grupo diferente de candidatos en columnas.

Los candidatos que pertenezcan a ambos grupos (a la fila y a la columna) serán datos con error grosero. El procedimiento se aplica reiteradamente, una vez que se detecta el error y se corrige la nube se modifica a otra extensión, y estos son los resultados. El proceso finaliza cuando se cumplen algunos criterios.

Una versión modificada de este método trata sobre todo el problema de los errores fuertemente correlacionados en el espacio. El procedimiento de López empieza a fallar cuando la auto correlación aumenta.

En el procedimiento de López no se requiere que los contornos de las tiras sean contiguos. Además, se pueden eliminar algunos valores (los más correlacionados) para el análisis. La tira se elige como en el caso anterior, pero en los cálculos consideramos los subconjuntos creados utilizando todas las filas k , siendo k el rango del campo de error, una propiedad geoestadística ([Samper & Carrera, 1990](#)). En esta versión modificada se asume que el rango se puede estimar a partir de un análisis independiente: dependerá de las características del MDE, del método de obtenerlo, de la escala de la fotografía aérea, etc. El método modificado se parece a la aproximación *multigrad*

(Strang 1989) empleada en los programas de ordenador científicos para la solución de una ecuación diferencial.

Como ya se ha indicado antes, los errores aleatorios son de naturaleza diferente y su magnitud es un indicador de la calidad del MDE. Por la importancia de este tipo de errores en este trabajo, serán tratados en detalle en el Apartado 2.7.

2.4.5 Métodos de interpolación

Como se ha comentado anteriormente, en la construcción de la estructura que forma el MDE se realizan procesos de interpolación a partir de los datos originales, donde se calcula la elevación en otros puntos del modelo. Se han propuesto y desarrollado muchos algoritmos de interpolación, a continuación se presenta una revisión de los más empleados en la generación de MDE:

- **Funciones polinómicas**

Se basa en encontrar una función **F** tal que: $\forall P(X, Y) \in D$ siendo $F = f(X, Y)$.

La función **f** será una función polinómica.

Las ecuaciones polinómicas pueden representar la superficie del terreno donde la elevación, Z , es función de X e Y , como muestra la siguiente ecuación:

$$Z = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3XY + a_4X^2 + a_5Y^2 + a_6X^2Y + a_7XY^2 + a_8X^2Y^2 + a_9X^3 + a_{10}Y^3 + a_{11}X^3Y + a_{12}X^3Y^2 + a_{13}XY^3 + a_{14}X^2Y^3 + a_{15}X^3Y^3$$

(Ecuación 36)

La ecuación bilineal polinómica incluye los 4 primeros términos, la bicuadrática los 9 siguientes y la bicúbica los 16 términos que muestran la ecuación. La ecuación más sencilla es la bilineal, ya que es de primer grado. Si se aumenta el grado del polinomio a dos, es decir la bicuadrática, además de ser continua la propia función se consigue también dicha continuidad en su derivada.

- **Algoritmos Gravitacionales (Función inversa de la distancia)**

La función inversa de la distancia –*inverse distance weighting*, IDW- se fundamenta en ponderar con mayor peso los puntos más cercanos al punto a interpolar como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{Z_i}{d_i^e}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^e}}$$

(Ecuación 37)

Siendo Z_i la cota de cada punto que interviene en la interpolación, d_i la distancia del punto P_i al punto a interpolar, y n el número de puntos que interviene en la interpolación. Según el exponente, e , de la función interpoladora surgen distintos algoritmos. Un buen valor de e es el dos.

Estos algoritmos permiten la generación de los MDE de forma sencilla y rápida, pero la calidad de los resultados depende del número y distribución de los puntos de partida para generar el modelo.

- **Algoritmo Geoestadístico (Kriging)**

El método de Kriging tiene la misma ecuación que la función inversa de la distancia con la gran salvedad que trata a la altitud como una variable regionalizada. Por tanto, se asume que la altitud tiene una correlación espacial y puede de-

finirse mediante unas funciones homogéneas en todo el área. Dichas funciones se deducen analizando la correlación espacial de los datos en función de las distancias entre ellos. El método de *Kriging* mide la dependencia de los datos mediante un estadístico que es la semivarianza γ entre los datos separados por distintas distancias y se representan mediante una función, semivariograma, que relaciona estos dos parámetros. La expresión más general de esta función es:

$$\gamma(d) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{i+d}) \quad (\text{Ecuación 38})$$

El Kriging es un algoritmo de interpolación óptimo desde el punto de vista estadístico, aunque presenta algunas dificultades a la hora de ser utilizado como método de construcción de los MDE. La más importante es que la teoría exige que el semivariograma sea de validez para todo el área del modelo, por lo que no permite una buena representación de discontinuidades topográficas bruscas ([Felicísimo, 1994](#)).

- **Funciones de curva adaptativas (Splines y B-splines)**

Una función de curva adaptativa, *splines*, como su nombre indica es una función que ajusta una curva suave a un conjunto de puntos conocidos, con la principal premisa que pase por dichos puntos. Se denomina "B- splines" cuando la función es racional no uniforme, *non-uniform rational B-spline* (NURBS).

Los algoritmos gravitacionales, geoestadísticos y curvas adaptativas (splines) se emplean en los MDE de malla regular rectangular. Las funciones polinómica, splines, B-splines y NURBS se emplean en los MDE de estructura TIN ([Martínez y col., 2001](#)).

Los métodos de interpolación empleados de forma general para la generación de MDE cuyos datos de elevación han sido obtenidos desde cualquier fuente de datos han sido revisados en el apartado 2.4.3, pero de forma más específica, [kim y col. \(1999\)](#) realizan un estudio comparativo de los algoritmos de interpolación en la producción de MDE desde imágenes SPOT. Los métodos de interpolación analizados fueron:

- **Media Bin (Bin Average) (interpolación exacta)**

La media Bin es el más simple de todos los métodos de interpolación. Los datos de entrada son almacenados en una estructura denominada "bin", un rectángulo centrado sobre la malla de salida.

- **Promedio de ventana móvil (Moving Window Average, MWA) (interpolación suave)**

El MWA asigna a los datos de salida el promedio de las elevaciones de entrada dentro de un radio de interpolación.

- **Vecino más próximo (Nearest Neighbourhood, NN) (interpolación exacta)**

La elevación del dato de salida es la elevación del punto de entrada que tenga la distancia más corta entre los puntos de entrada en la malla.

- **Kriging (interpolación exacta).**

Con este método se pretende encontrar el peso óptimo (ω_i) mediante interpolación de la altura (H) de x_0 , utilizando las propiedades estadísticas del terreno:

$$\hat{H}(x_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i H(x_i) \quad (\text{Ecuación 39})$$

El peso óptimo es determinado por una función que describe la variación espacial del terreno (variograma):

$$\frac{1.5r}{2R} - \frac{0.5r}{(2R)^3} \quad \text{(Ecuación 40)}$$

donde:

R: es el radio del Kriging.

r: la distancia desde la celda de la malla.

- **Gausiano (interpolación suave).**

La interpolación gausiana utiliza la ecuación 29 donde la función del peso esta vez viene dada por:

$$\exp\left[\frac{-(x_1 - x_0)^2}{\sigma^2}\right] \quad \text{(Ecuación 41)}$$

donde:

σ : define la anchura de la función gausiana.

- **Modified Shepard (interpolación exacta).**

Este método usa unas funciones cuadráticas básicas y toma como pesos el inverso de la distancia ([Renka, 1988](#)).

- **Multicuadrático (interpolación exacta).**

En este método la fórmula usada es también la ecuación 29 excepto que la función base que viene dada por la expresión:

$$Q(x, y) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + R^2} \quad \text{(Ecuación 42)}$$

el coeficiente R toma el valor de:

$$R^2 = \left[\frac{1.25D}{\sqrt{n}} \right]^2 \quad \text{(Ecuación 43)}$$

siendo D un valor elegido empíricamente, n el número de puntos variable en cada área de búsqueda.

- **Curvatura mínima (interpolación exacta).**

La interpolación mínima curvatura, se fundamenta en la minimización de la curvatura de la superficie a calcular. La fórmula de interpolación es presentada en [Franke, \(1982\)](#).

Los resultados obtenidos por Kim y col. ([1999](#)) sobre la comparación de estos métodos de interpolación son que el método de mínima curvatura es el más exacto aunque tiene el gran inconveniente que es 10 veces más lento que los otros métodos; Por tanto considerando la exactitud y la velocidad de procesado los métodos más apropiados son Kriging y multicuadrático.

2.4.6 Programas comerciales de fotogrametría digital aérea y espacial

Las aplicaciones de fotogrametría digital que ofrece el mercado pueden clasificarse, en

relación con nuestro trabajo, por su capacidad para procesar o no datos procedentes de fotogramas aéreos y de sensores transportados por satélites. Algunas aplicaciones son específicamente fotogramétricas mientras que en otros casos se trata de programas que, siendo inicialmente de tratamiento de imágenes, han incorporado algún módulo para aprovechar los datos estereoscópicos.

En la Tabla 4 se muestran los programas de fotogrametría digital recopilados en [García & Cuartero \(2002\)](#) con algunas de sus características.

Tabla 4. Aplicaciones de fotogrametría digital ([García & Cuartero, 2002](#)).

Aplicación	Empresa	aérea	espacial	URL
Albany	Erio Technologies	SI	NO	www.eriotech.com
ATLAS Photogrammetric Software	KLT Associates	SI	NO	www.kltassoc.com
DIAP	ISM	SI	SI	www.ismcorp.com
DIGI3D	Topcal Informática	SI	NO	www.digi21.net
DMS	R-Wel	SI	SI	www.rwel.com
DVP	DVP-GS	SI	SI (sólo Spot)	www.dvp.ca
ENVI 3.6	RSI	NO	SI (sólo Aster)	www.rsinc.com
Imagestation	Z/I Imagin	SI	SI	www.ziimaging.com
Imagine 8.5 Photogrammetry Suite	LH Systems	SI	SI	www.erdas.com
Inpho. grammetry	Inpho	SI	?	www.inpho.de
OrthoEngine	PCI Geomatics	SI	SI	www.pcigeomatica.com
OrthoMapper	Image Processing Software, Inc.	SI	NO	www.orthomapper.com
Photopol	Topol Software	SI	NO	www.topol.cz
Siscam	Siscam s.r.l.			www.siscam.it
Socet Set	LH Systems	SI	SI (sólo Spot)	www.lh-systems.com
Softplotter	Boeing Autometric	SI	SI	www.autometric.com
Summit Evolution	DAT/EM	SI	NO	www.datem.com
VirtuoZo	Virtuozo Systems I.	SI	?	www.virtuozo.com

2.5 Imágenes SPOT

2.5.1 Introducción

El programa SPOT¹⁴ cuenta con cuatro satélites. En el Anexo 6 se detallan los periodos de operatividad de estos satélites, así como características de los datos, niveles de procesamiento y líneas futuras del programa SPOT. En este apartado se van a desarrollar aspectos sobre la geometría de las imágenes SPOT.

¹⁴ <http://www.spotimage.fr/home/>
<http://edc.usgs.gov/glis/hyper/guide/spot>

La órbita del SPOT es casi polar, circular y heliosincrónica¹⁵. Sus características se muestran en la Tabla 5. Todos los satélites SPOT están situados en la misma órbita (Figura 17) con lo que son posibles 26 posiciones (disponibles en un momento dado), correspondiendo a cada día del ciclo orbital, SPOT-1, SPOT-2 y SPOT-4 están colocados para optimizar el tiempo de vuelta al lugar y la adquisición de datos estereoscópicos.

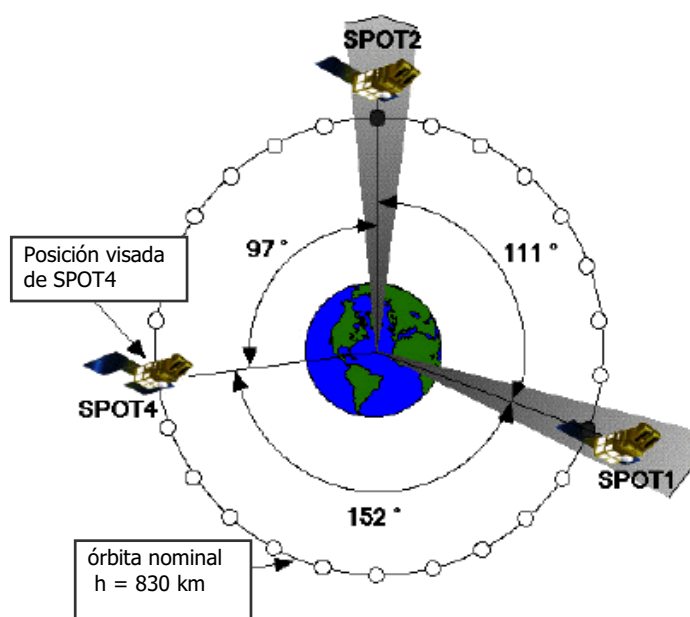


Figura 17. Constelación SPOT: satélites SPOT 1, 2 y 4 (Baudoin, 1999).

Otras características básicas de las imágenes SPOT se muestran en la Tablas siguientes.

Tabla 5. Características orbitales de SPOT.	
Parámetro	Valor
Altura de vuelo	818-833 km
Relación base/altura	0.55 y 1.15
Inclinación de la órbita	98.72°
Periodo	101 min
Duración del ciclo	26 días

¹⁵ Una órbita heliosincrónica cruza el ecuador a la misma hora solar local. Esta configuración permite que, al cabo de un cierto número de órbitas, el satélite vuelva a sobrevolar un mismo punto de la Tierra a la misma hora solar local. Este periodo de repetición es lo que determina la resolución temporal del satélite, que en el caso de SPOT es de 26 días.

Tabla 6. Características de las imágenes SPOT.	
Parámetro	Valor
Superficie cubierta	60x60 km
Bandas	
multiespectrales (XS)	3
pancromáticas (capacidad estéreo)	1
Resolución espacial	
multiespectrales (XS)	20 m
pancromáticas (capacidad estéreo)	10 m
Rango electromagnético (μm)	
XS1	0.50 - 0.59
XS2	0.61 - 0.68
XS3	0.79 - 0.89
pancromático	0.51 - 0.73

2.5.2 Geometría de las imágenes SPOT

Las características geométricas de una imagen SPOT son bastantes diferentes a las de una fotografía aérea. Las diferencias se deben principalmente a las diferentes relaciones perspectivas y distintas geometrías en la intersección de rayos homólogos de las imágenes. Una fotografía aérea es una imagen con una perspectiva cónica de una determinada zona de superficie terrestre, mientras que las imágenes SPOT son una secuencia de perspectivas cilíndricas (Figura 18) (CEOS, 2000).

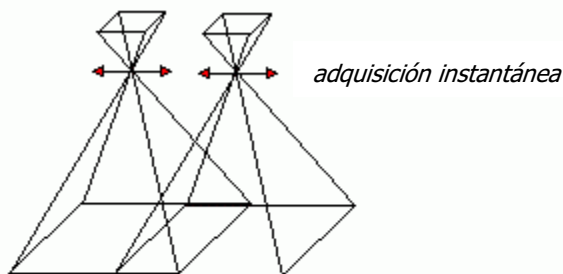
Las cuatro propiedades geométricas más destacables de una imagen SPOT son:

- Cada fila es una proyección central (en lugar de cada imagen).
- El ángulo de apertura es muy pequeño: 4° en lugar de 60° - 120° .
- Las sucesivas imágenes de paso son partes consecutivas de una banda continua (no hay recubrimiento).
- Se dispone de datos auxiliares de la geometría de la imagen (datos de cabecera de las imágenes).

Como ya hemos visto, para poder explotar las imágenes estereoscópicas es necesario formar el modelo estereoscópico, lo que equivale a colocar las imágenes simulando la geometría en el momento de la captura de las imágenes (orientación).

En nuestro caso, existe un problema añadido al cálculo de las orientaciones y que se deriva de que los datos vienen dados en sistemas de referencia distintos. Por ejemplo, la posición del satélite se expresa en coordenadas de un sistema geocéntrico, las coordenadas terreno se toman mediante GPS en el sistema WGS84 y el centro de posición de las imágenes SPOT viene dado por coordenadas geográficas. Lógicamente, todos los datos deben ser expresados en un único sistema de referencia para la resolución de la orientación exterior de las imágenes SPOT.

Fotografía Aérea: varias perspectivas cónicas.



Imágenes SPOT: secuencia de perspectivas cilíndricas.

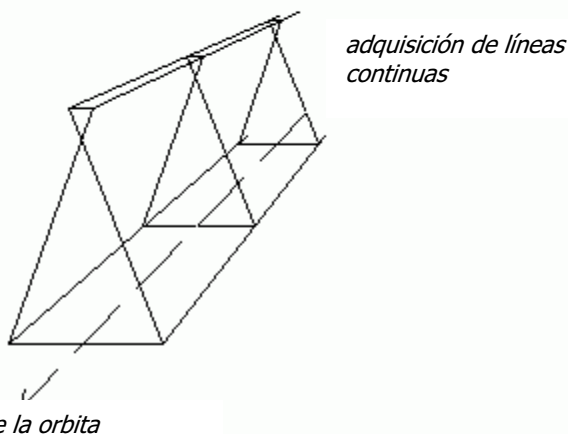


Figura 18. Diferencias entre las perspectivas de la fotografía aérea y de las imágenes SPOT tomadas por sensores de barrido (CEOS,2000).

La geometría de la toma de las imágenes SPOT se define con una dirección de vuelo, la distancia focal f y PP el punto principal en el momento de la toma t . Debido a esta geometría se forma una perspectiva central en cada línea, manteniéndose una geometría aproximadamente equivalente a una perspectiva paralela a lo largo de la línea de vuelo (Figura 18).

Para un punto "A" en una línea muestreada en el instante t_n , el punto imagen correspondiente, "a", debe satisfacer la condición de colinearidad con los parámetros de orientación expresados en función del instante de la toma. De la misma forma, para el punto "B" del terreno su punto imagen, "b", debe cumplir la condición de colinearidad para el instante t de la toma.

Chen & Lee (1990) explican la geometría de las imágenes SPOT como la relación entre líneas de muestreo, obtenida mediante polinomios de bajo orden en función del tiempo de muestreo. Una imagen o escena (este segundo término es más habitual en teledetección) completa de una imagen SPOT está compuesta por 6000x6000 píxeles. El tamaño CCD de cada píxel es 13x13 μm ; la distancia focal nominal es de 1,082 m y el tiempo de captura o muestreo entre líneas consecutivas es de 0,0015 s. Es importante tener en cuenta que los valores de tamaño del píxel y de distancia focal pueden variar

ligeramente debido a desajustes del sensor.

Las coordenadas imagen se establecen mediante las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} x(i) &= 0 \\ y(i) &= [\text{núm. de píxel} - (6000+1)/2] \cdot 0,013 \text{ mm} \end{aligned}$$

A la hora de formular las ecuaciones de colinearidad para datos SPOT, las coordenadas (fila, columna) de un punto P se transforman en coordenadas instrumentales (x(p), y(p)) correspondientes al momento de la toma, t:

$$\begin{aligned} t &= t_{\text{fila}} 3000 + 1,504\text{ms} \cdot (\text{fila}-3000) \\ x(p) &= (3000,5 - \text{columna}) \cdot 13 \mu\text{m} \\ y(p) &= 0 \end{aligned}$$

Mientras la coordenada "y" (perpendicular a la matriz lineal del detector) es cero por definición, la coordenada "x" es igual a la distancia de la columna al centro de la imagen escalada por la resolución del detector.

Existen varias alternativas en la elección del modelo matemático, especialmente para el modelado de las órbitas de los satélites y para la altura de su plataforma.

La orientación externa (OE) se realiza calculando los parámetros correspondientes. Si se tienen 6 parámetros en cada línea de las imágenes SPOT y cada imagen está formada por 6000 líneas, los parámetros de OE a resolver son 36000, lo que supone grandes dificultades de cálculo. Para reducir el número de parámetros se adoptan 6 funciones lineales que describen la relación entre esos 36000 parámetros.

Estas 6 funciones lineales son:

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \varphi_0 + k_1 y \\ \omega_i &= \omega_0 + k_2 y \\ \kappa_1 &= \kappa_0 + k_3 y \\ X_{Si} &= X_{S0} + k_4 y \\ Y_{S1} &= Y_{S0} + k_5 y \\ Z_{Si} &= Z_{S0} + k_6 y \end{aligned} \tag{Ecuación 44}$$

donde:

- y : es un número de columna,
- los parámetros de orientación externa de la columna i son:

$$\begin{aligned} X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si} \\ \varphi_i, \kappa_i, \omega_i \end{aligned}$$

Debido a las características dinámicas de la captación de las imágenes, todos los parámetros de las proyecciones geométricas son funciones de tiempo, y el centro de proyección es igual a la posición del satélite en cada instante t . Los elementos de la matriz de rotación ($a_1, b_1 \dots c_3$) dependen de la posición del satélite, del vector velocidad y del cambio de altura en la plataforma.

El cálculo de los parámetros en cada línea se realiza mediante las siguientes ecuaciones de colinearidad:

$$v_x - \frac{\partial x}{\partial X} V_x - \frac{\partial x}{\partial Y} V_y - \frac{\partial x}{\partial Z} V_z = (x) - x + \frac{\partial x}{\partial X_s} \Delta X_s + \frac{\partial x}{\partial Y_s} \Delta Y_s + \frac{\partial x}{\partial Z_s} \Delta Z_s + \frac{\partial x}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial x}{\partial \kappa} \Delta \kappa$$

$$v_y - \frac{\partial y}{\partial X} V_x - \frac{\partial y}{\partial Y} V_y - \frac{\partial y}{\partial Z} V_z = (y) - y + \frac{\partial y}{\partial X_s} \Delta X_s + \frac{\partial y}{\partial Y_s} \Delta Y_s + \frac{\partial y}{\partial Z_s} \Delta Z_s + \frac{\partial y}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial y}{\partial \kappa} \Delta \kappa$$

también se pueden expresar de forma matricial:

$$A \cdot V = B \cdot X - L$$

donde:

$$X = [\Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa, \Delta X_{S0}, \Delta Y_{S0}, \Delta Z_{S0}, k1, k2, k3, k4, k5, k6]$$

$$V_i = [v_x, v_y, V_x, V_y, V_z]^T$$

$$L_i = [l_x \ l_y]^T = [x-(x) \ y-(y)]^T$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ 0 & 1 & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix}$$

2.5.3 MDE generados a partir de imágenes SPOT-HRV

La extracción de un MDE a partir de imágenes SPOT se realiza mediante los pasos ya mencionados y aplicables de forma general al proceso fotogramétrico:

- La orientación de las imágenes.
- Proceso de correspondencia, donde se extraen los valores de Z.
- Una interpolación opcional en función de que exista un cambio de estructura del MDE o se realice una densificación de los datos.
- La depuración y eliminación de los errores groseros.

Como la extracción de las elevaciones de un MDE por técnicas automatizadas se basa en el cálculo del paralaje entre los puntos conjugados, la exactitud del MDE va a depender directamente en la exactitud del cálculo del paralaje. Por tanto, es fundamental la relación base/altura.

Para el cálculo de la altura en cada punto se aplica una fórmula fotogramétrica simple ([Welch & Remillard 1994](#)):

$$\Delta h = \frac{H \Delta p}{B} \quad \text{(Ecuación 46)}$$

donde Δh es la elevación del punto en el terreno, H es la altura de vuelo, B la base y

Δp la diferencia de paralaje de ese mismo punto. Es por esto que el error del cálculo del valor de paralaje es directamente proporcional al error de la elevación en cada punto.

La precisión del procedimiento de generación de MDE desde imágenes SPOT es alta dado el hecho de que las ecuaciones de colinearidad en la que se basan los algoritmos permiten obtener una relación directa entre las coordenadas imagen y las coordenadas objeto. De esta forma se obtienen la orientación relativa y las coordenadas modelo, y los parámetros de calibración pueden ser incluidos en el ajuste de errores sistemáticos. El ajuste del bloque es eficiente porque es simultáneo al tratamiento de un gran número de grandes imágenes y reduce el número de puntos de apoyo necesarios en terreno.

Una posibilidad de mejorar la calidad de los datos estereoscópicos es reduciendo el tiempo transcurrido entre las dos tomas, es decir, con la captura simultánea de los datos. Para ello el satélite debe contar un mínimo de dos conjuntos de sensores realizando la captura oblicua y vertical de forma simultánea.

2.5.4 Estudios realizados con imágenes SPOT

Desde 1986, fecha de lanzamiento del primer satélite SPOT, se han realizado numerosos estudios que analizan las posibilidades y limitaciones que ofrecen las imágenes estereoscópicas. Lógicamente, los primeros trabajos se refieren a las calibraciones y control de los instrumentos. Los métodos de explotación de dichas imágenes para la extracción de productos cartográficas aparecen con bastante más retraso. De hecho, hasta la fecha no existe una metodología estándar para analizar las posibilidades en la exactitud que cada tipo de imagen. Por este motivo, los investigadores analizan el error de los MDE de formas diversas y con datos procedentes de distintas fuentes y por tanto con exactitudes y fiabilidad muy desiguales.

Los resultados de los estudios más significativos localizados en la bibliografía se presentan a continuación en orden cronológico.

[Priebbenow & Clerici \(1988\)](#) presentan resultados de una experiencia realizada en Australia con valores de error cuadrático medio (ECM) de 5.4 m. Su conclusión es que las imágenes SPOT pancromáticas permiten generar cartografía con una exactitud geométrica elevada y compatible con los estándares de la escala 1:50.000.

[Day & Muller \(1988\)](#) examinaron tres métodos para la generación de MDE a partir de datos SPOT. Los resultados fueron examinados mediante la digitalización manual de un MDE matricial con 30 m de resolución. El objetivo del trabajo era comparar el comportamiento operacional de los algoritmos. Además, en el trabajo se da la función de distribución de los errores y se informa del número de puntos de control que se salen del límite $|\text{error} - \mu| > 3\sigma$.

[Mukai y col. \(1990\)](#), consiguen a partir de imágenes SPOT pancromáticas generar MDE con valores de ECM de 26 m, valor calculado con 40 puntos de control tomados de cartografía 1:25.000 preexistente. El estudio se realizó en una zona de 40x45 km, situada en los Alpes Centrales de Japón, con un desnivel máximo de 2200 m. Para el cálculo del ECM se utilizó un total de 60 puntos de control.

[Haan \(¿?\)](#) analizó los factores determinantes en la precisión de los MDE derivados de los datos SPOT. Señala que el primer factor que determina la precisión geométrica es el ajuste en la orientación de las imágenes. Se puede conseguir suficiente precisión geométrica con un limitado número de puntos de control pero cuidadosamente elegidos. Los puntos conjugados se pueden medir con un ECM de 0.5 píxeles para las filas y columnas respectivamente. Considerando únicamente la geometría de los rayos imágenes que intersectan un par estereoscópico de 21 °E / 21 °W se estiman errores en el terreno de 4, 4 y 8 m para los ejes X, Y y Z respectivamente.

[Sasowski y col. \(1992\)](#) realizan pruebas similares en un área de 25 km² de Alaska y

presentan un ECM de 19 m, con errores absolutos en el rango -13 a +48 m. En este caso, no se emplearon puntos de control para deducir el error del MDE, sino que construyó otro MDE a partir de cartografía convencional con 5 m de intervalo entre curvas de nivel. El error medio no es nulo e interpretan que el MDE muestra elevaciones sistemáticamente mayores que el mapa de referencia, de escala 1:6.000.

[Baltsavias & Stallmann \(1993\)](#) analizan el problema de las diferencias radiométricas entre imágenes SPOT sometidas a procesos de correspondencia de imágenes. Estas diferencias se deben al intervalo transcurrido entre las dos tomas, que puede ser de días o semanas.

[Kubik y Wu \(1995\)](#) presentan los resultados del tratamiento de imágenes SPOT mediante estaciones de trabajo fotogramétricas con un ECM de 6 m en altitud.

Los estudios más recientes muestran mejoras en los valores del error de los MDE generados desde imágenes SPOT, debidas probablemente a la maduración de las técnicas de correlación y de otros procesos incorporados a las estaciones fotogramétricas digitales. Entre ellos se encuentran los siguientes:

[Al-Rousan y col. \(1998\)](#) comparan la generación de MDE con imágenes SPOT empleando distintas aplicaciones comerciales trabajando en una zona de desierto al Nordeste de Jordania. El número de puntos de control es variable entre 10 y 47. Los resultados muestran valores de ECM entre 3.3 y 6.7 m.

En [Hae-Yeoun y col. \(2000\)](#) se propone una mejora en la estrategia de construcción de MDE con imágenes SPOT variando el esquema de interpolación. Para ello analizan diferentes métodos de correlación (gausiana, mínima curvatura, kriging, multicuadrática y Shepard modificado). Los resultados obtenidos en una zona de Corea muestran ECM de 25.5 y de 33.6 m. Estos valores de error fueron obtenidos por comparación con otros MDE de resolución de 100 m (DTED de NIMA, USA) y 60 m generados por digitalización de curvas de nivel por el Instituto Geográfico Nacional de Corea.

Durante los últimos años se ha evaluado la generación de MDE desde imágenes SPOT para aplicaciones de teledetección y se ha comparado el error del MDE con otros métodos ([Renaudin, 2000](#)). También podemos encontrar trabajos bastante recientes que investigan la construcción de DEM a partir de imágenes estereoscópicas de otros sensores y satélites: IKONOS ([Li y col., 2000](#), [Toutin, 2001](#)), MOMS ([Lanzl y col., 1995](#)), ASTER ([Toutin and Cheng, 2001](#)), AVNIR ([Hashimoto, 2000](#)).

Finalmente, en las páginas del CEOS (*Committee on Earth Observation Satellites*), bajo el epígrafe *Resources in Earth Observation-2000* (<http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b/astart.htm>) puede encontrarse un documento sobre la producción de MDE con datos SPOT¹⁶ ([Durand, 2000](#)). En este trabajo se plantean o proponen algunas cuestiones relativas al control del error (aunque el autor utiliza indistintamente los términos error, calidad y precisión). Básicamente, el autor señala como posibles criterios de medida los derivados del ECM del error en las elevaciones (criterios de "primer orden") y los derivados de la fidelidad en la representación de las formas, flujos hidrológicos (criterios de "segundo orden"). Se reconoce que estos últimos con criterios cualitativos.

Una aportación de este trabajo es la llamada de atención sobre la variación en la relación base/altura de SPOT, que puede estar en un amplio rango en función de los ángulos de toma de las imágenes (entre 0.55 y 1.15). Asimismo, señala que con 6 a 8 puntos de apoyo medidos con suficiente precisión es suficiente para crear un MDE "fiable" donde se cumpliría que el error en la elevación estaría entre 3.5 y 6.5 m según la relación B/H (<http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b/ceos1/science/gdta/ang/a2an/41.htm>, Ap. 2.3.2).

¹⁶ DEM, stereoscopic aspects of SPOT:

<http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b/ceos1/science/gdta/ang/a2an/1.htm>

Tabla 7. Resumen de trabajos realizados en la generación de MDE a partir de imágenes estereocópicas SPOT-HRV.

Fecha	Primer autor	ECM (m)	Puntos de control		Otros métodos
			Núm.	Origen	
1988	Priebbenow	5,4			
1990	Mukai	26	40	cartografía 1:25000	
¿?	Haan	8			
1992	Sasowski	19			Compara con MDE derivado de mapas 1:5000
1995	Kubik y Wu	6			
1998	Al-Rousan	3.3 / 6.7	10-47		
2000	Hae-Yeoun	25.5 / 33.6			Compara con un MDE de 100 m de resolución

Fecha: fecha de la publicación.

Autor: de la publicación.

ECM: error cuadrático medio resultante.

Núm.: número de puntos de control empleados para calcular el error.

Origen: procedencia del valor de elevación de los puntos de control.

Otros métodos: en el cálculo del error en caso de no usar puntos de control.

Como conclusiones que se derivan de la lectura de estos antecedentes podemos señalar las siguientes:

- El origen de los puntos de control debe garantizar que su exactitud es suficiente para el control de calidad: carece de sentido comparar el MDE con datos de exactitud desconocida ya que, en este caso, sólo estamos comprobando el grado de similitud entre ambas fuentes de datos. Este requisito no puede garantizarse cuando los puntos de control se extraen de cartografía convencional preexistente o de otros MDE.
- La toma de puntos de control debe realizarse independientemente de cualquier otra fuente cartográfica previa y con una elevada exactitud; la distribución sobre el terreno debe garantizar asimismo una representación de los diferentes tipos de relieve de la zona.
- El número de puntos de control suele ser reducido (pocas decenas) por lo que la fiabilidad del control del error puede verse comprometida.
- Los valores de ECM alcanzados por los autores son bastante diversos, sin que quede claro cuál es la causa de las discrepancias. Frecuentemente los datos aportados por los autores sobre las técnicas empleadas, características de las zonas de trabajo, etc. son muy escasos e insuficientes para valorar los resultados de la investigación.

2.6 Imágenes ASTER

2.6.1 Introducción

TERRA es un satélite concebido por el programa EOS (Sistema de Observación Terrestre) de la NASA para registrar diferentes tipos de datos a partir de cinco subsistemas: CERES, MODIS, ASTER, MOPITT y MISR (para más detalles del satélite y de los senso-

res ver Anexo 7). TERRA fue lanzado en 1999 y su vida útil se estima en 6 años.

El sistema ASTER¹⁷, *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*, se desarrolló con la finalidad de obtener datos geológicos detallados y estudiar fenómenos que pudieran producir un impacto ambiental a nivel global, como por ejemplo la actividad volcánica. Aunque la duración del ciclo es de 16 días, en caso de emergencias como las derivadas del vulcanismo, incendios o inundaciones, se pueden obtener datos cada 2 días por la capacidad de orientar el sensor VNIR lateralmente $\pm 24^\circ$ para registrar imágenes en las órbitas adyacentes.

La órbita de TERRA es casi polar. Las principales características orbitales se muestran en la Tabla 8.

Parámetro	Valor
Altura de vuelo	700- 737 km (705 km en el Ecuador)
Relación base/altura	0.6
Inclinación de la órbita	98.2°
Periodo	98.9 min
Duración del ciclo	16 días

ASTER es un sensor de imágenes formado por 3 subsistemas que corresponden a diferentes zonas del espectro electromagnético: VNIR (*visible and near infrared*, visible e infrarrojo próximo), SWIR (*shortwave infrared*, infrarrojo medio) y TIR (*thermal infrared*, infrarrojo térmico). Los datos se toman en un total de 14 bandas espectrales cuya resolución espacial varía en función de la longitud de onda. La estereoscopia es longitudinal y se toma en una banda del IR próximo (subsistema VNIR) con una resolución de 15 m. Las características de las imágenes se muestran en la Tabla 9.

¹⁷ <http://asterweb.jpl.nasa.gov/default.htm>

Tabla 9. Características de las imágenes TERRA.	
Parámetro	Valor
Superficie cubierta	60x60 km
Ángulo de la toma oblicua	-27.6°
Bandas	
subsistema VNIR	3 + 1 oblicua
subsistema SWIR	6
subsistema TIR	5
Resolución espacial (m)	
subsistema VNIR	15
subsistema SWIR	30
subsistema TIR	90
Rango electromagnético (μm)	
subsistema VNIR	
B1	0.52-0.60
B2	0.63-0.69
B3	0.78-0.86
B3 (toma oblicua)	0.78-0.86
subsistema SWIR	
B4	1.600-1.700
B5	2.145-2.185
B6	2.185-2.225
B7	2.235-2.285
B8	2.295-2.365
B9	2.360-2.430
subsistema TIR	
B10	8.125-8.475
B11	8.475-8.825
B12	8.925-9.275
B13	10.250-10.950
B14	10.950-11.650

2.6.2 Geometría de las imágenes ASTER

El sistema VNIR de TERRA se compone de dos telescopios montados de tal forma que minimicen la distorsión de las imágenes (Figura 20). Uno es de vista vertical y otro de vista oblicua orientado hacia atrás en relación con la trayectoria orbital con un determinado ángulo de 27.6°.

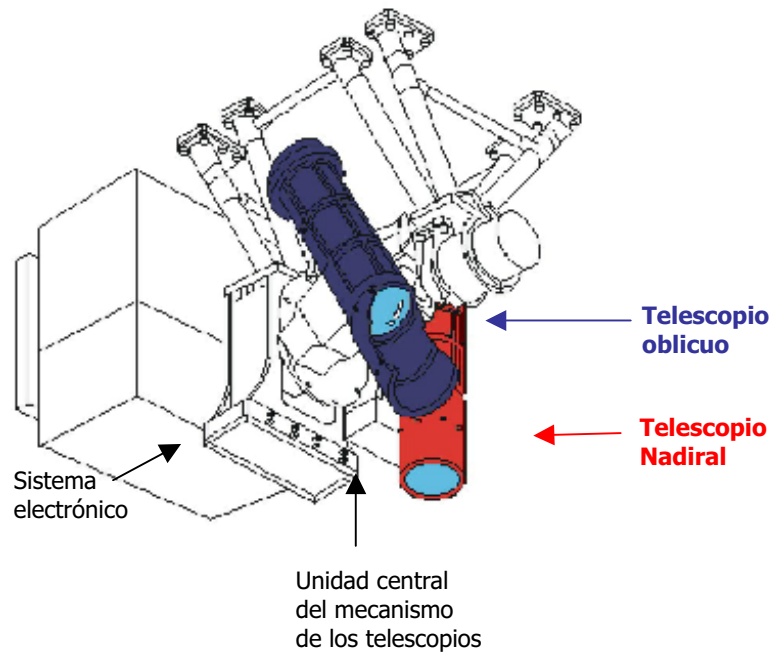


Figura 20. Configuración del sensor VNIR (JPL, 2001).

Los detectores de cada una de las bandas son 5000 elementos CCD pero sólo 4000 de estos detectores se usan de forma continuada. Existe un retraso entre los datos de adquisición nadirales y los oblicuos; durante este periodo de tiempo la rotación de la Tierra produce un desplazamiento del centro de la imagen. El sistema VNIR extrae automáticamente la corrección de los 4000 píxeles basándose en la información de posición de la orbital suministrada por la plataforma de EOS.

El plano focal del telescopio de vista oblicua contiene un detector matricial simple y emplea un filtro para discriminar entre las diferentes longitudes de onda. El plano focal del telescopio nadiral contiene tres líneas matriciales y emplea el método de separación por prisma Dichroit y filtros de interferencias para la separación espectral permitiendo la separación de los datos en tres bandas mediante la observación de una misma zona simultáneamente.

La Figura 21 muestra la configuración estereoscópica de estos dos telescopios. La relación entre la base/altura y el ángulo α es: $\text{base/altura} = \tan \alpha$, siendo α el ángulo entre las dos direcciones de las tomas. El ángulo α correspondiente a la relación base/altura de 0,6 es de $30,96^\circ$. Pero si se considera la curvatura terrestre, el valor de este ángulo en el diseño de orientación de los telescopios debe ser de $27,60^\circ$.

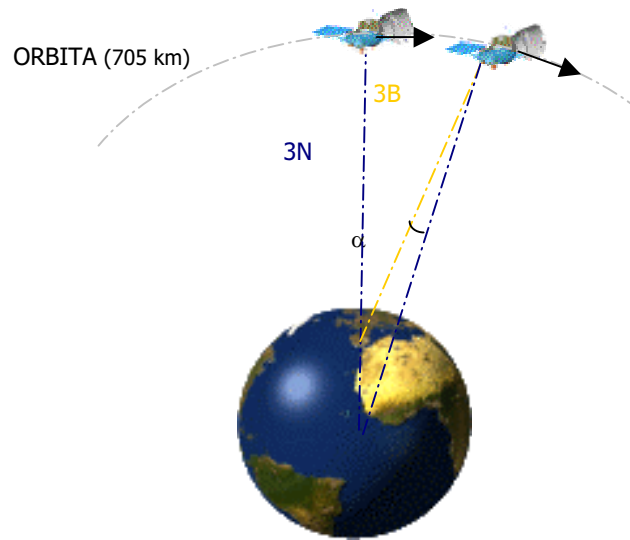


Figura 21. Configuración de la geometría del satélite TERRA.

2.6.3 MDE generados a partir de imágenes ASTER

La capacidad de ASTER para construir MDE está basada en el principio geométrico de Pitágoras y en los principios fotogramétricos que han sido comprendidos y usados rutinariamente en imágenes aéreas durante más de 50 años ([American Society of Photogrammetry, 1952](#)).

La relación entre la elevación de un punto y el paralaje de dicho punto en el par estereoscópico es proporcional a la relación base/altura de la toma (ver ecuación 39), dicha relación es aplicada para el cálculo de la elevación en cada punto. En la Figura 22 se muestra el esquema de medición de la elevación de un determinado punto a partir de la diferencia de paralaje (Δp) en un estéreo par de ASTER. Además, la elevación del punto, Δh , se relaciona con el ángulo α y el intervalo de tiempo (Dt) necesario para registrar la parte superior y fondo del objeto.

La aplicación de este principio en fotogrametría espacial se remonta a más de 20 años: Stereosat y Mapsat. La posibilidad del cálculo automatizado de la diferencia de paralaje, y por tanto de la elevación del punto, por procedimientos de correspondencia entre imágenes han sido descritos por varios investigadores como ya se ha explicado anteriormente.

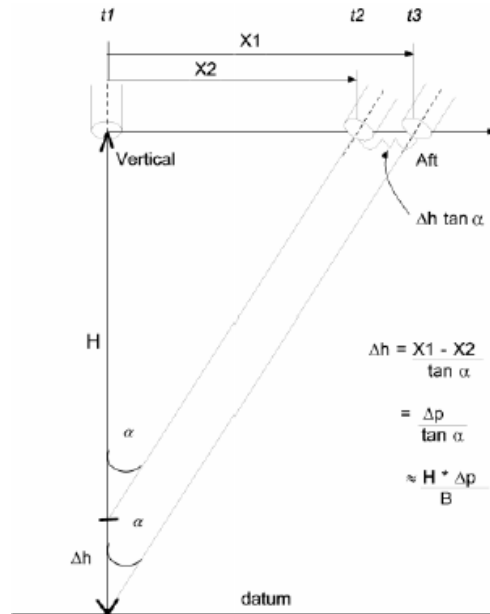


Figura 22. Esquema de medición de la elevación (Δh)
 BASE (B) = X_1
 Dt: representado por $(X_1 - X_2) = \Delta p$
 (de [Lang & Welch, 1999](#)).

Método de correspondencia entre imágenes

Para extraer la elevación a partir de unos datos estereoscópicos de TERRA-ASTER se utilizan las bandas 3N y 3B de las 14 que forman la escena completa. Estas bandas toman datos en el IR próximo, lo cual es una novedad respecto a los métodos más tradicionales que usan imágenes pancromáticas en el espectro visible. La correspondencia entre puntos homólogos de la imagen se consigue con los métodos ya descritos en otros apartados de correspondencia de imágenes.

A partir de un conjunto de coordenadas del punto correspondiente, la posición del satélite y los vectores de la línea visual (LOS, *line of sight*) de las bandas 3N y 3B se puede calcular por interpolación la malla de puntos que son incluidos en el nivel 1A de los datos. Como muestra la Figura 23 el punto de cruce de los dos vectores que forman las líneas de las vistas 3N y 3B, será el punto terreno observado, y por tanto medido. Este método topográfico de medición por intersección de las líneas visuales se conoce como método por haces.

Aunque el paralaje nominal (relación base/altura) es 0,6, este valor no es fijo, ya que depende hasta cierto punto de la posición del píxel y del ángulo de la toma oblicua. Por consiguiente, el método de haces se emplea para calcular la posición del punto del terreno, incluida su elevación, indiferente de la posición del píxel y del valor del ángulo transversal.

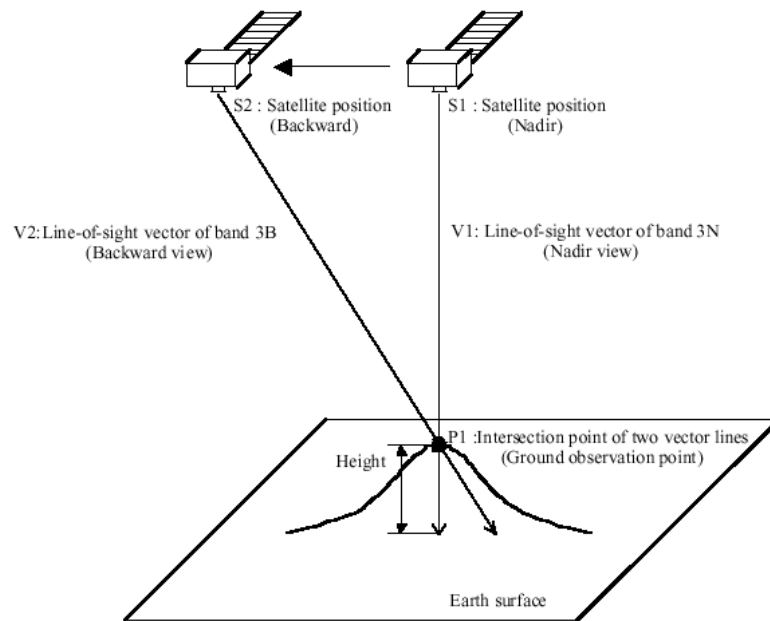


Figura 23. Medición de puntos terreno por el método de haces (ERSDAC, 2002).

2.6.4 Estudios realizados con imágenes ASTER

La bibliografía sobre construcción de MDE con imágenes ASTER es aún muy escasa aunque existe consenso en que es posible obtener valores de ECM menores de 25 m. Cuando las imágenes son óptimas, los valores de ECM pueden reducirse hasta un mínimo de 10 m tal como se muestra en la Tabla 11 (Toutin & Cheng, 2001; Toutin, 2001).

Kääb y col. (2002) realiza un trabajo con datos ASTER para la supervisión de deformaciones en zonas de alta montaña. El ECM obtenido fue de 60 m. El error fue calculado con respecto a medidas fotogramétricas realizadas manualmente con otro MDE de 25 m de tamaño de malla obtenido de cartografía 1:30.000. El valor de ECM de 60 m fue el resultado para toda la zona de trabajo; sin embargo, en una zona de topografía moderada, pero dentro de la zona de alta montaña, el ECM bajó a 18 m.

Hirano y col. (2002) evalúa la exactitud de MDE generados desde datos ASTER en diversas zonas (Monte Fuji en Japón; Los Andes, entre Chile y Bolivia; San Bernardino, al Este de los Angeles y Huntsville, al Norte de Alabama). Los resultados obtenidos para cada uno de los diferentes MDE se presentan en la Tabla 10. En este trabajo se muestran los diferentes valores de estimación del error de los MDE generados con datos ASTER tanto por los diferentes criterios en la generación de los MDE (como el número de puntos de apoyo empleados) como el origen de la fuente de datos de los puntos de apoyo y control.

Tabla 10. Resultados de los errores obtenidos en MDE generados desde datos ASTER en [Hirano y col. \(2002\)](#).

Zona	ECM (m)	Puntos de control		
		Núm.	Origen	Exactitud
Mt.Fuji en Japón	26.3	51	cartografía 1/25.000 de 10 m de CI del GSI (Geographical Survey Instituted of Japan)	±5 m
Los Andes	15.8	53	cartografía 1/50.000 de 20 m de CI del IGM (Instituto Geográfico Militar de Bolivia)	±10 m
San Bernardino	10.1	16	cartografía 1/24.000 de 3 a 12 m de CI del USGS (US Geological Survey)	±5 m
Huntsville	7.3	39	DGPS	±1.5 m
	11.1	512	DGPS (cinemático)	
	14.7	239776	cartografía 1/24.000 de 3 a 6 m de CI del USGS (US Geological Survey) y DEM (Level 2) del USGS 7.5 min	

Zona: de trabajo.

ECM: error cuadrático medio.

Núm.: número de puntos de control.

Origen: procedencia del valor de elevación de los puntos de control.

Exactitud: de los puntos de control según su origen.

Tabla 11. Resumen de trabajos realizados en la generación de MDE a partir de imágenes estereoscópicas TERRA-ASTER.

Fecha	Primer autor	ECM (m)	Puntos de control	
			Núm.	Origen
	Selby	11/25		
2001	Toutin	30		
2001	Toutin	10 17		Cartografía 1:100.000
2002	Kääb	18/60		Medidas fotogramétricas (datos aéreos)
2003	Hirano	26,3	51	Cartografía 1:25.000
		15,8	53	Cartografía 1:50.000
		10,1	39/512	DGPS (estático/cinémático)
		7,3-14,7	239	MDE preexistente del USGS

Fecha: fecha de la publicación.

Primer autor: de la publicación.

ECM: error cuadrático medio resultante.

Núm.: número de puntos de control empleados para calcular el error.

Origen: procedencia del valor de elevación de los puntos de control.

Otros métodos: en el cálculo del error en caso de no usar puntos de control.

Tras la revisión de estos trabajos, se deduce que los resultados del error de los MDE generados a partir de datos ASTER son bastante diferentes por varias razones; entre ellas destacan los criterios empleados en la generación del MDE y el método de análisis empleado en el cálculo del error.

Además, se vuelven a reiterar las conclusiones obtenidas en la revisión realizada en el apartado anterior sobre el número y origen de los puntos de control empleado en el análisis del error del MDE.

Los trabajos realizados con este tipo de datos espaciales son muy escasos e insuficientes para valorar las posibilidades que ofrecen en la generación de MDE. Por esto, se hace necesario investigar en esta línea planteándose como uno de los objetivos de esta Tesis.

2.7 Calidad de los MDE

2.7.1 Introducción

Términos como exactitud, precisión, incertidumbre y calidad suelen diferenciarse mal por sus estrechas relaciones, aunque sus significados son distintos; en lo que respecta a este trabajo, usaremos las definiciones siguientes:

- La *exactitud* es un parámetro aplicable a los datos y refleja la diferencia entre los valores de elevación del MDE y los valores reales (no siempre conocidos), también lo podemos llamar *error*. Un dato será tanto más exacto (medido con poco error) cuanto más se aproxime al valor real.
- La *precisión* es un parámetro aplicable a los métodos de medida u obtención de datos y se refiere a la capacidad del método para generar resultados con

mayor o menor discriminación en la escala de medida. Por ejemplo, un distanciómetro que mida con una resolución de 1 mm (tres dígitos significativos tras la coma decimal de las unidades) será más preciso que otro que lo haga con 1 cm (dos dígitos).

Precisión y exactitud están relacionadas pero la relación no es estricta: un método puede ser muy preciso pero, si está afectado por un error sistemático, dará resultados poco exactos.

- la *incertidumbre* es un concepto estadístico que se deriva directamente de un conjunto de valores de error; por ejemplo, con 150 puntos de control se determina la función de distribución del error, que será conocido en cada punto. El resultado permite asignar a cualquier otro punto de la zona, del cual se desconoce el error propio, un valor de incertidumbre derivada de los valores previos.

La incertidumbre permite realizar estimaciones del error posible y de su probabilidad estadística en un punto cualquiera.

Finalmente, la calidad de un MDE mediría su idoneidad para ser utilizado para cumplir unos objetivos concretos. Es decir, la calidad de un MDE es una propiedad variable ya que depende del objetivo para el cual se utilice. Lógicamente, la calidad depende del error o más precisamente de la incertidumbre asociada al MDE, aunque pueden entrar en consideración otros factores complementarios ([Östman, 1987](#); [Bolstad & Stowe, 1994](#)). En este trabajo no entraremos en la valoración de la calidad del MDE sino en la estimación del error.

Es conveniente destacar que en la cartografía analógica el error y la escala están directamente relacionados, pero esta relación ya no es tan clara en los datos digitales ya que no poseen una escala intrínseca de representación.

2.7.2 Tipos de exactitud

En principio, podemos diferenciar dos tipos de exactitud, en función de cuál sea la referencia con la que se comparan los datos. Denominaremos exactitud absoluta a la medida del error respecto a una referencia absoluta, como el *datum*; en cambio, hablaremos de exactitud relativa cuando estemos valorando las diferencias entre los propios datos.

Es frecuente establecer tanto la exactitud absoluta como la relativa como suma de dos componentes: horizontal y vertical. La exactitud horizontal o planimétrica evalúa el error en el plano XY; los errores planimétricos son vectores por lo que la incertidumbre asociada a este tipo de exactitud debe expresarse en términos de estadística circular (error circular estándar).

La exactitud vertical evalúa el error de la componente Z o elevación. En este caso se trata de una variable lineal por lo que la incertidumbre se expresará mediante los estadísticos pertinentes (desviación estándar o error cuadrático medio, ECM).

2.7.3 Variables influyentes en el error de los MDE

El error que encontremos en el MDE dependerá de múltiples causas que han podido influir en las diferentes etapas de su construcción y que ya han sido presentadas en apartados anteriores. Las causas no son sólo inherentes a los métodos empleados (captura de datos, algoritmos de correlación, interpolaciones, etc.) sino que también pueden influir las características del terreno (abrupto, llano), su cobertura, que puede hacer más o menos fiable el proceso fotogramétrico, y las condiciones de la toma (posición solar, turbidez atmosférica...).

Por ejemplo, en fotogrametría aérea se comprueba un error creciente cuanto más escarpada es la zona. Ackermann ([1996](#)) propone como regla general que el error cua-

drático medio de un MDE generado por fotogrametría aérea en terreno llano debe estar en torno a 1/20 del espaciado de muestreo del modelo, mientras que en terreno abrupto estaría alrededor de 1/10. A su vez, [Li \(1992\)](#) realiza un estudio sistemático del error en un MDE según el intervalo de muestreo para distintos tipos de terreno y con datos obtenidos por fotogrametría aérea a distintas escalas de trabajo. El principal objetivo de este trabajo es encontrar las relaciones entre el error y la densidad de puntos y la conclusión a la que se llega es que el error y el intervalo de muestreo presentan una alta correlación en MDE matriciales. La calidad puede ser considerablemente mejorada cuando se incluyen datos auxiliares como las líneas de ruptura (*breaklines*) en el proceso de construcción del MDE.

En fotogrametría espacial algunas causas pueden seguir siendo las mismas pero hay procesos que cambian y que pueden influir introduciendo nuevos factores de error o reduciéndolo en algunas fases del trabajo. En cualquier caso, cuando se trabaja con variables simultáneamente influyentes en un proceso, la única forma de analizar su influencia es paso a paso individualmente: si existen tres variables, A, B y C, se fijan los valores de B y C (variables estáticas) y se analiza la influencia de cambios de la variable A en los resultados. El proceso se repite con la B fijando los valores de A y C, etc. Estas pruebas pueden no ser únicas y frecuentemente deberemos repetir el análisis para diversos juegos de valores de las variables estáticas.

2.7.4 Estadísticos para la medida del error

El error en un MDE va a medirse comparando la elevación en el MDE con datos fiables en un conjunto de puntos de control. A partir de los valores de error se calculan los estadísticos que van a expresar las características de la incertidumbre que asociaremos al MDE en su conjunto. Los parámetros son generalmente: el error medio (EM), la desviación estándar (s) y el error medio cuadrático (ECM). Debemos hacer énfasis en que estamos midiendo exclusivamente el error de la componente Z por lo que los estadísticos son los habituales en la estadística lineal (no circular).

Se define como error un punto de control i , al valor $e_i = z_i - z_j$ donde z_i es la elevación asignada al punto en el MDE y z_j la elevación "real", estimada por métodos más precisos.

El error medio, EM, es la media aritmética de los errores individuales:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (\text{Ecuación 47})$$

donde n es el número de puntos de control. Como los errores positivos y negativos pueden llegar a anularse entre sí, el error medio es un estadístico útil sólo para comprobar que el error en el MDE es aleatorio (lo que se cumple si $EM = 0$).

La desviación estándar se calcula por la conocida expresión:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - EM)^2} \quad (\text{Ecuación 48})$$

Y, finalmente, el error cuadrático medio:

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (\text{Ecuación 49})$$

es una expresión equivalente a la desviación típica en ausencia de sesgo (es decir, si $EM=0$).

2.7.5 Fiabilidad y número de puntos de control

Uno de los problemas que se plantean en la realización de estas pruebas es el del número idóneo de puntos de control. Debe equilibrarse el tamaño de la muestra con la significación estadística: es necesario, por motivos de eficacia y economía, reducir la muestra de puntos al tamaño mínimo necesario. En los tests cartográficos se aconseja emplear un mínimo de 20 puntos de control por hoja. En el caso de los MDE no existen demasiadas referencias sobre este aspecto. La más significativa es la de [Li \(1991\)](#) donde plantea una fórmula que relaciona el número de puntos de control n y la *fiabilidad* (*reliability*) del error obtenido como resultado $R(e)$, siendo e la medida del error en términos de desviación típica:

$$R(e) = \frac{1}{\sqrt{2(n-1)}} \times 100\% \quad (\text{Ecuación 50})$$

En nuestro trabajo, el valor de fiabilidad debe entenderse como la anchura del intervalo de confianza para el ECM resultante del control del error. Así, una estimación $ECM=10.0$ m con una fiabilidad del 5% acota el intervalo de confianza al 95% del ECM de la siguiente forma:

$$10.0 \pm 1.96 (10.0 * 0.05) = 10 \pm 0.98$$

El problema inverso también está resuelto: el número de puntos necesarios para hacer un control del error con una fiabilidad determinada se calcula con la siguiente expresión:

$$n = \frac{1}{2R(e)^2} + 1 \quad (\text{Ecuación 51})$$

Por tanto, para evaluar el error de un modelo con $R(e)=10\%$, son necesarios 51 puntos de control mientras que para un 6% el número de puntos llega ya a 140.

2.7.6 Normalización en la generación y exactitud de MDE

En España no existen normas sobre la generación y control de la exactitud de MDE. En otros países disponemos de algunos textos que podemos utilizar como referencia. En concreto:

- EE.UU.: **Standards for Digital Elevation Models**, National Mapping Program Standards, US Geological Survey, <http://rockyweb.cr.usgs.gov/nmpstds/demstds.html>
- Canadá: **Accuracy Standards for Positioning**, Geodetic Survey Division, Geodetic Survey of Canada, http://www.geod.nrcan.gc.ca/index_e/products_e/publications_e/Accuracy_Standards.pdf
- EE.UU.: **Geospatial Positioning Accuracy Standards**, Federal Geographic Data Committee (FGDC), US Geological Survey, <http://www.fgdc.gov/standards/status/textstatus.html>

En *Standards for Digital Elevation Models* del US Geological Survey se expresan los objetivos del USGS respecto a los MDE y se describen los tipos de modelos que producen. En una segunda parte se desarrolla una serie de especificaciones donde se definen los tipos de errores que se generan en los MDE y, finalmente, se habla del control de calidad.

En cuanto al primer aspecto, existen varios tipos de MDE estandarizados del USGS con

espaciados referidos al sistema cartográfico UTM (10x10 m y 20x20 m); si son referidos en coordenadas geográficas, el intervalo de espaciado viene dado por intervalos de longitud y latitud. Así, los MDE denominados de 7.5 minutos cubren un territorio similar al de las hojas topográficas convencionales 1:25.000. En estos MDE el tamaño de celda es de 30x30 m. Los MDE de 30 minutos tienen un tamaño de celda de 2 segundos, etc.

El control de calidad es considerado como una parte integral del proceso de producción de los modelos, donde se realizan una serie de controles para verificar la exactitud. Las verificaciones se realizan con 28 puntos de control por modelo, 20 interiores y 8 en los bordes. También se realiza otra serie de verificaciones, algunas de ellas visuales para la detección de los grandes errores.

El USGS clasifica los MDE en función de la exactitud absoluta vertical en tres niveles:

- Nivel 1: el objetivo es un ECM de 7 m y se tolera un ECM máximo de 15 m. El Error máximo absoluto permisible será de unos 50 m (3 veces el ECM máximo) por encima del cual el punto será considerado un error grosero.
- Nivel 2: son modelos obtenidos generalmente a partir de mapas topográficos preexistentes a escala 1/100.000; el ECM máximo permitido es la mitad de la equidistancia entre las curvas de nivel originales y no deben existir errores mayores que el valor de equidistancia.
- Nivel 3: se admite un ECM máximo de un tercio del intervalo entre curvas de nivel y no habrá errores puntuales mayores que 2 tercios de dicho intervalo.

En *Accuracy Standards for Positioning* del *Geodetic Survey* de Canada se pretende ofrecer unas normas de exactitud dentro del contexto del Sistema de Referencia Espacial Canadiense (*Canadian Space Reference Systems, CSRS*). En estas normas se describen dos tipos de exactitud, que se calculan para coordenadas geodésicas (longitud y latitud) y altura elipsoidal: exactitud absoluta (*network accuracy*) y exactitud local (*accuracy local*).

El término *network accuracy* hace referencia a la exactitud absoluta de las coordenadas para un punto expresada como el 95% de nivel de confianza con respecto al sistema de referencia definido. La exactitud absoluta se puede calcular para cualquier proyecto que esté conectado al CSRS. La exactitud local, en cambio, es un estadístico de centralización (mediana, media...) de la exactitud relativa de las coordenadas para un punto con respecto a otro punto adyacente, expresada como el intervalo del 95% de nivel de confianza. La exactitud local en altura elipsoidal se calcula usando una media a un intervalo de confianza relativa del 95% entre el punto en cuestión y otro punto adyacente.

En todas las consideraciones se separan los componentes horizontales o planimétricos y verticales o altimétricos aunque es obligado reconocer que se menciona en uno de los apéndices la posibilidad de cálculo de elipsoides de confianza integrando las tres componentes espaciales.

El estadístico utilizado para representar la exactitud horizontal es la elipse de confianza del 95% mientras que en la exactitud vertical es ya lineal: el intervalo de confianza al 95%. Ambos son, en consecuencia, medidas de incertidumbre en el sentido comentado en el Apartado 2.7.

En función de estos estadísticos se establece un conjunto de *accuracy classes* que van desde la Clase 1 cm (asociada a un límite de intervalo de exactitud de 1 cm) hasta la de 200 m. Todo el rango se divide en clases donde la incertidumbre se dobla aproximadamente en cada paso.

Finalmente, en *Geospatial Positioning Accuracy Standards*, del *Federal Geographic Data Committee* (FGDC) se incluyen tres partes relativas a los MDE. En una primera parte

se hace referencia a la metodología, donde se incide en la importancia de la exactitud de los datos empleados para realizar los controles. En una segunda parte se presenta una normativa para redes geodésicas donde se ofrece una metodología común para informar de la exactitud de los valores de coordenadas horizontales y verticales para puntos de control geodésicos. Finalmente, en una tercera parte se desarrolla la Normativa Nacional para la Exactitud de los Datos Espaciales (NSSDA).

La NSSDA no define valores umbrales de exactitud sino que son las agencias las encargadas de establecer umbrales para sus aplicaciones y especificaciones en productos y para los contratos. Como en la mayoría de los casos, la NSSDA usa el ECM como estimador de la exactitud de posición y se informa mediante los intervalos del 95% de nivel de confianza. La exactitud vertical se estimará mediante un mínimo de 20 puntos de control sobre un conjunto de datos de donde se asume que los errores sistemáticos han sido eliminados.

Capítulo 3 Obtención de los puntos de apoyo y control

Ya se ha hecho énfasis anteriormente sobre la necesidad de disponer de datos fiables para el apoyo y el control del error. Esta necesidad se tuvo presente desde el principio del planteamiento del presente trabajo, ya que dicha toma de datos sería la base sobre la que se apoyan todos los estudios posteriores. Por ese motivo se realizó una exhaustiva planificación con un reconocimiento de la zona, donde se verificó la existencia de los vértices geodésicos y se planearon las campañas de campo.

Entre las diferentes técnicas existentes para obtener las coordenadas de los puntos de apoyo (PA) y puntos de control (PC), no hubo ninguna duda que el método más adecuado sería mediante Sistemas de Posicionamiento Global, GPS, ya que aporta la precisión necesaria para el estudio y reduce el tiempo de obtención de los datos ante otras técnicas geodésicas y topográficas.

En este capítulo se detalla el método de medida y los equipos empleados, las campañas realizadas, los vértices geodésicos de la zona de trabajo y los tipos de datos observados, así como los cálculos realizados para la obtención de dichos datos.

3.1 Método de medida: técnicas de posicionamiento global (GPS)

3.1.1 Fundamento de la metodología GPS

El GPS (*Global Positioning System*) es un sistema de orientación y navegación cuyo funcionamiento está basado en la recepción y procesamiento de las informaciones emitidas por una constelación de 24 satélites (NAVSTAR). Como los fundamentos del método son ya suficientemente conocidos, sólo recordar que se basan en el método de trilateración: la recepción simultánea de señales emitidas por varios satélites permite la estimación de las distancias y, en consecuencia, resolver el problema de la localización de la estación receptora de las señales.

En cuanto a la organización del sistema GPS, es habitual diferenciar tres sectores:

- Sector espacial, constituido por la constelación de 24 satélites, que se mueven en seis planos orbitales con una inclinación sobre el plano del ecuador de 55° y una órbita casi circular de 26600 km de radio. Las señales emitidas por cada satélite portan información sobre el tiempo, la situación orbital, identificación, etc. y permiten la estimación de las distancias hasta el receptor.
- Sector de control, formado estaciones terrestres cuya función es el establecimiento de la base de tiempo GPS y la determinación de las efemérides de los satélites.
- Finalmente, se entiende como sector del usuario a los receptores que captan las señales enviadas por los satélites.

3.1.2 Captura de puntos de apoyo y control

La captura de puntos se realizó de acuerdo con la siguiente secuencia de pasos:

- Selección de los vértices geodésicos de la zona.
- Observación simultánea de los mismos para el cálculo de los parámetros de transformación.
- Cálculo y ajuste de los parámetros de transformación.

- Determinación de una estación base para el método diferencial.
- Determinación de los puntos de apoyo sobre las imágenes: puntos reconocibles tanto en la imagen como en el terreno y con una buena distribución sobre el área de trabajo.
- Observación de los puntos de apoyo y control simultáneamente con un receptor en la estación base fija.
- Procesado y cálculo de los puntos observados.

Los vértices geodésicos se utilizan para el cálculo de los parámetros de transformación entre el sistema GPS global (WGS84) y el sistema de referencia local (ED50, proyección UTM). Para estimar estos parámetros, los vértices geodésicos se usan como puntos de referencia ya que se conocen sus coordenadas en ambos sistemas.

El método empleado para la obtención de las coordenadas fue la observación simultánea en modo estático de los cinco vértices seleccionados. El cálculo de los parámetros se realizó con la aplicación informática Leica Ski-Pro¹⁸.

Las coordenadas de los puntos de apoyo y control se captaron mediante técnicas de GPS diferencial (DGPS). El fundamento del método diferencial radica en que los errores producidos por el sistema GPS afectan de forma muy similar a los receptores situados próximos entre sí de forma que si se utiliza un receptor fijo (estación base) con localización conocida, los errores pueden ser conocidos y corregidos en la estación móvil.

3.1.3 Medidas realizadas

La obtención de los datos de campo se realizó en tres campañas de campo:

- 1ª campaña (marzo de 2001), donde se realizó el reconocimiento de la zona de estudio con la selección de los vértices geodésicos y su localización y accesibilidad.
- 2ª campaña (abril de 2001), donde se realizaron las observaciones simultáneas desde cada uno de los vértices geodésicos seleccionados en la anterior campaña, con los equipos GPS estacionados durante un periodo de tiempo superior a las dos horas; también se tomaron aquí los puntos de apoyo, previamente seleccionados en gabinete sobre las imágenes.
- 3ª campaña (junio de 2001), donde se observaron los puntos y las líneas de control; estos datos no fueron seleccionados previamente sobre las imágenes ya que su identificación no es un requisito condicionante como es el caso de los puntos de apoyo.

Las observaciones se realizaron con receptores Leica SR510, SR520 y SR530¹⁹.

3.1.4 Vértices geodésicos

Para transformar las coordenadas del sistema WGS84, que proporcionan los receptores GPS, a coordenadas UTM del sistema cartográfico ED50, es necesario el cálculo de los parámetros de transformación específicos de una determinada zona mediante estacionamientos prolongados y simultáneos en varios vértices geodésicos que circunden el área de trabajo.

¹⁸ <http://www.leica-geosystems.com/gps/product/ski-pro.htm>

¹⁹ <http://www.leica-geosystems.com/products/gps-systems/surveying-systems.htm>

La elección de estos vértices es un factor importante para obtener los parámetros de transformación óptimos de la zona de estudio y por tanto, en la planificación previa de las campañas de campo se han tenido en cuenta los siguientes aspectos en la selección de los mismos:

- La zona de estudio quedará cubierta o circundada por los vértices.
- Deberá verificarse previamente la existencia actual del vértice y la accesibilidad al mismo.
- Se verificará la ausencia de señales radioeléctricas y de obstáculos físicos que puedan distorsionar las señales o provocar el efecto multicamino.
- Las observaciones desde los vértices debe ser simultáneas por lo que deberá disponerse de un número equivalente de equipos y personas.
- Los parámetros de transformación son fiables sólo dentro de la envolvente de los vértices.

A partir de estas condiciones y del reconocimiento de la zona se determinaron los vértices que serían observados, que fueron finalmente los siguientes (ver reseñas en el **Anexo 1**):

Tabla 12. Nombre y coordenadas UTM de los vértices geodésicos (m)			
Nombre	X	Y	Z
Padre Guerrero	417.804,32	4.091.640,20	1.114,4
Mesa de Formes	424.572,31	4.088.966,41	1.080,4
Herrero	438.018,66	4.089.271,83	1.052,6
Lopera	431.969,33	4.081.257,33	1.485,1
Atalaya de Agrón	422.540,76	4.098.195,83	1.171,1

3.1.5 Cálculo y ajuste de los datos

Para determinar la distancia entre el satélite y el receptor es imprescindible realizar cálculos a posteriori sobre los datos tomados en el campo, también denominados "observables". En la metodología GPS existen dos tipos de datos observables: pseudodistancia y de fase, siendo éste último el más preciso y el utilizado en esta toma de datos.

Las mediciones de pseudodistancia se utilizan para localizar la posición del receptor en el espacio. Si el receptor usara un reloj atómico sincronizado con los relojes atómicos de los satélites, se podría intersectar las mediciones de distancias a 3 satélites, cuyas posiciones son obtenidas por los datos de las efemérides, y así determinar la posición X, Y, Z del receptor. Debido a que se usan distintos relojes, es necesario un cuarto satélite para que el reloj del receptor pueda ser sincronizado con la hora GPS, y de esta forma se pueda resolver el error del receptor.

Para la medición de estas pseudodistancias, todos los receptores emplean el código C/A; el cual no posee restricciones para su uso. El código C/A se transmite con una frecuencia de 1.023 Mhz y se repite cada 1/1000 de segundo. Esto es adecuado para navegación pero no para Geodesia. El código P se genera para un ciclo de 267 días y se transmite con una frecuencia de 10.23 Mhz, por lo que cada elemento del código tiene una longitud aproximada de 30 metros. Su precisión es 10 veces mayor que el código C/A, es decir, de unos 30 cms.

El observable de fase se fundamenta en determinar la diferencia de fase entre la señal del receptor y la señal del satélite observado. La señal procedente del satélite está afectada de errores que hay que eliminar. Estos errores son generados por diversas causas: efectos en la señal al traspasar la ionosfera y la troposfera (error ionosférico y troposférico respectivamente), procedentes del oscilador y por el error de fase inicial del satélite.

La ionosfera tiene un contenido de iones que produce un adelanto de la señal. El valor de este error ionosférico va a depender de la radiación solar existente, la latitud del punto

y la hora del día. El mejor método para eliminar gran parte de este error es el empleo de receptores bifrecuencia o bifase que captan las dos señales portadoras.

Contrariamente a la ionosfera, la troposfera es un medio cambiante y por tanto el error troposférico es difícil de eliminar ya que no es constante, aunque existen modelos que pueden emplearse para atenuarlo.

La determinación de las líneas bases se realiza mediante el cálculo de los parámetros de transformación, mediante la observación de cinco vértices geodésicos simultáneamente, en dicho cálculo se emplean todos los observables.

Para conseguir más precisión en el posicionamiento de los puntos observados se emplea la técnica diferencial (DGPS). El posicionamiento diferencial utiliza la posición de los puntos obtenidos de las pseudodistancias y aplica correcciones a esa posición. Estas correcciones son generadas por un receptor referencia y las utiliza un segundo receptor para corregir su posición generada internamente. Puesto que el receptor de referencia tiene posición conocida, se pueden calcular los errores entre la posición conocida y la posición calculada, y transformar las diferencias (o correcciones) al otro receptor referencia.

3.1.5.1 Cálculo de los parámetros de transformación

El siguiente paso es el cálculo y ajuste de las coordenadas de los puntos, proceso que como ya se indicó antes, se realizó con el programa Leica Ski-Pro; los pasos seguidos para el cálculo en dicha aplicación informática son:

- Asignación de los datos observados a un proyecto (Importar/Datos brutos GPS); una vez importados los datos se activan las observaciones a calcular y se realizan las modificaciones pertinentes, como el cambio de alturas de la antenas, etc.
- Procesado de los datos; el primer paso es obtener las coordenadas de un punto, como un *Single Point*, para más tarde realizar el ajuste, guardándose finalmente los datos. Un requisito importante en el procesamiento de los datos es la resolución de todas las ambigüedades. A partir de aquí, se calculan todas las baselines, quedando resuelto el ajuste de los vértices y obteniendo unas coordenadas en el sistema de referencia WGS-84 de cada uno de ellos.
- Asignar las coordenadas de los vértices geodésicos en el sistema local (Administrador/Coordenadas/Nuevo y asignar el archivo de coordenadas creado mediante Herramientas/Importar datos ASCII).
- Elección del tipo de transformación a realizar (Administrador/Sistema de coordenadas/Transformaciones/Nuevo); en nuestro caso: Elipsoide A: WGS-84; Elipsoide B: Internacional; Tipo: Clásica 3D; Modelo: Molodensky Badekas.
- Elección de la proyección a utilizar (Administrado/Sistema de coordenadas/Proyección / Nuevo): Nombre: UTM30; Tipo: UTM; Hemisferio: Norte; Zona: 30; Meridiano Central: 9º W.
- Cálculo de los parámetros de transformación (Módulo Datum and Map). La ventana de dicho módulo se subdivide en dos partes, siendo la superior la correspondiente al elipsoide A de la transformación y la inferior la que corresponderá al elipsoide B. Una vez realizado el ajuste los resultados quedan almacenados en un informe.
- Generación del sistema de coordenadas (Administrador/Sistema de coordenadas/Nuevo): Nombre: UTM30; Transformación: PARTESIS; Residuales: Multicuartrático; Proyección: UTM30.
- Por último, se realiza la asignación del sistema de coordenadas al proyecto (Proyectos/Propiedades), donde se cambia el sistema de coordenadas WGS84 por el UTM30. De esta forma, el proyecto ya dispone de los parámetros de transformación, permitiendo la conversión del sistema WGS84 utilizado por GPS al sistema

de referencia ED50.

Los resultados de los parámetros de transformación se presentan en la Tabla 13, y los residuales de las coordenadas de los vértices al cambiar las coordenadas de un sistema de coordenadas a otro en la Tabla 14.

Parámetros	Valor	ECM
dX	-63352.3931 m	0.0353
dY	-530402.5443 m	0.0353
dZ	119.2562 m	0.0353
Rotación del eje X	6.61458"	1.01678
Rotación del eje Y	-0.38738"	1.56064
Rotación del eje Z	21589.8379"	1.03717
Escala	-15.2632 ppm	3.9186

Vértice	WGS 84 → UTM			UTM → WGS 84		
	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dE (m)	dN (m)	dA (m)
Atalaya de Agrón	0.0492	-0.0740	-0.0876	-0.0705	-0.1025	-0.0096
Herrero	0.0497	0.1139	-0.0438	0.1168	-0.0604	0.0074
Lopera	-0.0685	-0.0392	0.0548	-0.0437	0.0833	-0.0197
Mesa de Formes	0.0270	0.0061	0.0543	0.0079	0.0274	0.0538
Padre Guerrero	-0.074	-0.0067	0.0224	-0.0106	0.0520	-0.0320

3.1.5.2 Cálculo de los puntos de apoyo y control

Una vez calculados los parámetros de transformación correspondientes a la zona de estudio, ya es posible el cálculo de las coordenadas en el sistema de referencia ED50 del resto de los puntos observados. Los pasos seguidos en el cálculo de estos puntos son:

- Importación de los datos y la asignación al proyecto correspondiente.
- Se establece el vértice de base como punto fijo en posición y altura.
- Se procesan los datos, resolviendo las ambigüedades y se calculan las baselíneas desde la estación fija a cada uno de los puntos observados.
- Finalmente, se obtienen los resultados de todos los puntos en ambos sistemas de referencia.

3.2 Descripción de los puntos de apoyo y control

Mediante las técnicas comentadas en el apartado anterior, se ha determinado un conjunto de 20 puntos de apoyo (PA) que cumplen la condición de ser fácilmente identificables tanto en las imágenes como en el terreno. Dichos puntos fueron seleccionados previamente a las campañas de toma de datos en campo, identificándolos en las imágenes y en la cartografía existente. La identificación de los PA se realizó con la ayuda de un programa de tratamiento de imágenes, ENVI, donde se realizó una georreferenciación aproximada de la zona con puntos cuyas coordenadas fueron extraídas de la cartografía existente. Las co-

ordenadas precisas se obtuvieron mediante técnicas DGPS, anteriormente explicadas, con una exactitud final de unos 10 cm. Las coordenadas de dichos puntos se listan en la Tabla 15.

La distribución de los puntos no es arbitraria sino que se planificó para que fuera lo más homogénea posible dentro de la limitación de una identificación exacta. La distribución final se muestra en la Figura 24. Los vacíos se deben, bien a la presencia del embalse de los Bermejales bien a la abrupta topografía de las zonas Sudeste y Suroeste.

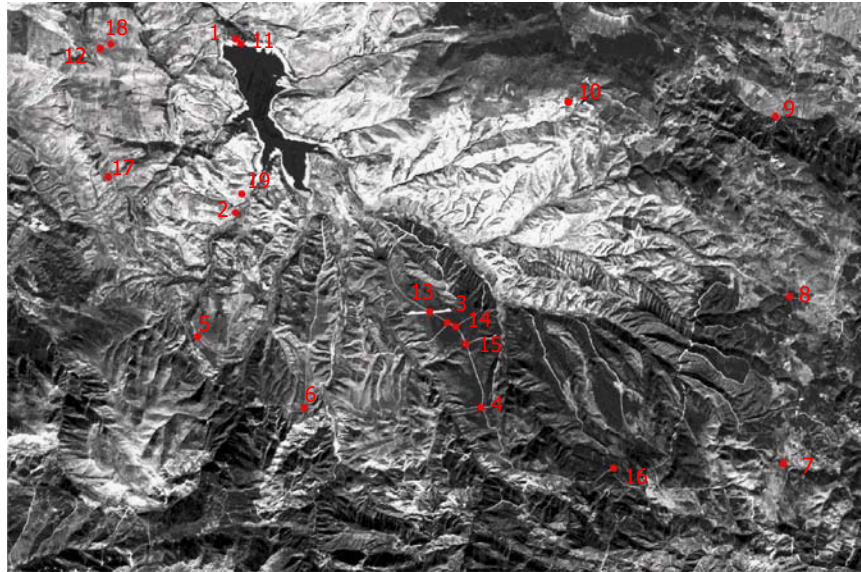


Figura 24. Localización de los puntos de apoyo.

Tabla 15. Coordenadas UTM de los puntos de apoyo.

ID	X	Y	Z
1	420465.00	4095146.00	834
2	420464.00	4090417.00	867
3	426220.00	4087416.00	1073
4	427127.00	4085109.70	1177
5	419433.00	4087036.00	1017
6	422331.00	4085098.60	1052
7	435509.50	4088124.90	1353
8	435345.83	4083568.00	1291
9	435130.00	4093036.00	1214
10	431428.20	4092024.50	1164
11	420613.00	4095014.00	834
12	416787.00	4094885.00	1134
13	425739.00	4087720.00	1063
14	426447.00	4087300.00	1078
15	426722.00	4086839.00	1078
16	430736.00	4083457.00	1287
17	417013.00	4091387.00	1111
18	417078.00	4095003.00	1142
19	420635.00	4090923.00	859
20	417620.00	4090713.00	859

Los puntos de control se obtuvieron con la misma metodología que los de apoyo. En total se tomaron 315 puntos de control (ver Figura 25), cuyas coordenadas se listan en el Anexo 3.

El objetivo de estos puntos de control es utilizar sus coordenadas como referencia fiable para la valoración del error de los MDE.

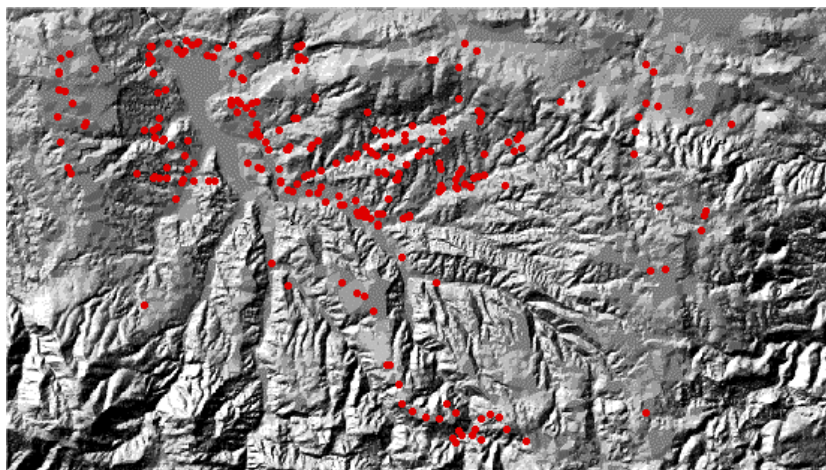


Figura 25. Localización de los puntos de control.

3.3 Otros datos

3.3.1 Cartografía de apoyo

Las cartografías disponibles de la zona de estudio es la siguiente:

- Mapa Topográfico Nacional de España (Escala 1:50.000): hojas 1025, 1026, 1040, 1041, 1054 y 1055 (Instituto Geográfico Nacional).
- Mapa Topográfico Nacional de España (Escala 1:25.000): hojas 1040-II (Arenas del Rey), 1040-IV (Canillas de Albaída), 1041-I (Jayena), 1041-III (Pico de Navachica) (Instituto Geográfico Nacional).
- Mapa Topográfico de Andalucía (Escala 1/10.000, formato digital): hojas 104041, 104042, 104043, 104111, 104112, 104113, 104121, 104122 y 104123 (Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía).
- Modelo Digital de Elevaciones correspondiente a las hojas 1025, 1026, 1040, 1041, 1054 y 1055 (Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía).

Capítulo 4 Análisis de las variables influyentes en la generación de MDE con imágenes SPOT-HRV

4.1 Introducción

En este capítulo, como el título indica, se van a analizar las variables influyentes en la generación de un MDE desde imágenes estereoscópicas SPOT-HRV por técnicas automáticas de correlación. La principal finalidad de dicho análisis es realizar un MDE con la mayor exactitud posible que dichas imágenes permitan; es decir, hacer óptimo el flujo de trabajo y los valores de las variables influyentes en el resultado. Para ello es necesario conocer el valor o rango de valores óptimos de las variables que influyen en los procesos previos y en el propio proceso de extracción automática de las elevaciones para la obtención del MDE, así como intentar comprender cuál es el mecanismo de influencia de dichas variables en el proceso. Tampoco nos cabía duda desde el principio que los métodos de trabajo impuestos por las peculiaridades de cada aplicación informática pueden tener una influencia decisiva y que pueden ser un condicionante más en la magnitud del error del MDE resultante.

Para cada una de las variables analizadas se han realizado pruebas experimentales que evalúan la fluctuación del error del MDE según varía el valor de la variable. Para tener una mayor posibilidad de comprensión de los mecanismos de influencia de las variables, las pruebas se han realizado con diferentes programas fotogramétricos (4.2.1). Aunque será comentado más adelante, las características de las aplicaciones informáticas hacen que, ocasionalmente, algunas pruebas no puedan reiterarse con los tres programas.

Las variables analizadas son las siguientes:

- Número de puntos de apoyo.
- Distribución de los puntos de apoyo.
- Estructura del MDE resultante: vectorial (TIN) o raster (GRID).
- Tamaño de malla o distancia entre puntos (resolución espacial, sólo para estructuras GRID).
- Algoritmo de correspondencia de imágenes.
- Valor del coeficiente de correlación.

La zona de estudio ha sido presentada en el primer capítulo y la obtención de los datos necesarios para la generación de los MDE (puntos de apoyo) y su control de calidad (puntos de control) han sido explicados en el Capítulo 3.

Este capítulo se organiza de la siguiente forma:

- Las aplicaciones informáticas y los datos empleados se detallan en el primer punto.
- A continuación se explica el flujo de los procesos requeridos en la generación del MDE en cada uno de los programas empleados: Socet Set y OrtoBase PRO en este caso.
- Se muestran las pruebas experimentales realizadas para cada variable y análisis de las mismas.
- Se presentan los resultados y conclusiones.

4.2 Datos y material empleados

Para la realización de los MDE y el estudio de sus respectivos errores se han empleado distinto material y tipos de datos, que a continuación se detallan:

4.2.1 Programas informáticos

Para construir los MDE se han utilizado las aplicaciones: Socet Set (Leica Geosystems) y Erdas Imagine 8.5 con OrthoBASE Pro (Leica Geosystems). Para tareas complementarias se ha utilizado la aplicación de proceso de imágenes ENVI 3.4 (Research Systems) y para el control del error el sistema de información geográfica ArcView 3.2 (ESRI) y la hoja de cálculo Excel 2000 (Microsoft).

- Socet Set es una aplicación modular que trabaja con distintos tipos de imágenes digitales (aéreas, SPOT-HRV y Landsat) basada en la normalización de las imágenes y por tanto aprovechando las ventajas de la geometría epipolar; utiliza la estructura piramidal en el almacenamiento y visualización de las imágenes. Para la construcción de los MDE se ha empleado el módulo ATE (*Auto Terrain Extraction*) donde existe un procedimiento específico para trabajar con imágenes SPOT-HRV
- OrthoBase PRO es un módulo integrable en Erdas Imagine que, como en el caso anterior utiliza la normalización de imágenes y la estructura piramidal para sus procesos. En este caso, existe también un método específico para trabajar con imágenes SPOT-HRV.

La utilidad de un método específico para SPOT es que asegura el aprovechamiento de los datos de los ficheros de cabecera donde figura toda la información orbital y de los sensores. En un módulo genérico sería necesario introducir estos datos a mano en algún punto del proceso o estimarlos mediante métodos de cálculo inverso.

ENVI 3.4 es una aplicación de tratamiento de imágenes y ha sido empleado en los trabajos previos de selección de los posibles puntos de apoyo y georreferenciación de las imágenes SPOT. ArcView 3.2 se ha utilizado para la extracción de las elevaciones del MDE en los puntos de control para realizar los tests de exactitud. Finalmente, Excel 2000 es una hoja de cálculo empleada para el cálculo de los tests estadísticos.

4.2.2 Imágenes estereoscópicas SPOT

Las imágenes SPOT-HRV que forman el par estereoscópico (Figura 26 toma vertical y Figura 27 toma oblicua lateral) fueron tomadas con fechas 2-11-1991 y 2-01-1992, es decir, con dos meses de diferencia. Las características de los datos se detallan en la Tabla 16. La geometría de la toma de los datos queda definida con la relación base/altura. La base tiene un valor de 722,87 km y la altura de 830,01 km (media de las dos alturas correspondientes a los distintos momentos de la adquisición de los datos).

Tabla 16. Características de los datos SPOT-HRV.

	Escena 1	Escena 2
Nivel de corrección	1A	1A
Satélite	SPOT 2	SPOT 2
Sensor	HRV modo PAN	HRV modo PAN
Día de la toma	25/11/1991	02/01/1992
Hora de la toma	11 h 28 min 21 s	10 h 57 min 46 s
Latitud centro imagen	36° 52' 48" Norte	36° 52' 20" Norte
Longitud centro imagen	3° 47' 40" Oeste	3° 49' 09" Oeste
Tamaño de la imagen	60 x 60 km	60 x 60 km
Resolución geométrica	10 m	10 m
Angulo de incidencia	25,8° (izquierda)	24,1° (derecha)
Altura del sensor	830144 m	829872 m
Relación base/altura	0.87	

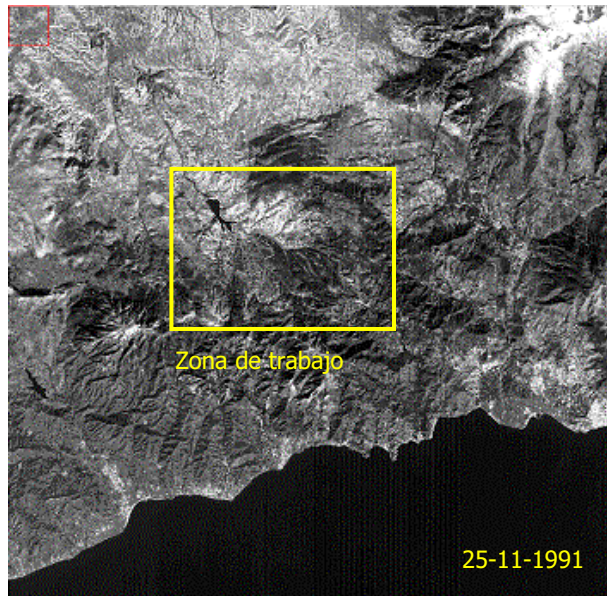


Figura 26. Escena 1 del par estereoscópico SPOT.

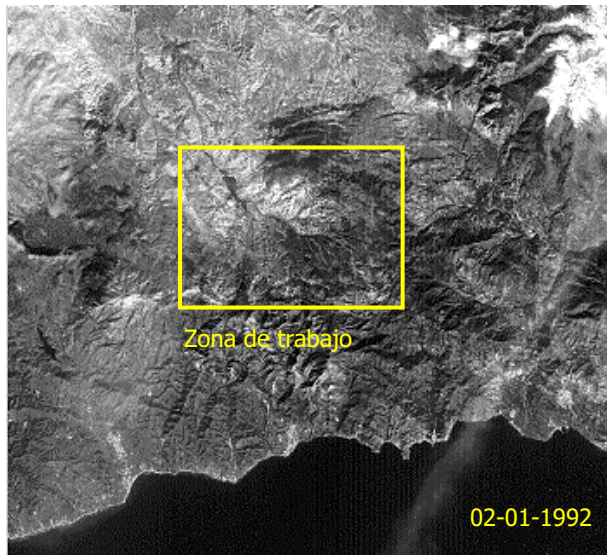


Figura 27. Escena 2 del par estereoscópico SPOT.

4.3 Generación de un MDE con datos estereoscópicos SPOT-HRV

El flujo de trabajo seguido para generar un MDE a partir de datos SPOT está formado principalmente por las operaciones fotograméticas de preparación de las imágenes con las que posteriormente se realizan las operaciones automatizadas de extracción de la elevación en una estación fotogramétrica digital. Estos pasos quedan resumidos en la Figura 28.

Aunque el flujo de trabajo es básicamente el mismo en las dos aplicaciones informáticas utilizadas, las peculiaridades de cada una de ellas hacen que los detalles sean bastante diferentes, cuestión que se expone a continuación.

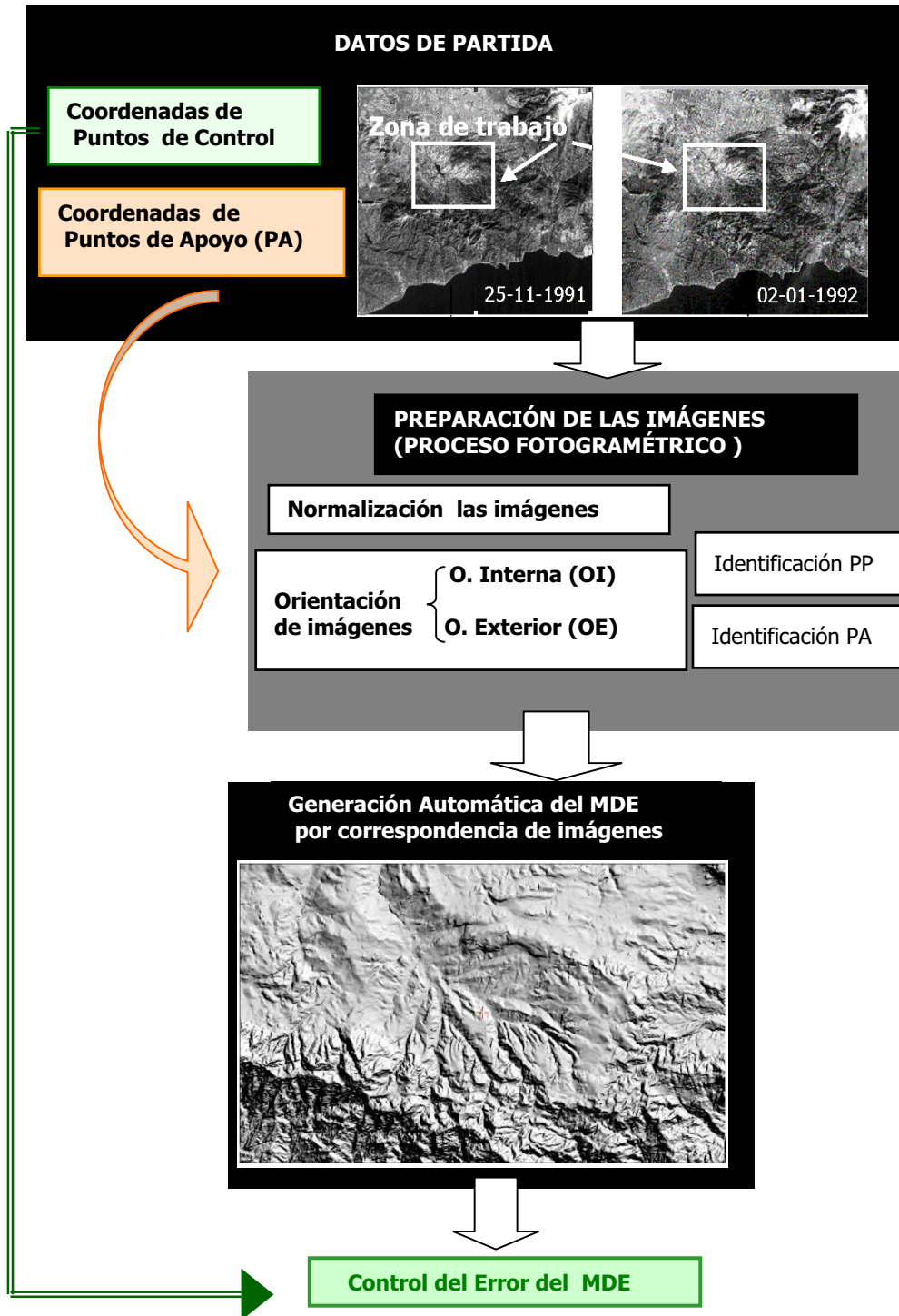


Figura 28. Esquema de generación de un MDE a partir de imágenes SPOT-HRV.

4.3.1 Generación de un MDE en Socet Set

Los pasos a realizar en Socet Set para la obtención automática de un MDE son los que a continuación se detallan:

- **Creación de un proyecto:** en esta primera parte se realiza la gestión/organización del proyecto donde van a integrarse los ficheros que contienen las imágenes SPOT y datos de cabecera. Se trata, por tanto, de una etapa donde se configura el sistema de coordenadas de trabajo (UTM), la referencia vertical (nivel medio del mar), las unidades de trabajo (metro), etc. El *datum* geodésico debe basarse en un elipsoide geocéntrico, como el WGS84, debido a que las efemérides y los datos de altitud del satélite SPOT están referidos a un sistema geocéntrico.
- **Importación y preparación de las imágenes:** donde se procede a la importación de las imágenes y a la generación de la pirámide de imágenes para su gestión posterior en la presentación gráfica con distintas resoluciones y en las operaciones de correlación. Debemos destacar que la lectura de imágenes SPOT se realiza directamente y no presenta problemas de formato. Un detalle no documentado es la necesidad de que las dos imágenes estén en directorios diferentes ya que en caso contrario su lectura es imposible.
- **Orientaciones y triangulación:** la orientación de las imágenes SPOT equivale a los procesos clásicos fotogramétricos de orientación relativa (OR) y absoluta (OA). Estas orientaciones se realizan mediante identificación de puntos homólogos en ambas imágenes (OR) y de puntos de apoyo de coordenadas terreno conocidas (OA), en el módulo MST (*Multi Sensor Triangulation*). La orientación interna con las imágenes SPOT no tiene sentido ya que la relación entre la unidad mínima de la imagen, el píxel, y la lente del sensor es constante y conocida. La identificación de puntos homólogos, también llamados puntos de paso (PP), entre las dos imágenes se realiza mediante correlación automática de puntos por el método de correspondencia de área, ABM (comentado en el apartado 2.4.4.)

La orientación absoluta es el proceso que escala el modelo estereoscópico de la orientación relativa al modelo final con coordenadas-terreno. En este proceso es donde intervienen los puntos de apoyo. En fotogrametría digital, ambos procesos, OR y OA, se suelen realizar de forma simultánea; añadiendo puntos de apoyo se reduce el número de puntos de paso necesarios ya que todas las coordenadas de los PA son conocidas. Por tanto, un punto de apoyo medido en un par estereoscópico contribuye con 4 parámetros conocidos (dos por cada imagen) y 0 incógnitas. El ajuste del sistema de ecuaciones se calcula por mínimos cuadrados y resuelve el problema de un conjunto de $n+1$ ecuaciones lineales con n incógnitas.

Para determinar el mínimo número de puntos que se requiere para llegar a una solución, se debe multiplicar el número de imágenes del bloque por el número de parámetros de cada imagen que se han de ajustar. En nuestro caso, como son dos imágenes, el número de incógnitas es 14.

Como se muestra en la Figura 29 se recomienda que para dar más consistencia y fiabilidad a los cálculos y reducir los valores residuales de los ECM del ajuste, se utilicen más del 50% de puntos redundantes ([Bae Systems Mission Solutions Inc., 2001](#)).

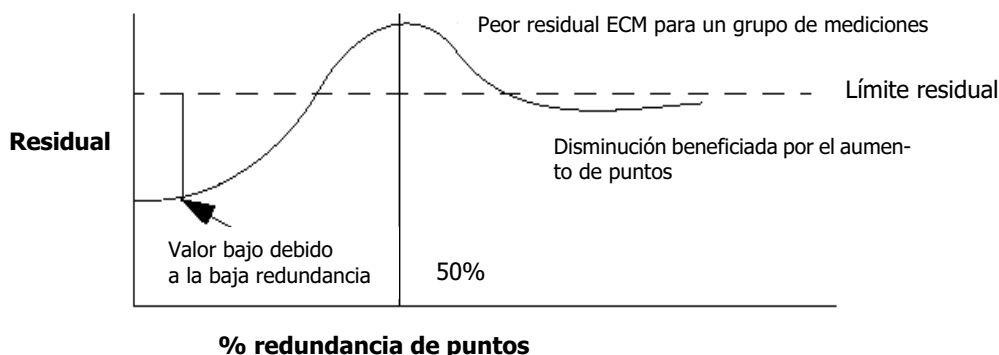


Figura 29. Influencia de la redundancia en los residuales de las orientaciones.

- **Generación del MDE:** el módulo ATE crea automáticamente un MDE a partir de un par estereoscópico basado en el cálculo de las elevaciones a partir de los paralajes en X de cada uno de los puntos que formarán el modelo en las imágenes rectificadas. La extracción automática de la elevación se realiza mediante un algoritmo iterativo que comienza con el nivel más pequeño de la pirámide de imágenes, el de menor resolución, y sucesivamente desciende en el árbol de imágenes hasta llegar a la máxima resolución.

La aplicación permite generar el MDE con estructura matricial o como una red de triángulos irregulares. A lo largo de los procesos en la generación del MDE intervienen distintos parámetros como el número de los puntos de apoyo empleados en la orientación del par, su distribución, el tamaño de malla del modelo raster (en su caso), el algoritmo o estrategia de correspondencia empleado en la extracción de la elevación y el método de depuración usado para revisar y verificar el modelo. Todos estas variables pueden influir en el MDE final y en su error.

4.3.2 Generación de un MDE en OrthoBase Pro

Los pasos en este caso son:

- **Creación de un proyecto:** como en el caso anterior, el 'proyecto' es la unidad de trabajo donde se organizarán los datos y procesos. Los proyectos son ficheros con extensión *blk* donde se introducirán las imágenes en el formato propio *img*. Como antes, los proyectos tienen unas propiedades que deben especificarse; por ejemplo, en el caso del método de captura de imágenes tenemos las siguientes:

frame camera
digital camera
video camera
no-metric camera
generic pushbroom
SPOT pushbroom
IRS-1C pushbroom
IKONOS

dada la disponibilidad de un sensor específico, se elige la opción *SPOT pushbroom*. También deben definirse el sistema de coordenadas (UTM) y la zona (huso 30 N), el elipsoide (Hayford) y las unidades de trabajo (metros).

- **Importación de las imágenes:** se realiza directamente y quedan almacenadas en un formato propio de la aplicación. También se realiza la organización en forma de pirámide de imágenes.
- **Orientaciones y triangulación:** para cada imagen deben introducirse algunos datos del sensor (los equivalentes a los parámetros de orientación interna en fotogrametría aérea convencional). Los parámetros del sensor se configuran con los datos especificados en las tablas siguientes. También deben especificarse algunos datos para cada imagen, especialmente el ángulo de incidencia (-25.8° y $+24.1^\circ$ respectivamente) y la resolución espacial (10 m en ambas imágenes).

Nombre del sensor	SPOT PAN
Longitud focal (mm)	1082.0
Punto principal Xo (mm)	0.0
Punto principal Yo (mm)	0.0
Tamaño del píxel (mm)	0.013
Núm. de columnas	6000

X	2
Y	2
Z	2
OMEGA	0
PHI	0
KAPPA	2

- **Medida de los puntos de paso (*tie points*):** para la identificación automática de los puntos de paso es necesario identificar previamente de forma manual un mínimo de dos puntos en cada una de las imágenes. Posteriormente se miden más puntos de forma automática (ver Figura 30) y se configura el conjunto de parámetros que definirán la estrategia de correlación. Los parámetros empleados se muestran en la Tabla 19.

<i>Search size</i>	21
<i>Correlation size</i>	7
<i>Least square size</i>	21
<i>Coefficiente limit</i>	0.85
<i>Initial accuracy</i>	10%

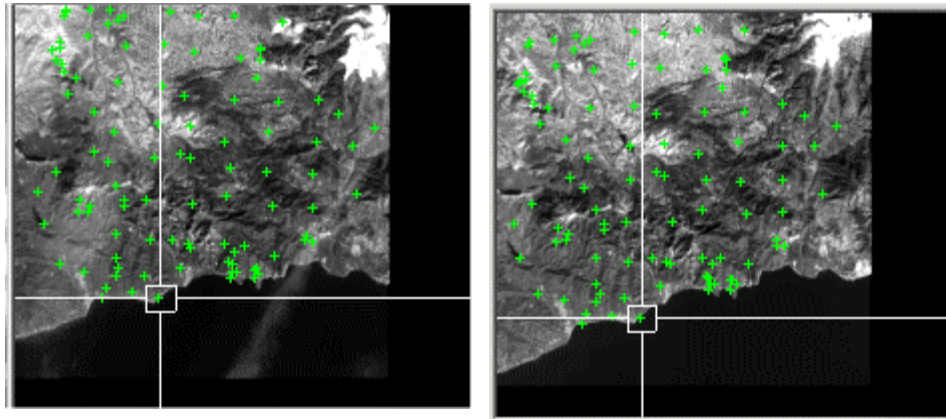


Figura 30. Esquema de los puntos de paso identificados.

- **Identificación de los puntos de apoyo:** éste es uno de los procesos fotogramétricos en los que no existe ningún grado de automatismo por lo que la identificación de cada uno de los puntos de apoyo se realiza de forma manual en cada una de las imágenes y se les asignan las coordenadas correspondientes. La necesidad de identificar los puntos en la pantalla destaca la importancia de la calidad de la visualización y de la conveniencia de disponer de visión en color (falso color) para esta fase del trabajo. En nuestro caso sólo se dispone de visión monocromática debido al tipo de imagen.
- **Cálculo y ajuste de la triangulación:** una vez identificados los puntos de paso y de apoyo sólo queda realizar el cálculo y ajuste de la triangulación de los puntos. En este proceso es donde se decide el número de puntos de apoyo y su distribución, dos variables que influyen en la calidad del ajuste de las imágenes y por tanto en la posterior generación del MDE. Para resolver la orientación de un par SPOT el problema matemático es igual al ya explicado en el apartado anterior: el número de incógnitas es 14 y como cada punto de apoyo reduce el sistema en cuatro incógnitas, se necesita un mínimo teórico de 4 para resolver el sistema.
- **Generación del MDE:** los pasos a seguir en la generación automática de un MDE en OrthoBase Pro son los siguientes:
 - Configuración de los datos del MDE:
 - Estructura del MDE (*DEM; 3D Shape; ASCII*)²⁰.
 - Nombre del fichero.
 - Tamaño de malla o distancia entre puntos (en X y en Y).
 - Posibilidad de recortar el MDE en un determinado porcentaje de superficie.
 - Selección de propiedades:
 - Parámetros de la proyección de los resultados (UTM huso 30 N, elipsoide Hayford).
 - Área de selección: todos los MDE se han generado en el mismo marco geográfico: esquina superior izquierda X=407800 m, Y = 4076700 m y esquina inferior derecha: X=445600 m, Y=4100000 m.
 - Conjunto de parámetros que definen la estrategia de correlación:

²⁰ DEM es una estructura normalizada del USGS; 3D Shape es una estructura propia del SIG ArcView (ESRI); la opción ASCII genera un fichero texto simple.

- Tamaño de la ventana de búsqueda (en X e Y).
- Tamaño de la ventana de correlación (en X e Y).
- Límite del coeficiente de correlación.
- Tipo de terreno (áreas abiertas, urbanización, bosques, etc.).
- Posibilidad de suavizado del MDE mediante filtros (para la realización de las pruebas siempre se ha desactivado esta opción para no distorsionar los resultados).
- Control de exactitud del MDE: el valor de exactitud del MDE se puede calcular en OrthoBase Pro con los propios puntos de apoyo y de paso, pero también permite utilizar datos externos de elementos que no han intervenido en la generación del MDE, como es el caso de los puntos de control obtenidos por medidas DGPS.

4.4 Análisis de las variables influyentes

4.4.1 Introducción

En los antecedentes (Apartado 2.5.4) se han revisado los trabajos de investigación sobre MDE generados por técnicas automatizadas con imágenes SPOT donde pudimos observar que los valores del error varían en un rango muy variable (desde 3.3 a 33.6 m). Entendemos que esta variabilidad puede ser debida, entre otras posibilidades, a dos factores: que el MDE haya sido generado con una combinación de parámetros influyentes no óptima o que el cálculo del error no se haya realizado de forma adecuada. Como ya se ha dicho, el objetivo principal de nuestro análisis es generar el "mejor" MDE posible analizando los valores óptimos de las variables influyentes en el error del modelo. Alcanzando este objetivo podemos añadir algo de luz sobre el problema anterior. Por otra parte, muchos trabajos no indican qué tipo de datos se ha utilizado en el control del error mientras que otros mencionan fuentes que pueden ser poco fiables.

Para el estudio de cada una de las variables y de su influencia se ha empleado la misma metodología de análisis, basada en realizar distintas pruebas experimentales fijando todas las variables influyentes excepto la variable a estudio, la cual tomará distintos valores dentro de un rango lógico para posteriormente, analizar su influencia en el error final del modelo. En la Tabla 20 se muestra un esquema de las variables y de las pruebas experimentales.

Para el cálculo de la exactitud de cada uno de los MDE se realizó un test estadístico de error con los 315 puntos de control distribuidos por toda el área de estudio. Los 315 puntos cumplen el requisito de que su exactitud es superior a la exactitud esperable de los puntos extraídos automáticamente por la estación fotogramétrica; en consecuencia, dichas elevaciones se pueden aproximar a los valores reales o "verdad terreno". La fórmula propuesta por [Li \(1991\)](#) se emplea para relacionar el número de puntos de control y la fiabilidad del control de error (ver Apartado 2.7.5).

En los trabajos revisados sobre generación de MDE con imágenes SPOT (apartado 2.6.7) ninguno de los trabajos consultados evalúa la fiabilidad del error en los análisis. Sí queda claro que los 20 puntos de control propuestos por los organismos productores de las pruebas ya mencionadas no pueden extrapolarse a los MDE ya se quedan cortos si deseamos una fiabilidad elevada: según la fórmula anterior sólo garantizan un valor del 16%.

Por este motivo, para la realización de las pruebas de error en este trabajo se recogió un total de 315 puntos de control lo que garantiza una fiabilidad mejor del 4% en los valores de ECM resultantes. Las relaciones entre la fiabilidad (en tanto por uno) y número de puntos de control se muestran en la Figura 31.

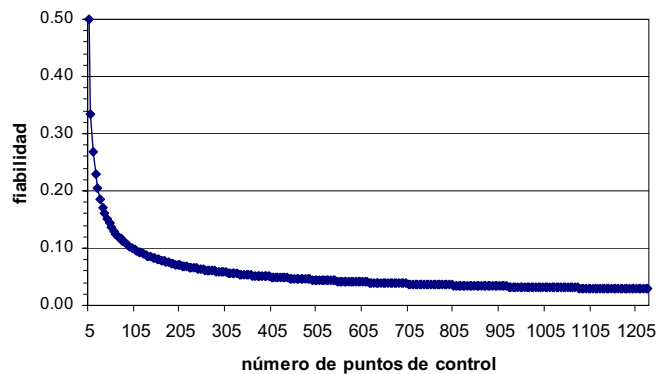


Figura 31. Relación entre la fiabilidad y tamaño de muestra de puntos de apoyo.

En los estudios estadísticos generalmente se realiza la eliminación de los errores groseros considerándose como tales aquellos cuyo valor es mayor a 3 veces la desviación típica de la distribución de errores. En nuestras pruebas se consideró oportuno no realizar este tipo de depuración para tener un valor real completo de los resultados del proceso.

4.4.2 Pruebas experimentales: descripción general

A continuación se explica cada una de las seis pruebas experimentales realizadas, con las que se construyó un total de 114 modelos digitales de elevaciones. Recordemos que el objetivo de dichas pruebas no es, en principio, la comparación de las aplicaciones entre sí (aunque se comentarán sus peculiaridades) sino que se utilizan dos programas diferentes para comprobar la consistencia de los resultados. Las pruebas son las siguientes:

- **Prueba experimental 1:** ¿Cuántos puntos de apoyo deben emplearse? Cuantos más puntos de apoyo se utilicen, ¿Aumentará la exactitud del MDE final?
- **Prueba experimental 2:** ¿La distribución de los puntos de apoyo influye en el resultado final?
- **Prueba experimental 3:** ¿Un MDE con estructura TIN generado con automatismos es más exacto que un MDE raster?
- **Prueba experimental 4:** ¿La modificación del tamaño de malla influye en la calidad de la correlación y por tanto en la exactitud del MDE?
- **Prueba experimental 5:** ¿Cuál es la estrategia de correspondencia de imágenes más apropiada?
- **Prueba experimental 6:** ¿El coeficiente de correlación que proporciona la estación fotogramétrica en cada elevación es un buen parámetro para depurar el MDE?

Tabla 20. Esquema de las pruebas experimentales en la generación de MDE con SPOT-HRV.				
Prueba	Variable analizada	Aplicación	Otros parámetros	Núm. de MDE
1	Número de puntos de apoyo de 5 a 20, de uno en uno	Socet Set	15 PP, malla de 20 y de 100 m y estrategia adaptativa	16 16
		OrthoBase	15 PP; malla de 20 m, ventana correlación de 7x7, límite de correlación de 0,65	16
2	Distribución de los puntos de apoyo 4 distribuciones diferentes	Socet Set	15 PP, 9 PA, malla de 20 m y estrategia adaptativa	4
		OrthoBase	15 PP; malla de 20 m, ventana correlación de 7x7, límite de correlación de 0,65	4
3	Estructura del MDE vectorial TIN o raster GRID	Socet Set	15 PP, 13 PA, malla de 20 m y estrategia adaptativa	2
		OrthoBase	15 PP; malla de 20 m, ventana correlación de 7x7, límite de correlación de 0,65	2
4	Tamaño de malla 100, 80, 60, 40, 20, 15 y 10 m	Socet Set	15 PP, 9 y 13 PA y estrategia adaptativa	7 7
		OrthoBase	15 PP, 9 PA; estructura TIN, ventana de correlación de 7x7, límite de correlación de 0,65	7
5	Algoritmo de correlación	Socet Set 'Adaptativo' y 'SPOT'	15 PP, 13 PA, malla de 20 m	2
		OrthoBase ventanas diversas	15 PP, 13 PA, estructura TIN y límite de correlación de 0,65	12
6	Límite del coeficiente de correlación	Socet Set 11 valores entre 0,50 y 1,0	15 PP, 13 PA, malla de 20 m y estrategia adaptativa	11
		OrthoBase 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95	15 PP, 13 PA, estructura TIN, ventana de correlación de 7x7, límite de correlación de 0,65	8

4.4.3 Prueba 1: número de puntos de apoyo

El conocimiento de una serie de puntos del terreno es imprescindible para relacionar el sistema de coordenadas imagen del modelo estereoscópico, obtenido a partir de la orientación relativa, con el sistema de coordenadas terreno. La disminución del número de puntos de apoyo buscando la reducción del trabajo de campo ha sido una de las prioridades en la investigación fotogramétrica. La técnica más utilizada para llevar a cabo la orientación externa de varios fotogramas con un número reducido de puntos de apoyo es la aerotriangulación fotogramétrica, pero no se han encontrado estudios relativos sobre el número de puntos de apoyo necesarios para orientar imágenes de satélite. Este número influirá previsiblemente en el error del ajuste de las imágenes o en la triangulación del bloque. El problema, por tanto, es ¿Cuál es el número de puntos de apoyo que es aconsejable emplear?

El número de puntos mínimo depende del número de parámetros de imagen ajustados por cada sensor y el número de imágenes en que cada punto aparezca. Para determinar el mínimo número de puntos requeridos se multiplica el número de imágenes que forman el bloque (en este caso sólo dos) por el número de parámetros de cada imagen que deben de ser ajustados.

El número de incógnitas por cada imagen de un par estereoscópico SPOT-HRV son 7 (focal, 3 parámetros de posición y altitud y los 3 primeros componentes de la posición y altitud con respecto al tiempo). Los valores estimados a priori de estos datos para comenzar el cálculo iterativo se obtienen de los ficheros de cabecera de las imágenes (de aquí la importancia de una lectura directa de dichos ficheros).

Cada punto de paso representa 3 incógnitas (sus coordenadas terreno) pero aporta 4 parámetros conocidos: fila y columna en cada imagen en la que se mide. El balance es que con cada punto de paso se obtiene un parámetro conocido. Por otro lado, la medida exclusiva de puntos de paso en las dos imágenes supone que se necesitan 15 para resolver las 14 incógnitas. Este proceso equivale a la orientación relativa, donde las imágenes están orientadas y el modelo estereoscópico representa la zona a representar pero sin una relación concreta con el terreno. Dicho modelo ya se puede visualizar en 3D.

La metodología de trabajo seguida ha sido la generación de diversos MDE con diferentes números de puntos de apoyo; los resultados de las orientaciones podrán variar y los MDE resultantes podrán ser contrastados con los puntos de control. En este estudio se han empleado un máximo de 20 puntos de apoyo claramente identificables tanto en las imágenes como en el terreno (ver Apartado 3.2) y se han hecho análisis desde el total de 20 hasta sólo 4 disminuyendo de uno en uno.

El uso de los 20 puntos de apoyo no plantea problemas pero es necesario diseñar una estrategia para decidir qué puntos se van eliminando progresivamente para realizar el siguiente análisis. El criterio de selección fue el siguiente: comenzando con el total de los 20, se elimina el punto que guarde una distancia mínima a cualquier otro. En el Anexo 5 se adjuntan los esquemas de las distintas distribuciones que forman los puntos de apoyo resultado de dicha estrategia.

4.4.3.1 Prueba experimental 1 en Socet Set

El manual del usuario de Socet Set recomienda usar de 4 a 6 puntos de apoyo por modelo indicando que se obtendrán precisiones en el rango de 6 a 20 m. En la misma fuente se indica que si no se emplean puntos de apoyo el error será de aproximadamente 500 m.

Para la generación de cada MDE (pasos explicados en el apartado 4.3.1) se fijó el resto de las variables con los siguientes valores: 15 puntos de paso en la orientación relativa, estructura grid (raster matricial) con un tamaño de malla de 20 y 100 m²¹ y la estrategia de correspondencia llamada adaptativa.

²¹ La prueba experimental con 100 m de tamaño de malla fue desarrollada como Proyecto Fin de Carrera en Ingeniería en Geodesia y Cartografía por Dña. Elia Quirós Rosado, con el título "In-

El cálculo de la orientación de las imágenes se realiza mediante ajuste de haces por mínimos cuadrados, que resuelve un conjunto de $n+1$ ecuaciones lineales con n incógnitas. Las incógnitas de dichas ecuaciones que se han de resolver son los parámetros de la imagen (ángulo del sensor, posición) y las posiciones ajustadas en el terreno de los puntos de paso. Como se han empleado 15 puntos de paso, cada modelo se obtiene con redundancias comprendidas entre el 111% y 339% (ver Tabla 21), valores muy superiores a la redundancia del 50% mínima recomendada.

Una vez generados los MDE se procedió al análisis estadístico de los mismos: se extrajeron los valores de las elevaciones de cada uno de los 315 puntos de control en cada MDE y se compararon con los valores de los puntos de control. Los resultados se muestran en la Tabla 22: error medio (EM), error cuadrático medio (ECM) y desviación estándar (s).

Puede observarse que el error medio es siempre negativo, con valores comprendidos en el rango de $-3,48$ a $-6,11$ m. Esto indica que existe un sesgo en la distribución de errores, o lo que es lo mismo, que existe un error sistemático en todos los MDE generados. Sin embargo, desde el punto de vista estadístico, ninguno de los valores de error medio es significativamente diferente de cero²².

En teoría, los estudios estadísticos se habrían de hacer en ausencia de errores groseros y sin sesgos en la distribución del error. En este caso parece correcto olvidarnos de esta premisa, ya que queremos estudiar el error tal y como se produce, sin obviar el hecho de que trabajando con un par estereoscópico SPOT y con las estaciones fotogramétricas digitales, existe un error sistemático negativo comprendido entre los límites antes señalados.

Con respecto al ECM podemos observar como varía relativamente poco en magnitud: un rango de 1.50 m entre el valor mínimo y el máximo (9.18 y 10.68 m). En la Figura 32 podemos observar como el ECM y la desviación estándar no mejoran sensiblemente al aumentar el número de puntos de apoyo llegando incluso a empeorar en los últimos casos, donde el número de PA es mayor.

El incremento del ECM a partir de los 18 PA podría ser causado por una mala distribución de dichos puntos, ya que a pesar de que aumentan en número la distancia entre ellos es tan pequeña que parece que en lugar de contribuir a una mejora en la exactitud del MDE, hacen que el ECM aumente.

fluencia de los puntos de control y elevación en la calidad de la georreferenciación de imágenes de satélite". Los resultados de ambas pruebas fueron similares por los que sólo se presentan los resultados obtenidos en los MDE de malla de 20 m realizados en el presente trabajo.

²² La prueba es un simple test de la t de Student, donde $t = EM / (s / \sqrt{n})$; donde $n = 315$.

Tabla 21. Ecuaciones, incógnitas y redundancia del ajuste (prueba 1 con Socet-Set).

PA	Nº Ec. PA	Nº Ec. PP	Total de EC	Incógnitas	Ec. Redun.	% Rendun.
5	20	15	35	14	21	125
6	24	15	39	14	25	139
7	28	15	43	14	29	154
8	32	15	47	14	33	168
9	36	15	51	14	37	182
10	40	15	55	14	41	196
11	44	15	59	14	45	211
12	48	15	63	14	49	225
13	52	15	67	14	53	239
14	56	15	71	14	57	254
15	60	15	75	14	61	268
16	64	15	79	14	65	282
17	68	15	83	14	69	296
18	72	15	87	14	73	311
19	76	15	91	14	77	325
20	80	15	95	14	81	339

Tabla 22. Estadísticos básicos del test de error (prueba 1 con Socet-Set).

Nº de PA	EM (m)	ECM (m)	s (m)
5	-4.04	9.23	8.32
6	-4.31	9.65	8.65
7	-3.69	9.26	8.51
8	-4.64	9.72	8.55
9	-4.06	9.26	8.33
10	-3.48	9.31	8.65
11	-3.91	9.21	8.35
12	-5.15	9.82	8.37
13	-6.11	9.91	7.81
14	-5.45	10.01	8.41
15	-5.50	9.89	8.24
16	-5.10	9.72	8.29
17	-4.53	9.42	8.28
18	-5.34	9.18	7.48
19	-6.64	10.47	8.12
20	-5.87	10.68	8.93

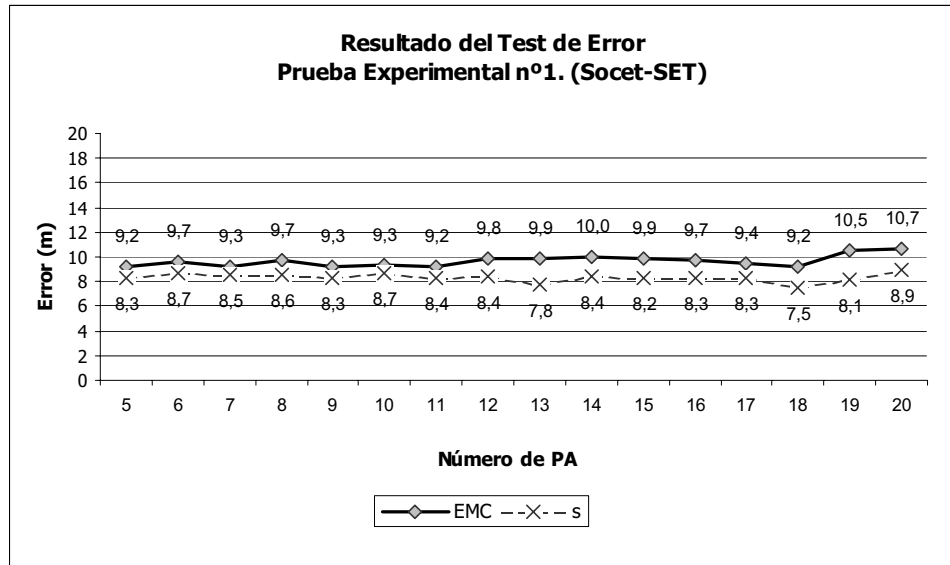


Figura 32. Representación gráfica del error (ECM y s) en la Prueba 1 con Socet Set.

La fiabilidad del error de los MDE generados se calcula según la propuesta de Li (1991) ya presentada anteriormente. Como el número de puntos de control es 315, la fiabilidad asociada al control del error es del 4%. Podemos obtener ahora los límites de confianza del 95% para los valores de s en cada modelo; en cada caso, el intervalo de confianza para s vendrá dado por el rango $s \pm (1,96 \cdot s \cdot r)$ donde r es la fiabilidad (*reliability*) expresada en tanto por uno. Por ejemplo, en el caso del MDE con 20 puntos de apoyo: $8.93 \pm (1.96 \cdot 0.36) = 8.93 \text{ m} \pm 0.70 \text{ m}$. Los resultados finales se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Intervalos de confianza para s en los MDE según el número de puntos de apoyo (Prueba 1 con Socet-Set).

Núm. de PA	s (m)	intervalo (95%)
4	8.28	±0.65
5	8.32	±0.65
6	8.65	±0.68
7	8.51	±0.67
8	8.55	±0.67
9	8.33	±0.65
10	8.65	±0.68
11	8.35	±0.65
12	8.37	±0.66
13	7.81	±0.61
14	8.41	±0.66
15	8.24	±0.65
16	8.29	±0.65
17	8.28	±0.65
18	7.48	±0.59
19	8.12	±0.64
20	8.93	±0.70

Un análisis interesante es la comparación entre el ECM del MDE y el ECM (en cada una de sus componentes) de las orientaciones en el ajuste de las imágenes al realizar las orientaciones relativa y absoluta (Tabla 24 y Figura 33).

Analizando únicamente los ECM en las orientaciones se puede observar como es mucho mayor el ECM en la componente X que en el resto de componentes lo que se debe al paralaje entre las imágenes. El error en la componente Y estará influido por la geometría epipolar mientras que el ECM de orientación en la componente Z es el que es más reducido.

Otro punto a destacar acerca de los ECM en la orientación es el hecho de que el ECM total de la orientación difiere en unos 9 metros aproximadamente del ECM en su componente Z ya que está muy condicionado por los altos valores de la componente X. Por esta razón en algunos análisis no será conveniente utilizar el ECM total como medida del error de la orientación, sino la componente que aplique al análisis en cuestión.

Tabla 24. Comparación del error de las orientaciones con el error del MDE (Prueba 1 con Socet Set). Todos los errores en m.

Núm. de PA	ECM O _x	ECM O _y	ECM O _z	ECM O _T	ECM MDE
4	9.82	3.06	2.94	10.70	9.06
5	9.35	3.88	2.61	10.45	9.23
6	11.22	3.91	2.54	12.16	9.65
7	10.50	4.47	2.77	11.74	9.26
8	9.96	4.30	2.89	11.22	9.72
9	9.30	4.37	3.41	10.83	9.26
10	8.96	5.08	3.43	10.86	9.31
11	9.94	5.06	3.32	11.63	9.21
12	10.09	5.21	3.38	11.85	9.82
13	9.58	5.04	2.52	11.12	9.91
14	9.46	7.48	3.24	12.48	10.01
15	9.34	7.30	3.15	12.26	9.89
16	9.60	7.08	3.10	12.33	9.72
17	9.45	7.66	2.96	12.52	9.42
18	9.92	7.86	3.06	12.48	9.18
19	9.00	7.99	2.77	12.35	10.47
20	8.95	7.87	2.97	12.28	10.68

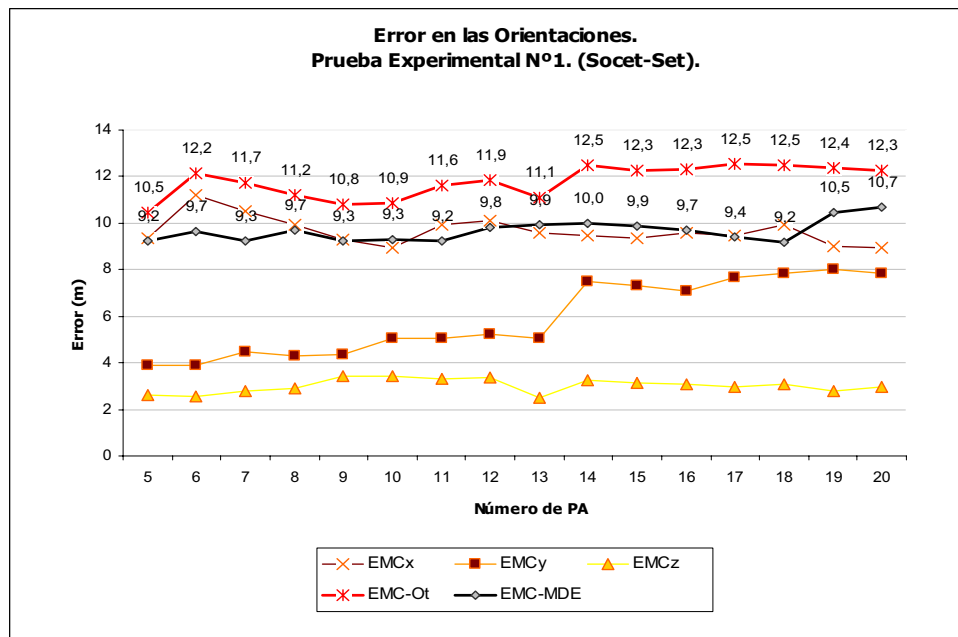


Figura 33. Comparación del ECM de los MDE según el número de puntos de apoyo y el ECM de las orientaciones en las tres componentes (Prueba 1 con Socet Set).

4.4.3.2 Prueba experimental 1 en OrthoBase Pro

Se ha repetido el análisis de la variable “número de puntos de apoyo” con la aplicación OrthoBase Pro. Los MDE han sido generados en condiciones idénticas que los anteriores, en el sentido de que el MDE generado con 5 puntos de apoyo en OrthoBase Pro lo ha sido con los mismos 5 puntos que se han empleado con Socet Set. Asimismo, la redundancia de los sistemas de ecuaciones es la misma que en el caso anterior, entre 111% y 339%. Debemos hacer notar que esta aplicación no permite trabajar con el mínimo teórico de 4 puntos.

Los MDE fueron contruidos configurando una ventana de búsqueda de 21 x 3 píxeles, una ventana de correlación de 7x7 y un límite para el coeficiente de correlación de 0,65; como ya se ha indicado, no se realizó suavizado posterior del MDE.

Al igual que en las pruebas anteriores, se realizaron los tests de control del error de cada MDE generado con los mismos 315 puntos de control, y cuyos resultados se muestran en la Tabla 25. Analizando los valores de error (Figura 34) se puede apreciar como el error medio tiene valores tanto positivos como negativos (recuérdese que con Socet Set siempre era negativo). A excepción del mayor valor (-8.26 m), el resto de los valores del EM está comprendido en un rango más moderado, entre -1.99 y 3.31 m; como en el caso anterior, ninguno de los valores de error medio difiere significativamente de cero desde el punto de vista estadístico.

Tabla 25. Estadísticos básicos del test de error (Prueba 1 con OrthoBase Pro).

Núm. de PA	EM (m)	ECM (m)	s (m)
5	0,05	7,70	5,64
6	-0,54	7,75	5,73
7	1,88	8,22	6,23
8	2,15	8,31	6,31
9	0,78	7,55	5,52
10	-1,99	7,59	5,60
11	-1,91	7,52	5,50
12	-1,44	7,41	5,37
13	-1,44	7,40	5,37
14	-1,36	7,39	5,37
15	3,31	8,30	6,30
16	2,66	8,16	6,17
17	2,01	7,92	5,92
18	2,24	8,01	6,01
19	1,76	7,90	5,91
20	-8,26	15,08	12,60

Analizando el ECM se observa que, exceptuando el último valor, 15.60, el resto de los valores varía relativamente poco, 0.69 m entre los valores mínimo y máximo (7.39 y 8.31 m). Al igual que en las pruebas realizadas en Socet Set, en OrthoBase Pro se observa que el ECM y la desviación estándar no mejoran sensiblemente al aumentar el número de PA (Figura 34).

La repentina subida del ECM en el último MDE, generado con 20 PA, podría ser causada por una mala distribución de dichos puntos y, al igual que en las pruebas anteriores, se confirma que si se aumentan los PA, pero con una distribución poco acertada, en lugar de contribuir a una mejora en el MDE podría hacer que el ECM aumente.

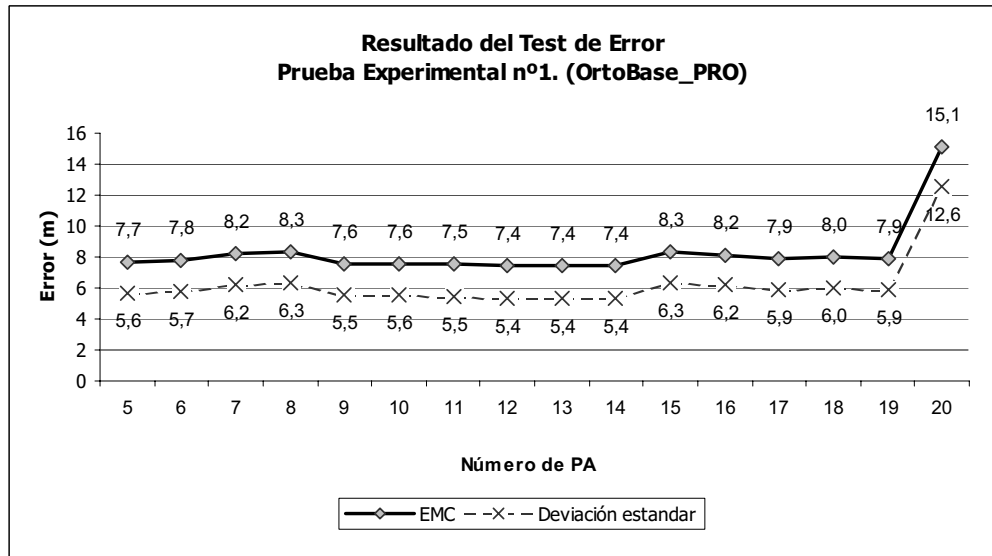


Figura 34. Representación gráfica del error (ECM y s) en la Prueba 1 con OrthoBase Pro.

En la **Tabla 26** se muestra la fiabilidad del error de los MDE generados según la fórmula propuesta por Li (1991). Como en el caso de Socet Set, el número de puntos de control es 315 y la fiabilidad del 4%.

Tabla 26. Intervalos de confianza para s según el número de puntos de apoyo (Prueba 1 con Ortho Base Pro).

Núm. de PA	s (m)	intervalo (95%)
5	5,64	±0.44
6	5,73	±0.45
7	6,23	±0.49
8	6,31	±0.49
9	5,52	±0.43
10	5,60	±0.44
11	5,50	±0.43
12	5,37	±0.42
13	5,37	±0.42
14	5,37	±0.42
15	6,30	±0.49
16	6,17	±0.48
17	5,92	±0.46
18	6,01	±0.47
19	5,91	±0.47
20	12,60	±0.99

En la **Tabla 27** se muestran los errores de las orientaciones de los MDE en cada una de sus componentes y el error medio cuadrático del MDE generado.

Como se muestra en la **Figura 35**, el ECM del MDE es siempre menor que el ECM total de las orientaciones (ECM-Ot). Si analizamos el error de ajuste en las orientaciones en cada una de sus componentes se puede observar que el error del MDE es de una

magnitud similar al error de orientación en la componente X, mientras que la componente Z posee el menor ECM de todos los componentes.

Tabla 27. Comparación del error de las orientaciones con el error del MDE (Prueba 1 con Ortho Base Pro). Todos los errores en metros.

Nº de PA del MDE	ECM O _X	ECM O _Y	ECM O _Z	ECM O _T	ECM MDE
5	7,5	24	4,5	28,5	7.70
6	9,0	36	4,5	37,5	7.76
7	10,5	39	6,0	40,5	8.22
8	10,5	48	6,0	49,5	8.31
9	9,0	45	6,0	45,0	7.55
10	9,0	45	6,0	46,5	7.59
11	7,5	39	4,5	52,5	7.52
12	7,5	39	4,5	54,0	7.70
13	9,0	40	4,5	55,5	7.75
14	9,0	37	4,5	57,0	8.22
15	9,0	45	6,0	54,0	8.30
16	7,5	36	4,5	52,5	8.16
17	7,5	37	4,5	52,5	7.92
18	9,0	42	6,0	52,5	8.01
19	9,0	40	6,0	54,0	7.90
20	9,0	46	81,0	121,5	15.08

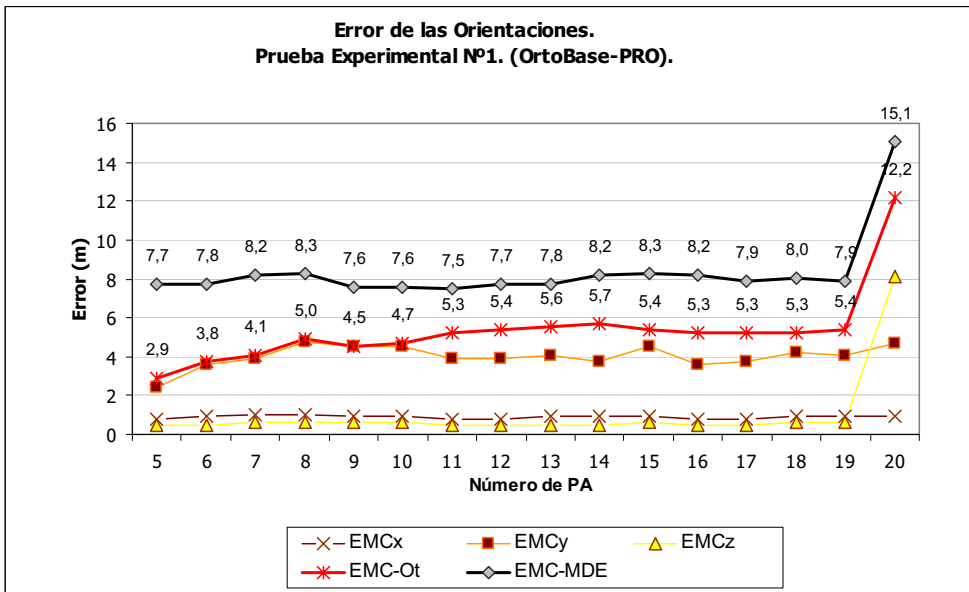


Figura 35. Comparación del ECM de los MDE según el número de puntos de apoyo y el ECM de las orientaciones en las tres componentes (Prueba 1 con OrthoBase Pro).

4.4.4 Prueba 2: distribución espacial de los puntos de apoyo

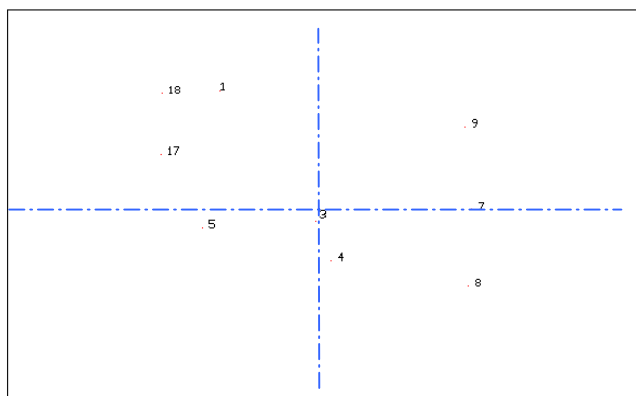
Paralelamente al análisis de la influencia del número de puntos de apoyo empleados en la orientación de las imágenes, surge la cuestión de la potencial influencia de su distribución espacial. El objetivo de la segunda prueba experimental es comprobar la importancia de ésta en los ajustes de las orientaciones de las imágenes y en la exactitud final del MDE.

En la realización de esta prueba se fijó el número de puntos de apoyo en 9 por dos razones: la primera es porque este número es suficiente para construir una distribución homogénea y la segunda es por los buenos resultados obtenidos en la prueba 1 (en Socet Set: $s = 8.3$ m, $ECM = 9.3$ m; en OrtoBase Pro: $s = 5.5$ m, $ECM = 7.6$ m).

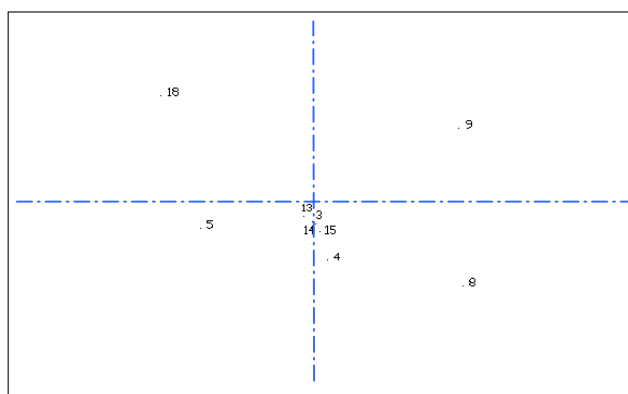
Para la prueba se plantearon 4 distribuciones espaciales diferentes a partir de los 20 puntos de apoyo disponibles (ver la Figura 36):

- Distribución A: es una distribución aproximadamente homogénea donde se han repartido los PA en los cuatro cuadrantes de la zona. Este tipo de reparto se suele considerar una distribución óptima.
- Distribución B: existen puntos en los cuatro cuadrantes pero en mayor cantidad en los cuadrantes inferiores.
- Distribución C: sólo existen PA en los dos cuadrantes inferiores.
- Distribución D: los puntos seleccionados se concentran prácticamente en un único cuadrante.

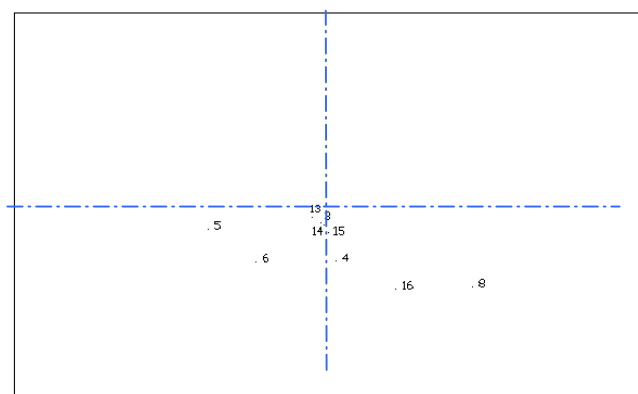
De acuerdo con lo habitualmente aceptado, las distribuciones están ordenadas de mejor (caso A) a peor (caso D) por lo que, previsiblemente, los errores en los ajustes deberían adoptar la misma pauta.



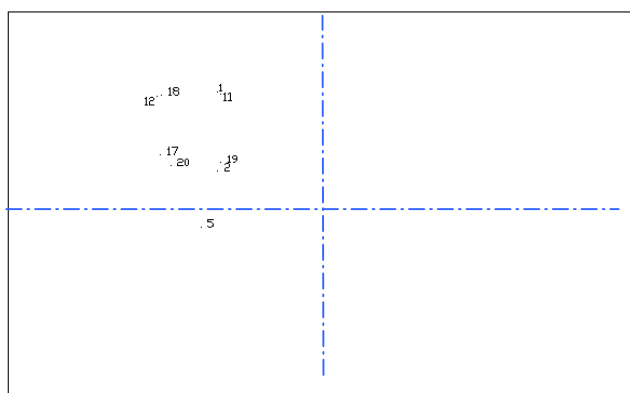
Distribución A



Distribución B



Distribución C



Distribución D

Figura 36. Distribuciones de los puntos de apoyo utilizados en la Prueba 2.

4.4.4.1 Prueba experimental 2 en Socet Set

Una vez fijado el número de puntos de apoyo y definidas las diferentes distribuciones se procedió a la elaboración de los MDE. Los resultados son de estructuras raster matriciales con una distancia entre puntos de 20 m.

Los datos sobre el ajuste de las orientaciones se muestran en la Tabla 28; son iguales para los cuatro MDE ya que se han empleado el mismo número de puntos de apoyo y por tanto el sistema de ecuaciones es de la misma dimensión en todos los casos. El número de ecuaciones redundantes es de 37 ya que para cada PA se forman 4 ecuaciones, por cada PP se forma una ecuación, con un total de 51 ecuaciones; como el número de incógnitas a resolver es 14, la redundancia del sistema es del 182%. Los resultados de los errores de ajuste por orientación se presentan en la Tabla 29.

Análogamente a la prueba anterior, a cada uno de los MDE generados se le ha realizado un test de error con 315 PC, y se compararon sus resultados con la componente Z de dichos PC en cada uno de los MDE generados en la estación fotogramétrica. Los resultados de los tests estadísticos se muestran en la Tabla 30.

Tabla 28. Número de ecuaciones, incógnitas y redundancia del ajuste (Prueba 2 con Socet Set).

Distribución	Nº Ecuac. PA	Nº Ecuac. PP	Total de Ec.	Incógnitas	Ec. Redun.	% Redun.
A, B, C, D	36	15	51	14	37	182

Tabla 29. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 2 con Socet-Set); todos los datos en metros.

Distribución	ECM	s	EM	E _{max}	E _{min}
A	6,45	6,39	-0,94	22,75	0,03
B	8,26	7,94	-2,33	33,37	0,05
C	9,83	8,46	-5,03	38,95	0,19
D	19,49	19,47	-1,37	128,42	0,10

Tabla 30. Comparación del error de las orientaciones con el error del MDE (Prueba 2 con Socet-Set); todos los datos en metros.

Distribución	ECM OX	ECM OY	ECM OZ	ECM OT	ECM MDE
A	9,07	5,66	2,79	11,05	6,45
B	9,00	8,64	3,39	12,93	8,26
C	10,02	5,07	1,21	11,29	9,83
D	11,21	12,08	3,47	16,84	19,49

La fiabilidad para la desviación estándar en cada uno de los MDE generados con las diferentes distribuciones de PA se muestra en la Tabla 29 como intervalo de confianza al 95%. La fiabilidad se calcula por la misma fórmula que en las pruebas anteriores (Li, 1991) y el número de puntos de control en los cálculos es siempre el mismo: 315.

Distribución	s (m)	Intervalo (95%)
A	6,39	$\pm 0,50$
B	7,94	$\pm 0,62$
C	8,46	$\pm 0,66$
D	19,47	$\pm 1,53$

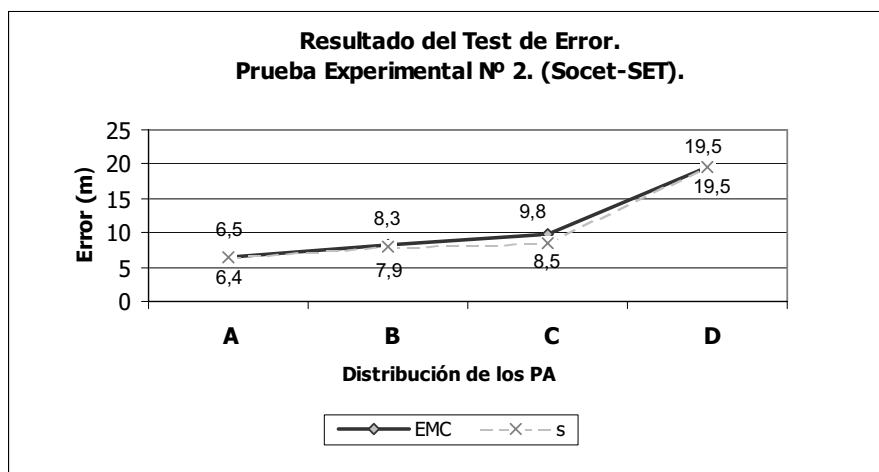


Figura 37. Valores de ECM y s de los MDE generados con las distintas distribuciones de los puntos de apoyo (Prueba 2 con Socet Set).

Puede observarse que el error medio sigue siendo siempre negativo confirmándonos que los MDE generados con imágenes SPOT-HRV por Socet Set parecen tener un error sistemático, aunque estadísticamente los valores de EM no difieren significativamente de cero.

También se observa que el ECM está relacionado con la distribución los PA como se preveía inicialmente. En la Figura 37 aparece claramente esta relación, mostrándose el menor error de la distribución A (ECM = 6.5 m) hasta el máximo para la D (ECM = 19,5 m). Confirmamos, por tanto, la conveniencia de una distribución homogénea de los PA sobre la zona de trabajo para reducir el error en el producto final.

Comparando el ECM de cada MDE con los ECM de las orientaciones, se aprecia que estos últimos son mayores que los primeros. Por tanto, se puede deducir, tanto de la prueba experimental 1 como de la 2, que la componente cuadrática de los errores de orientación de las imágenes no es un error acumulativo en el error del MDE final.

En el análisis de los ECM en las orientaciones (Tabla 30) se puede observar como es mayor el error en la componente X que en el resto salvo en la distribución D, donde los ECM de las componentes X e Y son de magnitud similar. Al igual que en la prueba 1, el ECM de la componente Z es el menor en todos los casos.

4.4.4.2 Prueba experimental 2 en OrthoBase Pro

El sistema matemático a resolver en las orientaciones es el mismo que el apartado anterior ya que se han empleado los mismo PA y PP; por tanto, las redundancias de los sistemas son idénticas. Los resultados de los tests de error se muestran en la Tabla 32, realizado con los 315 PC, y los errores de las orientaciones en cada distribución de los PA en la Tabla 33.

Tabla 32. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 2 con OrthoBase Pro); todos los datos en metros.

Distribución	ECM	s	EM	E _{max}	E _{min}
A	9,26	7,13	-5,43	25,64	-59,87
B	7,85	5,81	-2,72	24,60	-57,55
C	10,55	8,15	3,87	51,23	-38,44
D	100,38	73,57	49,31	-90,88	307,90

Tabla 33. Comparación del error de las orientaciones con el error del MDE (Prueba 2 con Socet-Set); todos los datos en metros.

Distribución	ECM OX	ECM OY	ECM OZ	ECM OT	ECM MDE
A	10,5	36,0	6,0	45,0	9,26
B	6,0	31,5	4,5	42,0	7,85
C	4,5	22,5	3,0	34,5	10,55
D	9,0	46,5	10,5	105,0	100,38

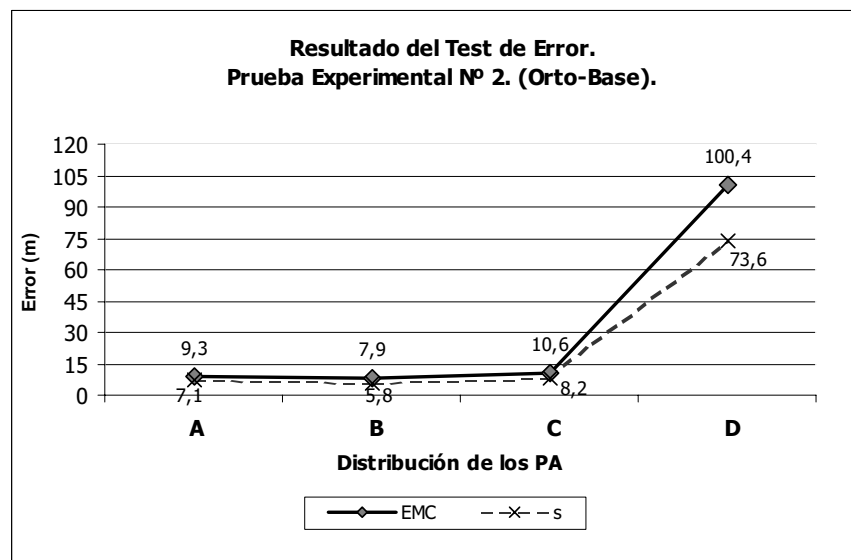


Figura 38. Valores de ECM y s de los MDE generados con las distintas distribuciones de los puntos de apoyo (Prueba 2 con OrthoBase Pro).

Los resultados de los tests estadísticos que se presentan en las tablas muestran que el error medio no es siempre negativo, como ocurría en las pruebas realizadas en Socet Set (aunque como antes, los valores de EM no difieren significativamente de cero). Se puede observar como el error final del MDE es muy elevado en el caso de la peor distribución, la D.

Se vuelve a confirmar con estas pruebas que la distribución de los PA empleados en las orientaciones de las imágenes tiene una relación con el error final del MDE. En la Figura 38 se muestra como los MDE generados con las tres primeras distribuciones son similares. En los dos casos donde las distribuciones son más homogéneas (A y B), los ECM de los MDE son muy aceptables, 9,3 m y 7,9 m, respectivamente. En la distribución intermedia el ECM aumenta a 10,5 m. Pero realmente se aprecia la sensibilidad de la distribución de los PA en la distribución D, donde todos los PA se concentran

en un mismo cuadrante de la zona de estudio y donde el error final del MDE generado es muy superior a los demás casos. Por tanto, se puede decir que OrthoBase Pro es muy sensible a una mala distribución de los PA empleados en las orientaciones afectando de forma muy directa al error final del MDE.

En la Tabla 34 se muestran los valores de fiabilidad traducidos a intervalo de confianza de la desviación estándar.

Distribución	s (m)	Intervalo (95%)
A	7,13	$\pm 0,56$
B	5,81	$\pm 0,46$
C	8,15	$\pm 0,64$
D	73,57	$\pm 5,77$

4.4.5 Prueba 3: estructura del MDE

La distribución de los datos de elevación es otro de los factores que puede tener implicaciones en la exactitud del MDE. Las aplicaciones utilizadas generan siempre MDE basados en puntos pero con dos variantes: equidistantes, organizados en una malla regular y con una distribución irregular, susceptibles de ser utilizados para generar un TIN.

Esta prueba tuvo su origen en el siguiente planteamiento. Si se fuerza a generar una malla regular de puntos, caben dos opciones: obligar a generar un dato de Z en cada punto de la malla (independientemente del mayor o menor éxito de la operación de correspondencia) o interpolar a partir de una red irregular de puntos (un TIN) previamente construido. Ambas opciones tienen riesgos porque, en el primer caso, puede haber frecuentes resultados claramente erróneos y en el segundo, porque obliga a una operación posterior de interpolación a partir del TIN. En este último caso, además, la generación del *grid* es una falsa opción ya que no se produce directamente a partir de las operaciones fotogramétricas.

El objetivo de esta prueba experimental es, por tanto, comparar los dos tipos de estructuras y comprobar si la generación de un MDE por técnicas automáticas con estructura TIN es preferible a una estructura *grid*.

4.4.5.1 Prueba experimental en Socet Set.

Para el desarrollo de esta prueba se realizaron dos MDE, uno por cada tipo de estructura, con los mismos errores de ajuste en la orientación de las imágenes, donde se emplearon 15 PP y 13 PA y con los mismos parámetros restantes: 20 m de tamaño de malla y estrategia de correspondencia adaptativa. El modelo matemático formado en la orientación de las imágenes se resuelve con una redundancia de 239% (Tabla 35).

Tras la generación de ambos MDE se realizaron los tests de error (igual que en las pruebas anteriores con los 315 PC) en el MDE vectorial (TIN) y raster (GRID). Los estadísticos básicos se muestran en la Tabla 36 para cada modelo generado.

Tabla 35. Número de Ecuaciones, incógnitas y redundancia del ajuste (Prueba 3 con Socet Set).

Estructura	Nº Ec. PA	Nº Ec. PP	Total de Ec.	Incógnitas	Ec. Redun.	% Rendun.
TIN / GRID	52	15	67	14	53	239

Tabla 36. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 3 con Socet Set); todas las unidades en metros.

MDE	EM	ECM	s	E _{max}	E _{min}
MDE GRID	-4,70	8,59	7,27	42,14	-49,90
MDE TIN	-4,49	8,62	7,37	41,25	-49,30

El ECM, considerado como el parámetro más indicativo para asociarlo al error del modelo, es de 8,59 m en el modelo de malla regular de 20x20 m y 8,62 m en el MDE de estructura TIN. No existe diferencia estadísticamente significativa entre ambos MDE; el error medio es, como en casos anteriores, negativo pero no difiere significativamente de cero. La desviación estándar y la fiabilidad del error de cada modelo se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37. Intervalos de confianza para s (Prueba 2 con Socet Set).

MDE	s (m)	Intervalo (95%)
MDE GRID	7,27	±0,57
MDE TIN	7,37	±0,58

4.4.5.2 Prueba experimental 3 con Orthobase Pro.

Esta prueba se desarrolló de la siguiente forma: se generaron dos MDE, uno con cada tipo de estructura, con 9 PA y 15 PP; los errores de ajuste en la orientación de las imágenes son los mismos: 0,30 píxeles, es decir, 4,5 m de error total de orientación. La redundancia del ajuste del sistema de ecuaciones es del 182%. Los parámetros en la generación de ambos MDE usan una estrategia de correlación con un tamaño de ventana de búsqueda de 27x3 mientras que la ventana de correlación fue de 9x9; el límite del coeficiente de correlación es de 0,65 y no se realizó ningún tipo de suavizado posterior.

Tras la generación de ambos MDE se realizaron los tests de error (igual que en las pruebas anteriores con los 315 PC) en el MDE vectorial (TIN) y raster (GRID). Los resultados estadísticos se muestran en la Tabla 38 y la fiabilidad del error en Tabla 39.

Tabla 38. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 3 con Orthobase Pro); todos los datos en metros.

MDE	EM	ECM	s	E _{max}	E _{min}
MDE GRID	0,82	7,56	5,52	29,55	-50,05
MDE TIN	0,79	7,55	5,52	29,48	-50,05

Tabla 39. Intervalos de confianza para s (Prueba 3 con Orthobase Pro); unidades en m.

MDE	s	Intervalo (95%)
MDE GRID	5,52	±0,43
MDE TIN	5,52	±0,43

Los resultados de esta prueba realizada en Orthobase Pro muestran que no existen diferencias significativas en la selección del tipo de estructura de los datos TIN o GRID. Los errores de cada MDE no se diferencian más que un centímetro, en el caso del ECM, y son el mismo en la desviación típica. Es necesario realizar más pruebas para

verificar que el programa realiza realmente MDE con diferentes tipos de estructuras de datos, ya que los resultados obtenidos son sospechosos en el sentido de que parece realizarse siempre un TIN y en caso de seleccionar una estructura raster el programa interpola a partir de la anterior estructura. En la siguiente prueba experimental se verificarán estos resultados.

4.4.6 Prueba 4: tamaño de malla

La densidad de los datos es una de las variables que potencialmente tiene un efecto más significativo en la exactitud de un MDE y en el aprovechamiento de los datos originales. Si es posible realizar un MDE con una densidad de puntos mayor, se están aprovechando las imágenes para extraer una mayor cantidad de información. Esto ha sido estudiado y reconocido por bastantes investigadores ([Ackermann, \(1980\)](#), [Li \(1992\)](#)). En el caso de un MDE raster el tamaño de celda es la medida más apropiada para especificar este parámetro. Es evidente que a menor espaciado de la malla se obtiene una mejor representación del terreno, pero a costa de necesitar un mayor volumen de información y, por tanto, de almacenamiento que podrá, incluso, dificultar la manipulación del MDE.

Como se ha visto en los antecedentes, la mayoría de los estudios encontrados que analizan esta variable se han realizado con imágenes aéreas y no se usan datos de imágenes de satélite. La clásica "regla de Ackermann" de extraer un punto cada 10 píxeles también se aplica en el caso de imágenes SPOT generando MDE de 100 m (Krzystek y Ackermann, 1995).

Una de las grandes dudas planteadas en la generación de un MDE es si los programas fotogramétricos con automatismos extraen la elevación de los puntos con la misma exactitud independientemente de la distancia entre los puntos a correlar. En fotogrametría aérea esta distancia puede ser mayor, ya que el tamaño del píxel en el terreno (también denominado GSD *Ground Sample Distance*) es más pequeño que en imágenes de satélite y por tanto para una densidad de puntos adecuada no es necesario correlar píxel a píxel.

Otro objetivo de esta prueba experimental es comprobar si existe algún problema en la calidad de la correlación entre puntos si se disminuye la distancia entre ellos, por limitaciones en la programación de los algoritmos de correlación.

Para analizar esta variable se han construido 7 MDE matriciales con distintos tamaños de mallas, desde 10 hasta 100 m, es decir de 1 a 10 píxeles.

4.4.6.1 Prueba experimental 4 en Socet Set

Al igual que en las anteriores pruebas experimentales se mantuvieron constantes los parámetros no estudiados: 13 puntos de apoyo, 15 puntos de paso y la estrategia adaptativa de correlación.

Al fijarse los valores de número de puntos de apoyo y de paso, el error de ajuste de la orientación de las imágenes es el mismo en todos los MDE²³. El ajuste se resuelve con un total de 67 ecuaciones que, como tenemos 14 incógnitas, supone un número de ecuaciones redundantes de 53. El porcentaje de redundancia del sistema para el ajuste

²³ Esta prueba experimental fue analizada en un Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería en Geodesia y Cartografía, realizado por Alicia Antolín Salazar y titulado "Análisis de variables influyentes en la exactitud de MDE con imágenes SPOT-HRV". En dicho trabajo se analiza el tamaño de malla pero realizando las pruebas experimentales con un error de ajuste diferente ya que se emplean otros valores de puntos de apoyo y de paso. Los resultados fueron similares a los que se presentan aquí.

te de la orientación de las imágenes es del 239%, muy superior al 50% recomendado (Tabla 40).

Tabla 40. Número de ecuaciones, incógnitas y redundancia del ajuste (Prueba 4 con Socet Set).

Nº Ec. PA	Nº Ec. PP	Total de Ec.	Incógnitas	Ec. Redun.	% Redun.
52	15	67	14	53	239

Los modelos resultantes son un conjunto de puntos con coordenadas X, Y, Z correspondientes a una retícula sobre el terreno con las dimensiones predeterminadas y una densidad de puntos que dependerá del tamaño de malla definido. Los MDE han sido generados con los tamaños de malla de 100, 80, 60, 40, 20, 15 y 10 metros. Posteriormente, se han comparado dichos modelos realizando los tests estadísticos con el conjunto de los 315 puntos de control. Los resultados del error de cada modelo se muestran en la Tabla 39. La fiabilidad de cada error se representa en la Tabla 40.

Tabla 41. Tamaño de malla y número de puntos de los MDE generados (Prueba 4 con Socet Set).

Tamaño de malla (m)	columnas x filas	Total de puntos
10	3787 x 2329	8.819.923
15	2521 x 1554	3.917.634
20	1891 x 1166	2.204.906
40	946 x 583	551.518
60	631 x 389	245.459
80	473 x 292	138.116
100	379 x 234	88.686

Tabla 42. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 4 con Socet Set); todos los datos en m.

Tamaño de malla	EM	ECM	s
100	-5,83	10,12	8,28
80	-5,22	9,23	7,63
60	-4,40	8,54	7,32
40	-4,69	8,60	7,22
20	-4,59	8,59	7,27
15	-4,50	9,34	8,20
10	-5,83	10,12	8,28

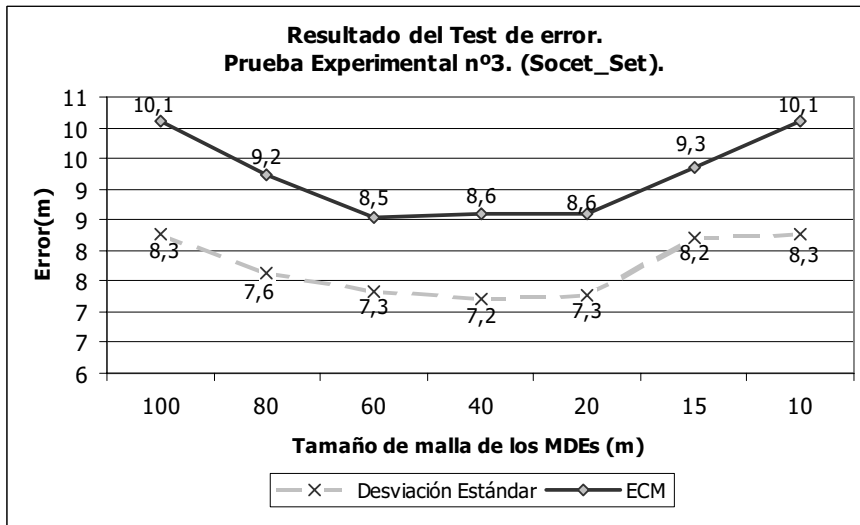


Figura 39. Valores del ECM y de s de los MDE (Prueba 4 con Socet Set).

Tabla 43. Intervalos de confianza para s (Prueba 4 con Socet Set); unidades en metros.

Tamaño de malla (m)	s	Intervalo (95%)
100	8,28	$\pm 0,65$
80	7,63	$\pm 0,60$
60	7,32	$\pm 0,57$
40	7,22	$\pm 0,57$
20	7,27	$\pm 0,57$
15	8,20	$\pm 0,64$
10	8,35	$\pm 0,65$

En los resultados de los tests de error se puede observar como a medida que el tamaño de la malla es menor, el error del modelo también disminuye hasta llegar a los 20 metros. En los modelos de 15 y 10 metros el error aumenta. Podemos señalar que el intervalo óptimo en nuestra prueba es el de 20 m ya que se consigue la máxima densidad de puntos (información) con el error mínimo. Los mayores valores de error con las mallas de 80 y 100 m pueden achacarse a la mayor generalización de la estructura, que representa el relieve con menos detalle. En cambio, el incremento de error para estructuras de 10 y 15 m podría deberse a problemas algorítmicos de los métodos de correlación ya que, en principio, no parece haber motivos para no realizar cálculos correctos píxel a píxel. Aún así, los resultados muestran claramente que aplicar la "regla de Ackermann" a este caso no sólo supone una severa pérdida de información sino un incremento del error.

4.4.6.2 Prueba experimental 4 en OrthoBase Pro

Para la generación de los MDE en Orthobase Pro se mantuvieron constantes los otros parámetros: 13 puntos de apoyo, 15 puntos de paso, una estrategia de correlación con un tamaño de ventana de búsqueda de 27x3 y una ventana de correlación de 9x9 y un límite del coeficiente de correlación de 0,65. Las ecuaciones, incógnitas y redundancia son las mismas que en caso anterior. Los MDE fueron también los mismos

que en Socet Set: 100, 80, 60, 40, 20, 15 y 10 metros.

En la Tabla 42 se muestran los resultados de los tests estadísticos realizados con los 315 puntos de control. Puede observarse que los resultados son idénticos independientemente del tamaño de malla seleccionado para su generación. La fiabilidad del error también es la misma lógicamente y se corresponde con un intervalo de confianza de ± 0.57 m (95%).

Tabla 44. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 4 con Orthobase Pro); todos los datos en metros.

Tamaño de malla	EM	ECM	s
100	-4,70	8,59	7,27
80	-4,70	8,59	7,27
60	-4,70	8,59	7,27
40	-4,70	8,59	7,27
20	-4,70	8,59	7,27
15	-4,70	8,59	7,27
10	-4,70	8,59	7,27

Estos resultados se justifican por el procedimiento que parece utilizar Orthobase Pro para generar las estructuras raster: en todos los casos, se construye un modelo TIN (único) y los datos de las mallas se extraen por interpolación. Por ese motivo, estos datos son siempre los mismos y los errores son constantes. Podríamos incluso reducir el tamaño de malla a 1 metro pero el único resultado sería representar más fielmente, como malla, los triángulos del TIN original.

4.4.7 Prueba 5: algoritmo de correspondencia de imágenes

Los programas presentan diferentes opciones para realizar la operación de correspondencia entre imágenes. En el apartado 2.4.4 de los antecedentes se han enumerado los tipos de algoritmos existentes en las correspondencias entre puntos y en la extracción automática de elevaciones. Aunque la mayoría de los programas comerciales trabajan como una "caja negra", podemos al menos comparar los algoritmos de correlación para la extracción de los datos de elevación tanto en Socet Set como en Orthobase Pro.

4.4.7.1 Prueba experimental 5 en Socet Set.

En el módulo ATE (*Auto Terrain Extraction*) de Socet Set existen dos métodos para el cálculo de la elevación:

- Adaptativo: la información de los manuales se limita a decir que este método emplea una estrategia de extracción adaptativa al terreno.
- No adaptativo: este método permite diseñar una estrategia específica manejando algunos parámetros de la correlación. En la Tabla 45 se muestra un total de 12 estrategias ya configuradas para la generación de MDE de forma automática no adaptativa.

Tabla 45. Estrategias de correlación en la extracción automática de la elevación en Socet Set (Bae Systems Mission Solutions Inc., 2001)

Pendiente máxima del terreno	Velocidad del rápida	Precisión alta	Alta precisión y eliminación de árboles y edificios	Alta precisión y velocidad. Gran densidad de puntos.
20°	Flat	Flat_1	Flat_plus	Flat_dense
30°	Rolling	Rolling_1	Rolling_plus	Rolling_dense
50°	Steep	Steep_1	Steep_plus	Steep_plus

Además de estas estrategias, existe una más llamada "SPOT.strat" que según los manuales está especialmente diseñada para imágenes SPOT y es válida en cualquier tipo de terreno.

Existen estudios comparativos sobre las distintas estrategias en la generación automática de MDE. Zhang & Miller (1997) presentan los resultados de una comparación entre el método adaptativo y no adaptativo de Socet Set en distintos tipos de terreno y con imágenes aéreas a distintas alturas de vuelo. Los resultados muestran en todos los casos que el método adaptativo es mejor que el no adaptativo. Bacher, (1998) también realiza un análisis comparativo de ambos métodos con los mismos resultados. Sin embargo no se han encontrado trabajos que recomienden o verifique la estrategia especialmente diseñada para imágenes SPOT con respecto a la estrategia adaptativa de correspondencia.

La eficacia del método adaptativo con respecto al no adaptativo en la extracción automática de las elevaciones está verificada. Por tanto, la presente prueba experimental tiene como objetivo comparar los resultados obtenidos con la estrategia adaptativa y la estrategia específica para SPOT que existe en Socet Set. Para ello se realizaron dos MDE, uno con cada tipo de estrategia. Los demás parámetros fijos en la generación de los MDE fueron los 15 puntos de paso, 9 puntos de apoyo, estructura raster matricial y 20 m de tamaño de malla.

Los resultados de los tests de error con los 315 puntos de control se muestran en la Tabla 46 y la fiabilidad del error en la Tabla 47.

Tabla 46. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 5 con Socet Set); todos los datos en metros

Estrategia	EM	ECM	<i>s</i>	Emáx
Adaptativa	-0,90	7,45	7,40	39,7
Spot	-1,01	9,19	9,15	4472,9

Tabla 47. Desviación estándar y fiabilidad expresada como intervalo de confianza al 95% (Prueba 5 con Socet-Set); datos en metros.

Estrategia	<i>s</i>	Intervalo (95%)
Adaptativa	7,40	±0,58
Spot	9,15	±0,72

Los resultados obtenidos muestran que el método adaptativo es preferible para la extracción automática de las elevaciones a partir de imágenes SPOT que la propia estrategia Spot, diseñada expresamente para este tipo de imágenes. Aunque las diferencias de ECM no son muy grandes, el MDE generado con el método adaptativo no contiene los grandes errores que son más frecuentes en el otro método y que quedan refleja-

dos en el valor de error máximo de 39,7 m frente a 4473 m.

Los motivos de este comportamiento son difíciles de saber debido al carácter de "caja negra" de los algoritmos, que no se documentan en los manuales. Por este motivo, la única forma de valorar su idoneidad es la realización de pruebas empíricas como la mostrada aquí.

4.4.7.2 Prueba experimental 5 en Orthobase Pro

En Orthobase Pro es posible configurar dentro de las estrategias de correlación los siguientes parámetros:

- Tamaño de la ventana de búsqueda.
- Tamaño de la ventana de correlación.
- Límite del coeficiente de correlación.
- Tipo de topografía.
- Filtrado del MDE.

En siguientes pruebas se analizará la influencia del tamaño de las ventanas de búsqueda y de correlación, mientras que el límite o valor umbral del coeficiente de correlación se verá en la sexta prueba experimental. Los demás parámetros se han mantenido en todas las pruebas con los mismos valores: topografía montañosa moderada y sin filtrado.

Se han realizado 6 MDE con los siguientes parámetros: 15 puntos de paso, 9 puntos de apoyo, estructura: TIN y una ventana de búsqueda de 21 x 3. Los valores de la variable a analizar (ventana de correlación) han sido: 3x3, 5x5, 7x7, 9x9, 11x11 y 15x15. Tras realizar los MDE se les pasó el test de error con los correspondientes puntos de control y los resultados se muestran en la Figura 40.

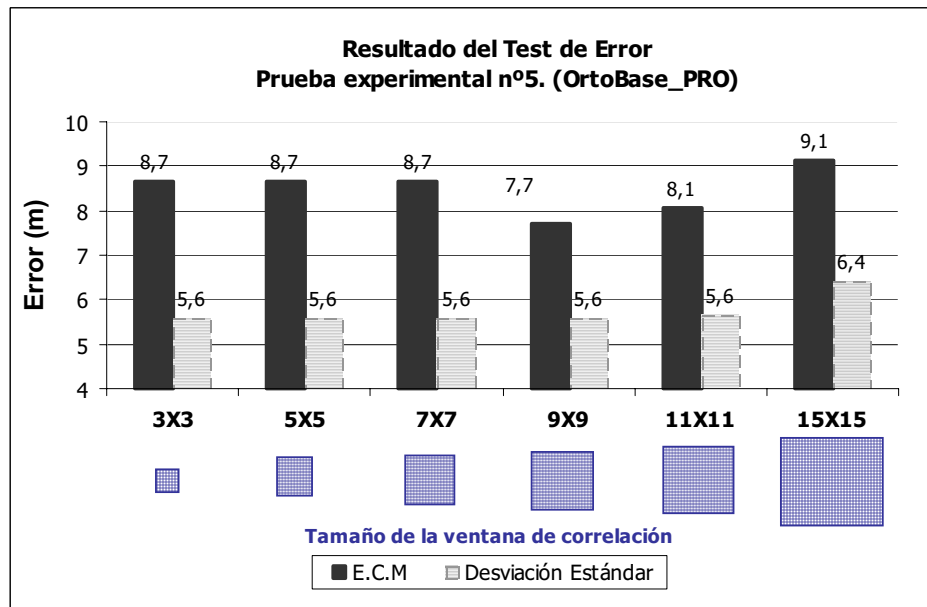


Figura 40. Valores ECM y s de los MDE según el tamaño de la ventana de correlación (Prueba 5 con OrthoBase Pro).

Aunque los valores son similares, las pruebas muestran que, entre las alternativas ele-

gidas, el tamaño óptimo de la ventana de correlación es 9x9. También hemos reparado en que el hecho de que los MDE generados con ventanas de 3x3, 5x5 y 7x7 tengan exactamente el mismo error se debe a que OrthoBase trabaja con una ventana mínima de 7x7 y, aunque parece que acepta tamaños menores en las opciones, luego incrementa la ventana a la hora de hacer los cálculos. Finalmente, se aprecia en las ventanas de correlación mayores, (11x11 y 15x15) hacen aumentar ligeramente el error del MDE.

El siguiente paso fue realizar las mismas pruebas pero fijando el valor de la ventana de correlación en 9x9 (el óptimo) y variando el tamaño de la ventana de búsqueda con las combinaciones: 15x3, 19x1, 21x3, 23x5, 25x5 y 27x7. Los resultados del test de error de los 6 MDE generados se muestran en la Figura 41.

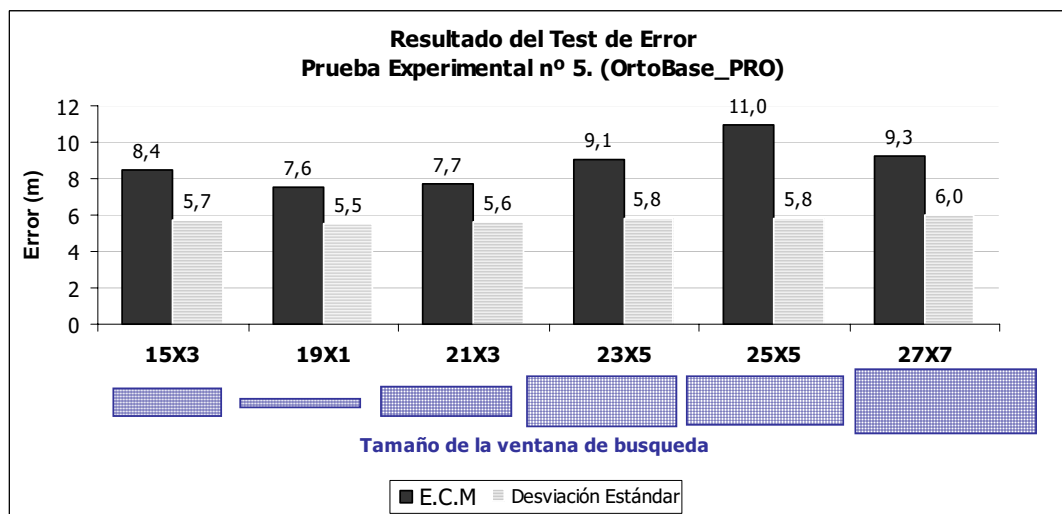


Figura 41. Valores de ECM y s según el tamaño de la ventana de búsqueda en la estrategia de correlación (Prueba 5 con Orthobase Pro).

Vemos que los resultados no son concluyentes en el sentido de que no parece existir una tendencia clara en cuanto a los valores óptimos. Los mejores valores de error corresponden a las ventanas de 19x1 y de 21x3 mientras que la usada por defecto por el programa es la de 15x3.

Los valores de fiabilidad para la desviación estándar se presentan en la Tabla 48 como intervalo de confianza al 95%.

Tabla 48. Desviación estándar e intervalos de confianza al 85% (Prueba 5 con OrthoBase Pro); datos en metros

Ventana de correlación	s	Intervalo (95%)
3 x 3	5,59	± 0,44
5 x 5	5,59	± 0,44
7 x 7	5,59	± 0,44
9 x 9	5,58	± 0,44
11 x 11	5,64	± 0,44
15 x 15	6,40	± 0,50
Ventana de búsqueda	s	Intervalo (95%)
15 x 3	5,67	± 0,44
19 x 1	5,53	± 0,43
21 x 3	5,59	± 0,44
23 x 5	5,82	± 0,46
25 x 5	5,81	± 0,46
27 x 7	5,97	± 0,47

4.4.8 Prueba 6: coeficiente de correlación

Las técnicas automáticas de correspondencia de imágenes empleadas en las estaciones fotogramétricas digitales permiten generar MDE con una densidad de puntos casi arbitraria y que puede ser superior a la necesaria.

La fiabilidad de las elevaciones es variable ya que depende de que se hayan reconocido adecuadamente los puntos homólogos lo que, en zonas conflictivas, puede ser poco fiable. Podemos pensar que algunas de estas zonas pueden caracterizarse por valores de correlación bajos debidos a causas diversas. La presencia de un valor bajo de correlación no es una prueba segura de mala calidad pero sí una señal de alarma; la inversa también es cierta: un valor de correlación alto no supone la corrección del resultado que puede deberse a artefactos o patrones repetitivos, etc. Sin embargo, con sus excepciones, podemos suponer que haya una relación estadística estrecha entre los dos valores: correlación y exactitud de la elevación.

El objetivo de esta prueba experimental es comprobar la relación entre el valor del coeficiente de correlación de los puntos la exactitud del MDE. La hipótesis del trabajo es que el coeficiente de correlación asociado a cada dato de elevación puede ser utilizado para conservar o eliminar el dato, realizando una reducción de la densidad de puntos sin degradación significativa de su calidad.

4.4.8.1 Prueba experimental 6 con Socet Set

El procedimiento es el siguiente: partiendo de un MDE raster con 20 m de malla (MDE00) se van eliminando progresivamente los puntos cuyo coeficiente de correlación sea inferior a una serie de valores umbral. El primer paso consiste en eliminar todos los puntos con $r < 0,50$ con lo que se construye un nuevo MDE pero con estructura TIN y con menos puntos. Este modelo se sigue depurando sucesivamente aumentando el valor umbral del coeficiente de correlación y reduciendo progresivamente la cantidad de puntos que forman el modelo. Cuanto más elevado es el valor umbral del coeficiente de correlación más puntos son eliminados y, por tanto, el modelo tendrá menos puntos pero con valores de coeficiente de correlación mejores.

En la Tabla 49 se muestran los 11 MDE que se han formado y la cantidad de puntos que forman cada uno de ellos. El primer modelo (MDE00) se ha construido seleccionando los parámetros más adecuados en función de los resultados de las pruebas ex-

perimentales anteriores: 15 puntos de paso, 13 puntos de apoyo (con distribución homogénea); estructura raster con 20 m de tamaño de malla y estrategia de correlación adaptativa.

La posible pérdida de calidad del DEM se comprueba mediante la realización de los respectivos tests de error con los 315 puntos de control. Los resultados de los tests de error se muestran en la Tabla 50. En la Tabla 51 se muestran los límites de confianza para la desviación estándar.

Tabla 49. Listado de los MDE incluidos en la prueba, los valores de correlación (r) y los puntos que los forman (Prueba 6 con Socet Set).

Nombre del MDE	Umbral de r	Núm. de puntos	% puntos
MDE00	ninguno	2 204 906 (todos)	100
MDE50	0,50	1 946 805	88
MDE75	0,75	1 634 059	74
MDE80	0,80	1 457 043	66
MDE85	0,85	1 194 227	54
MDE90	0,90	810 394	36
MDE91	0,91	716 759	32
MDE92	0,92	617 733	28
MDE93	0,93	514 095	23
MDE94	0,94	407 005	18
MDE95	0,95	199 745	9

Tabla 50. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 6 con Socet Set); todos los datos en metros.

MDE	EM	ECM	s
MDE95	-3,29	11,92	11,47
MDE94	-4,04	8,29	7,25
MDE93	-4,16	8,18	7,05
MDE92	-4,22	8,07	6,89
MDE91	-4,37	8,16	6,90
MDE90	-4,29	8,07	6,85
MDE85	-4,18	8,11	6,96
MDE80	-4,10	8,37	7,31
MDE75	-4,03	8,31	7,28
MDE50	-4,08	8,31	7,25
MDE00	-4,59	8,59	7,27

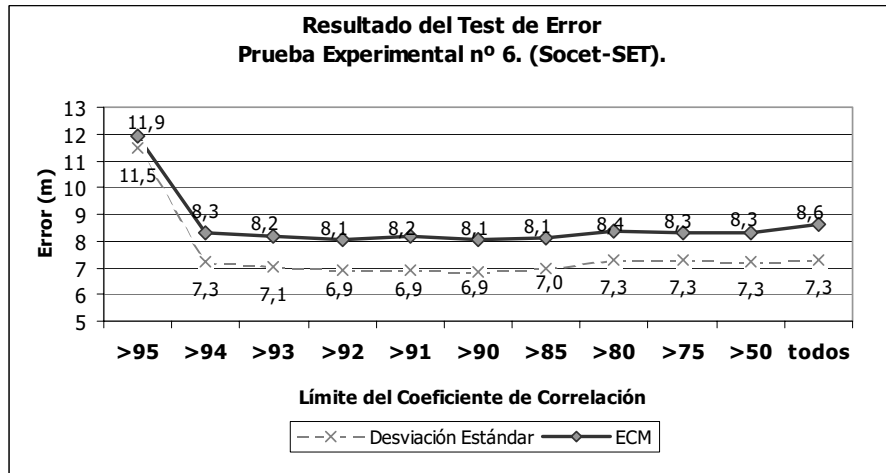


Figura 42. Valores de ECM y s de los MDE (Prueba 6 con Socet Set).

Tabla 51. Desviación estándar y fiabilidad expresada como intervalo de confianza del 95% (Prueba 6 con Socet Set).

MDE	s	Intervalo (95%)
MDE00	11,47	$\pm 0,90$
MDE50	7,25	$\pm 0,57$
MDE75	7,28	$\pm 0,57$
MDE80	7,31	$\pm 0,57$
MDE85	6,96	$\pm 0,55$
MDE90	6,85	$\pm 0,54$
MDE91	6,90	$\pm 0,54$
MDE92	6,89	$\pm 0,54$
MDE93	7,05	$\pm 0,55$
MDE94	7,25	$\pm 0,57$
MDE95	11,47	$\pm 0,90$

Como se puede observar, el MDE generado con todos los puntos tiene una redundancia de datos muy superior a la necesaria para una óptima representación del terreno. El error del MDE no sufre variaciones significativas en las sucesivas depuraciones, pudiendo llegar incluso a conservar sólo el 18% del total de los puntos iniciales (MDE94), donde todos los puntos tienen un índice de coeficiente de correlación igual o superior a 0,94.

Este resultado muestra que es posible reducir la cantidad de puntos de los MDE masivos a un porcentaje significativamente menor sin una aparente pérdida de exactitud. Esta reducción tiene un límite, probablemente marcado por una excesiva generalización de la estructura que, en nuestro caso, aparece en el MDE95.

4.4.8.2 Prueba experimental 6 en Orthobase Pro.

En la prueba experimental 5 vimos que Orthobase Pro permite configurar algunos parámetros en la estrategia de correlación. El valor óptimo de alguno de estos parámetros se ha analizado en la prueba correspondiente, dejando el estudio del límite del coeficiente de correlación como objetivo de esta prueba experimental.

Orthobase Pro no da un valor explícito del coeficiente correlación para cada punto sino

que los clasifica en 5 clases que responden a los siguientes intervalos de coeficiente de correlación:

- Excelentes: puntos con r entre 0,85 y 1,00.
- Buenos: puntos con r entre 0,75 y 0,85.
- Mediocres: puntos con r entre 0,50 y 0,75.
- Sospechosos: puntos con r inferior a 0,50.

Sin embargo, sí es posible fijar un valor umbral en los parámetros de correspondencia de imágenes. Los MDE fueron generados con los siguientes parámetros: ajuste de las imágenes con 18 puntos de apoyo, con unos errores residuales de 0,06 píxeles en la componente X, 0,28 píxeles en la componente Y y 0,04 píxeles en la componente Z, siendo el valor total del ajuste de 0,35 píxeles. Para la extracción de las elevaciones se configuraron las demás variables: estructura TIN, ventana de correlación de 21x3 y ventana de búsqueda de 9x9.

En la Tabla 52 se muestran los MDE generados con el valor de límite de coeficiente de correlación, el número de puntos y el porcentaje respecto al modelo menos restrictivo. Los resultados de los tests de error y la fiabilidad de la desviación estándar se presentan en las Tabla 53, Figura 43 y Tabla 54 respectivamente.

Listado de los MDE incluidos en la prueba, los valores de correlación (r) y los puntos que los forman (Prueba 6 con Socet Set). El umbral más bajo es $r=0,60$ por las propias limitaciones del programa.

Tabla 52. Listado de los MDE incluidos en la prueba, los valores de correlación (r) y los puntos que los forman (Prueba 6 con OrthoBase Pro).

Nombre del MDE	Umbral de r	Núm. de puntos	% puntos
MDE60	0,60	220.804	100
MDE65	0,65	212.078	96
MDE70	0,70	199.622	90
MDE75	0,75	181.898	82
MDE80	0,80	155.498	70
MDE85	0,85	118.034	53
MDE90	0,90	67.551	31
MDE95	0,95	13.375	6

Tabla 53. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 6 con OrthoBase Pro); todos los datos en metros.

MDE	EM	ECM	s
MDE60	-1,22	9,18	5,85
MDE65	-1,57	7,80	5,57
MDE70	-1,57	7,80	5,57
MDE75	-1,86	8,80	5,84
MDE80	-2,54	9,71	6,25
MDE85	-2,31	9,86	6,34
MDE90	-1,50	12,44	8,38
MDE95	8,52	32,37	21,81

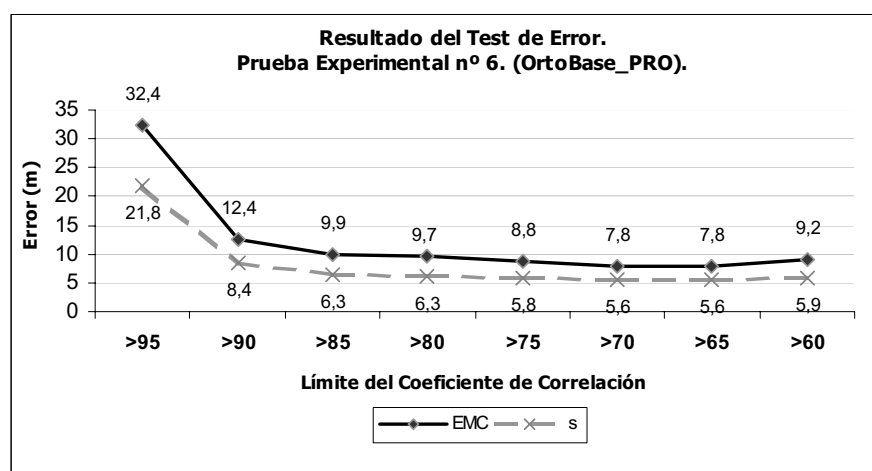


Figura 43. Errores en términos de EMC y S de los MDE. (Prueba Experimental Nº 6. Orthobase PRO).

Tabla 54. Desviación estándar e intervalo de confianza al 95% (Prueba 6 con OrthoBase Pro); datos en m.

MDE	s	Intervalo (95%)
MDE60	5,85	±0,46
MDE65	5,57	±0,44
MDE70	5,57	±0,44
MDE75	5,84	±0,46
MDE80	6,25	±0,49
MDE85	6,34	±0,50
MDE90	8,38	±0,66
MDE95	21,81	±1,71

En la Tabla 55 se presenta el porcentaje de puntos excelentes, buenos, regulares y sospechosos que el programa muestra en el informe de exactitud de cada MDE.

Tabla 55. Calidad de los puntos generados (Prueba 6 con OrthoBase Pro).

MDE	Núm. de puntos	Excel. (%) r>0,85	Buenos (%) 0,85>r>0,70	Med. (%) 0,70>r>0,50	Sosp. (%) r<0,50
MDE60	220.804	54	33	9	4
MDE65	212.078	56	35	5	4
MDE70	199.622	60	37	0	3
MDE75	181.898	65	32	0	3
MDE80	155.498	76	21	0	3
MDE85	118.034	97	0	0	3
MDE90	67.551	96	0	0	4
MDE95	13.375	93	0	0	7

Como se puede apreciar, los mejores MDE son aquellos generados con un límite de coeficiente de correlación de 0,65 a 0,70, donde el EMC de los MDE es de 7,8 m. Si el coeficiente de correlación es inferior a 0,60 el EMC del MDE sube a 9,2 lo que puede deberse a que el aumento de número de puntos correlados (de 212.078 en MDE65 a

220.804 en MDE60) no compensa con la exactitud de dichos puntos, empeorando el error del MDE. En el caso de aumentar el coeficiente de correlación, se generan menos puntos y mejor correlados, pero aparentemente con una densidad insuficiente. Como se puede apreciar la redundancia de puntos extraídos en OrthoBase Pro no es tan elevada como los MDE generados por Socet Set.

4.5 Conclusiones

El proceso de construcción de los MDE generados a partir de imágenes de satélite sigue una serie de etapas similares a las utilizadas en fotogrametría convencional que utiliza fotogramas aéreos. Una de las ventajas del uso de estaciones digitales es la posibilidad de aprovechar la información contenida en los ficheros auxiliares de las imágenes a la hora de efectuar el cálculo de orientaciones para la generación del modelo estereoscópico.

Las principales conclusiones generales obtenidas a lo largo de las pruebas experimentales realizadas son las siguientes:

- En primer lugar, se demuestra la eficacia de los métodos automáticos de correspondencia en la generación de MDE con imágenes SPOT con errores de elevación entre 6 y 8 metros, es decir, inferiores al tamaño del píxel. Estos errores pueden ser asumibles para muchas aplicaciones de análisis.
- Dependiendo del programa empleado pueden aparecer errores sistemáticos como es el caso de Socet-Set donde los MDE tienen un error medio que siempre es negativo. Este valor es aproximadamente de $-4,6$ m, valor medio de las pruebas realizadas. Las pruebas estadísticas no dan a este error un valor significativamente diferente de cero con los puntos de control empleados pero su permanencia y constancia parece indicar que no es una desviación aleatoria.
- Debe destacarse la importancia de disponer de puntos de apoyo y control exactos. En el primer caso bien distribuidos y en el segundo, además, abundantes. El uso de cartografía preexistente no es recomendable si no se conoce la exactitud de la misma. Las técnicas DGPS aportan datos con exactitud suficiente para un control efectivo del error de posición. El número de puntos de control es otro parámetro crítico ya que determina la fiabilidad del propio control del error.
- Las aplicaciones informáticas tienen peculiaridades que a veces ayudan al trabajo y a veces lo dificultan. Sería deseable una mayor transparencia de los modos de trabajo y una explicación de los algoritmos para evitar el efecto de "caja negra" que impide la comprensión exacta de las operaciones que se realizan.

Otras conclusiones más específicas, respuesta a las cuestiones planteadas inicialmente son las que se detallan a continuación.

Prueba experimental 1

El número de puntos de apoyo tiene una escasa influencia en el error final del MDE cuando se trabaja con pares estereoscópicos SPOT. No se cumple la hipótesis, lógica a priori, de que un mayor número de puntos de apoyo permite una reducción del error sino que parece tener mayor influencia la homogeneidad de la distribución que el número de puntos empleados.

En esta prueba se demuestra que cuando la redundancia en la resolución del ajuste en el proceso de orientación es bastante superior al 50%, el error de la orientación se estabiliza y su valor está muy próximo al límite residual. En el error cuadrático medio de las orientaciones tienen mucho mayor peso las componentes planimétricas que la al-

timetría.

En los MDE generados con pares SPOT-HRV en el programa Socet-Set, el ECM total de las orientaciones del par es superior al ECM del MDE, siendo la magnitud del ECM de orientación de la componente X muy similar al del MDE. Sin embargo, en OrthoBase Pro, el error total de las orientaciones es inferior al ECM del MDE; en consecuencia, el error de generación del MDE está afectado por más errores, además del cometido en las orientaciones.

Prueba experimental 2

En los resultados de esta prueba se verifica que la distribución de los puntos de apoyo influye fuertemente en la calidad del ajuste y, por tanto, en el error del MDE. Las distribuciones mejores son aquellas que los puntos se reparten homogéneamente sobre toda la zona de trabajo.

En los dos programas empleados se refleja una gran dependencia en la distribución de los puntos de apoyo pero con una sensibilidad diferente. Socet Set es más sensible ya que el ECM de cada MDE empeora levemente según empeora la distribución de los puntos de apoyo, llegando a un error de 19,5 m en la peor distribución. En OrthoBase Pro, esta sensibilidad no es inicialmente tan grande y sólo con la peor distribución el error del MDE sube a más de 100 m, saliéndose de los rangos razonables.

Prueba experimental 3

En esta prueba se verifica que en los MDE raster con una malla suficientemente densa se obtienen resultados tan satisfactorios como con MDE de estructura TIN: los resultados de exactitud en los dos MDE, uno raster y otro TIN, son iguales estadísticamente. Se verifica la eficacia del método de correspondencia de imágenes con intervalos de dos veces el tamaño del píxel.

Una de las principales ventajas de las técnicas automatizadas de extracción de elevaciones es poder decidir la densidad de puntos con la que se quiere realizar el MDE. Pero no todos los programas permiten realmente manejar esta variable: OrthoBase Pro permite aparentemente construir MDE con distintos tipos de estructura (*grid* o TIN) y permite decidir la distancia entre puntos en el caso de la estructura raster. La realidad, sin embargo, es que sólo realiza MDE con estructura TIN y, en caso de haber seleccionado una estructura raster, el programa realiza una interpolación del TIN previamente generado. Por tanto, este programa no permite decidir la densidad real del MDE sino que simplemente realiza un rellenado por interpolaciones. En Socet-Set, sin embargo, se pueden realizar MDE de estructura real con buenos resultados hasta un tamaño de malla de dos veces el píxel.

Prueba experimental 4

El tamaño óptimo de malla en la generación automática de un MDE con imágenes estereoscópicas SPOT es 20 m, es decir, dos veces el tamaño del píxel en el terreno. Reduciendo este valor se aumenta el error del modelo posiblemente por problemas algorítmicos ya que, a priori, no deberían existir problemas de correspondencias ni exactitud apurando hasta el tamaño de píxel (10 m). Los peores resultados para mallas menos densas (100 m) se deben al efecto de generalización que estas distancias suponen.

Prueba experimental 5

La estrategia denominada 'adaptativa' es la idónea para la extracción automática de las elevaciones no sólo para imágenes aéreas como verifican otros estudios ([Zhang, 1997](#); [Bacher, 1998](#)) sino también para imágenes SPOT. La estrategia denominada 'Spot' no da buenos resultados a pesar de haber sido diseñada específicamente para este tipo de imágenes.

Prueba experimental 6

La depuración de los MDE mediante valores umbral de coeficientes de correlación pa-

rece ser un método simple y adecuado para reducir el tamaño de la estructura sin pérdida significativa de exactitud. Las pruebas realizadas apoyan esta hipótesis y en el caso concreto de la prueba experimental con Socet Set ha sido posible reducir el MDE inicial a menos de un 19% de los puntos sin que la calidad del resultado pueda distinguirse estadísticamente del MDE generado en la estación fotogramétrica.

Capítulo 5 Análisis de las variables influyentes en la generación de MDE con imágenes TERRA-ASTER

5.1 Introducción

En este capítulo, de forma análoga al anterior, se analizan las variables influyentes en la generación de un MDE por técnicas automáticas de correlación con imágenes estereoscópicas TERRA-ASTER. Como en el caso anterior, la finalidad de los análisis es poder realizar un MDE con la mayor exactitud posible con dichas imágenes.

Cada una de las pruebas realizadas consiste en el análisis de una variable influyente en la generación del MDE. Al igual que con las imágenes SPOT-HRV, se han realizado las pruebas experimentales con dos aplicaciones fotogramétricas diferentes. Sin embargo, en este caso ha sido necesario descartar Socet-Set ya que no permite trabajar con datos ASTER. Se han mantenido los análisis con Orthobase Pro, que permite integrar las imágenes en un módulo genérico, y se ha introducido la aplicación Geomatica, que integra un modelo específico para imágenes ASTER.

Siguiendo, el mismo esquema de análisis, las variables analizadas en este capítulo son:

- Número de puntos de apoyo.
- Distribución de los puntos de apoyo.
- Estructura del MDE resultante: vectorial (TIN) o raster (GRID).
- Tamaño de malla o distancia entre puntos (resolución espacial, sólo para estructuras GRID).
- Algoritmo de correspondencia de imágenes.
- Valor del coeficiente de correlación.

La zona de estudio es la misma que la presentada en el primer capítulo y la obtención de los datos necesarios para la generación de los MDE (puntos de apoyo) y su control de calidad (puntos de control) han sido explicados en el Capítulo 3. Este capítulo se organiza de la siguiente forma:

- Las aplicaciones informáticas y los datos empleados se detallan en el primer punto.
- A continuación se explica el flujo de los procesos requeridos en la generación del MDE en cada uno de los programas empleados: OrthoBase Pro y Geomatica en este caso.
- Se muestran las pruebas experimentales realizadas para cada variable y análisis de las mismas.
- Se presentan los resultados y conclusiones.

5.2 Datos y material empleado

En la realización de los MDE y el estudio de sus respectivos errores se han empleado distinto material y tipos de datos, que a continuación se detallan:

5.2.1 Programas informáticos

Para construir los MDE se han utilizado las aplicaciones: Socet Set (Leica Geosystems) y Geomatica con OrthoEngine (PCI Geomatics). Para tareas complementarias se han utilizado la aplicación de proceso de imágenes ENVI 3.4 (Research Systems) y para el control del error el sistema de información geográfica ArcView 3.2 (ESRI) y la hoja de cálculo Excel 2000 (Microsoft).

- Geomatica Orthoengine es un módulo fotogramétrico al que se le han incorporado modelos específicos para trabajar con varios sensores con capacidad estereoscópica. En este sentido es la aplicación donde se ha hecho un mayor esfuerzo por estar al día en cuanto a las posibilidades de explotación de los datos según van estando disponibles. Posee módulos, entre otros, para procesar datos de fotografías aéreas, e imágenes ASTER, IKONOS y SPOT.

5.2.2 Imágenes estereoscópicas ASTER

Las imágenes TERRA (Figura 44) fueron capturadas por el sensor ASTER con fecha 22-10-2000; las tomas vertical y oblicua (ver Figura 45) se realizan de forma prácticamente simultánea. Las características de los datos se detallan en la Tabla 56. Hay que tener en cuenta que, en este caso, ha sido necesario trabajar con dos escenas ya que la zona de estudio no queda cubierta por una sola. Esto obligará posteriormente a realizar mosaicos bien de las propias imágenes, bien de los MDE.

Tabla 56. Características de los datos TERRA-ASTER.		
Escenas:	AST_L1A-0022470496	AST_L1A-0022470499
Nivel de corrección	Nivel 1A	Nivel 1A
Satélite	TERRA	TERRA
Sensor	VNIR	VNIR
Día de la toma	22/ 08/ 2000	22/ 08/ 2000
Hora de la toma	11 h 28 m 47 s	11 h 28 m 56 s
Latitud centro imagen	37,19° Norte	36,66° Norte
Longitud centro imagen	-3,69° Oeste	-3,85° Oeste
Tamaño de la imagen (píxeles):	Nadiral: 4100 filas x 4200 columnas Oblicua: 5000 filas x 4600 columnas	
Tamaño de la imagen (km)	60x60 km de recubrimiento	
Resolución geométrica	15 m (bandas VNIR)	
'Pointing angle':	8,5880	8,5880
Angulo de incidencia	0° y -30,96°	0° y -30,96°
Relación base/altura	0,73	

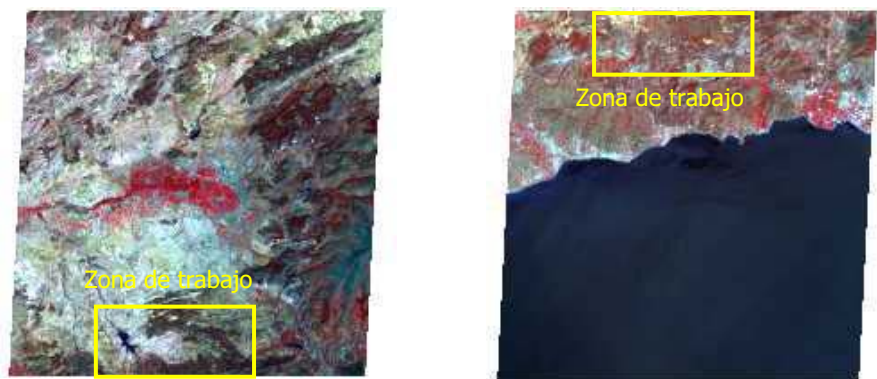


Figura 44. Escenas TERRA-ASTER (AST_L1A-0022470496, izquierda y AST_L1A-0022470499, derecha).

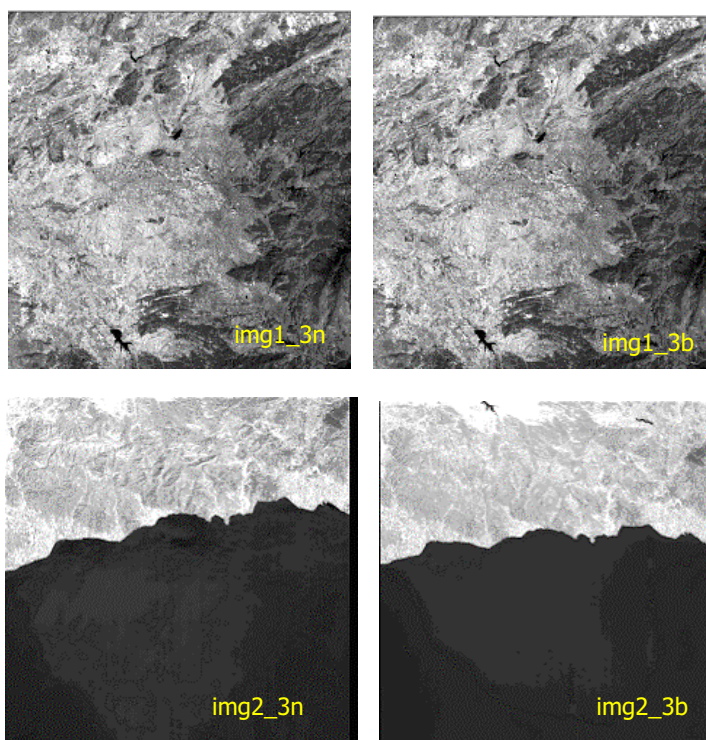


Figura 45. Imágenes nadiral (n) y oblicua (b, backward) en las dos escenas TERRA utilizadas.

5.3 Generación de un MDE con datos estereoscópicos ASTER-TERRA

Trabajar con imágenes TERRA-ASTER es algo más complejo que en el caso anterior debido a dos circunstancias: la zona no está cubierta por una sola imagen y el formato de distribución de los datos es HDF (Hierarchical Data Format). El primer problema se solucionará realizando mosaicos en algún momento del trabajo y el segundo obliga a diferentes estrategias de importación, según la aplicación informática.

Como en el caso de SPOT, una vez construidos los MDE se realizaron las pruebas experimentales para analizar los valores de las variables que influyen en su exactitud.

5.3.1 Generación de un MDE en Orthobase Pro

El primer programa con el que se ha realizado pruebas con imágenes TERRA-ASTER ha sido Orthobase Pro. Aunque como veremos más adelante no dispone de un módulo específico, como ocurría con las imágenes SPOT, permite trabajar seleccionando un modo de sensor genérico.

Para generar los MDE se deben importar las bandas 3n (nadiral) y 3b (oblicua) de cada una de las escenas. Como la zona de estudio no está cubierta por una sola imagen, es necesario realizar previamente un mosaico con las dos escenas (Figura 44). Orthobase no es capaz de utilizar directamente los datos HDF para trabajar y deben ser transformados a su formato propio, img. Este proceso se realiza con las bandas de forma individual y elimina toda posibilidad de utilizar los posibles datos de cabecera de los datos originales. La lectura de los datos ASTER HDF es una posibilidad muy recién-

te y fue necesario pedir una actualización específica para esta tarea. Instalada ésta, es posible utilizar las opciones *Import -> ASTER EOS HDF Format* para transformar las bandas 3n y 3b a formato img y realizar el mosaico de las mismas (Figura 46). La operación de mosaico tiene la característica de que ambas escenas son, en realidad, partes de un mismo conjunto de datos de barrido por lo que las filas y columnas en la zona de solapamiento son idénticas y no es necesario realizar operaciones de remuestreo ni corrección geométrica para asegurar el ajuste.

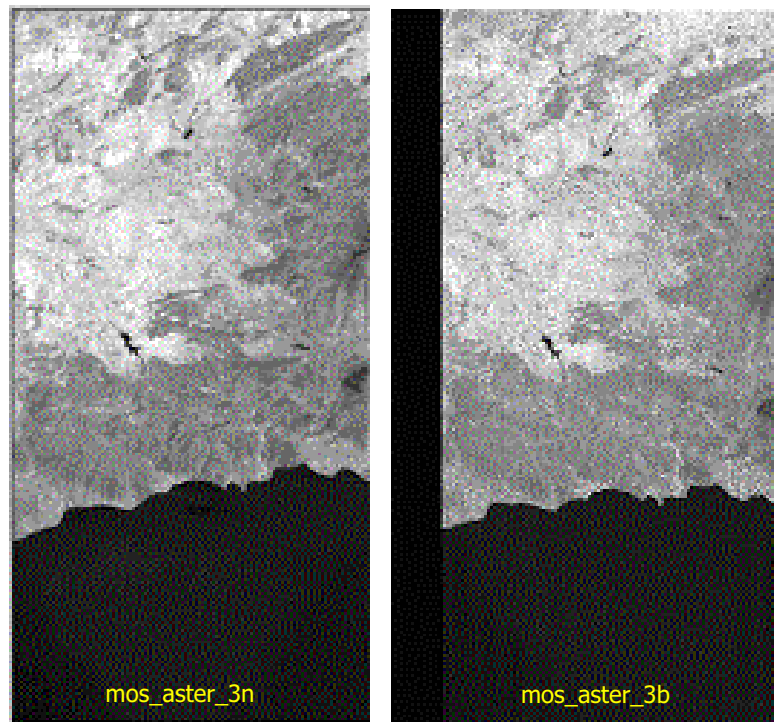


Figura 46. Mosaicos realizados con las imágenes TERRA-ASTER.

Como ya se ha dicho, no existe un modelo de sensor específico para ASTER por lo que se utilizará un modelo genérico (*generic pushbroom*) donde se deberán configurar los parámetros del sensor. Dichos parámetros se localizan en los metadatos de los ficheros de cabecera. Los pasos seguidos en OrthoBase Pro son los siguientes:

- **Crear un proyecto:** se crea el proyecto y se introducen las imágenes que se pretenden orientar, en nuestro caso *mosaico3n* y *mosaico3b*. Es importante tener en cuenta el orden de las imágenes: primero se introduce la imagen nadiral y posteriormente la oblicua.

Se selecciona el tipo de sensor con el que se han obtenido las imágenes:

frame camera
digital camera
video camera
no_metric camera
generic pushbroom
SPOT pushbroom
IRS_1C pushbroom
IKONOS

Dado que no existe un sensor específico, se selecciona el caso genérico (generic pushbroom). Se definen el sistema de coordenadas (UTM, elipsoide de Hayford, huso 30) y las unidades de trabajo (m).

- **Orientación de las imágenes:**

En la orientación de las imágenes se siguen los mismos pasos que en el caso SPOT, con las diferencias que se exponen a continuación en cuanto a los parámetros del sensor y del modelo en las Tablas 57 y 58.

Tabla 57. Parámetros del sensor.		
Nombre del Sensor	ASTER VNIR nadir	ASTER VNIR backward
Longitud focal (mm)	329.0	329.0
Punto principal Xo (mm)	0.0	0.0
Punto principal Yo (mm)	0.0	0.0
Tamaño del píxel (mm)	0.007	0.007
Núm. de columnas	4100	5000

Tabla 58. Parámetros del modelo estereoscópico.	
X	2
Y	2
Z	2
OMEGA	0
PHI	0
KAPPA	2

- **Medida de los puntos de paso (tie points):**

Al igual que con las imágenes SPOT, para la generación automática de PP es necesario identificar previamente de forma manual un mínimo de dos PP en cada una de las imágenes (se realiza en la herramienta *Point measurement tool*). Posteriormente se miden de forma automática más puntos (Figura 47) configurando el conjunto de parámetros que definirán la estrategia de correlación (en *EDIT/Auto. Tie point generation*). En la Tabla 59 se muestran los valores de dichos parámetros.

Tabla 59. Parámetros del algoritmo de correlación.	
<i>Search size</i>	21
<i>Correlation size</i>	7
<i>Least square size</i>	21
<i>Coefficient limit</i>	0.85
<i>Initial accuracy</i>	10%

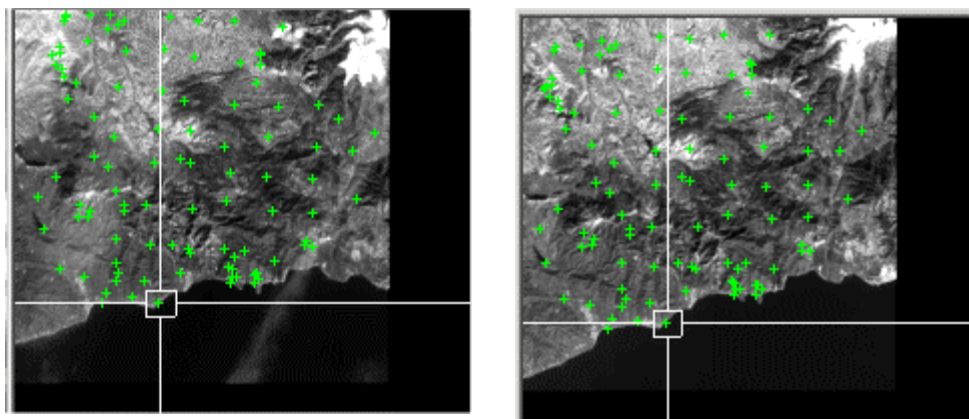


Figura 47. Esquema de los puntos de paso identificados.

- **Identificación de los puntos de apoyo (PA);** la identificación de cada uno de los puntos de apoyo se realiza de forma manual en cada una de las imágenes asignándoles las coordenadas correspondientes. En la Figura 48 se muestra un ejemplo de identificación de un punto de apoyo.

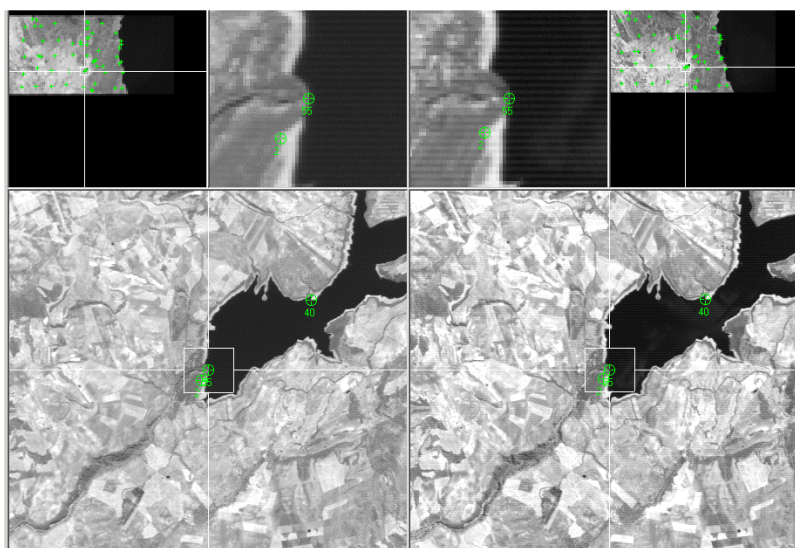


Figura 48. Identificación en la imagen del PA 11 (centro del muro de la presa), con coordenadas: X= 420613,00; Y =4095014,00 y Z= 834,03.

Para el resto de los pasos (cálculo y ajuste de la triangulación, generación de los MDE y análisis del error) se sigue un proceso idéntico al caso SPOT por lo que no lo repetiremos aquí. En la Figura 49 se presenta un esquema del flujo de trabajo.

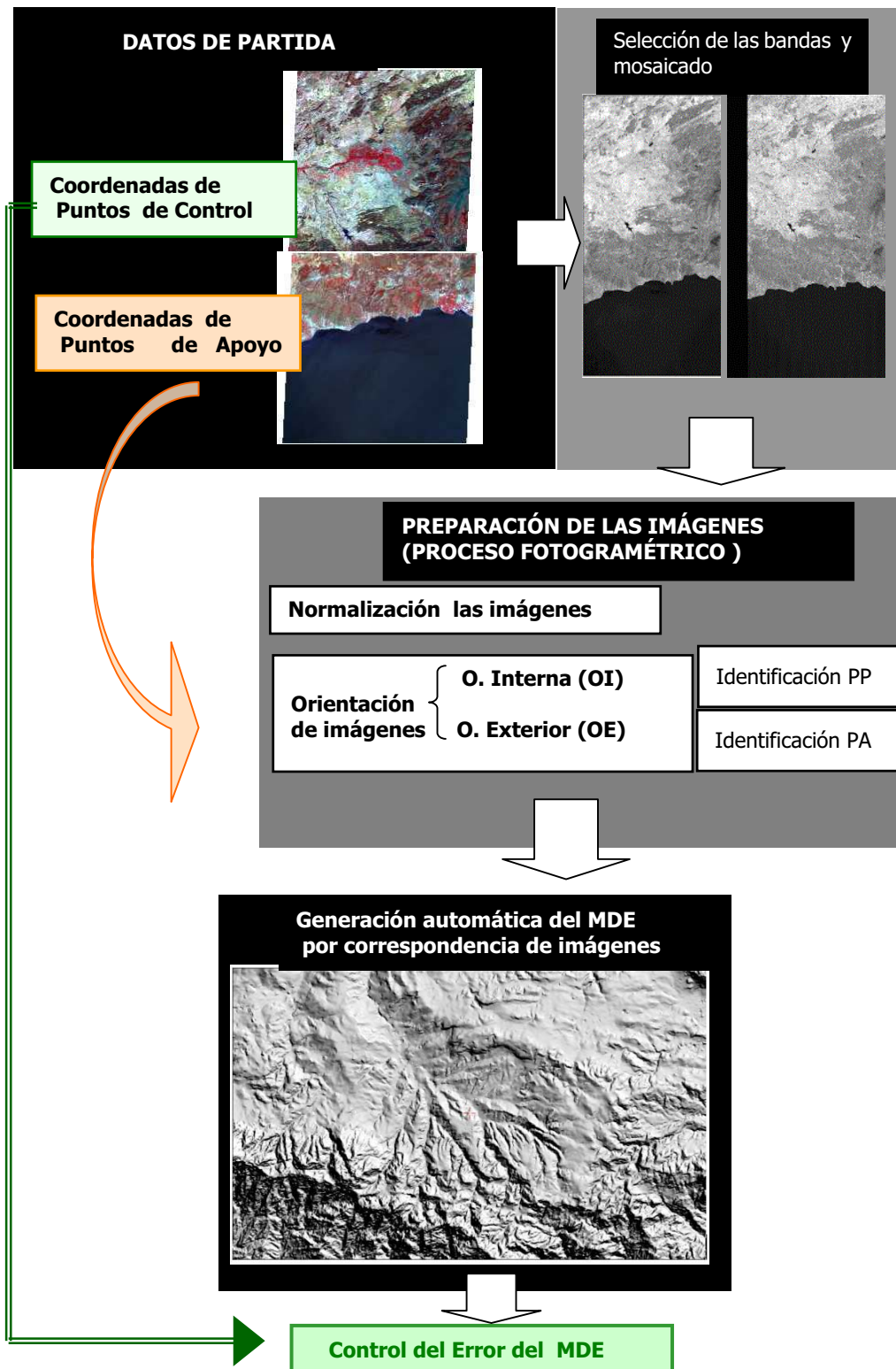


Figura 49. Esquema de generación de un MDE a partir de imágenes TERRA-ASTER en OrthoBase PRO.

5.3.2 Generación de un MDE en Geomatica OrthoEngine

OrthoEngine es una aplicación de PCI Geomatics²⁴ para realizar ortoimágenes y mosaicos de imágenes de satélite, tanto de sensores ópticos como de radar, corrigiendo las distorsiones causadas por la posición del satélite, la curvatura terrestre y la proyección cartográfica. El módulo llamado *OrthoEngine Satellite Models*, añade a estas aplicaciones la generación de MDE a partir de imágenes estereoscópicas de distintos tipos de datos obtenidos desde satélite, entre ellos imágenes radar. Los tipos de datos que admite son: AVHRR, ASTER, IRS, Landsat, MODIS, SPOT, RADARSAT, ERS y JERS.

Por tanto, este programa permite realizar las pruebas experimentales de estudio con un módulo específico para datos TERRA-ASTER. Los pasos a seguir para la generación de un MDE desde este tipo de datos son los siguientes:

- **Configuración de un proyecto**

Como en la mayoría de programas, el primer paso a realizar es la configuración del proyecto de trabajo donde se definen los parámetros generales. En el caso del módulo de OrthoEngine la información del proyecto debe especificar el método del modelo matemático; el tipo de datos con los que se va a trabajar, los datos de proyección y las unidades de los datos a generar. En el caso de las pruebas realizadas estos parámetros han sido configurados en *Processing Step* donde se seleccionan el modelo de órbita de satélite, datos de alta resolución, unidades de trabajo en metros, sistema de proyección ED50 y tamaño del píxel 15 metros (Figura 50).

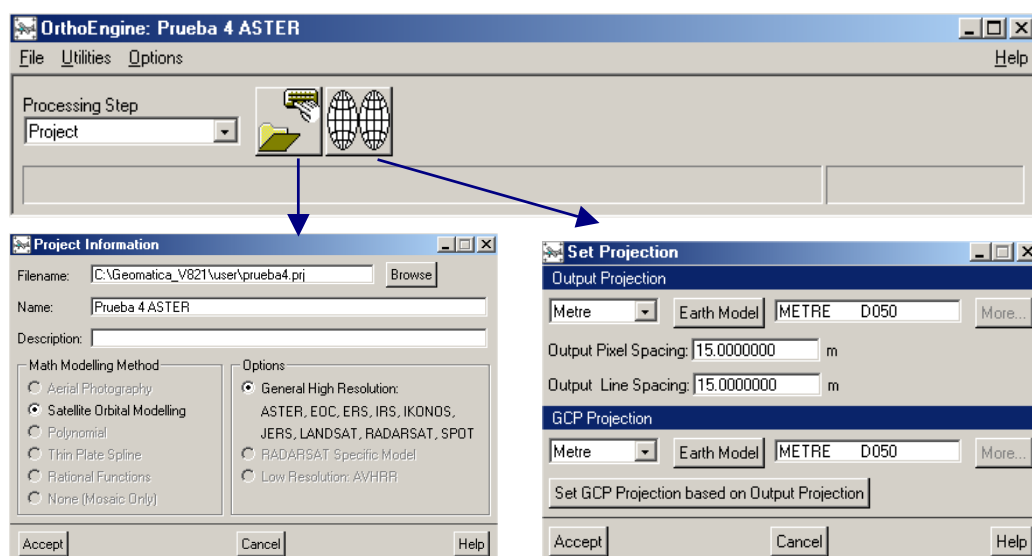


Figura 50. Configuración de los datos de un proyecto en OrthoEngine.

- **Importación de los datos**

El siguiente paso es la importación de los datos con los que se va a trabajar al proyecto anteriormente creado. Para ello, se selecciona en *Processing Step* → *Data Input*, y de las diferentes posibilidades de lectura de los datos se opta por la opción desde CD-ROM.

²⁴ <http://www.pcigeomatics.com/>

Los tipos de imágenes que permite seleccionar en *Data Source CD Format* (Figura 51) son: Landsat 7 (HDF, TIFF, FAST, NLAPS), LGSOWG SPOT, SPOTIMAGE SPOT, CEOS RADAR, EOSAT IRS, LGSOWG JERS1, Super Structure IRS, ASTER e IKONOS. En función del tipo de dato seleccionado, la configuración de las bandas que componen la imagen varía. En el caso de las imágenes ASTER aparecen las 14 bandas que componen dichas imágenes, aunque para el presente estudio solamente se importarán las bandas del VNIR (visible e IR próximo). La importación transforma los datos HDF al formato PIX propio.

Las tres primeras bandas VNIR (vista nadiral) se incluyen en un único fichero mientras que la cuarta banda (la vista oblicua) se incluye en otro fichero independiente, cuestión obligada por el programa.

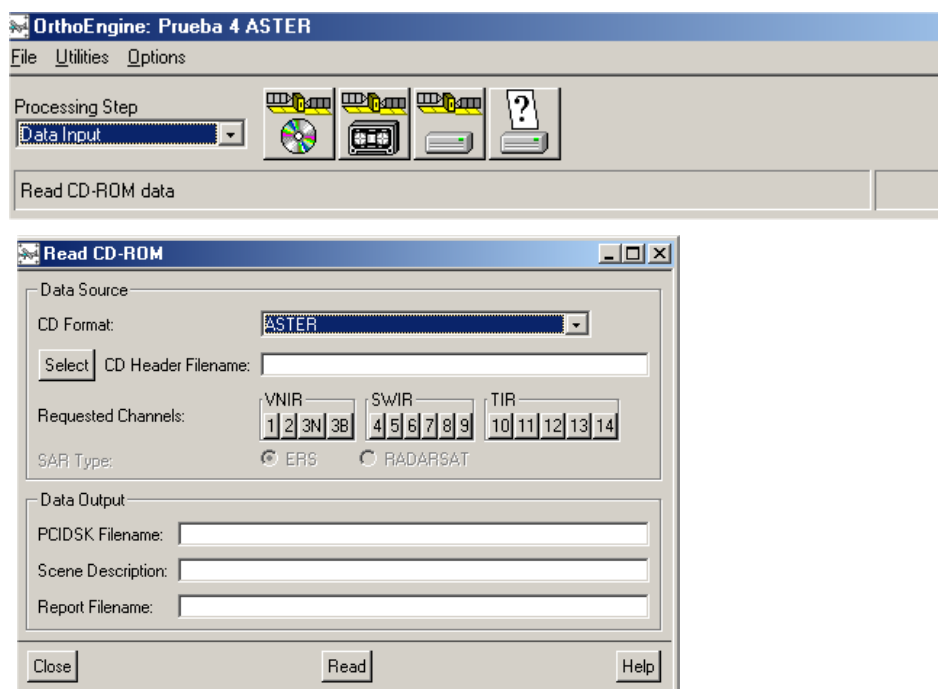


Figura 51. Lectura/importación de los datos.

- **Generación del modelo estereoscópico:**

Una vez configurado el proyecto e importadas las imágenes de trabajo se procede a la generación de los modelos estereoscópicos mediante la identificación de los puntos de paso y apoyo. Esto se realiza seleccionando en *Processing Step* la opción *GCP/TP Collecting* (Figura 52). En este submenú existen diferentes opciones para realizar los procesos de identificación de puntos homólogos, bien sean PP²⁵ o de PA²⁶.

²⁵ cuya terminología inglesa es TP, Tie Point

²⁶ la terminología inglesa de PA es GCP, Ground Control Point, que no se debe confundir con puntos de control denominados Check Point. Esta terminología ya permite intuir que los puntos empleados en las orientaciones de las imágenes son un parámetro de referencia para controlar la exactitud del producto generado, bien sea un MDE o una ortoimagen.

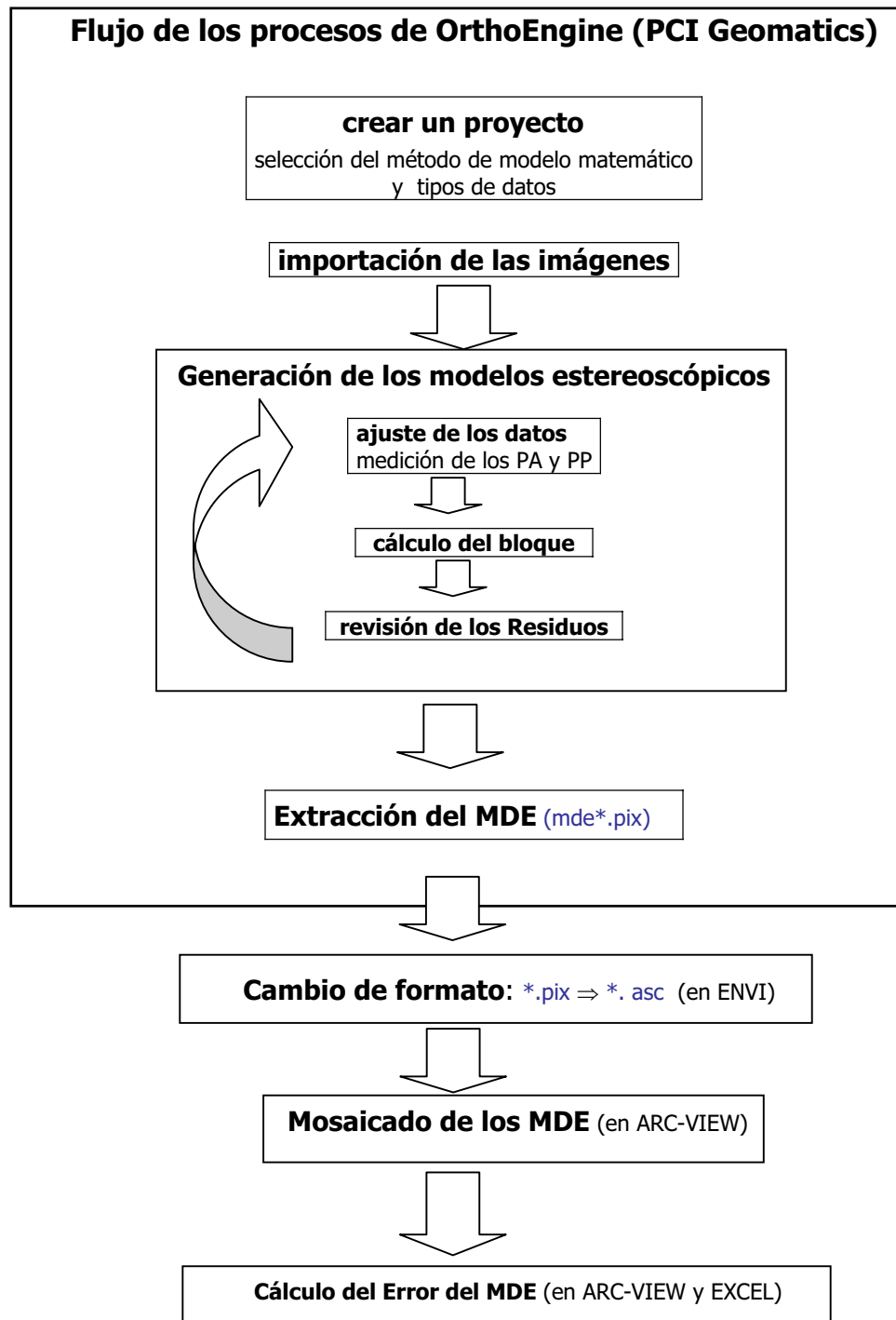


Figura 53. Flujo de los procesos realizados para la generación y cálculo del error de los MDE en Geomatica OrthoEngine.

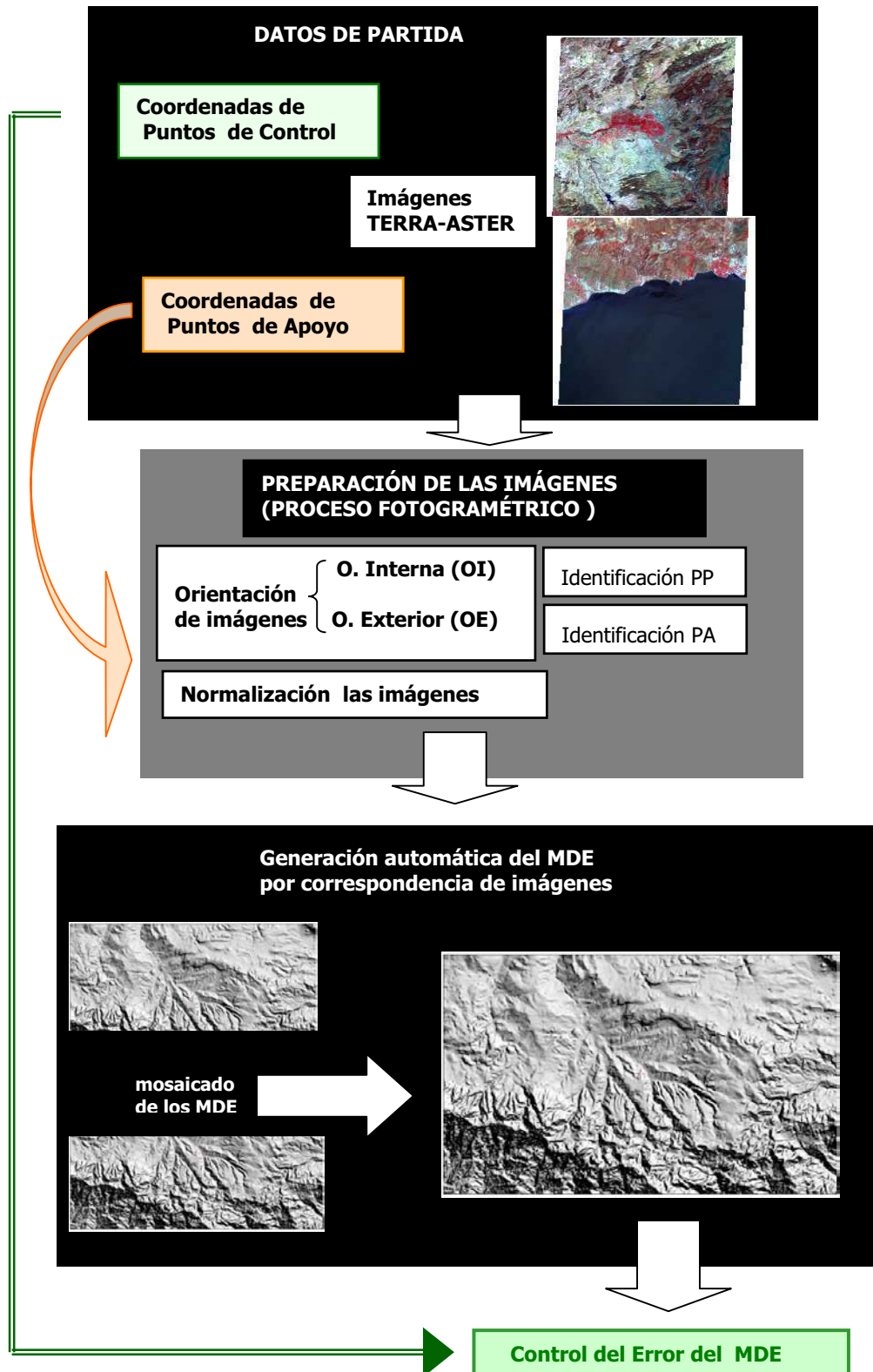


Figura 54. Esquema de generación de un MDE a partir de imágenes TERRA-ASTER en OrthoEngine.

5.4 Análisis de las variables influyentes

5.4.1 Introducción

En la revisión realizada para conocer los trabajos realizados con este tipo de imágenes se han encontrado muy pocas referencias. Hay que tener en cuenta que el satélite Terra es relativamente reciente y la explotación de sus datos está en pleno desarrollo.

Entre los trabajos revisados, la variabilidad del error de los MDE generados a partir de imágenes estereoscópicas TERRA-ASTER está en un amplio rango: entre 7 y 60 m; es decir entre la mitad del tamaño del píxel y cuatro veces su valor. Al igual que sucede con los estudios realizados con SPOT, esta variabilidad de exactitud se debe probablemente a factores relacionados con la falta de unificación de criterios tanto en la generación del MDE como en el análisis del error.

Por tanto, el objetivo marcado en este capítulo es realizar el MDE más exacto que este tipo de datos permita, empleando los valores óptimos en las variables que influyen en su generación. No se han encontrado estudios previos que analicen esta cuestión por lo cual se realizarán las pruebas experimentales necesarias para deducir dichos valores.

El desarrollo de las pruebas experimentales es similar al realizado con los datos SPOT y se analizan las mismas variables (número y distribución de los puntos de apoyo, tipo de estructura de los datos, tamaño de malla y coeficiente de correlación). Cada una de estas variables se analiza de forma empírica fijando los valores de las demás variables. Posteriormente, se procede al cálculo del error de cada MDE generado mediante la muestra de 315 puntos de control.

5.4.2 Pruebas experimentales: descripción general

Como en el caso SPOT, las pruebas experimentales buscan responder a las cuestiones ya planteadas anteriormente:

- **Prueba experimental 1:** ¿Cuántos puntos de apoyo deben emplearse? Cuantos más puntos de apoyo se utilicen, ¿Aumentará la exactitud del MDE final?
- **Prueba experimental 2:** ¿La distribución de los puntos de apoyo influye en el resultado final?
- **Prueba experimental 3:** ¿Un MDE con estructura TIN generado con automatismos es más exacto que un MDE raster?
- **Prueba experimental 4:** ¿La modificación del tamaño de malla influye en la calidad de la correlación y por tanto en la exactitud del MDE?
- **Prueba experimental 5:** ¿Cuál es la estrategia de correspondencia de imágenes más apropiada?
- **Prueba experimental 6:** ¿El coeficiente de correlación que proporciona la estación fotogramétrica en cada elevación es un buen parámetro para depurar el MDE?

La Tabla 60 muestra un esquema de las pruebas experimentales desarrolladas y las variables analizadas en cada uno de los programas utilizados, OrthoBase Pro y Geomatica Orthoengine. Se puede apreciar que el esquema de trabajo planteado ha sido el mismo que el realizado en el capítulo anterior con los datos SPOT-HRV. Veremos que, en función de las peculiaridades de cada programa empleado, algunas de las pruebas experimentales no se han podido desarrollar. En las pruebas se han generado un total de 55 MDE.

Tabla 60. Esquema de las pruebas experimentales en la generación de MDE desde TERRA-ASTER

Prueba	Variable analizada	Aplicación	Otros parámetros	Núm. de MDE
1	Número de puntos de apoyo	OrthoBase entre 5 y 15 PA	15 PP, estructura TIN, ventana de correlación de 9x9, límite de correlación 0,65.	11 MDE
		OrthoEngine entre 10 y 16 PA	16 PP, estructura GRID, 30 m de celda	8 MDE
2	Distribución de los puntos de apoyo 4 distribuciones diferentes	OrthoBase	15 PP, estructura TIN, ventana de correlación de 9x9, límite de correlación 0,65.	4 MDE
		OrthoEngine	---	---
3	Estructura del MDE	OrthoBase	---	---
		OrthoEngine	---	---
4	Tamaño de malla	OrthoBase 100, 80, 60, 40, 20, 15, 10 m	15 PP, 9 PA, ventana de correlación de 9x9, límite de correlación 0,65.	7 MDE
		OrthoEngine 120, 60, 30 y 15 m	16 PP, 12 PA, estructura raster	4 MDE
5	Algoritmo de correlación	OrthoBase (diversos tamaños de ventana de búsqueda y de correlación)	15 PP, 13 PA, estructura TIN, límite de coef. de correlación: 0,65	13 MDE
		OrthoEngine	---	---
6	Límite del coeficiente de correlación	OrthoBase 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95	15 PP, 13 PA, estructura TIN, ventana de correla- ción de 9x9	8 MDE
		OrthoEngine	---	---

5.4.3 Prueba 1: número de puntos de apoyo

La prueba 1 se ha realizado con un número fijo de 25 puntos de paso, mientras que el nú-

mero de puntos de apoyo ha sido la variable analizada. Las generalidades (incógnitas, planteamiento de la influencia de los PA, etc.) son idénticas a las expuestas en el caso SPOT por lo que no las repetiremos y pasaremos directamente a los resultados experimentales.

Una diferencia importante con el caso SPOT ha sido que los puntos de apoyo, claramente identificables en el primer caso, no lo son fácilmente en el caso ASTER. La diferente resolución espacial ha condicionado que se pueda utilizar un máximo de 16 puntos en OrthoBase Pro y 15 en Geomatica OrthoEngine. La obtención de las coordenadas de dichos puntos ya fue expuesta en el Capítulo 3.

5.4.3.1 Prueba experimental 1 en OrthoBase Pro

Los modelos estereoscópicos ajustados antes de la generación de los MDE se han realizado con un número de puntos de apoyo variable entre 5 y 15. En la documentación revisada de OrthoBase no se recomienda superar ninguna redundancia en la resolución del sistema matemático formado en la orientación de las imágenes. En la Tabla 61 se muestran las características del sistema de ecuaciones resuelto en el ajuste de cada uno de los modelos estereoscópicos. Como se puede ver, las redundancias del sistema varían desde un 44% (5 PA) hasta el 204% (15 PA).

En la generación de los MDE se configuró la extracción de las elevaciones con los siguientes parámetros: los datos del fichero de salida en formato "3D Shape" (formato vectorial propio de ArcView) y coordenadas del marco de la zona de trabajo iguales que en caso SPOT; el conjunto de parámetros que definen la estrategia de correlación son una ventana de búsqueda de 21x3, una ventana de correlación de 9x9 y un valor umbral para el coeficiente de correlación de 0,65.

Los MDE fueron generados con estructura TIN ya que se vio en las pruebas experimentales del capítulo 4 que OrthoBase Pro sólo genera este tipo de estructuras y, en el caso de seleccionar como fichero de salida una estructura *grid*, no extrae la elevación de los puntos correspondientes a la estructura definida sino que los interpola del TIN.

Una vez generados los MDE se precedió a realizar el análisis estadístico de los resultados. La fuente de datos empleada para dicho cálculo son los mismos 315 PC empelados en las pruebas con SPOT-HRV. En la Tabla 62 se muestran los estadísticos básicos de cada uno de los MDE. En dicha tabla se puede apreciar como el error medio varía entre -29,2 m y 41,0 m, por lo que *no* se puede deducir que exista un error sistemático en la extracción de las elevaciones ya que en ninguno de los casos el valor de EM es significativamente diferente de cero. Por otro lado, se puede ver que el ECM de los MDE varía entre 61,6 m (con 6 PA) y 34,5 m (con 12 PA).

Los mismos datos se representan gráficamente en la Figura 55; al igual que en los casos analizados en SPOT, se puede deducir que el error no disminuye proporcionalmente al ir aumentando el número de PA pero es conveniente emplear un número que asegure una redundancia en la resolución del sistema de ecuaciones que relaciona las coordenadas imagen con las coordenadas terreno.

Tabla 61. Ecuaciones, incógnitas y redundancia del ajuste (prueba 1 con OrthoBase Pro).

PA	Nº Ec. PA	Nº Ec. PP	Total de Ec.	Incógnitas	Ec. Redun.	% Redun.
5	20	16	36	25	11	44
6	24	16	40	25	15	60
7	28	16	44	25	19	76
8	32	16	48	25	23	92
9	36	16	52	25	27	108
10	40	16	56	25	31	124
11	44	16	60	25	35	140
12	48	16	64	25	39	156
13	52	16	68	25	43	172
14	56	16	72	25	47	188
15	60	16	76	25	51	204

Tabla 62. Estadísticos básicos del test de error (prueba 1 con OrthoBase Pro).

PA	EM (m)	ECM (m)	s (m)
5	41,03	51,53	43,75
6	-8,85	61,60	41,77
7	24,42	61,29	45,40
8	6,83	45,61	30,82
9	3,45	41,50	26,60
10	-14,03	40,88	28,79
11	3,80	39,50	25,43
12	-11,11	34,50	26,76
13	2,90	53,01	36,50
14	-18,16	46,02	32,86
15	-29,17	46,96	36,84

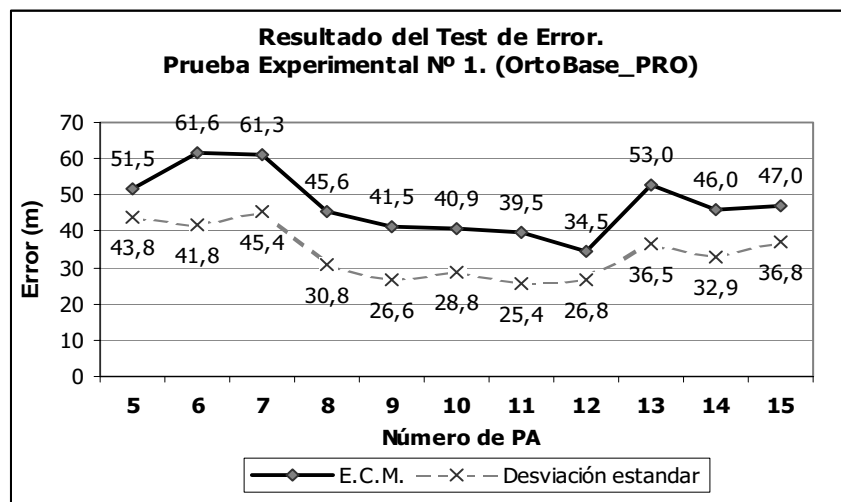


Figura 55. Representación gráfica del error (ECM y s) en la Prueba 1 con OrthoBase PRO.

La fiabilidad del error de los MDE, como en anteriores pruebas, ha sido calculada según la fórmula propuesta por Li (1991) (Tabla 63).

Tabla 63. Intervalos de confianza para s en los MDE según el número de puntos de apoyo (Prueba 1 con OrthoBase PRO)

Núm. de PA	s (m)	intervalo (95%)
5	43,75	±3.43
6	41,77	±3.27
7	45,40	±3.56
8	30,82	±2.42
9	26,60	±2.09
10	28,79	±2.26
11	25,43	±1.99
12	26,76	±2.10
13	36,50	±2.86
14	32,86	±2.58
15	36,84	±2.89

En la Tabla 64 se muestran los resultados de los ajustes de las orientaciones de las imágenes en las tres componentes y el error total del ajuste. En la Tabla 65 se comparan estos errores del ajuste, ya no en unidades de píxel sino en metros, con el ECM de cada MDE generado. En la Figura 56 se representan estos errores para una mejor interpretación y análisis. Se puede observar, como en las pruebas anteriores, que el número de PA no está relacionado linealmente con los resultados de error de los MDE. Además, se puede observar que los errores de ajuste de las imágenes son menores que los errores del MDE generado en cada caso.

Tabla 64. Error de las orientaciones según el nº de PA (Prueba 1 con OrthoBase PRO). Todos los errores en píxeles.

Núm. de PA	ECM O_x	ECM O_y	ECM O_z	EMC O_T
5	0,24	0,19	1,38	0,42
6	0,12	0,12	1,96	0,49
7	0,15	0,35	2,62	0,45
8	0,17	0,49	2,70	0,39
9	0,15	0,74	2,30	0,52
10	0,20	0,42	2,80	0,41
11	0,28	0,04	2,45	0,50
12	0,08	0,75	2,50	0,61
13	0,09	0,75	2,04	0,61
14	0,14	0,67	2,38	0,68
15	0,30	0,24	1,43	0,40

Tabla 65. Comparación del error de las orientaciones con el error del MDE (Prueba 1 con OrthoBase PRO). Todos los errores en m.

Núm. de PA	ECM O _x	ECM O _y	ECM O _z	ECM O _T	ECM MDE
5	3,6	2,85	20,7	6,3	61,60
6	1,8	1,8	29,4	7,35	61,29
7	2,25	5,25	39,3	6,75	45,61
8	2,55	7,35	40,5	5,85	41,50
9	2,25	11,1	34,5	7,8	40,88
10	3	6,3	42	6,15	39,50
11	4,2	0,6	36,75	7,5	34,50
12	1,2	11,3	37,5	9,15	53,01
13	1,35	11,3	30,6	9,15	46,02
14	2,1	10,1	35,7	10,2	46,96
15	4,5	3,6	21,45	6	51,53

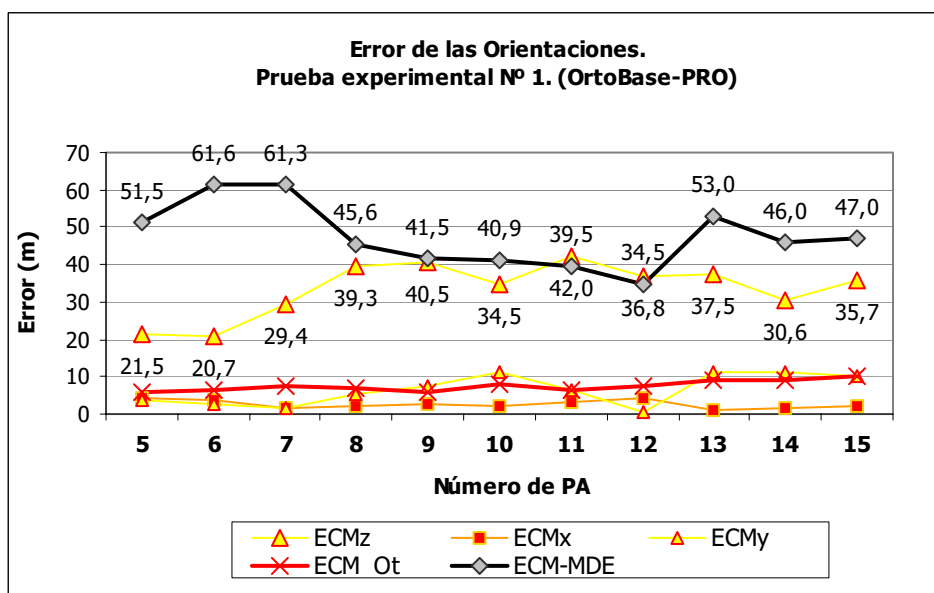


Figura 56. Comparación del ECM de los MDE según el número de puntos de apoyo y el ECM de las orientaciones en las tres componentes (Prueba 1 con OrthoBase PRO).

5.4.3.2 Prueba experimental 1 en OrthoEngine

En la documentación consultada de Geomatica OrthoEngine (*OrthoEngine Satellite Projects User's Guide*), se encuentra la siguiente información sobre los puntos de apoyo:

- Se requiere un mínimo de 4 PA para datos VIR, tales como SPOT, LANDSAT o IRS pero se recomienda el uso de 6 a 8 PA para estos mismos datos.
- Se requieren entre 5 y 8 PA para cada imagen SAR con el modelo de satélite general; se recomienda el uso de 10 a 12 PA.
- Se recomienda un gran número de PA para mejorar la exactitud en las operaciones estereoscópicas de extracción de MDE.

Además, se sugieren los siguientes criterios para seleccionar unos buenos PA:

- Tomar el tiempo necesario para seleccionar la mejor localización posible de los PA, previa a la toma de datos.
- Los PA no deben estar restringidos a las zonas de recubrimiento de las imágenes.
- Si un PA está inaccesible o si el terreno es demasiado alejado, escabroso o peligroso para su acceso, es posible emplear mapas topográficos de escala pequeña que proporcionen una referencia para la geocodificación.

Tanto en la revisión de la bibliografía como en la documentación de los programas más específicos para generar MDE con datos espaciales no se definen unos criterios sólidos en el empleo del número óptimo de PA. En este caso en la documentación de PCI Geomatica, por un lado dice que el número mínimo requerido es de 4 PA, pero se recomienda un uso de 6 a 8; más adelante indica que para mejorar la exactitud de los datos en la extracción automatizada de MDE se recomienda "un gran número de puntos de apoyo". En ningún momento se ha encontrado una explicación o justificación a esta recomendación.

En el apartado donde se explica el flujo de los procesos realizados para la generación de un MDE, se detalló que en OrthoEngine no se puede realizar un mosaico directo de las imágenes HDF. Por esta razón se ha partido de un número superior de número de PA para realizar el ajuste entre los dos pares estereoscópicos; con un número inferior a 9 PA las triangulaciones entre las imágenes no se consideraron admisibles por el elevado valor de los residuos. El número de PA varió en el rango de 10 a 16 PA. En los ajustes realizados se midieron un total de 16 PP, 8 en cada par estereoscópico. En la Tabla 66 se muestran las redundancias del sistema de ecuaciones en el ajuste matemático, siempre muy superiores a las mínimas requeridas.

Los MDE generados a partir de los anteriores ajustes se configuraron como datos de salida en estructura *grid* y con tamaño de malla de 30m.

En la Tabla 67 y Figura 57 se representan los resultados de los MDE generados a partir de cada uno de los distintos ajustes. Se puede apreciar como el error de los MDE mejora considerablemente al aumentar el número de PA empleado, como son los casos de 15 y 16 PA. Aunque el número de casos no es suficiente como para llegar a conclusiones determinantes, con más PA el error del MDE podría seguir disminuyendo o podría estabilizarse como en las pruebas realizadas con SPOT-HRV.

Tabla 66. Ecuaciones, incógnitas y redundancia del ajuste. (Prueba 1 con OrthoEngine).

Nº PA	Nº Ec. PA	Nº Ec. PP	Total de Ec.	Incógnitas	Ec. Redun.	% Rendun.
10	40	16	56	25	31	124
11	44	16	60	25	35	140
12	48	16	64	25	39	156
13	52	16	68	25	43	172
14	56	16	72	25	47	188
15	60	16	76	25	51	204
16	64	16	80	25	55	220

Tabla 67. Estadísticos básicos del test de error (Prueba 1 con OrthoBase Pro).

Nº de PA	EM (m)	ECM (m)	s (m)
10	-3.86	19.39	19.00
11	-3.24	17.35	17.04
12	-8.39	20.28	18.47
13	-8.64	22.46	20.73
14	-6.32	16.04	14.74
15	-2.72	13.90	12.80
16	-3.88	14.23	13.69

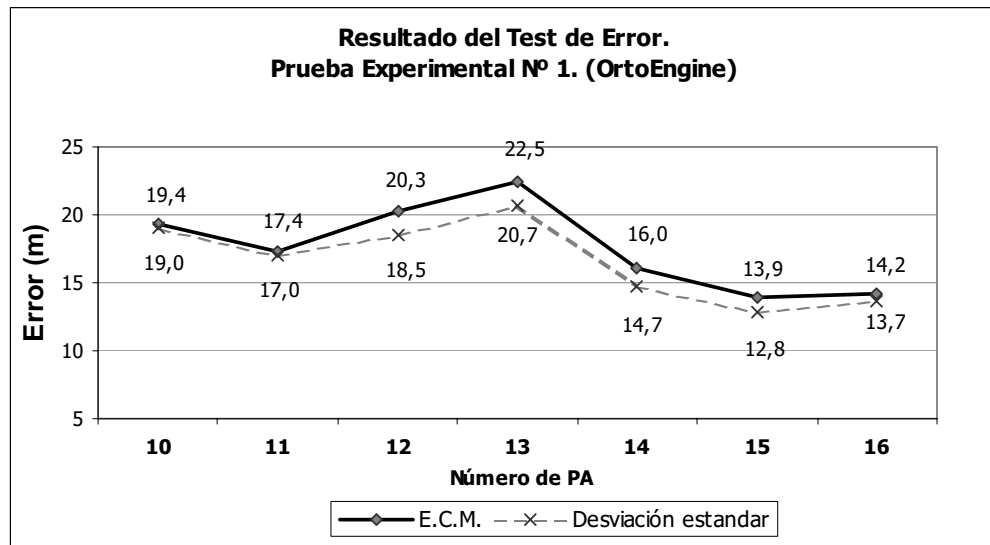


Figura 57. Representación gráfica del error (ECM y s) en la Prueba 1 con OrthoEngine.

En la Tabla 68 se muestra la fiabilidad del error y en Tabla 69 se presentan los resultados de los ajustes realizados en cada uno de los modelos estereoscópicos calculados previamente a la generación de los MDE. Se puede apreciar que los residuos de los PP son bastante inferiores, generalmente inferiores a $\frac{1}{4}$ de píxel, que en los PA. Esto es debido a que matemáticamente es más fácil ajustar los puntos sólo en la componente planimétrica, como es el caso de los PP, que en tres dimensiones, como ocurre con los PA.

Tabla 68. Intervalos de confianza para s según el número de puntos de apoyo (Prueba 1 con OrthoEngine).

PA	Núm. de errores groseros	s (m)	intervalo (95%)
10	19	19.00	±1.49
11	16	17.04	±1.34
12	29	18.47	±1.45
13	16	20.73	±1.63
14	29	14.74	±1.16
15	18	12.80	±1.00
16	22	13.69	±1.07

En los informes de resultados de los ajustes generados por OrthoEngine dan los parámetros representados en la Tabla 69, donde se aprecian los residuos en X e Y, pero no da residuos en la componente Z. Se puede apreciar en la Figura 58, que aunque los errores de ajuste de las orientaciones de las imágenes tienen un valor muy similar, el error del MDE disminuye considerablemente al ir empleando más puntos de apoyo. El mejor MDE obtenido tiene un ECM de 13,9 m y una desviación estándar de $12,8 \pm 1.0$ m; este error es de una magnitud inferior al píxel (15 m).

Tabla 69. Ajustes de los modelos estereoscópicos (Prueba 1 con OrthoEngine), todos los errores en píxeles.						
MDE	imágenes	Núm. de PA	Nº PP	EmcT	EmcX	EmcY
geomde1p510pa	Aster1_123n	8	8	0.60	0.53 0.23	0.30 0.01
	Aster1_3b	9	8	0.53	0.38 0.15	0.36 0.45
geomde2p510pa	Aster2_123n	5	8	0.67	0.60 0.26	0.29 0.02
	Aster2_3b	7	8	0.52	0.34 0.33	0.39 0.15
MDE_AST_10PA		Nº PA: 10 mediciones: 29		0,54	0.43 0.24	0.32 0.30
geomde1p11pa	Aster1_123n	8	8	0.60	0.52 0.23	0.30 0.01
	Aster1_3b	9	8	0.52	0.38 0.15	0.36 0.45
Geomde2p11pa	Aster2_123n	6	8	0.41	0.36 0.21	0.20 0.02
	Aster2_3b	8	8	0.48	0.26 0.26	0.40 0.41
MDE_AST_11PA		nº PA: 11 mediciones: 31		0.48	0.37 0.21	0.31 0.29
geomde1p12pa	Aster1_123n	8	8	0.64	0.57 0.21	0.29 0.01
	Aster1_3b	10	8	0.54	0.42 0.14	0.34 0.45
geomde2p12pa	Aster2_123n	7	8	0.58	0.36 0.23	0.45 0.01
	Aster2_3b	9	8	0.48	0.28 0.28	0.39 0.36
MDE_AST_12PA		nº PA: 12 mediciones 34		0.53	0.40 0.21	0.35 0.27
geomde1p13pa	Aster1_123n	9	8	0.64	0.55 0.21	0.32 0.01
	Aster1_3b	11	8	0.51	0.40 0.14	0.32 0.45
geomde2p13pa	Aster2_123n	7	8	0.59	0.38 0.23	0.45 0.02
	Aster2_3b	9	8	0.47	0.27 0.28	0.39 0.36
MDE_AST_13PA		nº PA: 13 mediciones: 36		0.52	0.39 0.21	0.35 0.27
geomde1p14pa	Aster1_123n	9	8	0.64	0.55 0.21	0.32 0.01
	Aster1_3b	11	8	0.51	0.40 0.14	0.32 0.45
geomde2p14pa	Aster2_123n	8	8	0.57	0.39 0.22	0.42 0.01
	Aster2_3b	8	8	0.47	0.27 0.27	0.36 0.36

MDE_AST_14PA	nº PA: 14 mediciones: 38	0.52	0.39 0.21	0.34 0.27
---------------------	---------------------------------------	-------------	----------------------------	----------------------------

MDE	imágenes	Nº PA	Nº PP	EmcT	EmcX	EmcY
geomde1p15pa	Aster1_123n	10		0.62	0.53	0.32
	Aster1_3b	12	8	0.50	0.23 0.38	0.01 0.33
geomde2p15pa	Aster2_123n	8	8	0.57	0.17 0.38	0.44 0.42
	Aster2_3b	11	8	0.44	0.22 0.26	0.01 0.37
MDE_AST_15PA		nº PA: 15 mediciones: 41		0.51	0.38 0.21	0.34 0.27
geomde1p16pa	Aster1_123n	11		0.64	0.56	0.31
	Aster1_3b	13	8	0.52	0.21 0.39	0.01 0.35
geomde2p16pa	Aster2_123n	8	8	0.56	0.18 0.37	0.43 0.42
	Aster2-3b	11	8	0.46	0.22 0.26	0.01 0.37
MDE_AST_16PA		nº PA: 16 mediciones: 43		0,52	0.40 0.21	0.34 0.27

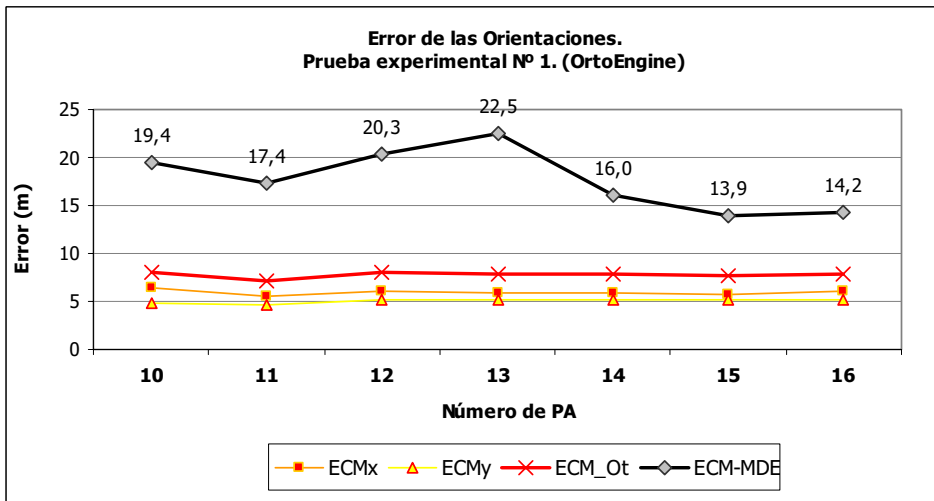


Figura 58. Comparación del ECM de los MDE según el número de puntos de apoyo y el ECM de las orientaciones (Prueba 1 con OrtoEngine).

5.4.4 Prueba 2: distribución espacial de los puntos de apoyo

La segunda prueba experimental tiene por objetivo analizar la influencia de la distribución de los PA empleados en la generación de los modelos estereoscópicos. Las diferentes distribuciones de PA empleadas van a ser las mismas que las diseñadas en el capítulo anterior en esta misma prueba experimental pero con datos SPOT.

Esta prueba sólo se ha podido realizar con el programa OrthoBase Pro ya que en OrthoEngine el número de puntos (9) ha sido insuficiente por estar la zona dividida en dos escenas. Este es uno de los inconvenientes que surgen al no poder realizar un mosaico de las imágenes antes de realizar los procesos de orientación.

Como ya vimos en el caso SPOT, se han usado 4 configuraciones:

- A: es una distribución homogénea donde se han repartido los PA en los cuatro cuadrantes del área de estudio. Se puede considerar la mejor distribución de las cuatro.
- B: existen puntos en los cuatro cuadrantes pero se ha dado más peso a los cuadrantes inferiores.
- C: los PA elegidos se seleccionaron únicamente en los dos cuadrantes inferiores.
- D: los puntos seleccionados se concentran en un alto porcentaje en un cuadrante.

5.4.4.1 Prueba experimental 2 en OrthoBase Pro

Los MDE son de estructura TIN y en la estrategia de correlación se fijaron los siguientes valores: ventana de búsqueda de 21x3, ventana de correlación de 9x9 y un límite del coeficiente de correlación de 0,65. La redundancia del sistema es la misma que en la primera prueba de este capítulo: un 108%.

Los resultados del test estadístico de error de cada uno de los cuatro MDE generados se muestran en la Tabla 70 y la fiabilidad del error en la Tabla 71. Se puede observar en los resultados que no existe una relación aparente entre la mejor o peor distribución de los PA y el error del MDE como sucedió en el caso SPOT.

Tabla 70. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 2 con OrthoBase Pro); todos los datos en metros.

Distribución	ECM	s	EM	E _{max}	E _{min}
A	47,62	37,57	-25,20	188,00	-200,00
B	43,18	36,77	22,80	249,00	-53,78
C	81,91	70,95	66,29	204,45	-184,00
D	46,37	34,89	12,39	263,00	-70,20

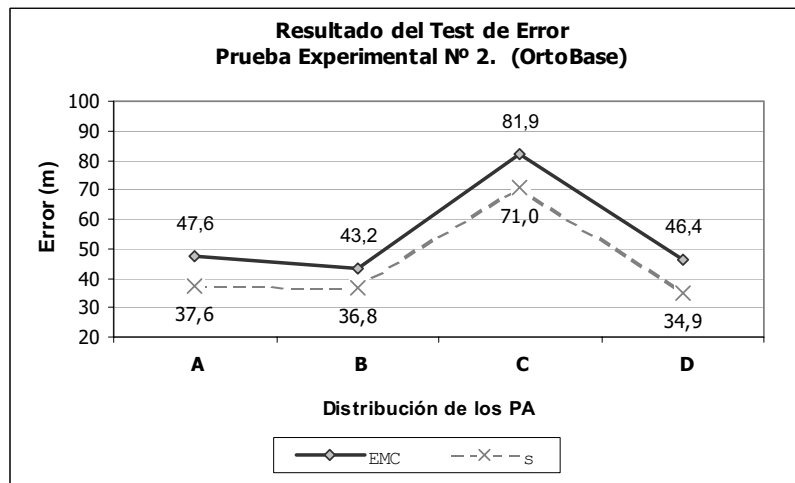


Figura 59. Representación gráfica de los errores (ECM y s); prueba 2 con OrthoBase Pro.

Tabla 71. Intervalos de confianza para s (Prueba 2 con OrthoBase PRO).

Distribución	s (m)	Intervalo (95%)
A	37,57	± 2.95
B	36,77	± 2.88
C	70,95	± 5.56
D	34,89	± 2.74

Tabla 72. Error de las orientaciones según el número de PA (prueba 2 con OrthoBase Pro); todos los errores en píxeles.

Distribución	ECM O_x	ECM O_y	ECM O_z	ECM O_T
A	0,20	0,25	1,50	0,43
B	0,14	0,76	2,43	0,46
C	0,21	0,96	2,35	0,98
D	0,12	0,85	2,72	0,41

Tabla 73. Comparación del error de las orientaciones con el error del MDE (Prueba 2 con OrthoBase Pro); todos los errores en metros.

Distribución	ECM O_x	ECM O_y	ECM O_z	ECM O_T	EMC MDE
A	3,00	3,75	22,50	6,45	47,62
B	2,10	11,40	36,45	6,90	43,18
C	3,15	14,40	35,25	14,70	81,91
D	1,80	12,75	40,80	6,15	46,37

5.4.5 Prueba 3: estructura del MDE

Esta prueba no se ha podido llevar a cabo en ninguno de los programas disponibles por los motivos que se exponen a continuación:

- Se ha verificado que OrthoBase Pro sólo realiza MDE con estructura TIN y que en el caso de seleccionar como dato de salida una estructura GRID lo que realmente realiza el programa es una interpolación posterior de acuerdo con el tamaño de malla que se pida.
- En el caso de OrthoEngine, dicho programa sólo permite la generación de MDE con estructura GRID.

5.4.6 Prueba 4: tamaño de malla

En las pruebas análogas realizadas con las imágenes SPOT se obtuvieron resultados bastantes claros sobre la posibilidad de realizar las correlaciones obviando la regla de usar distancias equivalentes a los 10 píxeles. En el caso de Socet Set con SPOT-HRV, los resultados obtenidos mostraron que el error del MDE mejoraba en función de la disminución de esta distancia de correlación hasta el límite inferior de los dos píxeles.

Los resultados obtenidos en OrthoBase Pro no aclararon la cuestión debido a que las estructuras raster generadas son en realidad falsas en el sentido de que se generan por interpolación a partir del TIN. En consecuencia, con imágenes ASTER sólo se va a realizar esta prueba experimental con Geomatica OrthoEngine.

5.4.6.1 Prueba experimental 4 en OrthoEngine

Los MDE generados en esta prueba se realizaron a partir del mismo ajuste matemático en la orientación de las imágenes. Este se realizó con 15 PA y con 16 PP; los resultados del ajuste (ECM) fueron, en los PA, de 0,38 píxeles en la componente X, de 0,34 píxeles en la componente Y y de 0,51 en la componente total planimétrica. En los PP el error de ajuste de las orientaciones (ECM) fue de 0,21 píxeles en X, 0,27 píxeles en Y mientras que la componente cuadrática de las dos anteriores de 0,34 píxeles.

La generación de los MDE en OrthoEngine deja poca flexibilidad para configurar las estrategias de extracción de las elevaciones; de hecho sólo es posible determinar el tamaño de malla, la variable analizada en este caso. En cambio, no es posible seleccionar tipos de algoritmos de correlación ni realizar una depuración en función del coeficiente de correlación.

Los MDE se han generado para tamaño de malla de 15, 30, 60 y 120 m ya que OrthoEngine sólo permite seleccionar valores equivalentes a 1, 2, 4 y 8 píxeles. Tras la generación de los MDE, se realizaron los tests de error con los 315 PC cuyos resultados se muestran en la Tabla 74 y Figura 60.

Tabla 74. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 4 con OrthoEngine); todos los datos en m.

Malla	ECM	s	EM	Emax	Emin
120	19,83	19,74	-0,43	56,3	0,04
60	17,74	17,07	-4,37	79,9	0,03
30	12,62	12,53	-1,50	48,8	0,00
15	17,54	16,77	-5,13	43,6	0,00

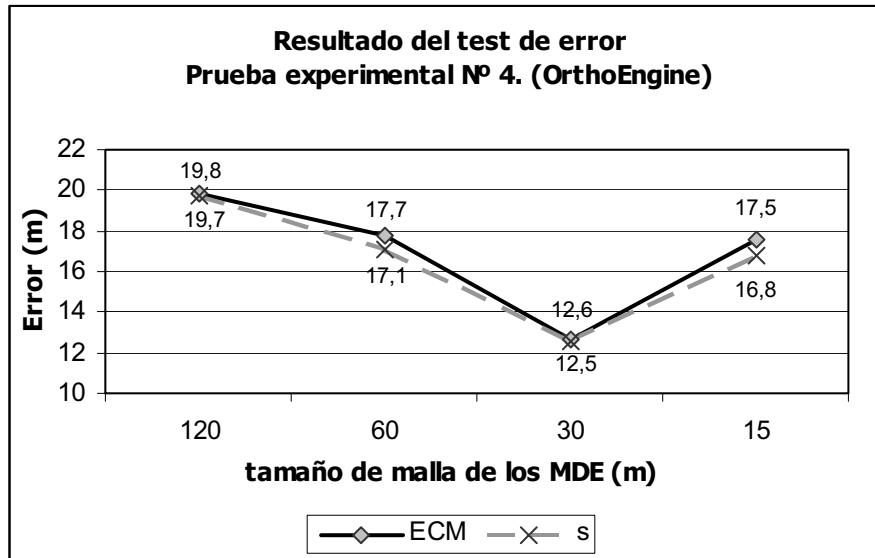


Figura 60. Representación gráfica del error (ECM y s) en la Prueba 4 con OrthoBase PRO.

El error de cada MDE como desviación estándar y su fiabilidad se presentan en la Tabla 75.

Tabla 75. Intervalos de confianza para s (Prueba 4 con OrthoEngine); unidades en metros.

Tamaño de malla (m)	s	Intervalo (95%)
120	19,74	$\pm 1,55$
60	17,07	$\pm 1,34$
30	12,53	$\pm 0,98$
15	16,77	$\pm 1,31$

Esta prueba consolida la idea de que los mejores resultados se obtienen para pasos de malla equivalentes a los 2 píxeles.

5.4.7 Prueba 5: algoritmo de correspondencia de imágenes.

Dependiendo de cada programa, el algoritmo de correspondencia de imágenes tiene distintas posibilidades en la configuración de la estrategia de correlación. En OrthoBase Pro se permite configurar parámetros como el tamaño de las ventanas de búsqueda y de correlación. Sin embargo, con OrthoEngine no es posible ningún tipo de configuración alternativa salvo la ya ensayada de tamaño de la malla. Por este motivo, esta prueba experimental sólo se desarrolla en OrthoBase Pro.

5.4.7.1 Prueba experimental 5 en OrthoBase Pro.

En prueba experimental se han analizado dos parámetros: el tamaño de la ventana de búsqueda, y el tamaño de la ventana de correlación. En primer lugar se realizaron diferentes MDE variando el tamaño de la ventana de búsqueda y fijando los demás valores. El ajuste de las imágenes se realizó con 12 puntos de apoyo, con unos errores re-

siduales de 0.28 píxeles en la componente X, 0.04 píxeles en la componente Y y 2.45 píxeles en la componente Z, siendo el valor total del ajuste de 0,5 píxeles. Para la extracción de las elevaciones se configuraron las demás variables de la forma siguiente: estructura TIN, ventana de correlación de 21x3 y límite de correlación de 0.65. Se han realizado MDE con valores para la ventana de búsqueda de 3x3, 5x5, 7x7, 9x9, 11x11, 13x13 y 15x15.

En una segunda parte, y partiendo del mismo ajuste, se realizaron otros MDE variando el valor de la ventana de correlación y fijando el valor de la ventana de búsqueda en 13x13, el tamaño óptimo en la prueba realizada anteriormente. Los MDE generados son también de estructura TIN y el límite de correlación es de 0,65. Los valores de la ventana de correlación han variado entre los siguientes valores: 15x3, 19x1, 21x3, 25x5, 27x7.

Los valores de los resultados de los tests de error realizados con los 315 PC se muestran en la Tabla 76 y en las Figura 61 y Figura 62.

Tabla 76. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 5 con OrthoBase PRO); todos los datos en metros.

Ventana de búsqueda	ECM	s	EM	E _{max}	E _{min}
3 x 3	36,87	29,82	-10,36	81,18	-115,67
5 x 5	36,87	29,82	-10,36	81,18	-115,67
7 x 7	36,87	29,82	-10,36	81,18	-115,67
9 x 9	37,34	30,20	-10,57	154,45	-116,90
11 x 11	36,26	29,58	-10,77	52,86	-125,01
13 x 13	34,84	28,85	-9,69	49,91	-113,45
15 x 15	32,08	26,76	-11,20	42,20	-53,85
Ventana de correlación	ECM	s	EM	E _{max}	E _{min}
15 x 3	34,84	28,85	-9,69	49,91	-113,14
19 x 1	38,83	30,72	-9,24	68,35	-198,09
21 x 3	34,84	28,85	-9,68	49,91	-113,14
23 x 5	35,11	29,16	-9,91	49,91	-113,14
25 x 5	35,11	29,16	-9,91	49,91	-113,14
27 x 7	34,93	29,05	-9,79	49,91	-113,14

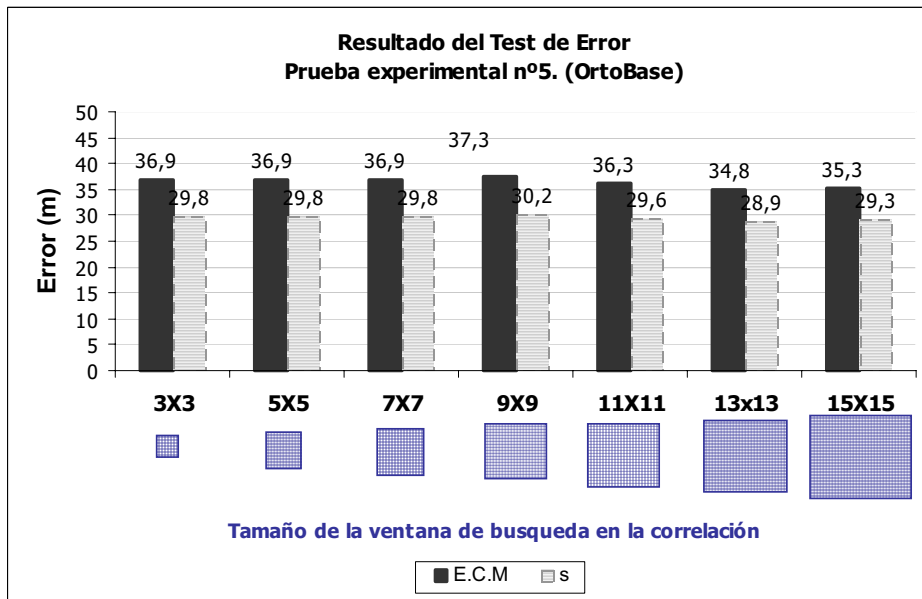


Figura 61. Valores ECM y s de los MDE según el tamaño de la ventana de correlación (Prueba 5 con OrthoBase Pro).

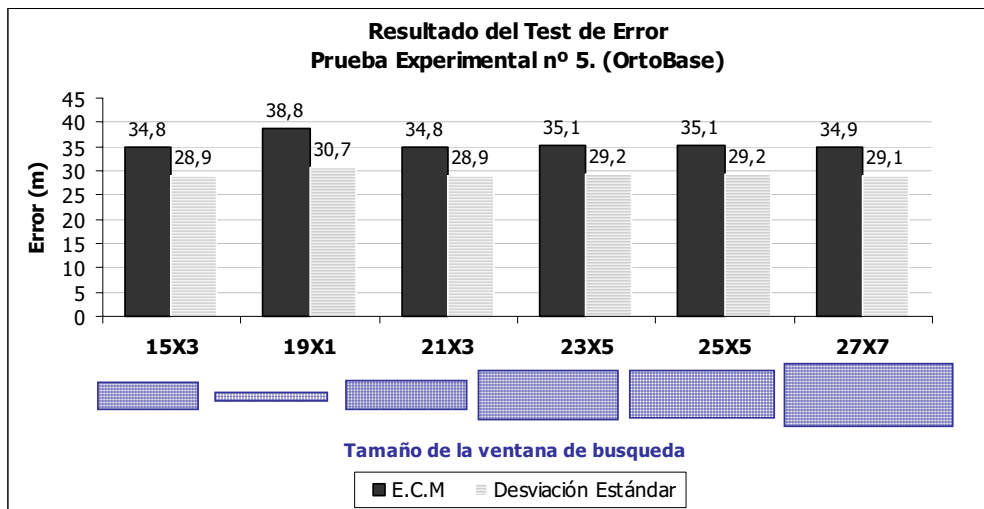


Figura 62. Valores de ECM y s según el tamaño de la ventana de búsqueda en la estrategia de correlación (Prueba 5 con Orthobase Pro).

Los valores de fiabilidad se muestran en la Tabla 77.

Tabla 77. Intervalos de confianza para s (Prueba 4 con OrthoBase PRO); unidades en metros.

ventana correlación	s	Fiabilidad
3 x 3	29,82	± 2,34
5 x 5	29,82	± 2,34
7 x 7	29,82	± 2,34
9 x 9	30,20	± 2,37
11 x 11	29,58	± 2,32
13 x 13	28,85	± 2,26
15 x 15	26,76	± 2,29
Ventana búsqueda	s	Fiabilidad
15 x 3	28,85	± 2,26
19 x 1	30,72	± 2,41
21 x 3	28,85	± 2,26
23 x 5	29,16	± 2,29
25 x 5	29,16	± 2,29
27 x 7	29,05	± 2,28

Puede observarse que, en este caso, los valores de error son muy similares por lo que podemos concluir que las variables que hemos podido utilizar para definir estrategias de correlación no tienen una influencia práctica en los resultados. Este resultado era previsible ya que este tipo de estrategias sólo tiene influencia potencial en el tiempo empleado para realizar los cálculos, al tener que analizar diferentes ventanas de búsqueda.

5.4.8 Prueba 6: coeficiente de correlación

En el capítulo cuatro ya se comprobó que el coeficiente de correlación puede ser un buen indicador de fiabilidad como criterio para depurar un MDE. Dependiendo del programa se puede seleccionar el umbral de este coeficiente para que el punto sea integrado o no como parte del MDE; este es el caso de OrthoBase Pro. Sin embargo, Geomatica OrthoEngine no deja posibilidad para incorporar este filtro por lo que el análisis de esta variable sólo se desarrolla con OrthoBase Pro.

5.4.8.1 Prueba experimental 6 en OrthoBase PRO

Los MDE generados en esta última prueba fueron con los siguientes parámetros fijos: el ajuste de las imágenes se realizó con 12 PA, con unos errores residuales de 0.18 píxeles en la componente X, 0.31 píxeles en la componente Y y 2.17 píxeles en la componente Z, siendo el valor total del ajuste es de 0,55 píxeles. Las demás variables en la extracción de las elevaciones son: estructura TIN, tamaño de la ventana de correlación de 21x3 y tamaño de la ventana de búsqueda de 9x9.

En la Tabla 78 se muestran los MDE generados con los valores de límite de coeficiente de correlación y el número de puntos extraídos en cada caso; como es obvio, a mayor restricción en cuanto al coeficiente, un menor número de puntos será el que pase el filtro. Los resultados de los tests de error se presentan en la Tabla 79 y en la Figura 63.

Tabla 78. Listado de los MDE incluidos en la prueba, los valores de correlación (r) y los puntos que los forman (Prueba 6 con OrthoBase PRO).

Nombre del MDE	Umbral para r	Núm. de puntos
MDE_ASTER_CC60	0,60	152.113
MDE_ASTER_CC65	0,65	139.220
MDE_ASTER_CC70	0,70	124.799
MDE_ASTER_CC75	0,75	108.740
MDE_ASTER_CC80	0,80	90.226
MDE_ASTER_CC85	0,85	68.378
MDE_ASTER_CC90	0,90	42.782
MDE_ASTER_CC95	0,95	13.375

Tabla 79. Estadísticos básicos de los tests de error (Prueba 6 con OrthoBase PRO); todos los datos en metros.

MDE	EM	ECM	s
MDE_ASTER_CC60	-11,04	36,12	29,49
MDE_ASTER_CC65	-10,57	37,34	30,20
MDE_ASTER_CC70	-10,83	36,48	29,92
MDE_ASTER_CC75	-11,18	36,13	29,56
MDE_ASTER_CC80	-11,06	36,79	30,33
MDE_ASTER_CC85	-11,92	39,93	31,93
MDE_ASTER_CC90	-10,33	41,09	33,37
MDE_ASTER_CC95	+8,52	32,37	21,81

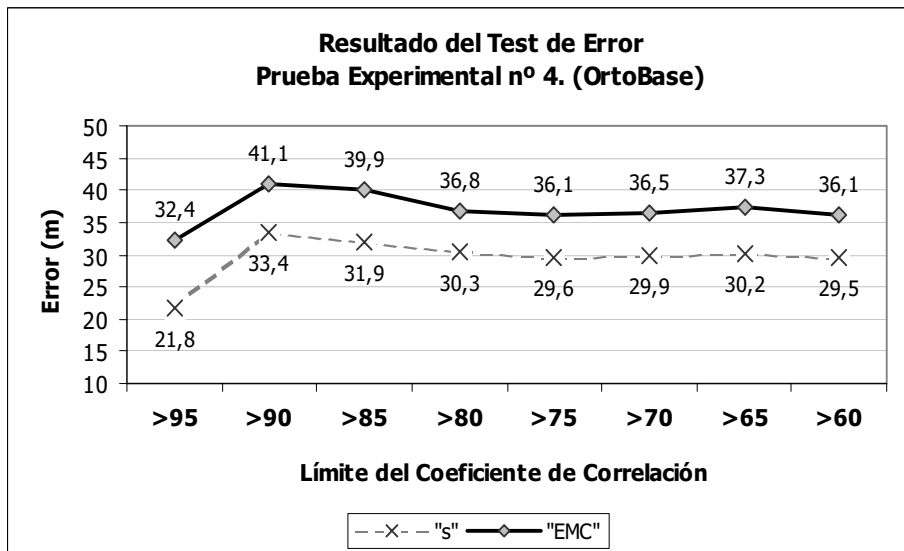


Figura 63. Valores de ECM y s de los MDE (Prueba 6 con OrthoBase PRO).

Como en todas la pruebas realizadas se ha calculado la fiabilidad del error de cada MDE cuyos valores se muestran en la Tabla 80.

Tabla 80. Desviación estándar e intervalo de confianza al 95% (prueba 6 con OrthoBase Pro); datos en metros.

MDE	<i>s</i>	Intervalo (95%)
MDE60	21,81	±2,31
MDE65	33,37	±2,37
MDE70	31,93	±2,35
MDE75	30,33	±2,32
MDE80	29,56	±2,38
MDE85	29,92	±2,50
MDE90	30,20	±2,62
MDE95	29,49	±1,71

En los informes sobre la exactitud de los puntos extraídos en OrthoBase Pro se clasifican los puntos con los siguientes intervalos de coeficiente de correlación: excelente ($r > 0,85$), buenos ($0,85 > r > 0,70$), regulares ($0,70 > r > 0,50$) y sospechosos ($r < 0,50$). En la Tabla 81 se presenta el porcentaje respectivo para cada clase en cada MDE.

Tabla 81. Calidad de los puntos generados (Prueba 6 con OrthoBase Pro).

MDE	Núm. de puntos	Excel. (%) $r > 0,85$	Buenos (%) $0,85 > r > 0,70$	Med. (%) $0,70 > r > 0,50$	Sosp. (%) $r < 0,50$
MDE60	152.113	54	33	9	4
MDE65	139.220	56	35	5	4
MDE70	124.799	60	37	0	3
MDE75	108.740	65	32	0	3
MDE80	90.226	76	21	0	3
MDE85	68.378	97	0	0	3
MDE90	42.782	96	0	0	4
MDE95	13.375	93	0	0	7

Los resultados de las pruebas muestran que el MDE más exacto es el generado con el límite de coeficiente de correlación más restrictivo, de 0,95; pero este resultado parece casual en el sentido de que la tendencia general en el resto es diferente. Si no consideramos el MDE95, el de menor error es el construido con un límite de coeficiente de correlación de 0,60.

5.5 Conclusiones

A lo largo de este capítulo se han realizado múltiples pruebas, obteniéndose como conclusiones generales las siguientes:

- Se verifica la eficacia de los métodos automáticos de correspondencia de imágenes en la generación de MDE en el caso de las imágenes TERRA-ASTER. Los errores de elevación obtenidos están entre los 13,9 y 37 metros, es decir, equivalentes a 0,9 y 2,5 píxeles respectivamente.
- Una de las principales cuestiones que ha surgido es la importancia de disponer de puntos de apoyo y control exactos. En el caso de las imágenes TERRA-ASTER las pruebas se han realizado aprovechando datos ya existentes. Por esto, los resultados obtenidos han estado limitados por la dificultad de localizar los puntos de apoyo en las imágenes.
- Las aplicaciones informáticas empleadas para trabajar con estas imágenes presentan limitaciones para su configuración y permiten poca libertad a la hora de definir las variables potencialmente influyentes en la generación de los MDE. Un factor importante, que puede suponer muchas horas de trabajo, es la posibilidad o no de realizar mosaicos de las imágenes previos a los procesos de orientación. En el caso de OrthoEngine, que no permite realizar esta operación de mosaico hasta que los datos no están georreferenciados, es necesario disponer de más puntos de apoyo para realizar las orientaciones ya que se trabaja con escenas independientes. El área de trabajo en nuestro caso es marginal en ambas escenas lo que ha podido influir también en los resultados.

Otras conclusiones más específicas, respuesta a las cuestiones planteadas inicialmente, son las que se detallan a continuación.

Prueba experimental 1

En el caso de ASTER, al igual que en SPOT, se verifica que el número de puntos de apoyo tiene escasa influencia en el error final del MDE.

Cada aplicación proporciona datos diferentes sobre los errores de ajuste de las imágenes. En el caso de OrthoBase, la aplicación proporciona errores de ajustes de tres componentes, X, Y y Z, mientras que en OrthoEngine sólo se muestra para dos componentes (X e Y). Por otro lado, en OrthoBase el error total de las orientaciones es inferior al ECM del MDE, de donde se deduce que el error del MDE está afectado por otras causas. Esto también sucede en las pruebas realizadas en OrthoEngine.

En la documentación consultada en Geomatica OrthoEngine se recomienda un número mínimo de 6 a 8 puntos de apoyo y se sugiere incrementar dicho mínimo para mejorar la exactitud de los resultados. En las pruebas realizadas con OrthoEngine sí parece bajar el error del MDE al aumentar el número de puntos de apoyo, aunque al no tener un número suficiente puntos identificables en las imágenes no podemos confirmar dicha tendencia.

Prueba experimental 2

Las pruebas realizadas con ASTER confirman los resultados obtenidos sobre la influencia de la distribución de los puntos de apoyo en los resultados de los ajustes de las imágenes.

De las dos aplicaciones disponibles, sólo se realizó las pruebas en el caso de OrthoBase, ya que con OrthoEngine la orientación debía hacerse con las dos escenas y no existían puntos de apoyo en cantidad suficiente.

En los resultados obtenidos en OrthoBase se aprecia que en la peor distribución, el

error del MDE alcanza los 81,9 m, muy por encima de las posibilidades que ofrecen estos datos. Por tanto, la distribución de los puntos de apoyo debe ser homogénea para aprovechar al máximo las posibilidades de la información.

Prueba experimental 3

En esta prueba se analizan las posibles diferencias entre estructuras del MDE. Las aplicaciones disponibles en este capítulo no han permitido realizar este ensayo ya que sólo permiten generar los MDE de acuerdo con una única estructura: raster en OrthoEngine y vectorial (TIN) en OrthoBase Pro.

Prueba experimental 4

El tamaño óptimo de malla en la generación automática de un MDE con imágenes estereoscópicas ASTER es de 30 m, es decir dos veces el tamaño del píxel en el terreno. Con los datos SPOT se obtuvo el mismo resultado: 20 m para un píxel de 10 m.

El incremento del error que se observa al reducir el tamaño de malla a 1 píxel no es fácil de explicar; cabe pensar en algún problema de los algoritmos que puedan no estar diseñados para estos pequeños (aunque posibles) incrementos. El tamaño de malla seleccionado para generar el MDE va asociado al nivel de generalización del terreno a representar por lo que la optimización de esta variable es una cuestión importante a la hora de utilizar eficazmente la información contenida en las imágenes.

Prueba experimental 5

Las posibilidades de configuración de la estrategia de correlación son variables en las aplicaciones utilizadas. En OrthoBase Pro se pueden configurar algunos parámetros como el tamaño de la ventana de búsqueda y de correlación, mientras que en OrthoEngine no se puede configurar ninguno. Por este motivo, la prueba sólo tuvo sentido en el caso de OrthoBase, donde se obtuvo que el tamaño de ventana de búsqueda óptimo fue de 13x13, mientras que el programa por defecto tiene configurado 9x9, y el tamaño de ventana de correlación óptimo ha sido de 21x3.

Prueba experimental 6

El coeficiente de correlación es parámetro de interés a la hora de valorar la fiabilidad de los datos de elevación extraídos. Por esto, algunas aplicaciones proporcionan información sobre la calidad de los datos extraídos en función de este coeficiente. En las dos aplicaciones empleadas, OrthoBase es la única que permite configurar el umbral del coeficiente de correlación de las elevaciones a extraer. En esta prueba se emplea el valor del coeficiente de correlación como parámetro para decidir la densidad de puntos que tendrá el MDE.

Capítulo 6 Análisis comparativo de MDE-SPOT, MDE-TERRA y MDE generados a partir de cartografía

6.1 Introducción

En los capítulos anteriores se han analizado las variables influyentes en la generación de MDE a partir de imágenes estereoscópicas espaciales SPOT-HRV y TERRA-ASTER. A través de las pruebas experimentales se han construido los "mejores" MDE posibles para cada fuente de datos en la zona de estudio. Definidos estos modelos, otro objetivo de este trabajo es compararlos con un MDE generado a partir de cartografía topográfica convencional.

En consecuencia, analizaremos a continuación los MDE obtenidos con menor error según las pruebas experimentales y en función de la fuente de datos y la aplicación informática. Posteriormente se realizará la comparación con un MDE de origen cartográfico. El método empleado para realizar las comparaciones es mediante las diferencias de modelos y análisis de los residuos.

6.2 MDE generado a partir de imágenes SPOT-HRV

6.2.1 Procesado de datos SPOT-HRV con Socet Set

El MDE con menor error generado en Socet Set se ha realizado empleando los valores que mejores resultados han generado en cada una de las pruebas experimentales.

De la primera y segunda prueba experimental se deduce que el número de PA no es influyente en el error final del MDE pero si la distribución de dichos puntos. La tercera prueba experimental demostró que la estructura de los datos no era un factor importante pero la cuarta prueba mostró que en el caso de una estructura raster, los mejores resultados se obtenían para un tamaño de malla equivalente a los dos píxeles (20 m). Finalmente, en la quinta prueba experimental se comprobó que la estrategia de correlación específica de SPOT en Socet Set no conseguía resultados óptimos y que daba mejores resultados la estrategia adaptativa. El modelo se construirá en consecuencia, con 13 puntos de apoyo distribuidos homogéneamente, estructura matricial, 20 m de tamaño de malla y estrategia de correlación adaptativa.

El MDE generado directamente con los estos valores está formado por un total de 2.203.739 puntos. En la última prueba experimental ya se verificó la eficacia de reducir los puntos del MDE mediante un filtrado en función del coeficiente de correlación. Realizado este filtro para un valor umbral de $r=0,90$, nos quedaría una estructura TIN con un 36% de los puntos iniciales aproximadamente. En la Figura 64 se muestra una representación gráfica del MDE donde se ha añadido un sombreado analítico para facilitar la interpretación del relieve.

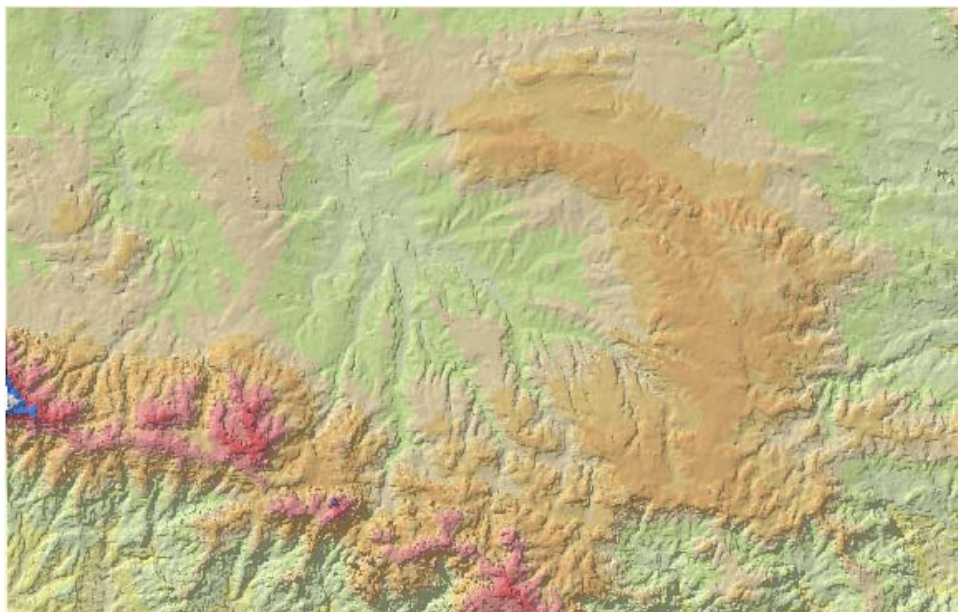


Figura 64. Representación del MDE SPOT SS.

Análisis del error

El análisis del error se realiza con la misma muestra de puntos de control empleada en las pruebas experimentales de capítulos anteriores. Los estadísticos básicos para el MDE raster sin depurar son: $-4,59$ m de EM; $8,59$ m de ECM, y una desviación estándar de $7,27$ m. La fiabilidad del error es del 4%, por lo que el valor de desviación estándar es de $7,27 \pm 0,57$ m con el 95% de confianza.

Tras la depuración con el valor umbral de $r=0,90$ el número de puntos disminuye a 810394 (un 36% del valor inicial) y los valores de error mejoran: EM= $-4,29$ m, ECM= $8,07$ m y $s= 6,89 \text{ m} \pm 0,54$ m. Parece claro que es conveniente depurar el modelo original eliminando los puntos cuyo coeficiente de correlación es más bajo. En Socet Set esto es posible ya que el valor de correlación acompaña a cada valor de elevación.

En la Figura 65 y Tabla 82 se puede observar la distribución de los errores, donde los valores máximos no superan en ningún caso los ± 50 m.

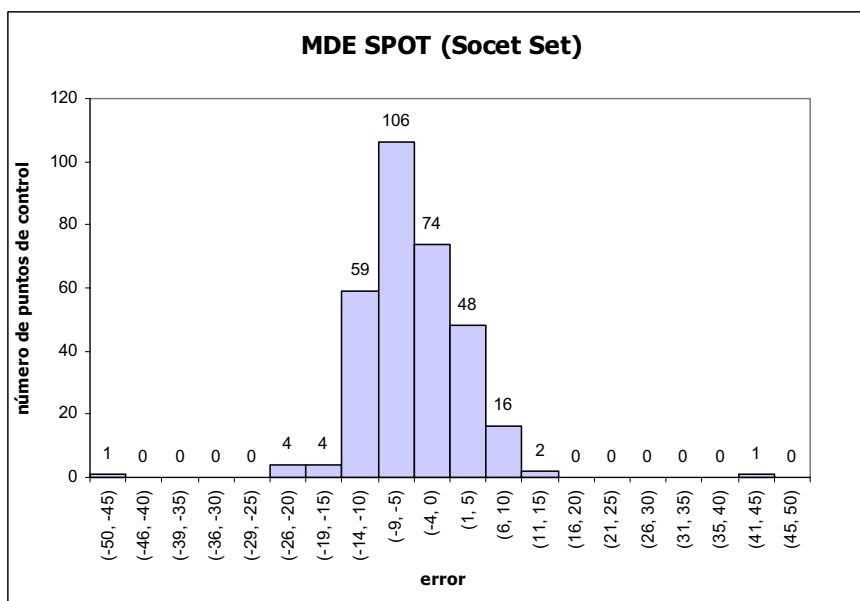


Figura 65. Histograma de los errores del MDE SPOT SS.

Intervalo del error	Núm. de puntos	%
(-50, -45)	1	0
(-46, -40)	0	0
(-39, -35)	0	0
(-36, -30)	0	0
(-29, -25)	0	0
(-26, -20)	4	1
(-19, -15)	4	1
(-14, -10)	59	19
(-9, -5)	106	34
(-4, 0)	74	23
(1, 5)	48	15
(6, 10)	16	5
(11, 15)	2	1
(16, 20)	0	0
(21, 25)	0	0
(26, 30)	0	0
(31, 35)	0	0
(35, 40)	0	0
(41, 45)	1	0
(45, 50)	0	0

6.2.2 Procesado de datos SPOT-HRV con OrthoBase Pro

En este caso, la mejor combinación de valores según las pruebas experimentales es: 14 puntos de apoyo distribuidos homogéneamente, estructura vectorial (TIN) y una estrategia de correlación definida por una ventana de correlación de 9x9, una ventana de búsqueda de 21x3 y un valor umbral de coeficiente de correlación de 0,65. Recordemos que Orthobase Pro no construye realmente estructuras raster sino que lo hace por interpolación a partir de un TIN.

El MDE generado con estos valores es un TIN con un total de 61060 puntos con la siguiente distribución en cuanto a la correlación: un 56% con $r > 0,85$, un 35 % con r entre 0,70 y 0,85 y un 6% entre 0,65 y 0,70; el restante 4% de los puntos con un $r < 0,65$ fue descartado.

En la Figura 66 se muestra una representación gráfica del MDE.

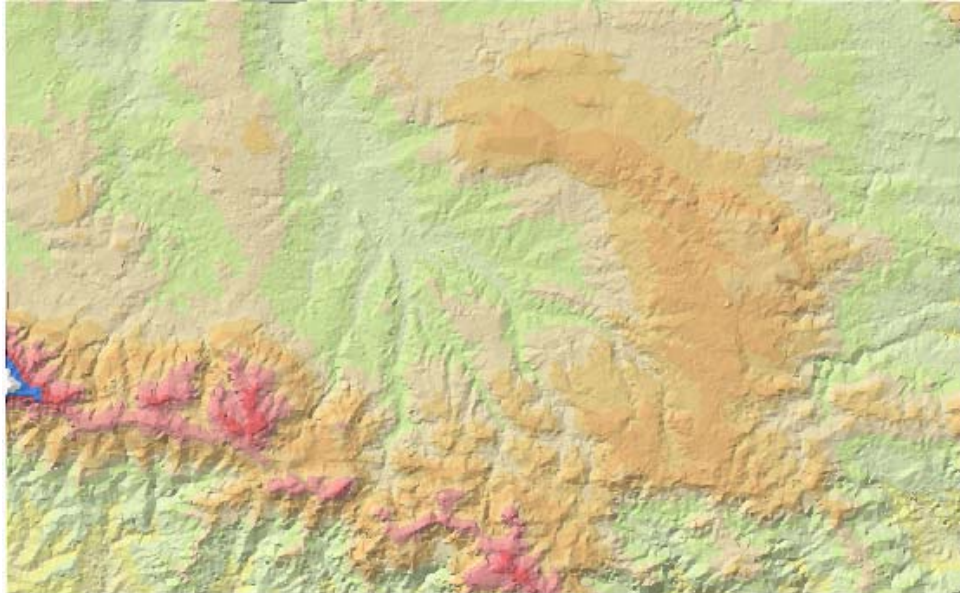


Figura 66. Representación del MDE SPOT OB.

Análisis del error

El análisis del error realizado con la muestra de 315 puntos de control presenta los siguientes resultados: $EM = 1,45$ m, $ECM = 7,69$ m y $s = 7,39$ m con un intervalo de confianza del 95% de $\pm 0,58$ m. En la Figura 67 y Tabla 83 se muestra la distribución de los errores, donde sólo existe un punto con error mayor de 50 m.

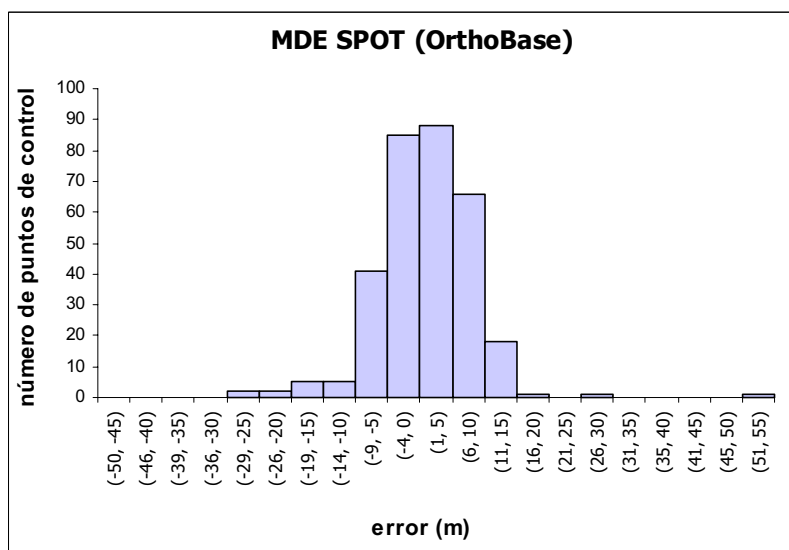


Figura 67. Histograma de los errores obtenidos en los puntos de control.

Tabla 83. Errores en los puntos de control.

Intervalo de error	Núm. de puntos	%
(-50, -45)	0	0
(-46, -40)	0	0
(-39, -35)	0	0
(-36, -30)	0	0
(-29, -25)	2	1
(-26, -20)	2	1
(-19, -15)	5	2
(-14, -10)	5	2
(-9, -5)	41	13
(-4, 0)	85	27
(1, 5)	88	28
(6, 10)	66	21
(11, 15)	18	6
(16, 20)	1	0
(21, 25)	0	0
(26, 30)	1	0
(31, 35)	0	0
(35, 40)	0	0
(41, 45)	0	0
(45, 50)	0	0
(51,55)	1	0

6.3 MDE generado a partir de imágenes TERRA-ASTER

En el capítulo 5 se analizaron las variables influyentes en la generación de un MDE a partir de imágenes TERRA-ASTER y, al igual que en SPOT, se utilizaron dos aplicaciones. A continuación se especifican los valores óptimos para cada caso.

6.3.1 Procesado de datos Terra-Aster con OrthoBase Pro

Como ya se ha indicado, OrthoBase Pro no dispone de un módulo específico para trabajar con imágenes TERRA-ASTER por lo que hubo que usar un procedimiento genérico. Tal vez este fue el motivo de los deficientes resultados conseguidos, incluso en el caso óptimo. Los parámetros usados fueron: 12 puntos de apoyo distribuidos homogéneamente, estructura TIN, ventana de correlación de 13x13, ventana de búsqueda de 21x3 y un valor umbral del coeficiente de correlación de 0,60.

La Figura 68 muestra la representación gráfica del MDE.

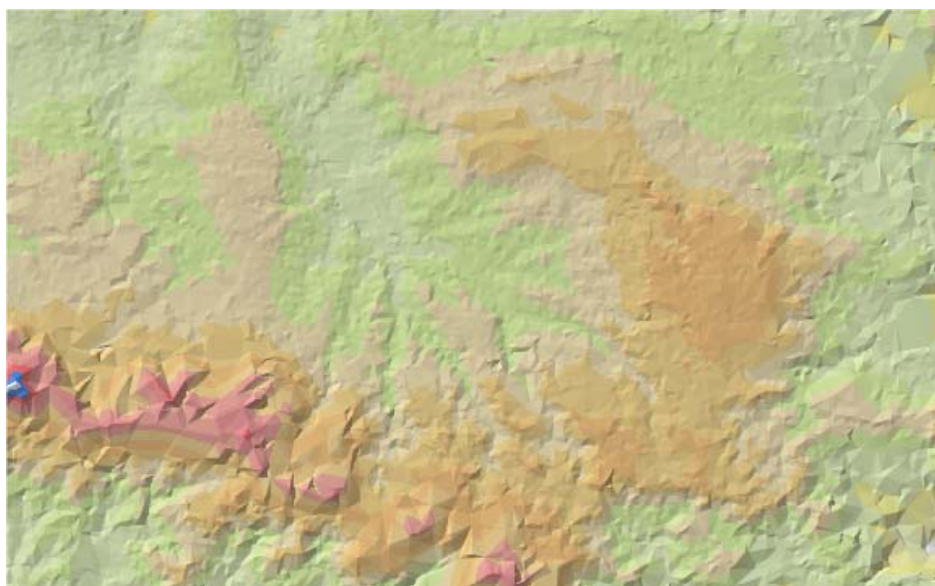


Figura 68. Representación del MDE construido con ASTER y OrthoBase Pro.

Análisis del error

Los resultados para el análisis realizado con los 315 puntos de control fueron: $EM = 9,7$ m, $ECM = 34,8$ m y $s = 28,8$ con un intervalo de confianza del 95% de $\pm 2,26$ m. En la Figura 69 y Tabla 84 se muestra la distribución de los errores, donde los valores máximos son de 113,3 m y $-50,0$ m.

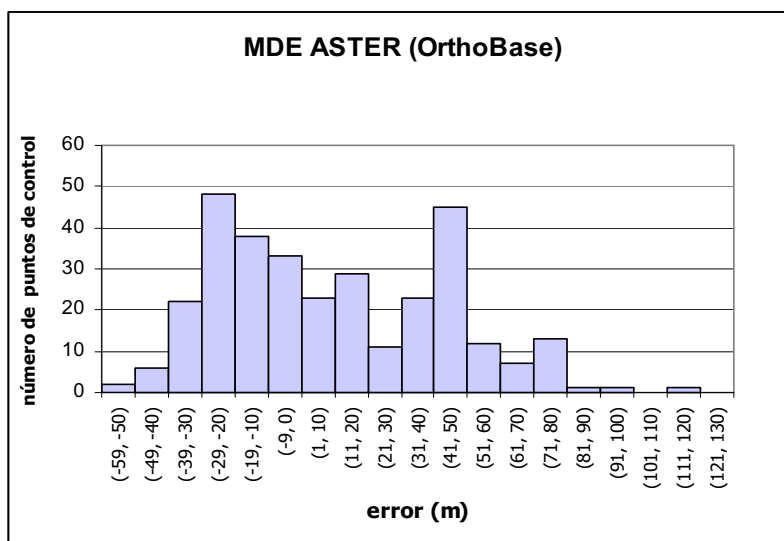


Figura 69. Histograma de los errores obtenidos en los puntos de control.

Tabla 84. Errores de los puntos de control.

Intervalo de error	Núm. de puntos	%
(-59, -50)	2	1
(-49, -40)	6	2
(-39, -30)	22	7
(-29, -20)	48	15
(-19, -10)	38	12
(-9, 0)	33	10
(1, 10)	23	7
(11, 20)	29	9
(21, 30)	11	3
(31, 40)	23	7
(41, 50)	45	14
(51, 60)	12	4
(61, 70)	7	2
(71, 80)	13	4
(81, 90)	1	0
(91, 100)	1	0
(101, 110)	0	0
(111, 120)	1	0
(121, 130)	0	0

6.3.2 Procesado de datos Terra-Aster con OrthoEngine

Los resultados obtenidos en OrthoEngine fueron mejores que en OrthoBase Pro posiblemente debido a la disponibilidad de un módulo específico para trabajar con imágenes TERRA-ASTER. De las pruebas experimentales desarrolladas se han deducido los valores más apropiados para obtener el MDE con menor error que, dentro de las muy limitadas posibilidades de modificación, han sido: 15 puntos de apoyo con distribución homogénea, estructura raster y 30 m de tamaño de malla (2 veces el tamaño de píxel). El MDE está formado por un total de 901379 puntos. En la Figura 70 se muestra la representación gráfica del MDE. Puede observarse la presencia de grandes errores, que se destacan debido al sombreado analítico incorporado a la imagen.

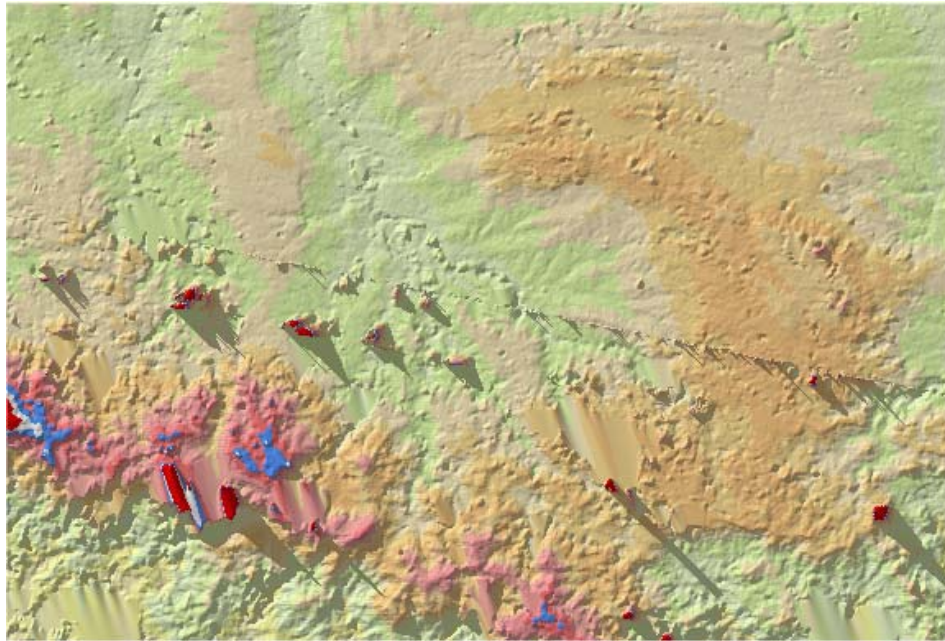


Figura 70. Representación del MDE ASTER OE.

Análisis del error

Los estadísticos fueron $EM = -1,5$ m, $ECM = 12,6$ m y $s = 12,5$ m con un intervalo de confianza de $\pm 1,0$ m. En la Figura 71 y Tabla 85 se muestra la distribución de los errores, donde existen algunos de hasta -200 m. Debe destacarse, sin embargo, que los numerosos errores puntuales visibles en la figura no se detectan en las pruebas estadísticas ya que los puntos de control no han coincidido en las zonas afectadas.

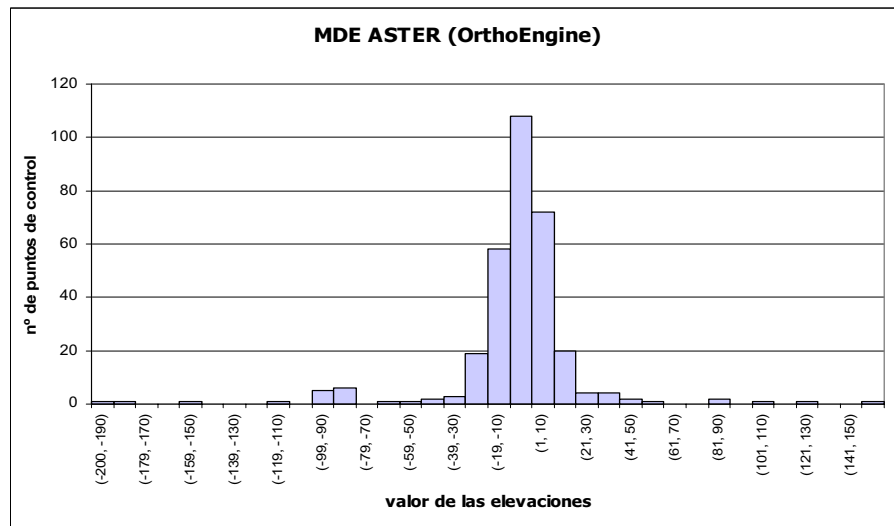


Figura 71. Histograma de los errores obtenidos en los puntos de control.

Tabla 85. Errores de los puntos de control.

error	nº puntos	%
(-200, -190)	1	0
(-189, -180)	1	0
(-179, -170)	0	0
(-169, -160)	0	0
(-159, -150)	1	0
(-149, -140)	0	0
(-139, -130)	0	0
(-129, -120)	0	0
(-119, -110)	1	0
(-109, -100)	0	0
(-99, -90)	5	2
(-89, -80)	6	2
(-79, -70)	0	0
(-69, -60)	1	0
(-59, -50)	1	0
(-49, -40)	2	1
(-39, -30)	3	1
(-29, -20)	19	6
(-19, -10)	58	18
(-9, 0)	108	34
(1, 10)	72	23
(11, 20)	20	6
(21, 30)	4	1
(31, 40)	4	1
(41, 50)	2	1
(51, 60)	1	0
(61, 70)	0	0
(71, 80)	0	0
(81, 90)	2	1
(91, 100)	0	0
(101, 110)	1	0
(111, 120)	0	0
(121, 130)	1	0
(131, 140)	0	0
(141, 150)	0	0
(151, 160)	1	0
(51, 60)	1	0
(61, 70)	0	0
(71, 80)	0	0
(81, 90)	2	1
(91, 100)	0	0
(101, 110)	1	0
(111, 120)	0	0
(121, 130)	1	0
(131, 140)	0	0
(141, 150)	0	0
(151, 160)	1	0

6.4 MDE generado a partir de cartografía topográfica

Este MDE fue generado por los servicios cartográficos de la Junta de Andalucía y completado en la Universidad de Córdoba²⁷ a partir de los mapas topográficos 1:50.000 del Servicio Geográfico del Ejército. La construcción del MDE raster a partir de las curvas de nivel digitalizadas se realizó con el SIG GRASS (<http://grass.baylor.edu/>). Una vez construido el MDE fue modificado para eliminar depresiones y picos aparentemente erróneos. En la Figura 72 se muestra su representación gráfica.

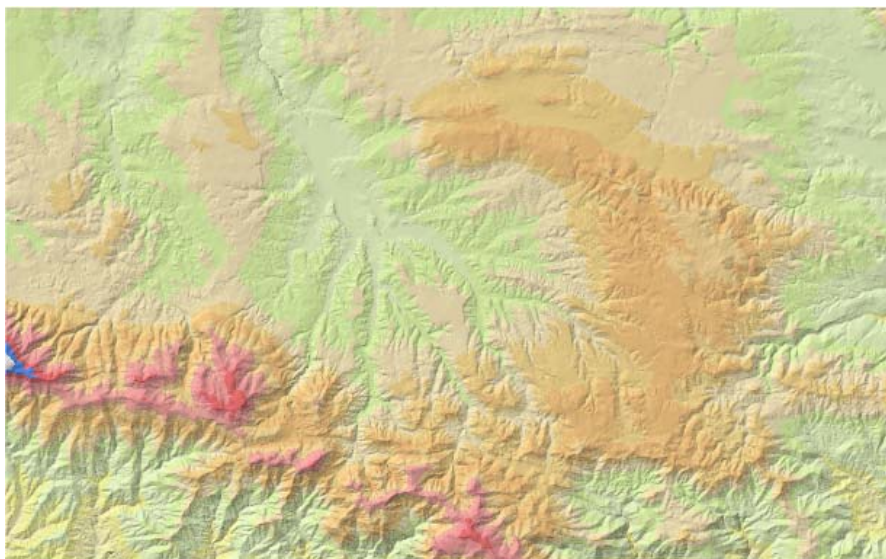


Figura 72. Representación del MDE generado a partir de cartografía.

Análisis del error

Como en el caso de SPOT-HRV y TERRA- ASTER, se realiza un análisis del error del MDE con la muestra de 315 puntos de control. Los estadísticos básicos del MDE generado con cartografía son: $EM=-1,1$ m de error medio; $ECM=7,9$ m y $s=7,8 \pm 0,6$ m.

En la Figura 73 y Tabla 86 se muestra la distribución de los errores, donde los errores máximos son de 62,2 y $-25,4$ m.

²⁷ En un Proyecto Fin de Carrera realizado por Enrique Garrido Jiménez, cuyo título es "*Comparación en la Explotación hidrológica y temática de pares SPOT frente a cartografía 1/50.000 mediante SIG. Aplicación a la cuenca de los Bermejales (GRANADA)*", para la especialización de Ingeniería Rural.

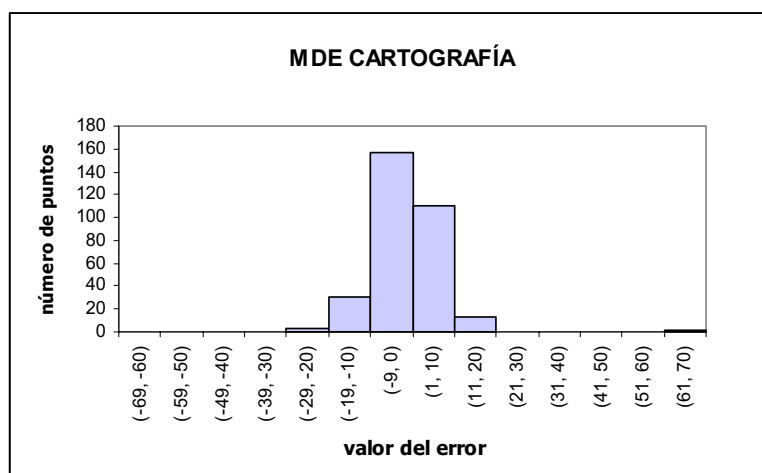


Figura 73. Histograma de los errores obtenidos en los puntos de control.

Tabla 86. Errores de los puntos de control.		
error	nº puntos	%
(-69, -60)	0	0
(-59, -50)	0	0
(-49, -40)	0	0
(-39, -30)	0	0
(-29, -20)	3	1
(-19, -10)	30	10
(1, 10)	157	50
(11, 20)	111	35
(21, 30)	13	4
(31, 40)	0	0
(41, 50)	0	0
(51, 60)	0	0
(61, 70)	0	0
(71, 80)	1	0

6.5 Análisis comparativo entre los MDE-SPOT, MDE-TERRA y MDE generado a partir de cartografía

Uno de los objetivos planteados en esta tesis es realizar una comparación entre el error de un MDE generado a partir de imágenes espaciales y un MDE generado desde cartografía convencional.

En la Tabla 87 se presenta el resumen de los estadísticos del error para los MDE; pueden apreciarse varias circunstancias:

- Tomando como referencia el MDE procedente de cartografía topográfica, los MDE SPOT presentan parámetros de error prácticamente iguales, con ECM entre los 7 y 8 m.
- Los MDE SPOT muestran resultados también iguales para las dos aplicaciones usadas.
- Los MDE ASTER muestran valores de error superiores a los anteriores y además hay una clara dependencia de la aplicación utilizada.
- Los mejores resultados SPOT y ASTER muestran valores de *s* inferiores al

tamaño de píxel (la relación es de 0,73 y 0,83 respectivamente).

Las diferencias relacionadas con el sensor pueden explicarse en razón a dos motivos por la disponibilidad o no de un módulo específico en la aplicación informática. Allí donde los hay se aprovechan los datos de cabecera y los valores de error son coherentes con el tamaño de píxel, como ocurre siempre para SPOT y sólo en OrthoEngine para ASTER. Orthobase no tiene un módulo específico y el resultado está lejos del óptimo posible.

Otro factor importante puede ser la selección de puntos de apoyo, más claramente distinguibles en las imágenes SPOT que en las ASTER. Los errores en la localización pueden haber penalizado los resultados obtenidos.

Tabla 87. Resumen de los mejores MDE generados.

Datos	Aplicación	Error			Fiabilidad de s
		EM	ECM	s	Intervalo 95%
SPOT	Socet Set	-4,6	8,6	7,3	$\pm 0,6$
	OrthoBase	1,5	7,7	7,4	$\pm 0,6$
ASTER	OrthoBase	9,7	34,8	28,8	$\pm 2,3$
	OrthoEngine	-1,5	12,6	12,5	$\pm 1,0$
CARTOGRAFÍA		-1,1	7,9	7,8	$\pm 0,6$

Calcular las diferencias entre los MDE permite analizar la presencia de disparidades en las estimaciones sin depender del conjunto limitado de puntos de control. Permite asimismo presentar visualmente la distribución espacial de estas diferencias con lo que puede ser posible deducir algunos resultados complementarios. Se han comparado todos los MDE con el precedente de cartografía y los modelos SPOT y ASTER entre sí.

En la representación gráfica de las diferencias entre modelos se ha mantenido una leyenda única con los mismos intervalos de clase. La Tabla 88 muestra los estadísticos básicos para las diferencias entre los MDE. Las abreviaturas son las siguientes: DM: diferencia media, Dmax: diferencia máxima positiva, Dmin: diferencia máxima negativa, Sd: desviación estándar de las diferencias (todos los datos en metros).

Tabla 88. Estadísticos básicos de las comparaciones entre los diferentes MDE.

	SPOT SS	Spot OB	ASTER OB	ASTER OE
Cartografía	DM = -6 Dmax = 225 Dmin = -588 Sd = 21	DM = 0 Dmax = 296 Dmin = -342 Sd = 20	DM = 24 Dmax = 421 Dmin = -431 Sd = 84	DM = -13 Dmax = 712 Dmin = -3682 Sd = 118
SPOT Socet Set		DM = -6 Dmax = 583 Dmin = -324 Sd = 22		
ASTER OrthoBase				DM = 33 Dmax = 3688 Dmin = -664 Sd = 142

En las figuras siguientes se muestra gráficamente la distribución de las diferencias entre los MDE, que serán comentadas a continuación.

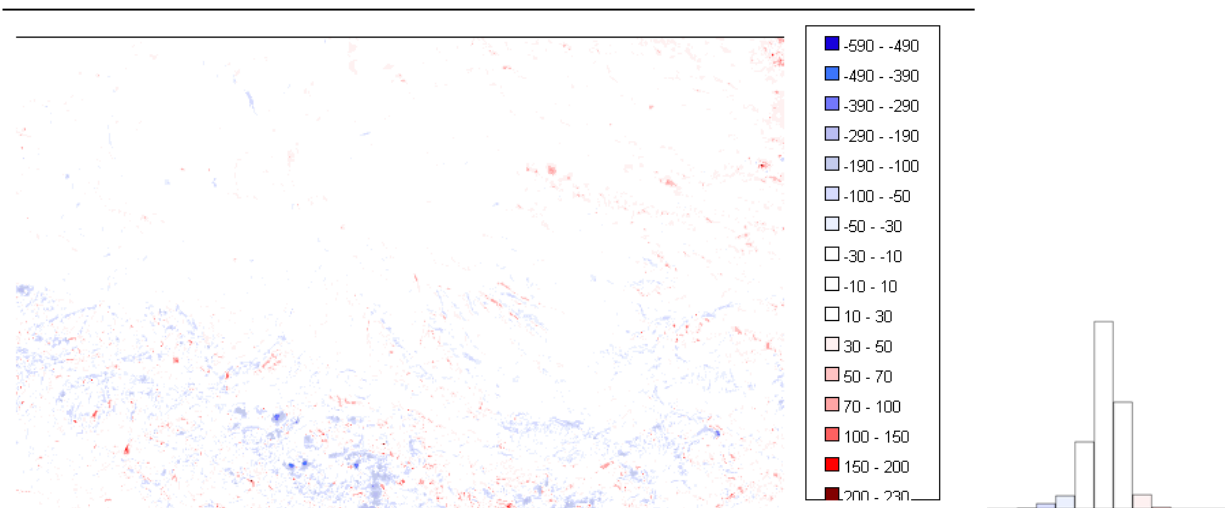


Figura 74. Diferencias entre MDE CARTO y MDE SPOT SS.

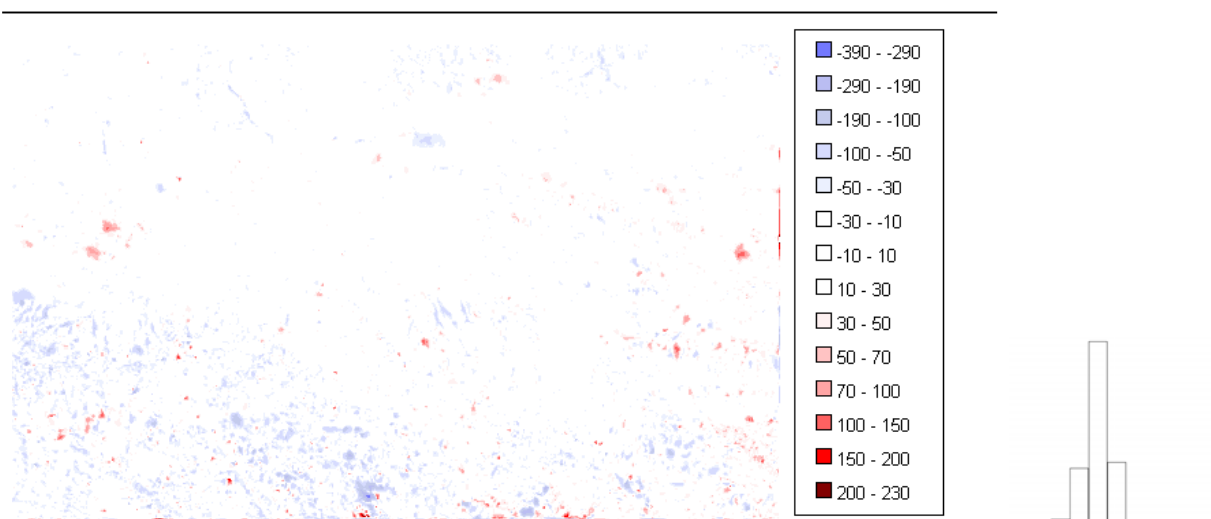


Figura 75. Representación del modelo diferencia entre MDE CARTO y MDE SPOT OB.

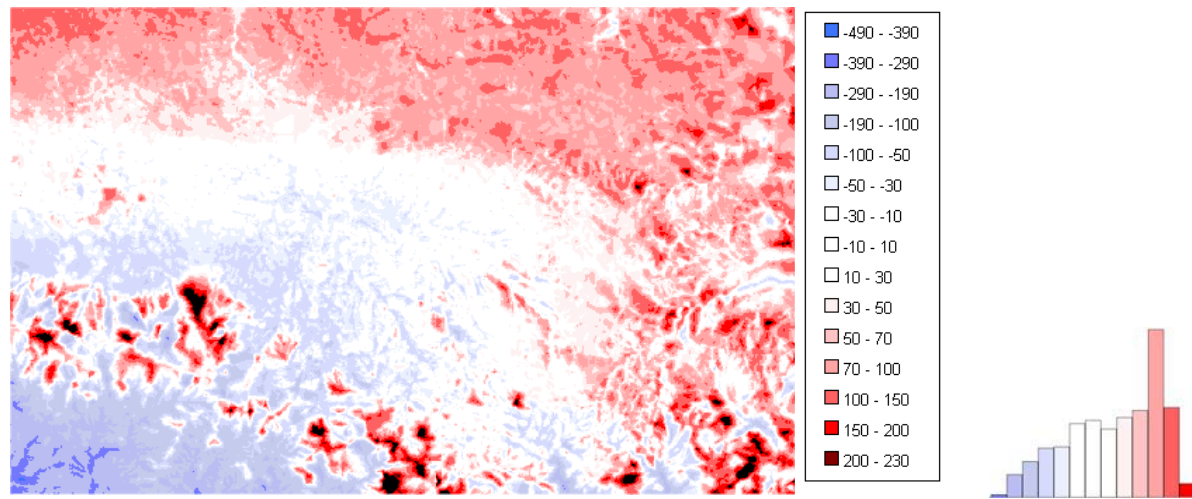


Figura 76. Representación del modelo diferencia entre MDE CARTO y MDE TERRA OB.

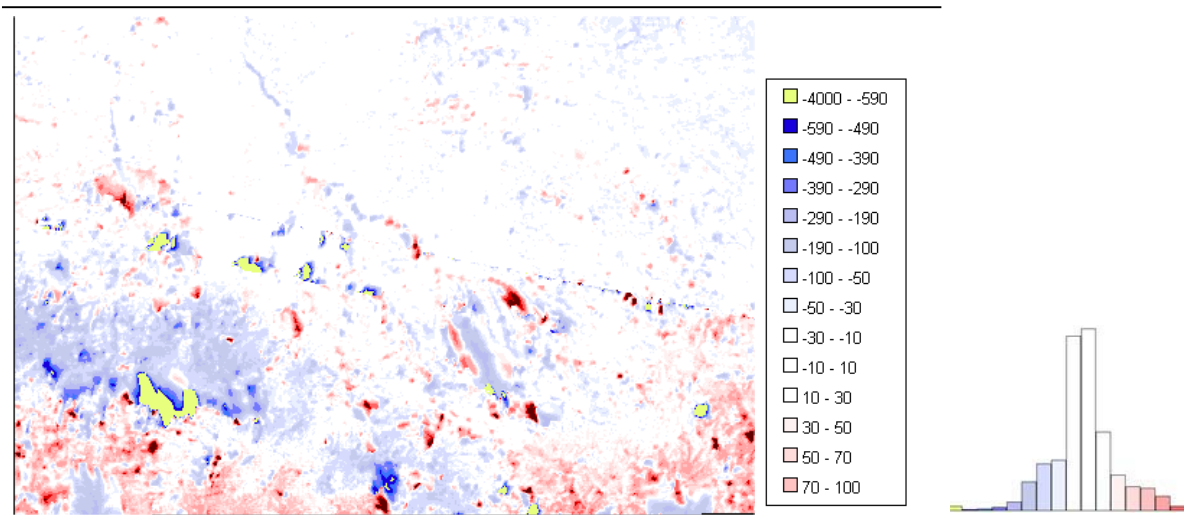


Figura 77. Representación del modelo diferencia entre MDE CARTO y MDE TERRA OE.

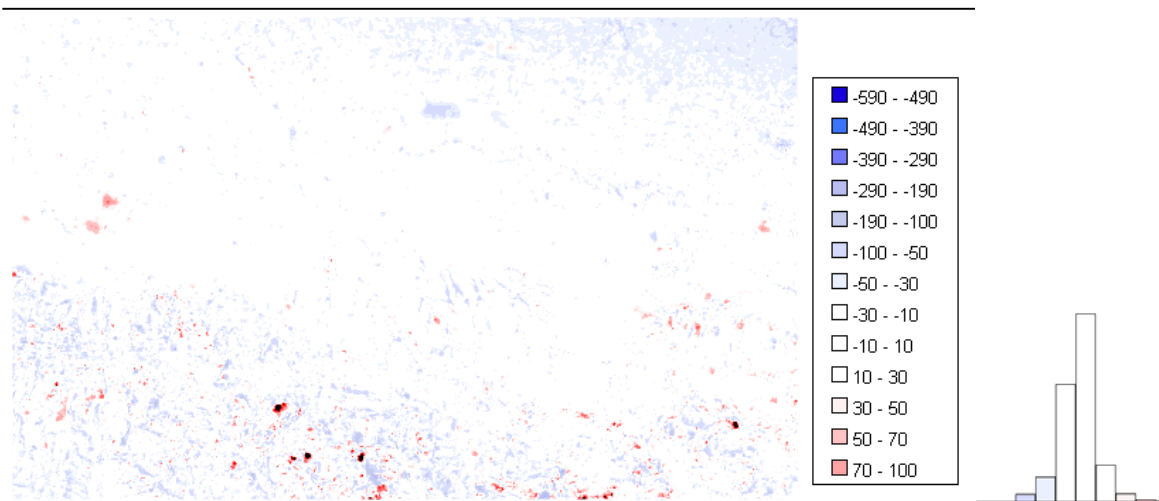


Figura 78. Representación del modelo diferencia entre MDE SPOT SS y MDE SPOT OB.

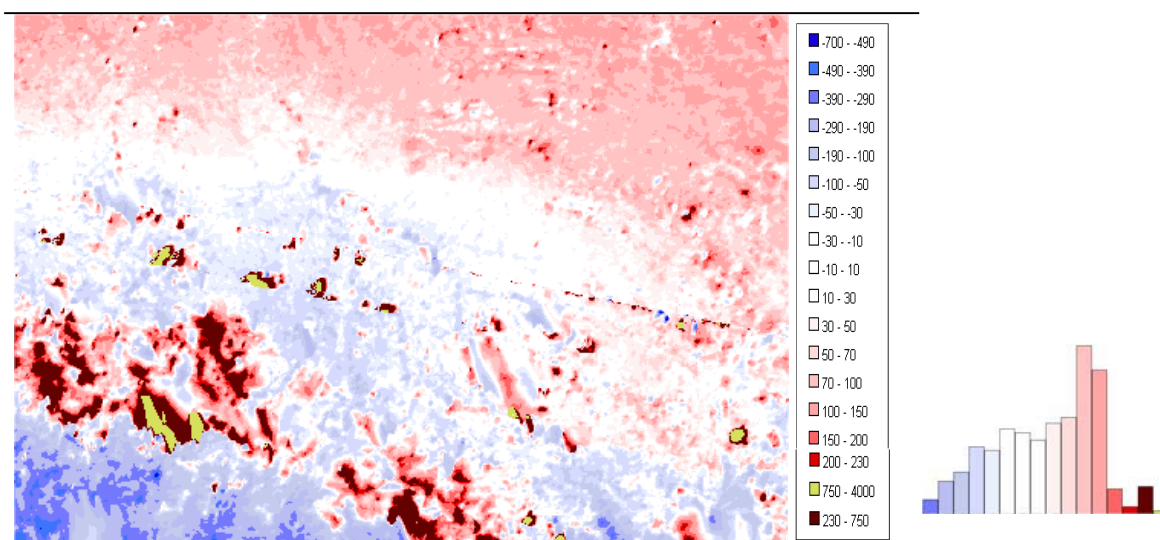


Figura 79. Representación del modelo diferencia entre MDE ASTER OB y MDE ASTER OE.

6.6 Resultados

De la tabla y representaciones gráficas pueden deducirse los siguientes resultados:

- Los MDE que mejor se ajustan al derivado de la cartografía son los construidos con datos SPOT, independientemente de la aplicación utilizada; sus estadísticos son prácticamente idénticos así como la distribución espacial de las diferencias que sólo muestra que las mayores discrepancias tienden a producirse en las zonas más abruptas.
- Las distribuciones de las diferencias para los MDE SPOT son gaussianas; de estas distribuciones podemos aceptar que el MDE elaborado con OrthoBase es ligeramente más satisfactorio ya que el 54% de las diferencias están en el rango de ± 10 m y sólo el 9% muestra diferencias de más de 30 m. En el MDE realizado con Socet los mismos porcentajes son del 47% y del 10%.
- Los MDE realizados con ASTER muestran un ajuste mucho peor al modelo derivado de la cartografía topográfica. Los porcentaje de celdas con diferencias inferiores a los 10 m es del 4% para OrthoBase y del 11% para OrthoEngine; las celdas con diferencias superiores a los 30 m son el 88% en OrthoBase y el 68% en OrthoEngine. A pesar de que los estadísticos anteriores favorecen a OrthoEngine, esta aplicación genera un gran cantidad de errores groseros (ver Figura), lo que se refleja en un muy elevado valor de s de 118 m frente a los 84 de OrthoBase. Es interesante destacar que los grandes errores se producen en zonas que no parecen presentar problemas en el resto de pruebas.
- La diferencias entre los modelos SPOT son escasas aunque existen diferencias puntuales de importancia lo que muestra que los modelos específicos en Socet set y OrthoBase tienen un comportamiento similar y sólo en casos puntuales se hacen evidentes errores de cierta magnitud.
- Los modelos ASTER, al contrario, son muy diferentes entre sí, lo que hace evidente el diferente comportamiento de los algoritmos utilizados en los cálculos. Hay que recordar que cada uno de los MDE se genera con limitaciones distintas: Orthobase carece de modelo específico para ASTER y OrthoEngine, aunque lo tiene, no permite unir las dos imágenes para un proceso único. Esto dificulta notablemente el uso óptimo de los puntos de apoyo, lo que puede haber influido en el resultado. La presencia de datos discrepantes es obvia en la figura y se refleja en los estadísticos: 3688 m de diferencia máxima, una diferencia media de 33 m y $s = 142$ m. Sólo el 3% de los datos tiene una diferencia en el rango de ± 10 m mientras que el 90% muestra discrepancias de más de 30 m.

A continuación, se presenta una representación gráfica en perspectiva del MDE generado con imágenes SPOT con una superposición de una ortoimagen generada también con dichas imágenes (Figura 80).

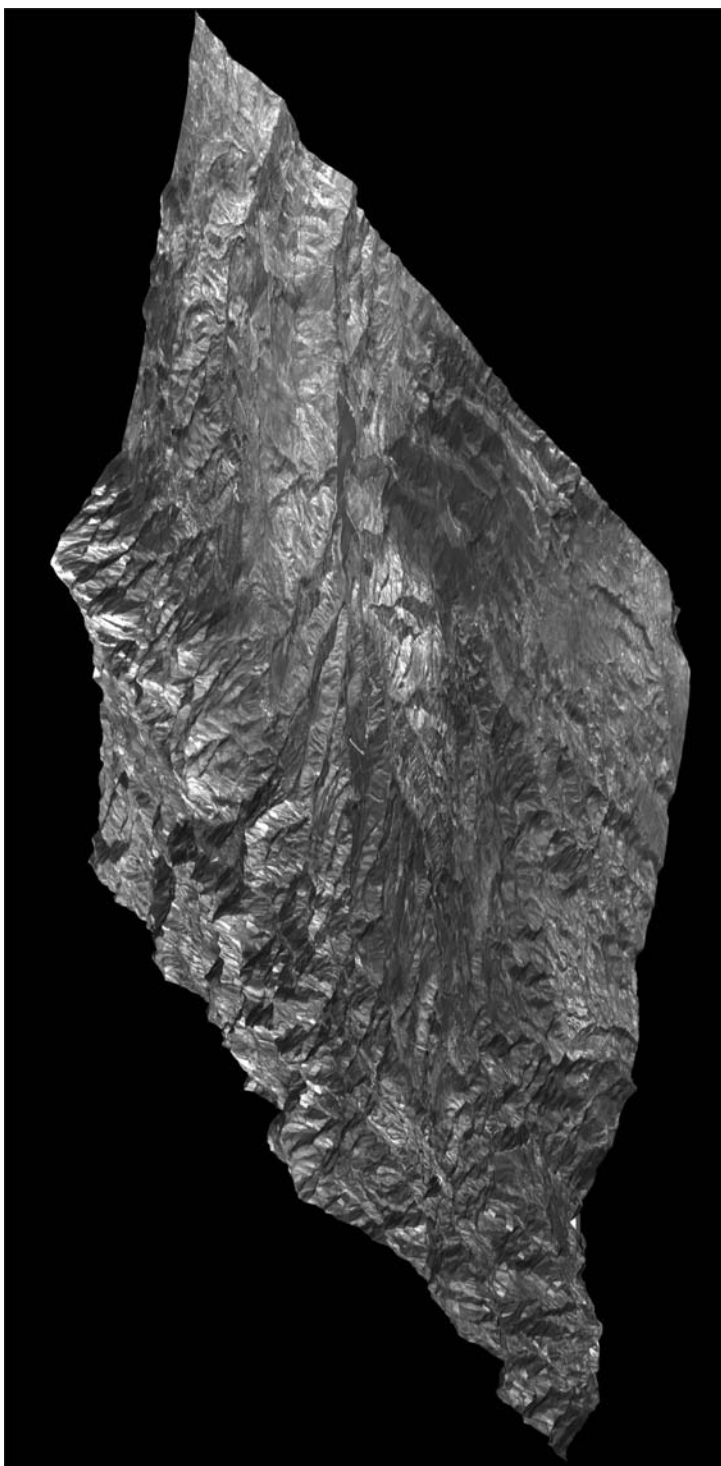


Figura 80. Vista perspectiva de la zona de estudio elaborada superponiendo una de las imágenes SPOT-HRV a un MDE.

Capítulo 7 Discusión y propuestas para el futuro

7.1 Discusión

Las pruebas se han realizado en una única zona de estudio por lo que puede plantearse una duda sobre si los resultados obtenidos son de validez general. Entendemos, sin embargo, que la zona elegida tiene unas características adecuadas para las pruebas ya que su relieve es complejo, con unas zonas suaves y otras abruptas por lo que quedan representados relieves de características diferentes.

Sobre las características de las imágenes

En principio, las imágenes SPOT y ASTER presentaban propiedades que podían penalizar, a priori, los resultados: SPOT tiene un tamaño de píxel menor que ASTER pero en su contra podía contarse la posible diferencia radiométrica entre las tomas, distanciadas en el tiempo. Los resultados confirmaron la influencia del tamaño de píxel pero no se mostraron aparentemente sensibles a las posibles diferencias radiométricas.

Las características de la toma estereoscópica (lateral o longitudinal) no tienen influencia en el proceso fotogramétrico. Ambas tomas son convergentes y su tratamiento está previsto como tal en las aplicaciones informáticas, donde es necesario introducir los ángulos de toma (o leerlos de los ficheros de cabecera).

Sobre las variables analizadas

Los resultados obtenidos muestran que las técnicas automáticas de construcción de MDE a partir de estos datos generan buenos resultados cuando se cumplen algunas condiciones; esencialmente, que existan datos completos sobre la toma (metadatos incluidos en los ficheros de cabecera) y que exista un modelo específico en la aplicación informática que sea capaz de aprovecharlos.

Los factores analizados (puntos de apoyo, estructura, estrategia de correlación...) permiten llegar a resultados que garantizan el mejor aprovechamiento posible de los datos originales. Algunos de los parámetros dependen de las peculiaridades de la aplicación informática (estructura de datos y tamaño de malla), otros son de validez general (distribución de los puntos de apoyo). En el caso óptimo, el valor de ECM para la elevación está por debajo del tamaño del píxel tanto en SPOT como en ASTER.

Debe destacarse que las aplicaciones no permiten el mismo grado de control en los procesos; PCI OrthoEngine es el más parecido a una "caja negra" mientras que Socet Set permite, con mayor o menor dificultad, cambiar casi todos los parámetros del proceso. Ninguna aplicación es transparente en cuanto a sus métodos por lo que la causa de algunos problemas debe deducirse más que comprobarse.

Conviene discutir lo relativo a las estrategias de correspondencias de imágenes. En realidad, lo importante de este proceso es el algoritmo utilizado para la determinación de puntos homólogos. Las otras variables (tamaño de ventanas de búsqueda y correlación, por ejemplo) tienen menos interés porque, al final, sólo sirven para definir sobre qué conjunto de datos va a trabajar el algoritmo de correspondencia. En un caso normal podrían afectar solamente al tiempo necesario para llevar a cabo los cálculos.

La estrategia óptima de correspondencia puede ser diferente en cada aplicación pero, además, es una variable que podemos considerar oculta ya que, en realidad, nunca llegamos a saber qué está haciendo exactamente la aplicación informática. Por ejemplo, Socet Set permite elegir entre varias estrategias por su nombre ("adaptativa", "spot"...), pero los algoritmos que hay detrás nos son desconocidos. En consecuencia no sabemos la influencia de esta fase del proceso en el resultado final. Un caso interesante es OrthoBase, de cuya información puede deducirse que usa una algoritmo de "correlación estructural". La realidad es que no es posible saber en qué se basa dicho

algoritmo y en qué fases interviene sustituyendo a los más convencionales.

El coeficiente de correlación es una variable útil para valorar el nivel de fiabilidad de los resultados. Se ha demostrado que la eliminación de puntos con bajos coeficientes permite reducir el tamaño y complejidad de la estructura TIN sin una pérdida significativa de exactitud.

Los resultados mostraron que había que considerar un factor más, muy influyente: las aplicaciones informáticas.

Sobre las aplicaciones informáticas

Las tres aplicaciones manejadas son muy diferentes en todos los aspectos. Socet Set es una aplicación compleja cuyo origen fue la fotogrametría aérea y que está diseñada básicamente para toma normal. Erdas OrthoBase Pro es una creación reciente que, en principio, da tanta importancia a los datos procedentes de tomas aéreas como a los de satélite o fotogrametría terrestre y soporta bien las tomas convergentes. PCI OrthoEngine es una aplicación diseñada en principio para la explotación de datos de satélite y ha optado por desarrollar modelos específicos para cada sensor.

La superioridad de disponer de modelos específicos para el sensor ha quedado demostrada por los valores de exactitud de los diferentes MDE. Hay otros factores, sin embargo, que han condicionado la calidad de los resultados; por ejemplo:

- La posibilidad de trabajar directamente los datos ASTER en formato HDF. Esto es posible sólo con PCI OrthoEngine; Socet Set no puede leer imágenes ASTER y Erdas Orthobase puede leerlas pero debe transformarlas al formato propio con lo que se pierde toda posibilidad de aprovechar los metadatos.
- La posibilidad de realizar mosaicos previos a las operaciones. Realizar mosaicos de imágenes tomadas por sensores de barrido es muy simple ya que las escenas individuales son, en realidad, fragmentos de una misma toma. Erdas OrthoBase obliga a transformar los datos HDF al formato propio 'img' pero, si la zona está en dos escenas, permite realizar sendos mosaicos de las tomas normal y oblicua previamente a las operaciones. La selección de puntos de apoyo se realiza sobre el mosaico así como el resto del proceso fotogramétrico. Por su parte, PCI OrthoEngine usa directamente los datos HDF pero no tiene herramientas para realizar el mosaico ni para recortar escenas. Esta circunstancia obliga a trabajar con las dos escenas independientemente y sólo se podrán unir los MDE ya construidos y georeferenciados. Las implicaciones en este trabajo han sido grandes porque la zona de estudio era marginal a ambas escenas y la selección de puntos de apoyo fue difícil lo que posiblemente haya influido en los resultados.

Destacaremos finalmente que ninguna de las aplicaciones tiene herramientas de detección de errores. Entendemos que los MDE generados no son utilizables directamente ya que todos ellos muestran datos que pueden considerarse errores groseros por lo que deberían incluirse herramientas de depuración.

7.2 Propuestas para el futuro

A lo largo de este trabajo hemos confirmado nuestra impresión de que en la fotogrametría espacial los datos van por delante de las aplicaciones. Esta disciplina ha cambiado características que antes eran constantes: la toma normal ha sido sustituida por toma oblicua e incluso los clásicos "pares" pueden en algunos sensores estar formados por tres tomas (una normal y dos oblicuas, hacia delante y hacia atrás). Las aplicaciones informáticas van a remolque de estas innovaciones, lo que hace, en nuestra opinión, que los resultados puedan ser mejorados en un futuro próximo.

En este trabajo se han aclarado algunas cuestiones que estaban sin resolver; por ejemplo, en los años 2001 y 2002, tras múltiples consultas a especialistas en la materia (entre ellos F. Ackermann) se ignoraba la distancia óptima de correlación en la ge-

neración de MDE a partir de este tipo de imágenes. Respecto a otras variables apenas existen referencias bibliográficas que demuestren un tratamiento sólido de su influencia.

También se ha llamado la atención con insistencia sobre la necesidad de realizar el control de exactitud con datos abundantes, bastante más de lo que es habitual actualmente, a riesgo de reducir drásticamente la fiabilidad del propio control.

Sobre el desarrollo de las aplicaciones informáticas en el tratamiento de los datos espaciales pueden hacerse algunas sugerencias que permitirían, en nuestra opinión, mejorar los resultados. Entre ellas destacaremos las siguientes:

- La necesidad de adaptarse a los nuevos formatos como el HDF, adaptando todas las herramientas de análisis al trabajo directo con ellos y aprovechando la totalidad de los metadatos que acompañan a las imágenes.
- Adaptación a las tomas oblicuas y a las tomas múltiples (*backward*, *nadiral* y *forward*), aprovechando sus características y, en el último caso, la posibilidad de disponer de pares diferentes para las combinaciones de las tres tomas. Los MDE deberían ser un resultado único de la fusión de las tres imágenes, donde la redundancia podría ayudar a resolver ambigüedades y al menos parte de los grandes errores.

Y en cuanto a los deseos desde el punto de vista de la investigación:

- Necesidad de una mayor transparencia en cuanto a los algoritmos utilizados: en ninguna de las aplicaciones se explica como se realiza, por ejemplo, el proceso de correspondencia entre imágenes estereoscópicas. Los trabajos de los autores (Toutin en el caso de PCI OrthoEngine y Wang en el caso de Erdas OrthoBase) son auténticas operaciones de marketing donde no se desvela apenas ninguna información útil.
- Mayor flexibilidad en la configuración de los parámetros que influyen en el proceso de generación del MDE.

7.3 Resumen de las principales aportaciones y futuras líneas de investigación

En este apartado se intenta recopilar con brevedad aquellas aportaciones más relevantes del trabajo desarrollado en esta memoria. Posteriormente, se realiza una declaración de intenciones sobre las líneas de avance que se intentará recorrer en un futuro.

Esta tesis constituye el primer estudio científico que analiza el error de MDE generados por métodos fotogramétricos automatizados a partir de datos espaciales, más concretamente imágenes SPOT-HRV y TERRA ASTER. La naturaleza digital de este tipo de datos constituye un esquema diferente en la obtención de los datos y por tanto, para la resolución matemática en la corrección geométrica de los datos.

Sobre las principales aportaciones de este trabajo se puede distinguir entre diferentes puntos: los datos, las aplicaciones y los métodos.

- Los datos espaciales evaluados han sido dos tipos de imágenes estereoscópicas: SPOT-HRV de 20 m de resolución espacial, y TERRA-ASTER de 30 de resolución espacial. La evaluación de estas imágenes se ha realizado mediante diversas pruebas empíricas donde se analizaban la influencia de diversas variables en la generación automatizada del MDE. Los resultados obtenidos en los MDE generados desde las distintas imágenes se pueden considerar muy satisfactorios. En el caso de SPOT se ha generado un MDE con un error de 7.7 a 8 m de ECM, lo que supone que dicho error es inferior a la mitad del píxel. En el caso de las imágenes ASTER el mejor MDE generado ha sido con un error de 12.6 de ECM, también inferior a la mitad del píxel. Por tanto, se puede afirmar que si se emplean los valores más adecuados en la orientación de las imágenes y la propia generación del MDE se puede obtener MDE con un error aproximado de la mitad de la resolución espacial.
- Con respecto a las aplicaciones, en este trabajo se ha revisado las aplicaciones existentes para trabajar con datos espaciales para fines cartográficos. Aunque de forma más exhaustiva se ha evaluado tres aplicaciones: Socet Set de Leica Geosystems, OrthoBase PRO modulo de Erdas Imagina de Leica Geosystems, y OrthoEngine de PCI Geomatics.

Socet Set sólo está preparado para datos espaciales SPOT, y no tiene ningún módulo genérico para trabajar con otro tipo de datos espaciales. Por esto, las pruebas realizadas con TERRA ASTER se busco otra aplicación alternativa. Los resultados obtenidos con Socet Set se pueden considerar de alta calidad y así lo reflejan los valores de estimación del error. Por otro lado, se debe destacar que el propio fichero de salida del MDE, además de la elevación se obtiene el coeficiente de correlación obtenido en cada punto. Esta información es muy valiosa para posteriores depuraciones y aligeramiento del propio MDE. Otra particularidad de Socet Set es que genera de forma directa diferentes tipo de estructura, GRID o TIN, constituyendo la única aplicación de las tres empleadas que permite dicha elección.

OrthoBase PRO de Erdas Imagine tiene un módulo específico para datos SPOT, con el cual el resultado obtenido es tan satisfactorio como en Socet Set, y un módulo genérico que ha sido empleado en las pruebas de TERRA ASTER cuyos resultados no han sido tan satisfactorios como se esperaba. OrthoBase sólo genera MDE con estructura TIN, aunque permite seleccionar estructura GRID se ha demostrado que es una interpolación de la estructura TIN previamente generada. Sin embargo, aunque carece de esta flexibilidad para seleccionar la estructura de los datos de salida, permite configurar los tamaños de las ventanas de búsqueda y de correspondencias en la extracción de la elevación.

OrthoEngine de PCI Geomatics permite trabajar con diferentes tipos de datos es-

paciales, entre ellos TERRA ASTER el cual ha sido empleado en este trabajo y cuyos resultados si se pueden considerar muy satisfactorios ya que el error de MDE está por debajo de la resolución espacial de las imágenes empleadas. Sin embargo de esta aplicación se debe destacar la poca flexibilidad en muchos aspectos. Por un lado en la propia generación del MDE, ya que no permite seleccionar el tipo estructura, los datos de salida son siempre estructura GRID y además la distancia de espaciamiento de los puntos debe ser múltiplo de 1, 2, 4, 8, 16 y 32 con respecto a la resolución espacial, y tampoco existen posibilidades en la elección de la estrategia de correspondencia. Pero además, existe un claro inconveniente en la explotación de los datos espaciales y es en la fase de preparación de las imágenes, donde se deben orientar con las dimensiones estándar de dichas imágenes, sin permitir mosaicar o recortar previamente dichos datos. Estos procesos facilitarían la selección de la zona de trabajo y reduciría el número de puntos de apoyo requerido en la orientación de los datos. El esquema de trabajo planteado en dicha aplicación es consecuencia de heredar los métodos empleados en fotogrametría aérea, donde el formato de las imágenes es directamente la zona de trabajo.

Sobre las aplicaciones se puede resumir que los módulos específicos son los más apropiados para fines cartográficos o para aquellas aplicaciones que se necesite un determinado nivel de exactitud. Por otro lado, los módulos genéricos pueden emplearse para otro tipo de trabajos que no se requiera una exactitud geométrica determinada. Una posible línea de trabajo es mejorar estos módulos genéricos.

- Los métodos empleados en la generación automática de MDE a partir de datos espaciales consiguen resultados muy válidos. Sin embargo, se ha detectado en el desarrollo de este trabajo que las aplicaciones existentes deben mejorar el tratamiento previo de las imágenes, es decir la orientación de los datos espaciales; en la propia configuración de la estructura del MDE y finalmente en la transparencia de la estrategia de correspondencia de imágenes.

Por otro lado, las técnicas automatizadas permiten generar estructuras de datos mucho más densas de lo necesario; esto supone que hay desarrollar métodos para aligerar dichos MDE con un determinado criterio. En esta tesis se ha propuesto un método de refinamiento en función del coeficiente de correlación asociado a cada dato de elevación, obteniéndose resultados excelentes.

Una de las líneas que en un futuro se pretende investigar es la explotación de este tipo de datos para fines cartográficos aprovechando la riqueza de información espectral (por ejemplo, el caso de TERRA-ASTER con 14 bandas), sin embargo las aplicaciones actuales sólo permiten trabajar con una o tres bandas espectrales; quizás los resultados en los algoritmos de correspondencias de imágenes podrían mejorar empleando otras combinaciones espectrales.

El veloz desarrollo de los datos espacial genera el nacimiento de una especialidad dentro de la fotogrametría, que es la fotogrametría espacial, cuya finalidad es la misma que las demás ramas de la fotogrametría (conseguir información métrica de las imágenes). El estado actual de la fotogrametría espacial es tan primitivo como se ha reflejado en esta tesis. En el año 2000 tras múltiples consultas a especialistas en la materia se ignoraba la distancia óptima de correspondencia entre imágenes espaciales en la generación de MDE.

Por ésto, y en función de esta situación, las líneas futuras de trabajo irán enfocadas a desarrollar y depurar métodos en la explotación de los datos estereoscópicos espaciales para posteriormente ser implementados en las distintas aplicaciones. La generación de MDE con datos espaciales abre puertas a muchos tipos de análisis, no sólo por la exactitud de los resultados, además por la rapidez de generación y por la posibilidad de estudios multitemporales.

De forma sintética se puede afirmar que la disponibilidad de datos espaciales con po-

tencialidad para ser explotados para fines cartográficos es mucho más rápida que el desarrollo y depuración de métodos y aplicaciones para la explotación de los mismos. Por ello, la fotogrametría espacial tiene mucho que recorrer.

ANEXOS

Anexos:

ANEXOS 1: VÉRTICES GEODÉSICOS

ANEXOS 2: PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN

ANEXOS 3: PUNTOS DE APOYO

ANEXOS 4: PUNTOS DE CONTROL

ANEXOS 5: GENERALIDADES SOBRE SPOT

ANEXOS 6: GENERALIDADES SOBRE ASTER

ANEXO 1: VÉRTICES GEODÉSICOS



Ministerio de Fomento
Subsecretaría

Dirección General del Instituto Geográfico Nacional
Subdirección General de Geodesia y Geofísica

General Ibañez de Ibero, 3
28003 MADRID

Reseña Vértice Geodésico

09-nov-00

Número.....	104146
Nombre.....	Herrero
Municipio.....	Albuñuelas
Provincia.....	Granada

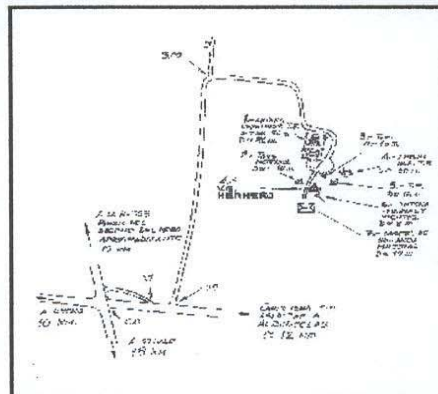
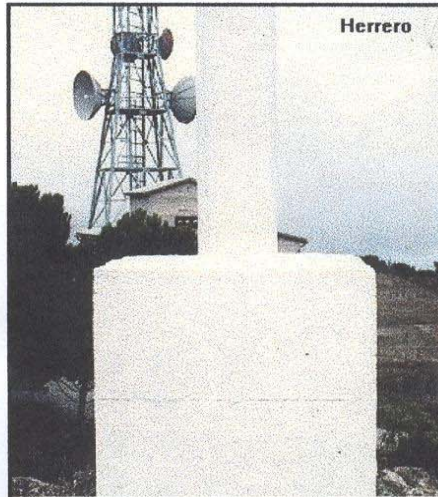
Coordenadas ED 50	
Longitud.....	-3° 41' 45,9135" Compensación.....: 01-jul-91
Latitud.....	36° 56' 48,7440"
X UTM.....	438.018,66 m Factor escala.....: 0,999647322
Y UTM.....	4.089.271,83 m Convergencia.....: -0° 25' 06,2880"
Altura.....	1.502,6 m (BP) Huso.....: 30

Situación :
En lo más alto del Cerro Herrero, donde existen varias instalaciones reseñadas y numeradas en el croquis.

Acceso:
Desde la intersección de carreteras secundarias "Puerto del Suspiro del Moro-Almuñeca" y "Jayena-Albuñuelas" y en dirección a Albuñuelas (que está sin asfaltar), a los 0,9 km se coge una pista a la izquierda que conduce a las instalaciones y al vértice en 4,5 km. El recorrido es apto para cualquier vehículo.

Observaciones:
REGENTE96.

Fecha de Construcción.....	11-dic-88
Centrado forzado.....	Si Nº de cuerpos.....: 1
Altura pilar.....	1,20 m Diámetro pilar.....: 0,30 m
Altura último cuerpo.....	1,00 m
Ancho último cuerpo.....	1,00 m
Altura total de los cuerpos.....	1,00 m



Horizonte GPS:
Posibles sombras de un repetidor de Telefónica y una caseta de vigilancia de incendios, aunque se observó sin problemas.



Ministerio de Fomento
Subsecretaría

General Ibañez de Ibero, 3
28003 MADRID

Dirección General del Instituto Geográfico Nacional
Subdirección General de Geodesia y Geofísica

Reseña Vértice Geodésico

09-nov-00

Número.....:	104122
Nombre.....:	Lopera
Municipio...:	Albuñuelas
Provincia...:	Granada

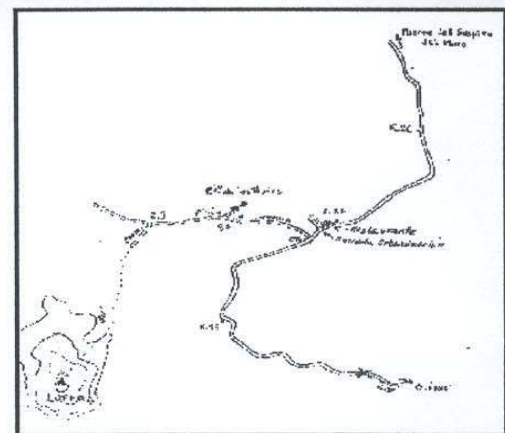
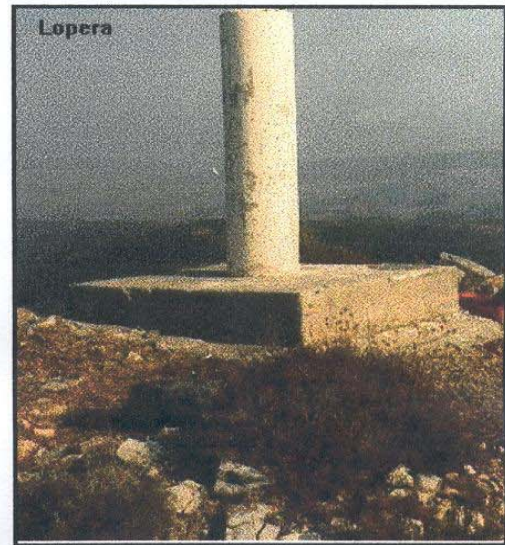
Coordenadas ED 50			
Longitud...:	-3° 45' 47,8816"	Compensación...:	01-jul-91
Latitud...:	36° 52' 27,1802"		
X UTM.....:	431.969,23 m	Factor escala...:	0,999657011
Y UTM.....:	4.081.257,33 m	Convergencia...:	-0° 27' 28,9579"
Altura.....:	1.485,1 m (BP)	Huso.....:	30

Situación:
Situado en el pico más alto del cerro Lopera, en la sierra del Chaparral, en terreno de monte bajo.

Acceso:
Desde Otívar, por la carretera al puerto del Suspiro del Moro, recorridos unos 20 Km., llenos de curvas, se llega a una recta larga y en el Km. 27,200, 100 m. antes de llegar a la entrada de la Urbanización "Prados del Pinar" y de un restaurante que hay a la izquierda, se toma a la izquierda la pista a Jayena. A los 500 m. se deja a la derecha el camino de entrada al cortijo de "Los Prados", a los 1,3 Km. otro a la derecha y al llegar a los 2,3 Km. se sigue a la izquierda por unas rodadas que a los 200 m. se pierden. Se deja el vehículo y, a pie, se sigue hacia el S., al pico más alto, tardando 30 minutos en llegar al vértice.

Observaciones:

Fecha de Construcción...:	06-oct-84		
Centrado forzado...:	No	Nº de cuerpos...:	1
Altura pilar...:	1,04 m	Diámetro pilar...:	0,30 m
Altura último cuerpo.....:	0,20 m		
Ancho último cuerpo.....:	1,00 m		
Altura total de los cuerpos...:	0,20 m		



Horizonte GPS:
Despejado



Ministerio de Fomento
Subsecretaría

General Ibañez de Ibero, 3
28003 MADRID

Dirección General del Instituto Geográfico Nacional
Subdirección General de Geodesia y Geofísica

Reseña Vértice Geodésico

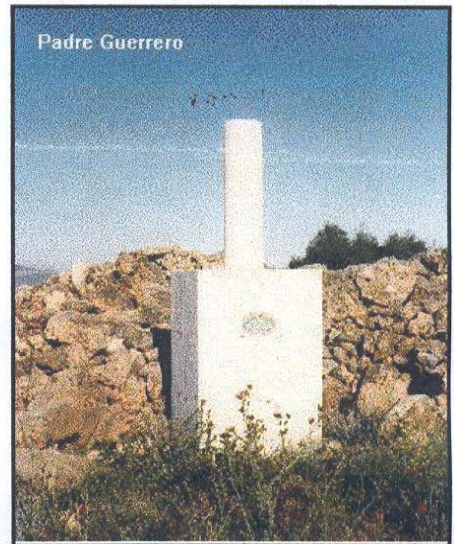
09-nov-00

Número.....:	104078
Nombre.....:	Padre Guerrero
Municipio...:	Alhama de Granada
Provincia...:	Granada

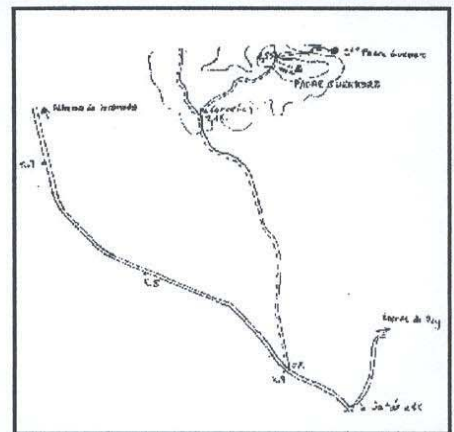
Fecha de Construcción..:	13-oct-84		
Centrado forzado..:	No	Nº de cuerpos..:	1
Altura pilar..:	1,20 m	Diámetro pilar..:	0,30 m
Altura último cuerpo.....:	1,50 m		
Ancho último cuerpo.....:	1,00 m		
Altura total de los cuerpos..:	1,50 m		

Coordenadas ED 50			
Longitud..:	-3° 55' 24,0252"	Compensación...:	01-jul-91
Latitud...:	36° 58' 00,0195"		
X UTM.....:	417.804,32 m	Factor escala...:	0,999683222
Y UTM.....:	4.091.640,20 m	Convergencia..:	-0° 33' 19,0157"
Altura.....:	1.114,4 m (BP)	Huso.....:	30

Situación :
Situado en una pequeña loma de terreno de labor, a unos 400 m. al S.O. del cortijo Padre Guerrero y junto a un majano de piedras; hay tres en la loma.



Acceso:
Desde Alhama de Granada, por la carretera a Játar, al llegar al Km. 9 se entra a la izquierda por un buen camino, que va subiendo a los Llanos del Padre Guerrero. A los 2.100 m. se sigue a la derecha, por el camino del cortijo Padre Guerrero, con cancela en su entrada, con candado y jalonado a los lados de almendros; la llave la tienen en el cortijo. Se sigue este camino 750 m., estando a unos 500 m. del cortijo; la señal se encuentra a la derecha, a unos 200 m.



Observaciones:

Horizonte GPS:
Despejado



Ministerio de Fomento
Subsecretaría

General Ibañez de Ibero, 3
28003 MADRID

Dirección General del Instituto Geográfico Nacional
Subdirección General de Geodesia y Geofísica

Reseña Vértice Geodésico

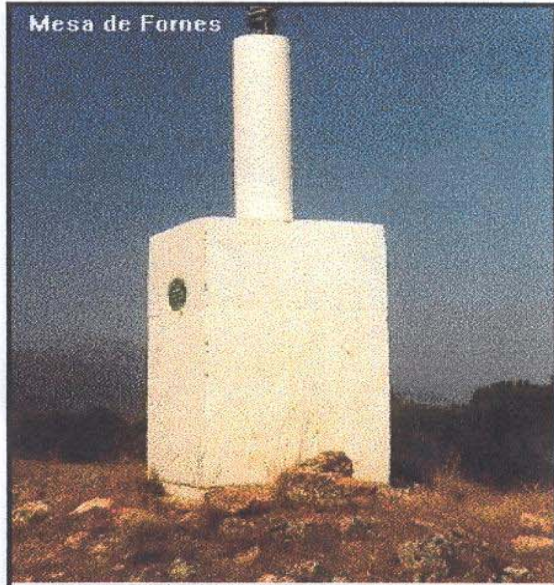
09-nov-00

Número.....:	104106
Nombre.....:	Mesa de Fornes
Municipio...:	Arenas del Rey
Provincia...:	Granada

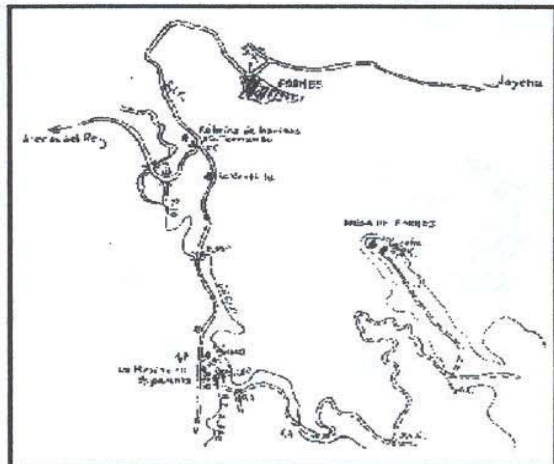
Fecha de Construcción..:	14-oct-84		
Centrado forzado..:	No	Nº de cuerpos..:	1
Altura pilar..:	1,20 m	Diámetro pilar..:	0,30 m
Altura último cuerpo.....:	1,50 m		
Ancho último cuerpo.....:	1,00 m		
Altura total de los cuerpos..:	1,50 m		

Coordenadas ED 50			
Longitud..:	-3° 50' 49,3922"	Compensación...:	01-jul-91
Latitud....:	36° 56' 35,3018"		
X UTM.....:	424.572,31 m	Factor escala...:	0,999670082
Y UTM.....:	4.088.966,41 m	Convergencia..:	-0° 30' 32,8387"
Altura.....:	1.080,4 m (BP)	Huso.....:	30

Situación :
Situado en el extremo N. de la meseta Mesa de Fornes, a 200 m. del borde, de ladera abrupta al N. y suave al S. La señal está en lo alto del único promontorio que hay, a pocos metros de unas ruinas árabes y a 20 m. al N. de la caseta de vigilancia de incendios.



Acceso:
Desde Fornes, por la carretera a Arenas del Rey, recorridos 2,6 Km., frente a la Fábrica de Harinas "San Fernando", se entra a la izquierda por la carretera a La Resinera. A 950 m. se cruza el puente sobre el río Cacán, a los 1,7 Km., a la izquierda, entre las casas de La Resinera y la Iglesia, se sigue un camino que a 250 m. cruza el río Algar, a 400 m. deja un camino a la derecha, a los 1.400 m. rodea el río Cobollón, cruzando al otro lado y dejando a los 2,4 Km. otro a la derecha, a los 4,6 Km., ya en lo alto de la meseta y en una recta, se sigue a la izquierda por otro que va hacia el N., a lo largo de la loma, acabando a los 5,8 Km. en una caseta de vigilancia de incendios. A pie, se recorren los 20 m. que quedan hasta la señal.



Observaciones:

Horizonte GPS:
Despejado



Ministerio de Fomento
Subsecretaría

General Ibañez de Ibero, 3
28003 MADRID

Dirección General del Instituto Geográfico Nacional
Subdirección General de Geodesia y Geofísica

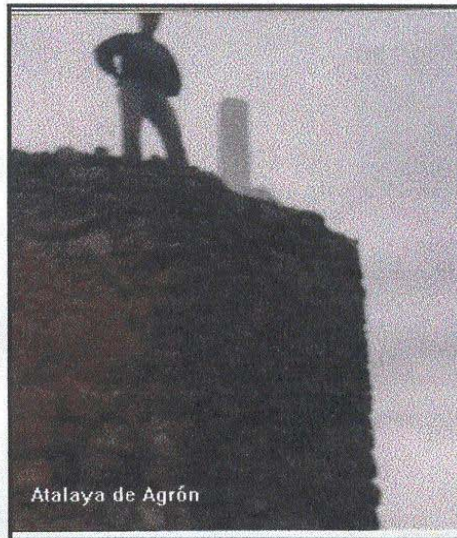
Reseña Vértice Geodésico

09-nov-00

Número.....:	102591
Nombre.....:	Atalaya de Agrón
Municipio...:	Agrón
Provincia...:	Granada

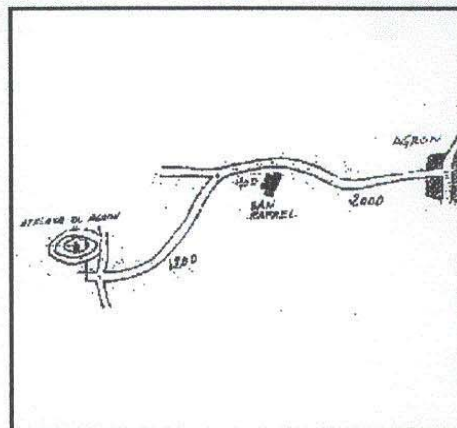
Fecha de Construcción..:	08-dic-87		
Centrado forzado..:	No	Nº de cuerpos..:	1
Altura pilar..:	1,20 m	Diámetro pilar..:	0,30 m
Altura último cuerpo.....:	0,50 m		
Ancho último cuerpo.....:	1,00 m		
Altura total de los cuerpos..:	0,50 m		

Coordenadas ED 50			
Longitud.....:	-3° 52' 14,9270"	Compensación...:	01-jul-91
Latitud.....:	37° 01' 34,1791"		
X UTM.....:	422.540,76 m	Factor escala...:	0,999673907
Y UTM.....:	4.098.195,83 m	Convergencia...:	-0° 31' 27,8830"
Altura.....:	1.171,1 m (BP)	Huso.....:	30



Situación :
Situado encima de la torre mora que hay en el cerro de la Atalaya de Agrón.

Acceso:
Desde Agrón se toma la carretera que conduce al cortijo de San Rafael (situado a unos 2 Km. del pueblo), 400 m. después del cortijo se toma un camino a la izquierda y unos 1.200 m. después se llega a un cruce de caminos, donde se deja el vehículo. Desde aquí, se llega andando hasta el vértice, que se encuentra a unos 200 m.

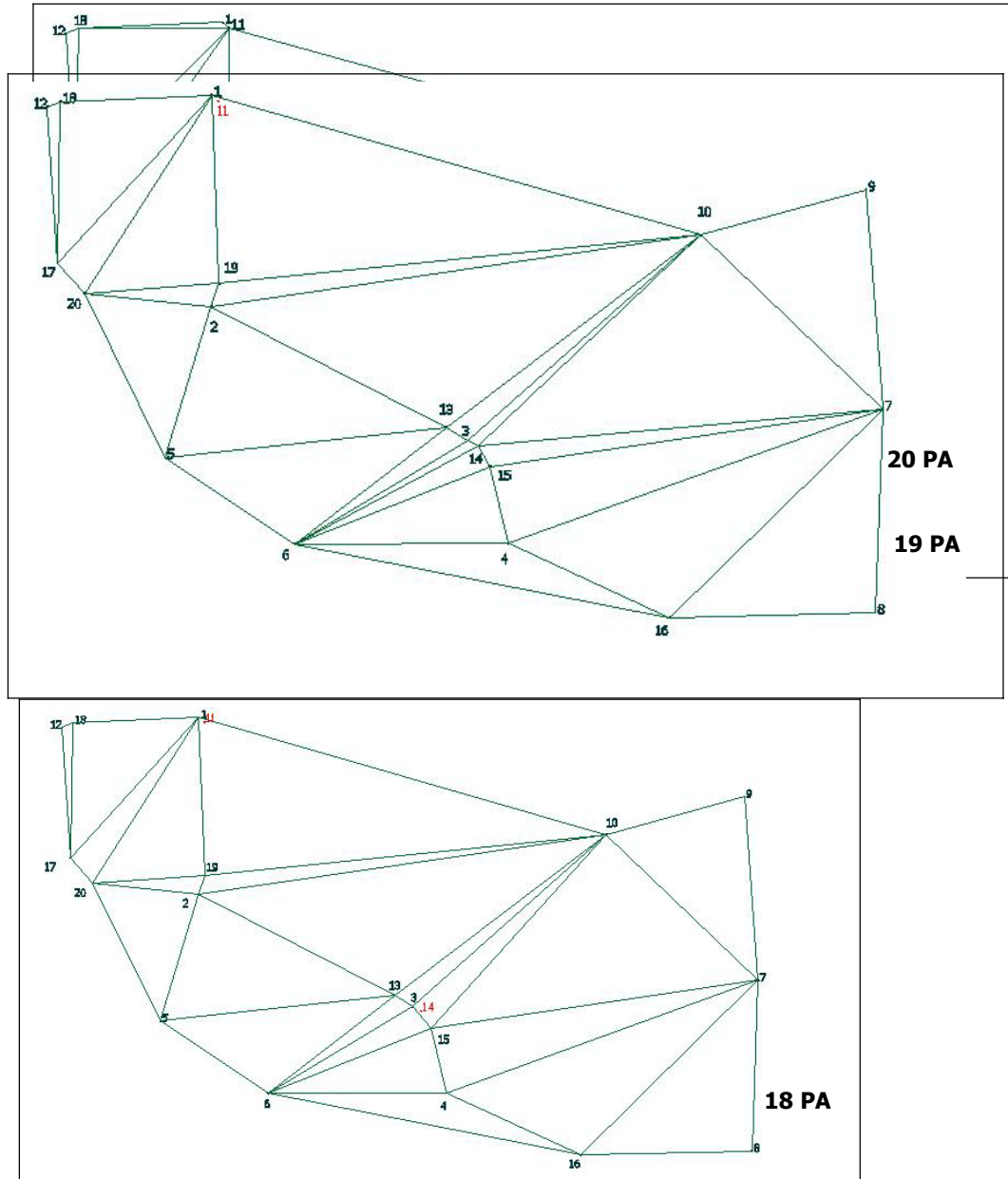


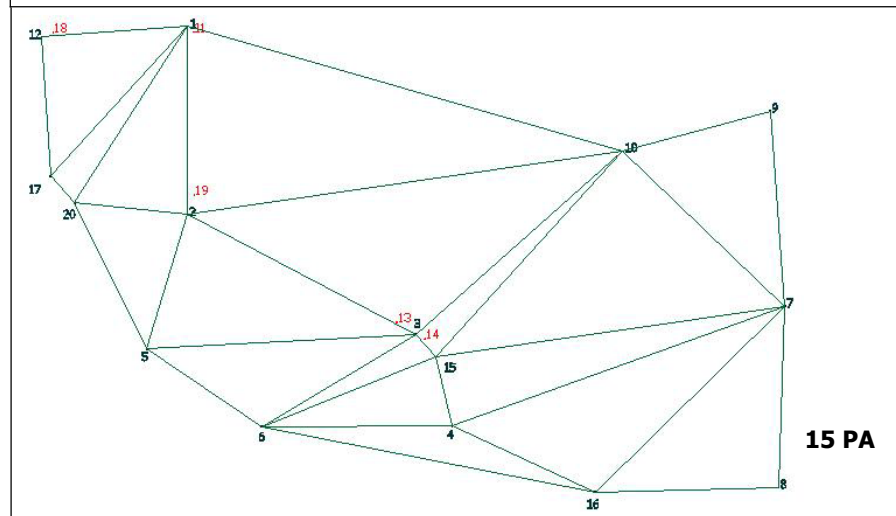
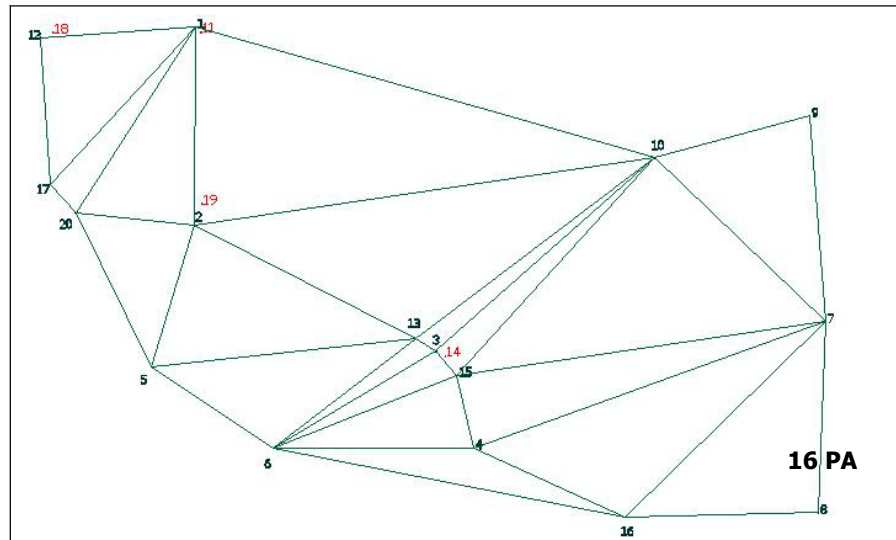
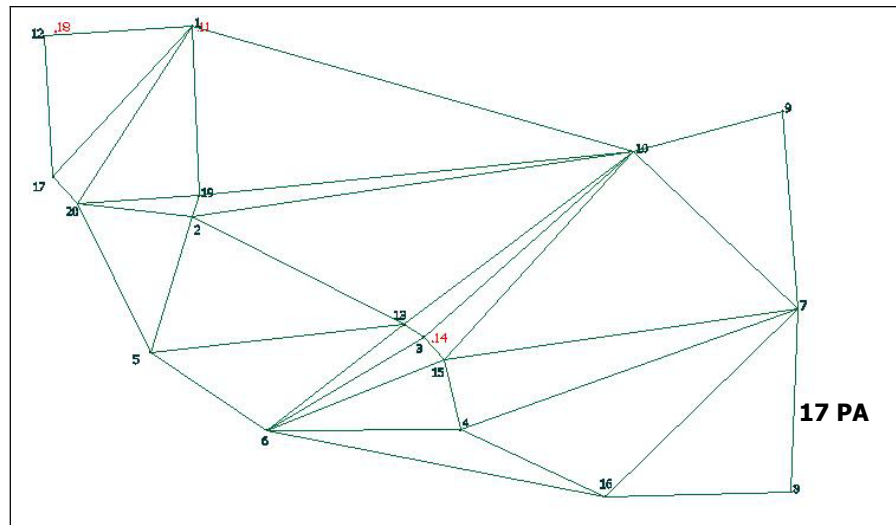
Observaciones:

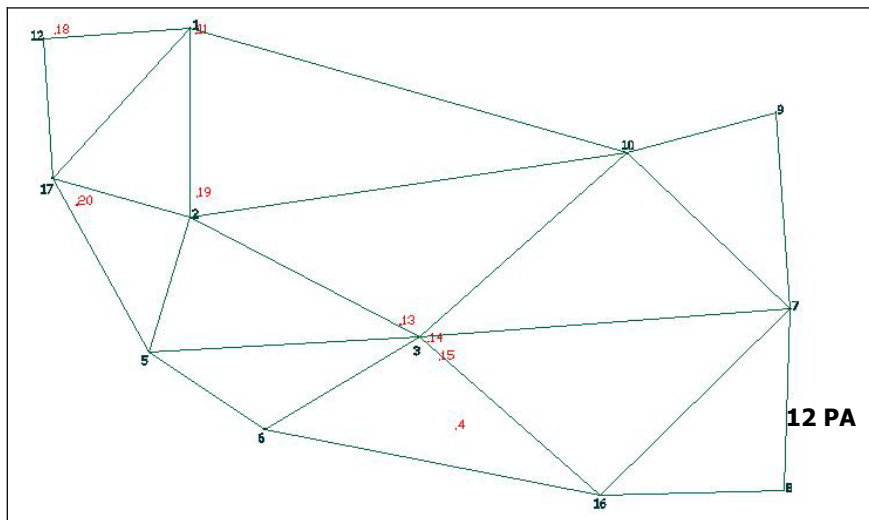
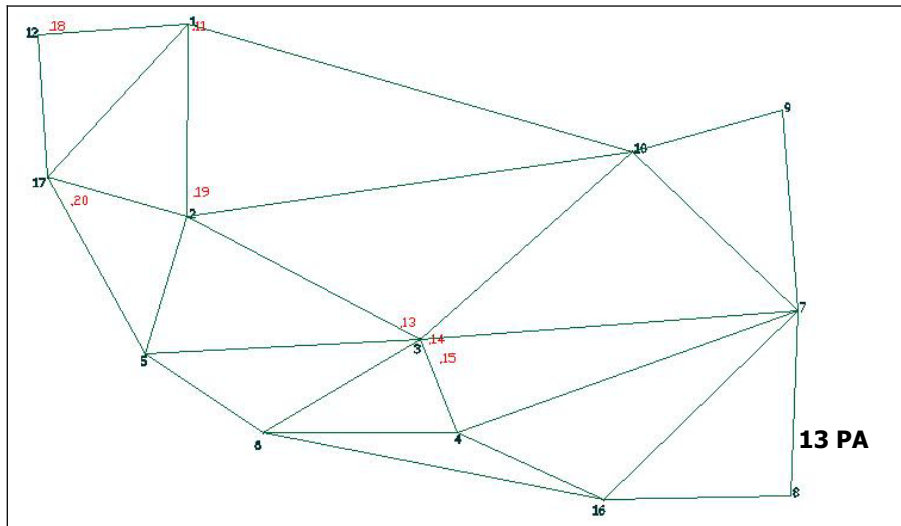
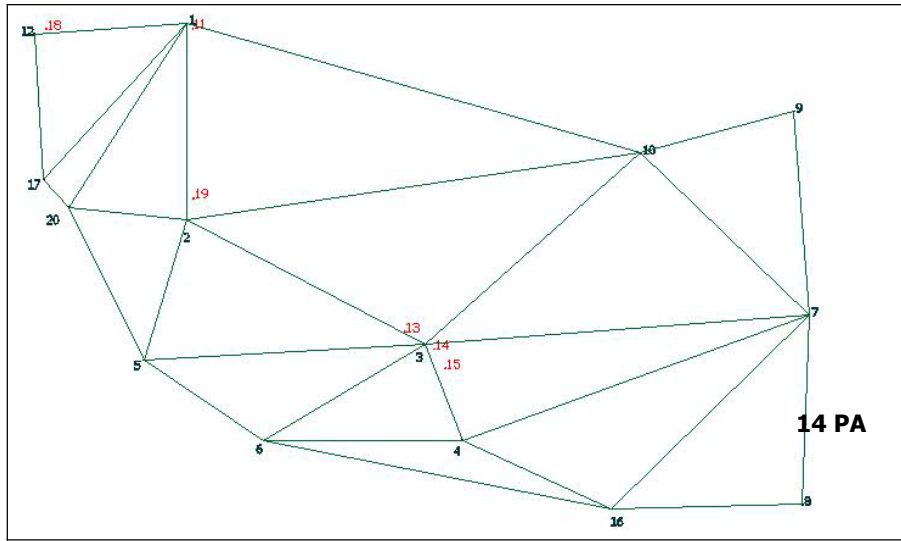
Horizonte GPS: Despejado

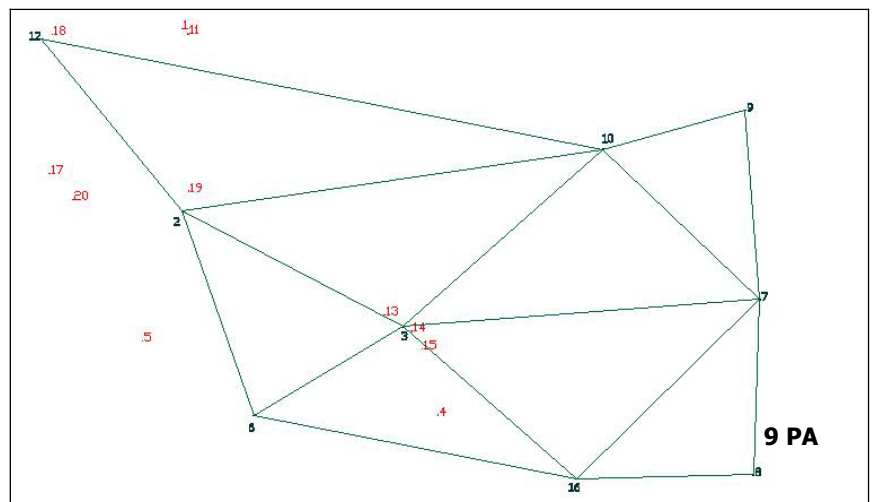
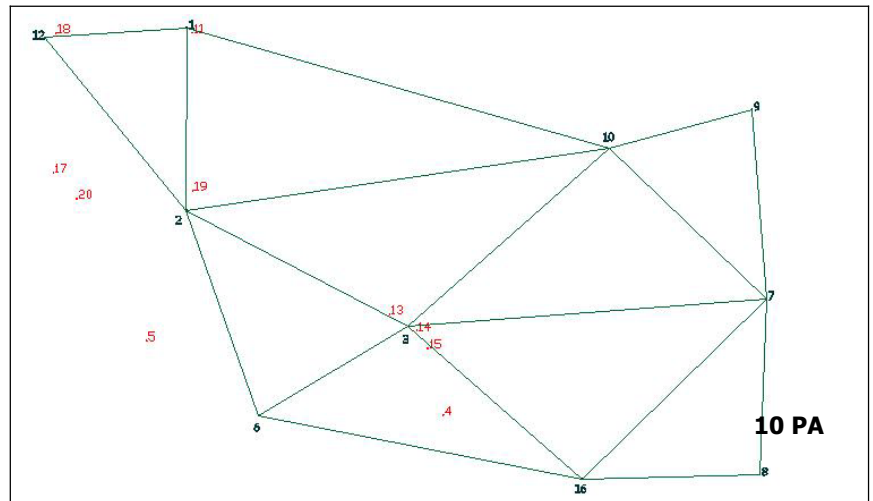
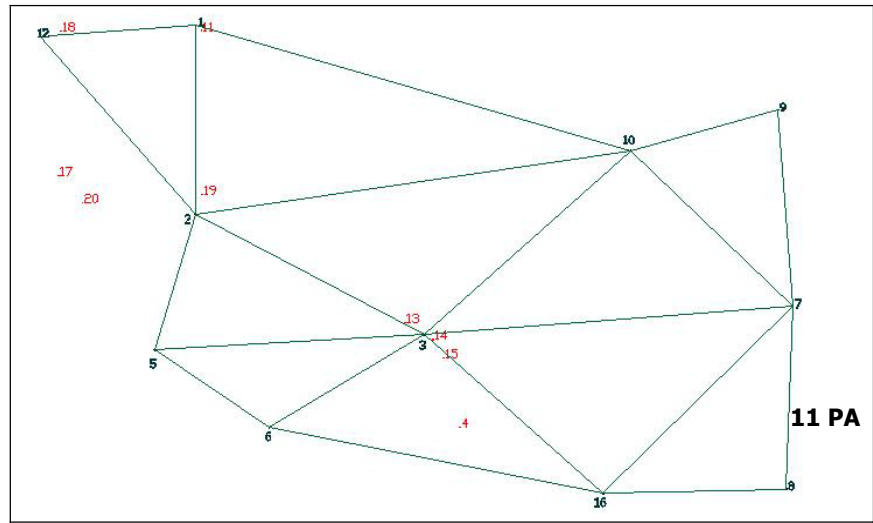
ANEXO 2: PUNTOS DE APOYO

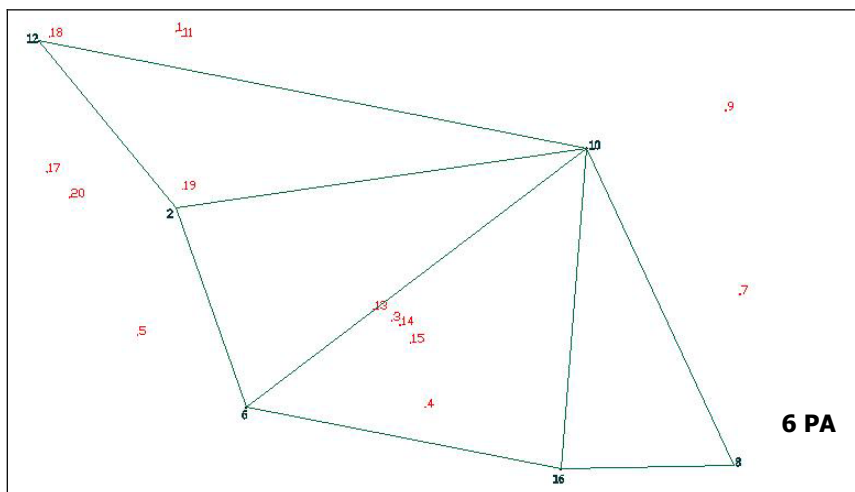
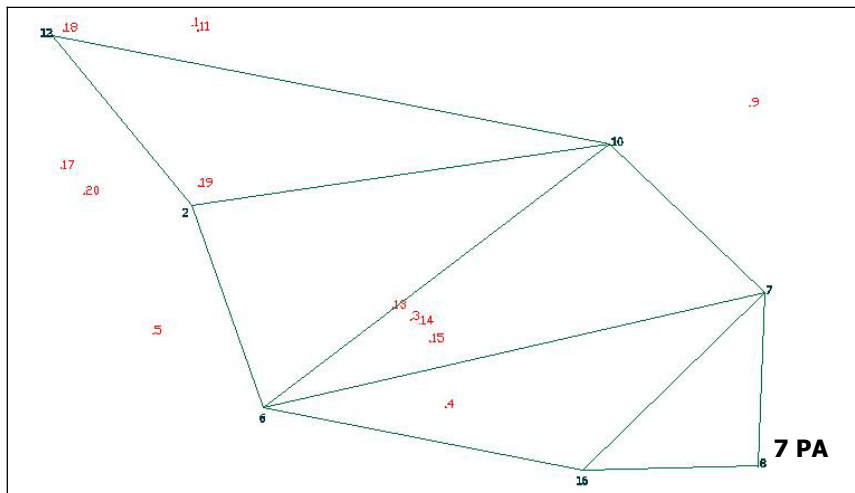
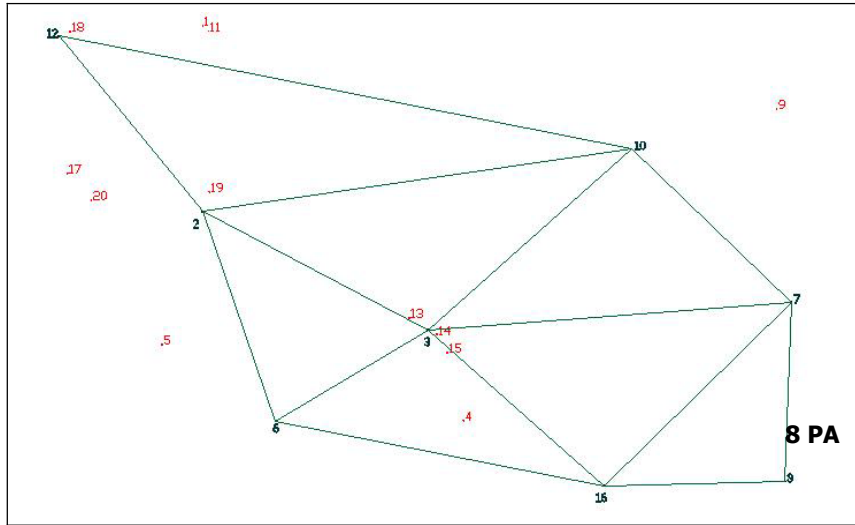
A continuación se muestran los croquis de las triangulaciones que forman cada uno de los grupos de PA formados en las pruebas experimentales:

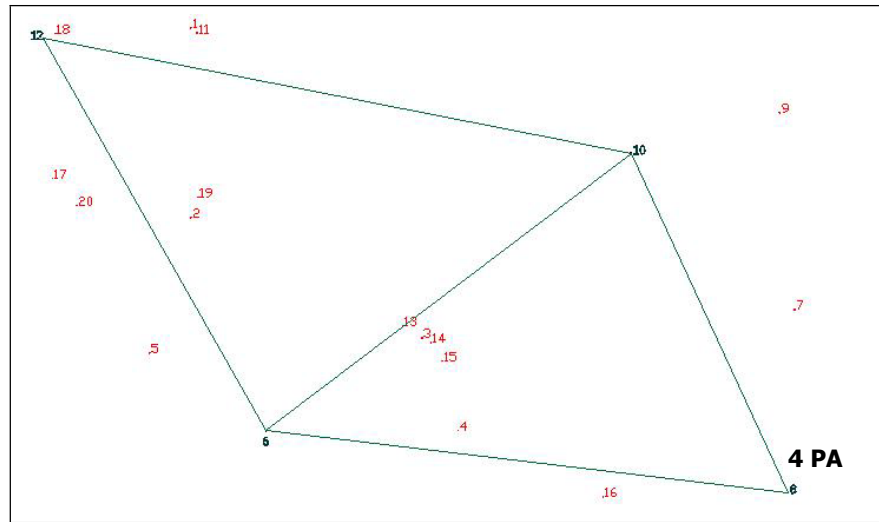
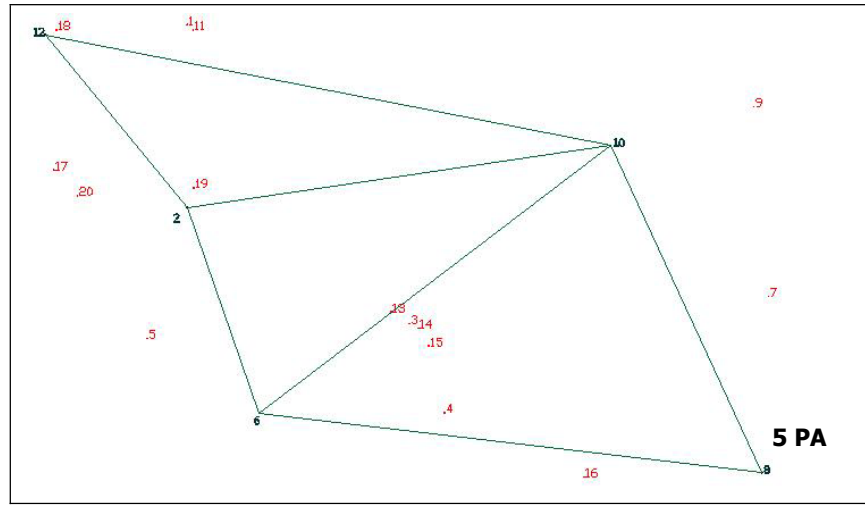












ANEXO 3: PUNTOS DE CONTROL

Punto Control	X	Y	Z
7	420688,868 4	4091018,49 9	854,8047
2	417012,516 9	4091390,15 9	1111,6935
2	424205,964 6	4092951,96 9	935,6248
6	424770,038 3	4092134,66 1	986,0495
1	424280,862 3	4092946,35 5	937,1762
8	420842,524 6	4091337,59 9	847,1296
18	426143,791 1	4091738,79 3	923,6580
5	417131,982 3	4091227,84 7	1099,9055
4	416754,113 8	4094420,76 4	1133,4571

3	416674,527 1	4093034,66 5	1140,5361
7	424770,064 1	4092134,22 1	986,3447
1	417131,912 1	4091230,93 9	1100,9296
13	424609,776 4	4091147,37 0	876,7025
15	425054,681 4	4091284,38 7	886,7306
10	424173,603 3	4090632,43 5	856,8655
11	424279,596 6	4090873,65 9	875,3894
14	424750,764 1	4091193,49 9	878,8549
17	425938,059 4	4091665,99 6	924,1427
8	424722,427 5	4092019,94 5	977,5252
6	420689,296 0	4091019,15 3	857,1323
9	424988,172 2	4092252,33 2	995,0511
9	420735,604 0	4091760,31 9	854,8196
16	425530,402 5	4091517,69 5	900,259
12	424549,046 2	4091121,88 7	872,0405
5	424877,248 9	4093634,44 4	995,2457
4	424873,881 7	4093604,92 0	989,4823
3	424887,090 2	4093595,21 3	1042,8956
103	427215,272 4	4090385,30 6	967,2557
19	426179,114 1	4091842,90 7	943,9121
47	426887,507 5	4091242,93 4	1009,6183
102	427215,262 4	4090385,34 9	967,2181
45	427115,112 1	4091222,25 7	1021,0382
40	428174,065 1	4091766,74 6	1067,0281
46	427054,245 0	4091234,05 6	1017,5775
32	428245,343 8	4092319,52 6	1088,6532
23	426524,037 1	4093160,54 6	1058,2073
30	427094,273 7	4092085,05 0	1037,7616
37	428889,578 6	4092531,33 7	1135,5442
20	426502,887 7	4092084,14 0	945,7394
42	427759,441 1	4091503,47 2	1051,9654
39	428552,635 9	4091903,96 8	1089,8020

21	426750,820 1	4092604,62 8	977,5485
43	427541,310 1	4091216,97 9	1037,5679
28	427974,392 7	4092733,47 7	1019,4437
26	427278,037 3	4092476,19 3	981,4889
27	427715,005 4	4092439,95 7	1032,9370
24	427026,797 7	4092515,85 3	979,6128
25	427055,965 4	4092446,49 9	984,3504
31	428252,321 0	4092309,27 2	1086,9596
33	428690,281 5	4092866,96 7	1070,0319
41	428308,338 0	4091906,44 8	1052,7248
34	428790,849 5	4092930,53 7	1063,4074
35	428921,426 6	4092974,15 1	1087,6813
44	427447,389 6	4091025,96 4	1027,2110
38	429003,460 8	4092273,21 1	1133,3549
29	427745,245 6	4092246,68 4	1058,1621
36	428904,503 9	4092863,40 6	1086,0300
22	426523,384 0	4093160,42 5	1059,7328
100	427462,978 9	4091033,27 0	1018,4459
Punto Control	X	Y	Z
29A	431287,981 4	4092279,85 8	1144,9143
32A	431442,681 7	4092029,73 8	1163,5320
5A	428817,426 9	4091552,39 4	1045,5701
B 007	416753,919 1	4094418,10 9	1133,4255
1A	426638,570 6	4091901,39 4	978,4411
30A	430990,431 9	4092185,24 7	1104,3654
B 019	419210,219 3	4091200,53 4	954,0148
25A	430172,188 2	4093043,53 3	1133,0940
B 008	417888,594 3	4094554,99 2	1175,4717
26A	430157,153 9	4093089,96 1	1140,3975
3A	426843,134 0	4091792,01 9	977,4948
27A	430051,131 7	4093226,72 8	1168,0177
B 025	420834,389 5	4092254,75 3	880,8439

B 010	416786,874 2	4094885,35 6	1134,6807
6A	428886,854 0	4091353,73 5	1022,9134
B 021	420686,668 8	4091013,45 6	855,0294
B 016	419939,172 5	4091078,54 8	890,5635
2A	426670,199 5	4091880,71 7	979,6438
9A	428928,982 2	4090722,14 1	958,3906
14A	429356,436 8	4091010,75 1	1004,7621
B 001	417131,903 5	4091229,35 4	1099,4936
11A	429831,109 0	4090776,40 3	987,6473
13A	429337,272 1	4090773,77 6	980,1575
18A	429932,980 8	4091050,62 1	1013,8732
B 005	416742,304 9	4093863,93 4	1132,9037
7A	428871,475 5	4090836,34 8	964,7795
B 012	417608,886 0	4092840,96 6	1123,2471
B 014	420136,904 0	4091414,22 3	903,3630
B 006	416915,593 6	4093823,41 9	1128,5666
B 003	416766,701 3	4092221,14 9	1117,6179
20A	430052,222 9	4091114,04 8	1018,8841
B 002	417013,064 4	4091387,46 3	1111,1629
B 004	416674,532 7	4093033,74 3	1139,2019
31A	431218,188 1	4091945,49 9	1133,1232
22A	430253,350 5	4091808,55 8	1044,9512
21A	430236,166 2	4091168,85 2	1015,7671
8A	428831,383 1	4090649,01 4	952,8950
B 018	419741,518 3	4091054,11 8	938,1315
10A	429404,845 4	4090753,51 8	973,8506
16A	429437,642 0	4091197,64 9	1026,9625
23A	430104,780 5	4092860,57 6	1116,3582
B 009	417078,042 0	4095003,09 5	1142,0674
19A	430025,218 7	4091098,40 1	1018,5408
28A	431399,201 3	4092428,81 9	1158,8913
B 011	417186,244 0	4093465,33 3	1131,2033

B 020	420634,885 6	4090922,58 1	858,5913
B 017	419788,894 7	4091095,92 7	922,0420
4A	427305,010 6	4091739,85 7	972,8154
12A	430886,661 9	4090834,75 8	1108,5513
15A	429514,006 6	4091337,33 8	1041,8493
24A	429456,348 6	4093573,33 2	1159,1620
B 022	420848,911 4	4091333,74 5	847,6282
17A	429635,906 0	4090876,85 0	972,5749
B 024	420833,647 6	4092257,14 7	884,2256
B 013	417544,651 6	4092740,71 5	1124,0905
B 023	421016,412 2	4091547,96 6	836,8216
B 015	420156,978 5	4091054,46 7	902,5833
60A	426174,812 0	4090369,15 1	898,0887
68A	427858,804 1	4089860,09 5	921,8546
33A	429419,679 1	4094571,54 0	1300,9402
36A	429627,638 3	4095367,46 6	1221,1962
Punto Control	X	Y	Z
35A	428671,135 8	4094840,37 6	1356,7784
40A	424405,818 7	4095266,84 3	1009,5840
37A	430013,588 6	4095103,71 2	1241,5244
63A	426846,383 9	4089935,25 6	929,3114
55A	425765,986 5	4090193,36 9	880,1981
67A	427777,692 2	4089844,21 7	921,0263
41A	424334,741 7	4094902,34 0	985,1825
53A	425696,966 3	4090218,46 1	872,9304
51A	425043,887 4	4090770,29 9	862,9324
59A	426382,659 0	4090062,55 9	897,0356
54A	425648,220 7	4090499,11 6	877,3711
62A	426609,155 0	4089782,60 4	903,8064
64A	426992,409 3	4089943,41 4	932,8612
58A	426471,051 7	4089949,01 6	895,3282
42A	424406,017 5	4094907,31 5	991,2555

61A	426448,304 0	4089818,98 7	896,9661
48A	424011,865 5	4090684,23 0	850,5968
50A	424955,198 1	4090575,32 6	859,1048
66A	427670,025 9	4089794,29 0	916,5611
47A	424244,343 6	4094493,64 2	1005,7069
39A	424431,583 5	4095290,30 8	1010,7070
44A	424411,027 7	4094851,38 2	981,2277
57A	426240,967 4	4089894,28 7	885,6985
38A	424279,914 3	4095241,37 3	1018,839
46A	424332,718 6	4094805,52 3	978,4288
43A	424384,239 0	4094852,80 7	980,3515
45A	424517,671 7	4094829,57 3	985,2039
69A	426871,051 8	4089597,87 7	897,4988
49A	424660,836 7	4090586,49 1	856,7404
56A	426209,025 1	4089947,65 8	887,1555
52A	425183,810 2	4090317,46 4	861,8293
34A	428545,948 4	4094819,24 4	1351,8957
85B	423749,273 3	4092572,90 5	915,1800
90B	423732,874 9	4091333,90 8	847,7404
81B	423012,728 8	4092578,02 2	868,9142
77B	422871,927 7	4093441,18 2	922,5382
93Bcontrol2	420463,644 8	4090419,22 1	867,1533
55B	420471,408 0	4095153,61 8	834,2944
64B	422265,568 4	4095283,53 3	934,6588
48B	419632,674 3	4094807,93 6	882,6500
82B	422868,012 9	4092442,51 3	844,8408
51B	419665,890 1	4095250,54 0	865,9979
50B	419587,584 6	4094971,28 8	870,5615
72B	422416,006 2	4093540,55 1	905,0431
52B	419631,984 1	4095272,07 4	870,8661
56B	420612,951 4	4095013,75 0	834,0963
84B	423310,810 6	4092214,25 9	846,9312

65B	423007,072 8	4094948,14 3	955,6361
76B	422397,068 6	4093142,32 7	878,3113
68B	422234,609 1	4094411,30 8	854,2371
78B	423031,239 4	4093511,77 6	936,4048
45B	420105,182 5	4093872,33 6	899,3733
86B	424040,816 4	4092042,08 4	898,6699
27B	423077,532 4	4091417,62 6	849,2674
49B	419683,566 5	4094803,68 4	877,3273
46B	419749,956 5	4094416,73 4	891,8064
71B	422484,388 9	4093460,43 8	902,6059
87B	424020,163 3	4091987,82 5	887,3484
26B	423180,173 9	4091373,12 6	858,5437
42B	419907,933 1	4092960,22 0	875,2564
000075B	422666,375 3	4093291,29 1	902,6193
Punto Control	X	Y	Z
000069B	422536,912 7	4094251,56 0	871,4216
000066B	421443,049 3	4094979,05 6	833,3144
000089B	423389,569 2	4091946,60 8	836,1319
000088B	423972,159 4	4091951,53 8	887,3691
000041B	419461,355 9	4092566,41 3	945,9268
000079B	422876,924 9	4093115,00 2	897,4929
000074B	422211,034 5	4093419,35 4	899,4528
000073B	422198,333 0	4093543,14 4	901,8374
000080B	423012,475 1	4092757,80 3	869,9058
000054B	420211,854 8	4095349,31 8	837,5938
000067B	421620,531 9	4094917,49 9	838,2029
000061B	421140,000 2	4095398,28 0	859,8167
000029B	421703,948 9	4090976,08 8	884,9326
000038B	419744,857 0	4092609,02 6	897,7572
000031B	421000,091 9	4090993,14 4	838,5980
000058B	420947,227 5	4095288,90 8	846,0388
000070B	422573,196 8	4094183,58 2	865,5431

000083B	423114,531 6	4092387,53 4	838,3903
000030B	421488,192 5	4090970,03 0	867,2131
000037B	419883,623 0	4092699,18 6	873,7716
000060B	421131,891 4	4095350,30 8	851,6214
000059B	420791,927 9	4095417,81 5	852,1648
000092B	423798,099 5	4090937,01 8	846,9592
000047B	419605,544 6	4094727,81 2	889,4397
000062B	421772,349 3	4095212,72 3	861,5949
000063B	422427,842 1	4094893,92 3	911,3616
000091B	423774,140 4	4090963,37 7	846,5552
20020405_183315 0	421002,549 1	4091001,06 4	839,0832
000057B	420752,560 3	4095127,60 8	834,7369
000044B	419891,548 7	4093764,99 7	891,9018
000034B	420010,328 8	4092266,52 7	886,9230
000004control	427133,597 1	4085114,34 3	1177,4523
000085B	423749,273 3	4092572,90 5	915,1805
000004camino	427224,497 6	4085111,15 6	1174,4166
000005contAUX	419452,422 2	4087017,49 2	1018,0668
000003control	426218,878 8	4087415,20 7	1073,4905
000005control	419443,216 6	4087030,77 0	1017,3825
000090B	423732,875 0	4091333,90 8	847,7404
Pista	425739,047 7	4087719,67 2	1063,4244
000081B	423012,728 8	4092578,02 2	868,9146
000064B	422265,568 4	4095283,53 3	934,6587
000048B	419632,674 3	4094807,93 6	882,6500
000082B	422868,013 2	4092442,51 4	844,8390
000051B	419665,890 1	4095250,54 0	865,9979
000050B	419587,584 6	4094971,28 8	870,5615
000072B	422416,006 2	4093540,55 1	905,0431
000052B	419631,984 1	4095272,07 4	870,8662
000056B	420612,951 1	4095013,75 0	834,0973
000084B	423310,810 5	4092214,25 9	846,9326

000076B	422397,068 5	4093142,32 7	878,3113
000078B	423031,239 4	4093511,77 6	936,4048
000086B	424040,816 3	4092042,08 5	898,6694
000027B	423077,532 4	4091417,62 6	849,2674
000049B	419683,566 4	4094803,68 4	877,3277
000046B	419749,956 5	4094416,73 4	891,8064
000071B	422484,388 9	4093460,43 8	902,6059
000087B	424020,163 2	4091987,82 5	887,3484
000026B	423180,173 8	4091373,12 6	858,5438
000075B	422666,375 3	4093291,29 1	902,6193
000089B	423389,569 2	4091946,60 8	836,1319
000088B	423972,159 6	4091951,53 8	887,3697
Punto Control	X	Y	Z
000079B	422876,924 9	4093115,00 2	897,4935
000074B	422211,034 6	4093419,35 4	899,4521
000073B	422198,333 0	4093543,14 4	901,8376
000080B	423012,475 1	4092757,80 3	869,9058
000054B	420211,854 7	4095349,31 8	837,5941
000061B	421140,000 6	4095398,28 0	859,8160
000029B	421703,949 7	4090976,08 8	884,9316
000031B	421000,091 3	4090993,14 4	838,5988
000058B	420947,227 4	4095288,90 8	846,0390
000083B	423114,531 6	4092387,53 4	838,3903
000030B	421488,192 4	4090970,03 0	867,2133
000060B	421131,891 4	4095350,30 8	851,6214
000059B	420791,927 9	4095417,81 5	852,1649
20020406_124355 0	423711,386 4	4088135,64 3	868,3559
000092B	423798,100 3	4090937,01 7	846,9606
000047B	419605,544 6	4094727,81 2	889,4397
000062B	421772,349 2	4095212,72 3	861,5949
000063B	422427,841 7	4094893,92 3	911,3625
000091B	423774,140 4	4090963,37 7	846,5551

000057B	420752,560 3	4095127,60 8	834,7369
000034B	420010,329 2	4092266,52 7	886,9225
000033B	420081,610 7	4092280,28 4	894,1372
000028B	422725,322 7	4091528,27 5	844,0992
000036B	419772,040 3	4092336,45 6	865,0781
000032B	420316,754 4	4092130,45 2	890,0549
000035B	419776,926 1	4092355,02 7	866,3602
G-40	435128,565 4	4093039,13 0	1214,3397
G-6_bis	437146,597 7	4089377,03 9	1379,6219
G-9	435982,298 9	4088160,56 7	1340,3248
G-42	435771,962 1	4093365,29 9	1190,7216
G-45	438099,027 2	4092777,72 9	1124,7021
G-17	430146,316 8	4082753,76 5	1066,1884
G-54	431444,473 1	4092028,21 8	1163,6718
G-7	437221,780 7	4089893,07 5	1414,8566
G-11	431586,485 1	4082713,42 4	1298,5690
G-24	429069,568 8	4083860,53 3	1207,2675
G-6	435519,458 4	4088122,64 3	1353,4182
G-44	437397,241 0	4092828,37 6	1140,6791
G-12	430943,180 8	4083065,48 1	1289,2000
G-1	426862,937 2	4089551,28 4	892,7384
G-39	435059,187 2	4092556,06 1	1238,0237
G-21	429318,633 0	4082642,79 0	1072,721
G-3	428735,855 5	4087740,51 4	932,2876
G-36	423489,685 4	4088336,57 1	856,8591
G-8	437274,789 4	4090016,35 4	1418,8716
G-37	435360,229 2	4083575,39 7	1291,539
G-43	436775,002 8	4093183,67 6	1166,0766
G-48	435400,736 9	4094663,89 9	1113,6222
G-28	427631,395 0	4083905,61 8	1259,4936
G-41	435370,570 1	4093453,83 6	1185,0447
G-38	435795,555 1	4090153,10 1	1328,0343

G-4	427852,295 2	4089851,74 8	921,3206
G-33	426447,219 3	4087299,88 3	1078,3478
G-27	427969,225 8	4083655,18 2	1255,4656
G-46	436423,098 5	4095177,04 4	1087,7397
G-13	430735,953 8	4083456,67 2	1286,9225
G-16	429974,293 0	4083057,25 7	1104,9588
G-31	427226,263 3	4085124,60 3	1174,1776
G-25	428818,493 6	4083396,27 2	1233,5656
G-20	429266,476 3	4082773,45 2	1064,2588
C-21	435011,118 5	4091805,14 5	1281,0084
Punto Control	X	Y	Z
G-23	429358,801 3	4083580,99 1	1178,2997
G-2	427626,658 5	4088553,88 8	933,7818
G-47	435608,773 9	4094420,31 5	1124,9428
G-22	429429,109 7	4083016,73 5	1094,9291
G-32	426721,645 5	4086838,65 6	1077,8411
G-15	430130,562 7	4083428,84 3	1152,6589
G-30	427556,022 3	4084484,92 1	1218,8434
G-50	433348,904 8	4094085,28 0	1232,2322
G-35	424037,434 6	4087625,65 6	874,9399
G-52	432658,450 1	4093504,32 7	1286,3904
C-9	435622,560 1	4087811,31 9	1342,0281
G-19	429526,994 3	4082905,37 6	1059,3812
G-26	428399,845 6	4083446,46 7	1269,8001
G-18	429881,982 9	4082876,98 9	1060,5670
C-10	435518,404 5	4087437,99 2	1343,5681
G-14	430446,941 4	4083568,81 8	1242,3255

ANEXO 4: GENERALIDADES SOBRE SPOT

4.1. Satélites de SPOT. desde SPOT-1 a SPOT-5

El esquema cronológico de lanzamiento de cada uno de los satélites se resume en la Figura 81, y es el siguiente:

- **SPOT-1** fue lanzado el 22 de febrero de 1986, y retirado del servicio activo el 31 de diciembre de 1990.
- **SPOT-2** fue lanzado el 22 de enero de 1990 y sigue estando operativo.
- **SPOT-3** fue lanzado el 26 de septiembre de 1993. El 14 de noviembre de 1997 tuvo lugar un fallo en el sistema de control de la posición del SPOT-3 y después de 3 años en órbita el satélite dejó de funcionar. El SPOT-1 fue entonces reactivado en Marzo de 1994 para solventar el aumento de demanda de imágenes SPOT.
- **SPOT-4** lanzado el 24 de Marzo de 1998 y está completamente operativo desde Mayo de mismo año.
- El satélite **SPOT-5**, último satélite, ha sido lanzado recientemente, en el 2002. Sus principales mejoras son especialmente en términos de resolución espacial (5m).

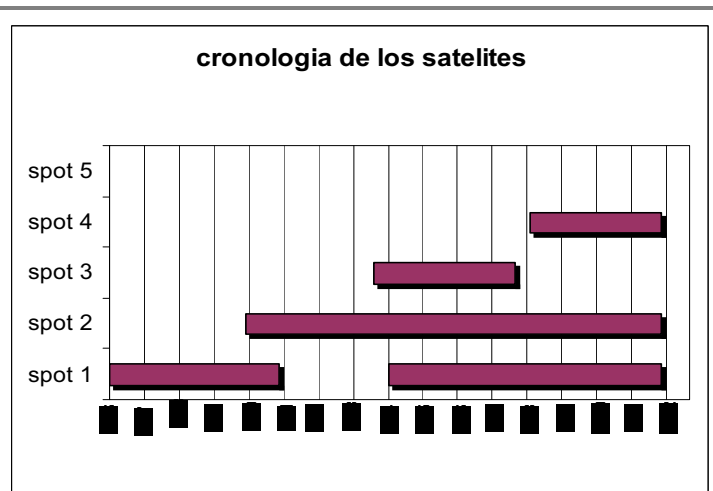


Figura 81. Periodos de operatividad de los satélites SPOT.

El satélite SPOT4 cuenta con dos sensores denominados HRV (*Haute Resolution Visible*), que posibilitan la obtención de imágenes en 2 modalidades: **pancromático** (PA) y **multibanda** (XS_n). Los dos sensores HRV pueden funcionar en cualquier modo, bien simultáneamente o individualmente. Como novedad importante con relación a los anteriores satélites de observación de la tierra, fue la posibilidad de variar el ángulo de visión oblicua de los detectores hasta los $\pm 27^\circ$ con respecto a la vertical (Figura 82). Este hecho, facilitó la observación de la misma zona en órbitas sucesivas (los sensores pueden enfocar a cualquier punto situado dentro de un rango de 475 Km en ambos lados del trazado de la órbita), y posibilita bajar la resolución temporal de 27 a

unos 2-3 días, permitiendo adquirir imágenes estereoscópicas, y por tanto, generar modelos digitales de elevaciones.

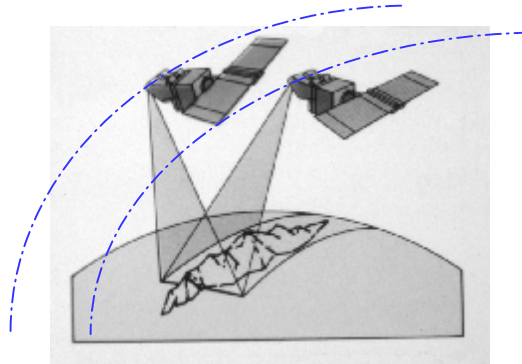


Figura 82. Giro del sensor HRV de SPOT

SPOT-4 además de los dos sensores HRV introdujo las siguientes mejoras en la obtención de datos:

- Adición de una banda nueva en el infrarrojo de onda corta (SWIR: 1,58-1,75 μm). El nombre de los dos instrumentos ha cambiado de HRV a HRVIR (de alta resolución visible e infrarrojo).
- Agregando a los dos HRVIR un instrumento nuevo llamado VEGETATION, que da una imagen muy amplia de la tierra (filas de 2000 kilómetros de ancho) con una resolución espacial de cerca de 1 kilómetro y de alta resolución radiométrica. Utiliza las mismas bandas espectrales que los instrumentos de HRVIR (B2, B3 y mid-IR) más una banda adicional conocida como B0 (0,43-0,47 μm) para usos oceanográficos y para las correcciones atmosféricas.
- Los instrumentos de proyección de imagen de los dos HRVIR son programables para la adquisición independiente de imágenes, aumentando perceptiblemente el número total de oportunidades de cambio de perspectiva de la imagen. En especial, es posible cambiar la dirección de la visión de un instrumento sin afectar la calidad de las imágenes adquiridas al mismo tiempo por el otro instrumento.
- Registro a bordo de todas las bandas espectrales. Esto se ha logrado sustituyendo la banda pancromática (0,51-0,73 μm) por la banda B2 (0,61-0,68 μm) que funciona en ambos modos de resolución (de 10 m y de 20 m).
- La capacidad de grabación (con dos grabadoras a bordo se aumentó de 22 a 40 minutos). Además, se agregó una capacidad de memoria de cerca de 10 Gbits, aumentando de este modo la fiabilidad total de la grabación a bordo.
- La transmisión por telemetría recepción directa en las estaciones en tierra protegiendo la confidencialidad comercial de datos transmitidos.

El programa **SPOT-5** ha desarrollado un método innovador de adquisición y de proceso de la imagen para alcanzar resoluciones de 3 m a partir de dos imágenes de 5 m. También se decidió continuar la misión VEGETATION instalando un instrumento a bor-

do del SPOT-5. El satélite **SPOT-5** ha sido lanzado en mayo del 2002. Las principales características destacables del SPOT-5 son los siguientes:

- Adquisición de la imagen y continuidad del servicio con los satélites SPOT anteriores, para satisfacer a los usuarios actuales que ya han invertido en el equipo y el software para la utilización de sus imágenes. Esto se facilita usando la misma órbita sincronizada con el sol con un ciclo de 26 días, la misma capacidad de ángulo visión nadiral de -27° a $+27^\circ$, las mismas bandas espectrales y las mismas áreas de 60 kilómetros de anchura para una visión vertical.
- Mejora de la resolución espacial hasta 3 m en la banda pancromática y 10m en el modo multiespectral. El SWIR que permanece en 20 m.
- Adquisición estereoscópica simultánea longitudinal (delante/detrás en vez de lateral).
- Tiempo de vida de la misión de más de 5 años, con una capacidad útil de visión de cerca de 42 Mkm² por año, incluyendo 6 Mkm² cubiertos por datos estereoscópicos.

El satélite SPOT-5 está aprovechando las tecnologías ya usadas en los satélites anteriores, en especial de la plataforma del SPOT-4.

Cada uno de los dos instrumentos de HRG (Alta Resolución Geométrica, *Haute Résolution Géométrique*) tiene dos nuevas estructuras matriciales lineales de detectores pancromáticos (en vez de una como en los sensores de los SPOT anteriores). Cada una de las líneas del detector puede conseguir una imagen del tamaño de 5m píxel y es posible combinar las dos imágenes de 5m de la misma área en una nueva imagen del tamaño de 2,5 m. píxel. Se utiliza un software específico para el procesado de imagen, desarrollado por CNES, para reconstruir la imagen final después de tres pasos: mezclado, interpolación y restauración (Figura 83).

Este nuevo tipo de imagen, simulado con todas sus características geométricas y radiométricas, concluye con una resolución entre 2,5 m y 3,5 m dependiendo de usos y los elementos analizados. Al procesado de las imágenes se le denomina "Supermode".

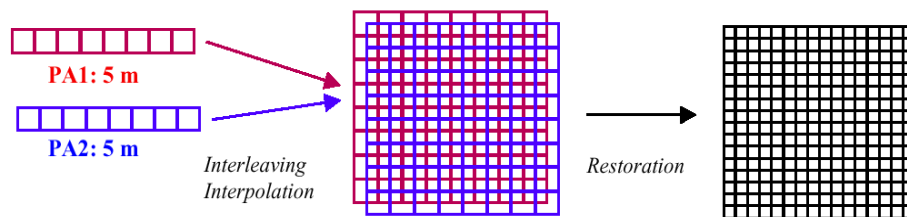


Figura 83. Procesado Supermode de imágenes SPOT-5 (Baudoin. 1999)

4.2. Características de los datos SPOT

Las características más importantes de la imágenes obtenidas por los sensores de los satélites de SPOT se muestran en la Tabla 89 y Tabla 90.

Tabla 89. Características generales de los datos SPOT.

Resolución temporal	26 días
Área recubierta por cada imagen	60 Km
Tipo de órbita	heliosincrónica
Altura de la órbita	aprox. 834 Km
Periodo orbital	aprox. 101 min.

Tabla 90. Características de las bandas de las imágenes SPOT.

CANAL	RANGO ELECTROMAGNÉTICO	RESOLUCIÓN
XS1	0.50 - 0.59 μ m (verde)	20 metros
XS2	0.61 - 0.68 μ m (rojo)	20 metros
XS3	0.79 - 0.89 μ m (inf.cercano)	20 metros
PA	0.51 - 0.73 μ m (visible)	10 metros

Todos estos productos varían su precio en función de las correcciones a las que hayan sido sometidos previamente a la distribución del producto. Las correcciones sistemáticas se clasifican en radiométricas y geométricas, corrigiendo las primeras entre otros, los efectos producidos por la mala calibración de los sensores y las segundas las debidas a la esfericidad y la rotación terrestre. Los satélites SPOT tienen los siguiente niveles de procesamiento:

Nivel 1A: Para este nivel de procesamiento no se lleva a cabo ninguna corrección geométrica. En radiometría, sólo se corrigen los efectos instrumentales mediante un modelo lineal destinado a igualar la sensibilidad de los detectores. Estas correcciones mínimas se aplican, de forma sistemática, a todos los datos Spot. La imagen no sufre ningún remuestreo, siendo de 6000 x 6000 píxeles en pancromático y 3000 x 3000 en multibanda.

Nivel 1B: Se efectúan las mismas correcciones radiométricas que para el nivel 1A. Las correcciones geométricas se aplican a los efectos sistemáticos: efecto panorámico, efecto de rotación y de curvatura de la tierra, variación de altitud del satélite con respecto al elipsoide de referencia. Las correcciones geométricas sirven para corregir el efecto panorámico.

Nivel 2: Las correcciones radiométricas son las del nivel 1A. Las correcciones geométricas, bidimensionales, se hacen conforme a una ley de deformación de la imagen establecida a partir de un modelo obtenido por datos auxiliares de altitud. Esta ley no recurre a un modelo numérico de terreno, por tanto los efectos de paralaje no se corrigen, quedando preservada la capacidad de visión estereoscópica SPOT.

Nivel 2A: La escena se restituye sin toma de puntos de apoyo, en un sistema de representación cartográfica determinado. Aunque la precisión de localización absoluta es idéntica a la obtenida en el nivel 1B, se puede, en cambio, calibrar cualquier punto de la imagen por sus coordenadas rectangulares.

Nivel 2B: Al realizarse las correcciones geométricas con la ayuda de puntos de apoyo, el error cuadrático medio es de 30 m. Para la realización del nivel 2B, es preciso poder disponer de la cartografía topográfica. De no existir se pueden tomar con GPS.

Nivel S: Se realizan las mismas correcciones radiométricas que para el nivel 1A. Las correcciones geométricas son idénticas a las aplicadas al nivel 2. Se llevan a cabo a

partir de puntos de control tomados en la imagen de referencia. La imagen se somete a un remuestreo.

4.3. ¿Por qué emplear imágenes SPOT?

Las ventajas del empleo de las imágenes satélite son conocidas, pero se puede destacar las siguientes:

- la capacidad de la plataforma espacial SPOT para obtener imágenes de la misma zona pero desde dos puntos de vista diferentes (imágenes estereoscópicas), hacen de esta fuente de información una herramienta muy apropiada para la generación de productos fotogramétricos.
- los costes de la imagen se reducen considerablemente frente a los métodos clásicos de fotogrametría analógica (sobre todo para pequeñas escalas) así el coste por Km² de una imagen SPOT es aproximadamente 3 veces menor –el coste real de una imagen SPOT se puede estimar en un 300% del precio de venta- que el de una imagen fotográfica, aunque evidentemente ésta última presenta una mayor resolución (12cms frente a los 10-20m), si bien esta resolución es de escasa utilidad para la generación de mapas a pequeña escala ([Konecny, 1990](#)).
- se produce otra considerable reducción de costes al necesitar un número de puntos de apoyo bastante menor para el procesamiento de las imágenes aéreas.
- las imágenes satélite proporcionan una cobertura constante y global de la superficie terrestre y su puesta a disposición del usuario es muy rápida (unos pocos días desde el momento de la captura).
- las imágenes son proporcionadas en formato digital, por lo que pueden ser directamente integradas en los procesos informáticos (fotogrametría digital), con el ahorro de costes de escaneado que las fotografías aéreas conlleva.

1.2. Líneas futuras de SPOT

Desde 1997 el Centro Nacional de Estudios Espaciales, (*Centre National d'Etudes Spatiales*, CNES) ha estudiado el uso de pequeños satélites para la observación de la Tierra con el principal fin de abaratar costes. Los estudios preliminares han concluido que con la posibilidad de un factor de reducción de 3 podría ser afrontada para cumplir la misión del SPOT5. Existe una necesidad de continuar y mejorar la misión del SPOT5, pero también de ampliar dicha misión, principalmente con otros tipos de imágenes (como SAR o hiperespectrales) o mejorando la resolución geométrica, ya que determinadas aplicaciones requieren resoluciones por debajo del metro.

Desde una perspectiva más general, el sistema SPOT se está desarrollando rápidamente forzado por la competitividad producida por los nuevos sistemas que generan imágenes de 1 metro de resolución espacial (IKONOS, OrbView, QuickBird).

La mejora de la misión SPOT 5 en términos de "resolución métrica" da paso a la propuesta de un nuevo concepto, el "3S". Las tres "S" proceden de la denominación de "Small Satellite System" o por "SPOT Sucesor System". El futuro de SPOT esta dirigido al desarrollo de dos series de pequeños satélites:

- 3S-HR: para mejorar las imágenes de alta calidad, con resoluciones espaciales por debajo del metro.
- 3S-CL: con un sistema más económico que el actual (aproximadamente tres veces).

La órbita 3S-CL ya no será la órbita del SPOT y fue elegida para maximizar la cobertura con una capacidad de visión mucho más ágil, hasta un ángulo de visión de 45°. Ca-

da satélite 3S-CL tiene solamente un instrumental que puede adquirir imágenes con 2 m de resolución en una banda pancromática obtenida a partir de 2 líneas del detector por un procesado Supermode y 7 m en 4 bandas que se registran sistemáticamente con la banda pancromática.

ANEXO 5: GENERALIDADES SOBRE ASTER

5.1. Satélite TERRA

El satélite TERRA, Figura 84, es concebido por el programa EOS de la NASA para registrar los cambios climáticos con precisión adecuada para permitir un pronóstico a corto plazo. Estos cambios atmosféricos están siendo generados por fenómenos como los incendios forestales, las erupciones volcánicas o las variaciones en las corrientes oceánicas.

Este satélite mide 3.5 m de altura por 6.8 de longitud y pesa 5190 kg. TERRA está compuesto de cinco subsistemas: CERES, MODIS, ASTER, MOPITT, MISR, que rastrean diferentes variables de la atmósfera; y la velocidad de datos de los instrumentos es de 18,545 kilobytes por segundo (promedio). Su vida útil se estima en 6 años.

Cada uno de los sistemas tiene características diferentes adaptadas para la captura de datos y el registro de diferentes parámetros:

- SISTEMA ASTER: Radiómetro espacial de emisión y reflexión térmica avanzado
- SISTEMA CERES: Medidor de las nubes y el sistema de radiación de energía de la Tierra
- SISTEMA MOPITT Mediciones de contaminación en la tropósfera
- SISTEMA MISR Radiómetro espectral con imágenes multiangulares
- SISTEMA MODIS Radiómetro espectral con imágenes de resolución moderada



Figura 84. Satélite TERRA.

5.2. Características del sensor ASTER

ASTER es el único instrumento de adquisición de imágenes de alta resolución en la plataforma EOS AM1. El principal objetivo de ASTER es obtener imágenes de la Tierra de alta resolución espacial en 14 bandas espectrales, además de obtener imágenes estereoscópicas en blanco y negro, ASTER contiene 3 subsistemas:

- VNIR (Visible and Near Infrared).
- SWIR (Shortwave Infrared).
- TIR (Thermal Infrared).

Tabla 91. Características de las bandas de las imágenes ASTER_TERRA.

Subsistemas	Nº de bandas	Rango electromagnético	RE
VNIR	3 Bandas	0.52-0.86 μ m	15 metros
SWIR	6 Bandas	1.60-2.43 μ m	30 metros
TIR	5 Bandas	8.125-11.65 μ m	90 metros

Glosario y abreviaturas

GLOSARIO

Estación Fotogramétrica Digital: Estación de trabajo que genera productos fotogramétricos a partir de imágenes digitales y mediante técnicas manuales y automatizadas.

Geometría epipolar: Geometría de una toma estereoscópica en la que los dos ejes de la cámara son paralelos entre sí y perpendiculares a la base.

Georreferenciación: Proceso por el que una imagen de satélite, obtenida en un sistema de coordenadas arbitrario, referido normalmente a la órbita, posición y orientación del sensor en el momento de la adquisición, se transforma a un sistema de coordenadas terrestres absoluto.

Líneas de Control: Conjuntos de puntos distribuidos de forma lineal, fácilmente identificables en las imágenes, de los que son conocidas las coordenadas 3D terreno y que servirán para estudiar la exactitud de los MDE.

Modelo Digital de Elevaciones: Estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

Orientación de Imágenes: Este término englobará los procesos de orientación relativa y absoluta. Con lo que se referirá tanto al establecimiento de la relación entre el espacio imagen y el espacio objeto, como a la reconstrucción de la superficie del terreno a escala real.

Paralaje: paralaje estereoscópica o paralaje absoluta es el cambio en posición de la imagen de un mismo punto en dos fotografías, producido por el cambio en la posición del sensor. La fórmula de paralaje es la relación matemática que permite calcular diferencias de altura a partir de diferencias de paralaje y viceversa. La diferencia de altura entre los puntos A y B, y tomando uno de ellos como referencia, por ejemplo el punto B y calcular la diferencia de altura del punto A con respecto al punto B:

$$Pa = Pb - Zr \cdot \frac{p}{P} \quad \text{y} \quad Pa = Pb + Zr \cdot \frac{p}{P}$$

En donde:

Zr = Altura de vuelo sobre el punto de referencia expresada en metros

P = $p^2 - r^2$ Paralaje absoluta del punto de referencia expresada en mm.

$Pa = La - Lr$ Diferencia de las lecturas de paralaje, en mm.

Par estereoscópico: Conjunto de dos fotogramas que captan el mismo elemento desde dos puntos de vista distintos, de tal manera que a partir de ellos se pueda reconstruir el objeto fotografiado.

Pirámide de Imágenes: Es la forma interna de trabajo de algunas de las Estaciones Fotogramétricas Digitales, en las que la imagen es almacenada en diferentes niveles, de tal manera que en el nivel superior la resolución de la misma es la menor y en el nivel

más bajo se encuentra la imagen con la resolución original.

Puntos de Apoyo: Puntos que pueden ser localizados con una determinada exactitud en una imagen. de los que se conocen sus coordenadas en el sistema de referencia terrestre y que servirán para la orientación de los modelos estereoscópicos.

Puntos de Control: Puntos de los que son conocidas las coordenadas 3D terreno y que servirán para estudiar la exactitud de los MDE.

Puntos de Paso: Puntos homólogos entre las imágenes que son utilizados para realizar la orientación. Son elegidos de forma automática por la estación en función de unos patrones internos de correlación y de distribución óptima en el modelo.

Puntos de Referencia: Puntos que pueden ser localizados con una determinada exactitud en una imagen. de los que se conocen sus coordenadas en el sistema de referencia terrestre y que servirán para la georreferenciación de las imágenes.

Abreviaturas

ABM: Area Based Matching

ASPRS: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing

AVHRR Advanced Very High Resolution Radiometer

CE90: Exactitud Posicional Circular con un nivel de confianza del 90%

CEOS: Committee on Earth Observation Satellites

CNES : Centre National d'Estudes Spatiales

DEM: Digital Elevation Model

DMA: Defense Mapping Agency

DSS: Decision Support System

EARSel : European Association of Remote Sensing Laboratories

ECM: Error Cuadrático Medio

EM: Error Medio

EMAS: Engineering Map Accuracy Standard

EO: Earth Observation

ERS : European Remote Sensing Satellite

ERS European Remote Sensing satellite

ESA European Space Agency

ESRIN European Space Research Institute

ETM Enhanced Thematic Mapper

ETRS89: Sistema de Referencia Terrestre Europeo

FAGS: Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services

FBM: Feature Based Matchig

FGDC: Federal Geographic Data Committee

GIS: Geographical Information System

HRV: Haute Résolution Visible

IAG: International Agency Geodesic

IAPRS: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing

ICSU: International Council of Scientific Unions

IERF International Earth Reference Frame

IERS International Earth Rotation Service

IRS: Indian Remote Sensing satellite

ISDN: Integrated Services Digital Network

ISPRS : International Society for Photogrammetry and Remote Sensing

ITRS : International Terrestrial Reference System

LISS : Linear Imaging Self Scanning sensor

LSM : Least Squares Matchig

MDE: Modelo Digital de Elevaciones

MDS: Modelo Digital de Superficie.

MDT: Modelo Digital del Terreno

NDVI: Normalised Difference Vegetation Index

NGVD'29: Nivel de Referencia Geodésico Vertical Nacional de 1929

NIR: Near Infra Red

NMAS: National Map Accuracy Standard

NOAA: National Oceanographic and Atmospheric Administration

NSSDA : Norma Nacional para la Exactitud de Datos Espaciales

OA: Orientación Absoluta

OEEPE: European Organisation for Experimental Photogrammetric Research

OA: Orientación Absoluta

OE: Orientación Exterior

OI: Orientación Interna

OR: Orientación Relativa

PA: Punto de Apoyo

PC: Punto de Control

PERS : Photogrammetric Engineering and Remote Sensing

PSMSL: Permanent Service for Mean Sea Level

PP : Punto de Paso

PRS: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

RE : Resolución Espacial

S: Desviación estándar

SAR: Synthetic Aperture Radar

SPOT: Systeme Provatoire d'Observation de la Terre

SWIR: Short Wave Infra Red

TIR: Thermal Infra Red

TM: Thematic Mapper

USGS: US Geological Survey

VNIR: Visible and Near Infra Red

Bibliografía

- [Ackermann, F. \(1994\)](#): "Digital Elevation Models – Techniques and Application. Quality Standards, Development". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 30(4) 421-432. <http://mapping.usgs.gov/standards/index.html>
- [Ackermann, F. \(1994\)](#): "Digital image correlation – performance and potential application in photogrammetry". Photogrammetric Record II. (64) 429.
- [Ackermann, F. \(1996\)](#): "Digital Photogrammetry. An addendum to the manual of photogrammetry". ASPRS. ISBN:1-57083-037-1
- [Albertz & Wiedemann \(1996\)](#): "Topographic and thematic mapping from satellite image data". 1st Turkish-German Joint Geodetic Days. Istanbul. 217-226.
- [Al-Rousan, N., & Petrie, G. \(1998\)](#): "Sistem calibration, geometric accuracy testing and validation of DEM & ortomages data extracted from SPOT stereopairs using commercially available image processing". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 32 (Part. 4) 8-15.
- [Angleraud, C. \(1992\)](#): "DEM determination from SPOT". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol.29 (Part. B4) 461-463.
- [Ariza, F.J. \(2002\)](#): "Calidad en la Producción Cartográfica". Editorial. Editorial RA-MA. ISBN:8478975241
- [ASPRS \(1952\)](#): "Manual of Photogrammetry". Second edition. Washington, DC: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- [Bacher, U. \(1998\)](#): "Experimental Studies into Automated DTM Generation on the DPW770". Int. Achives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 32. (Part. 4) 35-41
- [Bae Systems Mission Solutions Inc \(2001\)](#): "SOCET Set V.4.3.1. User's Manual". 861 p. (in CD).
- [Baltsavias, E. \(1991\)](#): "Multiphoto Geometrically Constrained Matching". Ph.DThesis in Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich.
- [Baltsavias, E. P., & Stallmann, D. \(1993\)](#): "SPOT Stereo Matching for DTM Generation". Paper presented at the Conference "Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision". 12. - 16. April. Orlando. USA. In Proc. of SPIE. Vol. 1944. 152 - 163.
- [Baudoin, A. \(1999\)](#): "The current and future SPOT Program". Proceedings. ISPRS Workshop "Sensors and Mapping form Space 1999".
- [Barnard, S.T., & Thompson, W.B. \(1980\)](#): "Disparity Analysis of Images". IEEE PAMI. Vol. 2. No. 4. 333-340.
- [Bolstad, P. V. & Stowe, T. \(1994\)](#): "An Evaluation of DEM Accuracy: Elevation. Slope and Aspect". PE& RS. 60(2). 1327-1332.
- [Chapman, C.A. \(1952\)](#): "A new quantitative method of topographic analysis". American Journal of Science, 250. 428-452.
- [CEOS \(2000\)](#): "DEM. Stereoscopic aspects of SPOT". (<http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b2/ceos1/science/gdta/ang/a2an/1.htm>)
- [Christmas, W.J. \(1995\)](#): "Structural matching in computer vision using probabilistic Reasoning". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Thesis of Vision. Speech and Signal Processing Group; Department of Electronic and Electrical Engineering University of Surrey. Guildford. U.K. Disponible en <http://citeseer.nj.nec.com/christmas95structural.html>
- [Chen, L.C. & Lee, L.H. \(1990\)](#): "A Systematic Approach in Digital Mapping for SPOT Satellite Imagery". Transactions of the Chinese Institute of Engineers. Series D. Vol.2. No.1. 53-62.
- [Cho, W., Madani, M. & Schenk, T. \(1992\)](#): "Resampling digital imagery to epipolar geometry". IAPRS. 29(B3) 404-408.

- [Day, T. & Muller, J.P. \(1988\)](#): "Quality assessment of Digital Elevation Models produced by automatic stereo matchers from SPOT images pairs". Proceeding of the 16th International Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Kyoto. Commission III. 148-159.
- [Días, A. & Mezcua J. \(1986\)](#): "Fundamentos de Geofísica". Madrid (España): Alambra. ISBN:84-205-1381-4
- [Doyle, F.J. \(1978\)](#): "Digital terrain models: an overview". Photo-grammetric Engineering and Remote Sensing, 44(12). 1481-1485.
- [Dowman, I.J. \(1998\)](#): "Automating image registration and absolute orientation: solutions and problems". Photogrammetric Record. 16 (91). 5-18 (April. 1998).
- [Durand, D. \(2000\)](#): "DEM. Stereoscopic aspects of SPOT". En CEOS (2000). Resources in Earth Observation 2000. Case studies. data and information for education and developing countries. <http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b/astart.htm>. Secc. [The Science of Remote Sensing](#).
- [ERSDAC, Earth Remote Sensing Data Analysis Center \(2002\)](#): "Aster User's Guide". Part III, DEM Product (L4A01). http://www.science.aster.ersdac.or.jp/users/pdf/Part30_1E.pdf
- [Felicísimo, A. M. \(1994\)](#): "Paramétric statistical meted for error detection in digital elevatiom models". ISPRS Jornal of Photogrammetry and Remote Sensing. 49(4). 9-33
- [Felicísimo, A. M. \(1994\)](#): "Modelos Digitales del Terreno". Oviedo (España): Pentalfa. ISBN:84-7848-475-2 <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/SIG/ICA95.html>
- [Fogelman, F., Robert, Y., & Tchuyente, M. \(1987\)](#): "Automata Networks in Computer Science: Theory and Applications". Princeton University Press. Princeton. N.J. GARDNER R. H. (1987). "Neural Models for the analysis of broad-male landscape pattern". Landscape Ecol.
- [Förstner, W. \(1982\)](#): "On the Geometric Precision of Digital Correlation". International archives of the photogrammetry. Vol. 24. Helsinki 1982: 176-189.*
- [Franke, R. \(1982a\)](#): "Scattered data interpolation: tests of some methods". Math. Comp.. 38. 181-200.
- [Franke, R. \(1982b\)](#): "Smooth interpolation of scattered data by local thin splines". Computers Math. With Applic. 8. 273-281.
- [Gruen, A. \(1985\)](#): "Adaptative Least Square Correlation: A poweful image matching techniques". S Afr J of Photogrammetry. Remote Sensing and Cartography 14 (3). 175-187*
- [García, J., Cuartero, A. \(2002\)](#): "Tendencia y recopilación practica de programas utilizados en estaciones fotogramétricas digitales". Mapping. Vol. 78. 26-32.
- [Gugan, D. J. \(1987\)](#): "Practical aspects of topographic mapping from SPOT imagery." Photo-grammetric record 6. 349-55.
- [Haan, A \(?\)](#): "An Analys of the Precision of a DEM obtained from SPOT Data". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- [Hae-Yeoun, L., Wonkyu, P., Taejung, K., Seungbum, K., Heung, K.L. & Tag-gon, K.M.D. \(2000\)](#): "The Development of an Accurate DEM Extraction Strategy For Satellite Image Pairs Using Epipolarity of Linear Pushbroom Sensor and Intelligent Inerpolation Scheme". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 33 (Part B3). 705-712.
- [Hadi, A.S. \(1992\)](#): "Identifying Multiple Outliers in Multivariate Data". J. Royal tatist. Soc. B 54. 3. 761-771.
- [Hawkins, D. M. \(1974\)](#): "The detection of errors in multivariate data, using Principal Components". ASA. 69, 340-344.
- [Hawkins, D. M. \(1993a\)](#): "A feasible solution algorithm for the Minimum Volume Ellipsoid Estimator in Multivariate data". Computational Statistics 8, 95-107.
- [Hawkins, D. M. \(1993b\)](#): "The feasible set algorithm for least median of squares regression". Computational Statistics & Data analysis. 16, 81-101.

- [Hannah, M.J. \(1981\)](#): "Error detection and correction in Digital Terrain Models". PE&RS, 47 (1), 63-69.
- [Hannah, M. J. \(1988\)](#): "Digital Stereo Image Matching Techniques". Proceeding of 16th ISPRS. In ASPRS vol. 27, B3, 87-104.
- [Hashimoto, T. \(2000\)](#): "DEM generation from stereo AVNIR images". Advances in Space Research. 25 (5), 931-936.
- [Heipker, C. \(1996\)](#): "Overview of Images Matching Techniques" OEEPE Workshop on "Automation in Digital Photogrammetric Production". http://dgrwww.epfl.ch/PHOT/workshop/wks96/art_3_1.html
- [Heiskanen, W. A. & Moritz, H. \(1967\)](#): "Physical Geodesy". San Francisco: Freeman.
- [Hirano, A., Welch, R., Lang, H., \(2002\)](#): "Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 1255 (2003): 1- 15.
- [Joly, F. \(1988\)](#): "La Cartografía ". Barcelona (España): Oikos.
- [Kääb, A., Huggel, C., Paul, F., Wessels, R., Raup, B., Kieffer, H., and Kargel, J. \(2002\)](#): "Glacier monitoring from ASTER imagery. Accuracy and Applications". EARSeL Proceedings. LIS-SIG Workshop. Berne, March 11-13, 2002. http://www.geo.unizh.ch/~kaeaeb/kaeaeb_earsel.pdf
- [Kim, S., Taejung, K., Wonkyu, P., Heung-kyu, L. \(1999\)](#): "An optimal interpolation scheme for producing a DEM from the automated stereo-matching of full-scale SPOT images". Proceeding of ISPRS conference on "Sensors and mapping from Space 1999". Hanover. Germany.
- [Kim, T., \(1999\)](#): "A Study on the Epipolarity of Linear Pushbroom Images". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.
- [Konecny, G., \(1990\)](#): "Photogrammetric and Cartographic Aspects of Geographic Information Systems". Geo-Informations-Systeme. 1-2.
- [Kraus, K. & Pfeifer, N. \(1998\)](#): "Determination of terrain model in wooded areas with airborne laser scanner data". ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 53. 193-203.
- [Kreiling, W. \(1976\)](#): "Automatische Erstellung von Hohenmodellen und Orthophotos durch digitale korrelation" Dissertation. Institut fuer Photogrammetrie. Universitaet Karlsruhe.
- [Kubik, K. & Wu X. \(1995\)](#): "Mapping from SPOT images using digital photogrammetric workstation". 17th International Cartographic Conference Proceedings. Barcelona. 1, 266-274.
- [Lang, H., Welch, R., \(1999\)](#): "ATBD-AST-08 Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Digital Elevation Models" (Standard Product AST14). V.3.0, revised february 1999. http://eospsa.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/ASTER/atbd-ast-08.pdf
- [Lanzl, F., Seige, P., Lehmann, F. & Hausknecht, P. \(1995\)](#): "Using multispectral and stereo MOMS-02 data from the Priroda mission for remote sensing applications". ISSSR. International Symposium on Spectral Sensing Research. Melbourne. Australia.
- [Lee, H., Park, W., Kim, T., Kim, S., Lee, HE. K. & Kim, T.G. \(2000\)](#): "The development of an accurate DEM extraction strategy for satellite image pairs using epipolarity of linear pushbroom sensors and intelligent interpolation scheme". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 33, Part B3.
- [Lerma, J.L. \(2002\)](#): "Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital". ED. Uiniversidad Politécnica de Valencia. ISBN: 8497052102.
- [Li, M.X. \(1989\)](#): "Hierarchical multipoint matching with simultaneous detection and location of breaklines". Ph.D thesis. Royal Institut of Technology. Department of Photogrammetry. Stockholm.
- [Li, R., Zhou, G., Yang, S., Tuell, G., Schmid, N.J. and Fowler, C. \(2000\)](#): "A study of the potential attainable geometric accuracy of IKONOS satellite imagery". Proceedings of 19th ISPRS Congress. Amsterdam.
- [Li, Z. \(1992\)](#): "Variation of the accuracy of digital Terrain models with samplig interval". Photo-

grammetric Record.

- [Li, Z. \(1991\)](#): "Effects of Check Point on the Reliability of DTM Accuracy Estimates Obtained from experimental test". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 57 (10), 1333-1340.
- [López, C. \(1997\)](#): "Quality of geographic data - Detection of outliers and imputation of missing values". PhD thesis in Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden.
- [López, C. \(1997\)](#): "Locating some types of random errors". *International Journal of Geographic Information Science*. 11. 7, 677-698.
- [López, C. \(2000\)](#): "On the improving of elevation accuracy of Digital Elevation Models: a comparison of some error detection procedures". *Transactions on GIS*. Vol. 4. nº1, 43-64.
- [Mark, D. M. \(1978\)](#): "Phenomenon-based data-structuring and digital terrain modelling". *Geo-Processing*. 1, 27-36.
- [Martínez, R., Gonzalez, F., Gordo, C. \(2001\)](#): "Análisis de las metodologías habituales para la generación de Modelos Digitales del Terreno". *Mapping*. Nº 71.
- [Maune, D. \(1996\)](#): "Digital Photogrammetry. An addendum to the manual of photogrammetry". Maryland (U.S.): ASPRS. (1996). ISBN:1-57083-037-1.
- [Mercer, J.B., Thornton, S., & Tennant, K. \(1998\)](#): "Operational DEM Production from Airborne Interferometry and from RADARSAT Stereo Technologies". RTI Annual Conference. ASPRS.
- [Miller, C. L. & Laflamme, R. A. \(1958\)](#): "The Digital Terrain model – Theory and Application". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 24, 433- 442.
- [Moellering, H. \(1983\)](#): "Designing interactive cartographic systems using the concepts of real and virtual maps". En Clarke, K.C. (1990,5).
- [Mukai, Y., Sugimura, T. & Arai, K. \(1990\)](#): "Automated generation of digital elevation model using system corrected SPOT data". *Proceedings 23th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Bangkok. 1107-1115.
- [Mukai, Y., Sugimura, T., Iijima, T., Ayabe, K., Tachi, K. & Nakazawa, T.\(1989\)](#): "Automatic computation of elevation data of side-lap area using system corrected Landsat TM data". Technical Report. Remote Sensing Technology Center of Japan. Tokyo.
- [Orun, A.B. & Natarajan, K. A \(1994\)](#): "Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60. 12, 1431-1437.
- [Östman, A. \(1987\)](#): "Quality control of photogrammetrically sampled Digital Elevation Models". *Photogrammetric Record*. 12 (69), 333-341.
- [Özbalımucu, M.\(2000\)](#): "Comparison of the results obtained from the aerial photographs and SPOT stereo images in the production of 1/50.000 scaled topographical maps". *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII. Part B4. Amsterdam.
- [Petzold, B., Reiss, P., & Stössel, W. \(1999\)](#): "Laser Scanning- Survey mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models". *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54. 95-104.
- [Peucker, T.K., Fowler, R.J., Little, J.J. & Mark, D.M. \(1978\)](#): "The triangulated irregular network". *Proceedings of the ASP Digital Terrain Models (DTM) Symposium*. American Society of Photogrammetry. Falls Church. Virginia. 516-540
- [Pollard, S.B., Mayhew, J.E.W. & Frisby J.P. \(1985\)](#): "PMF: A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit". *Perception*. Vol. 14. 449-470.
- [Priebbenow, R. & Clerici, E. \(1988\)](#): "Cartographic applications of SPOT imagery. *International Archives of Photogrammetry*". 37 (Part B4). 289-297.
- [Rauhala, U. A. \(1987\)](#): "Fast compiler positioning algorithms and techniques of array algebra in analytical and digital photogrammetry". *Proceedings of the Intercommission Conference on Fast-Processing of Photogrammetric Data*. Interlaken. June 2-4. 156-178.

- [Renaudin, E. \(2000\)](#): "Evaluation of DEMs from SAR Interferometry and SPOT stereoscopy for Remote Sensing Applications". Memoire presente en vue d'obtenir le Diplome d'ingenieur ESGT (Ecole Superieure des Geometres el Topographes). Institute for Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology. (Zürich)
- [Renka, R.J. \(1988\)](#): "Multivariate interpolation of large sets of scattered data". ACM Trans. Math. Software. 14. 139-148.
- [Ritsperis, A.\(1992\)](#): "Evaluating a New Methodology for the Prediction of Fire Behavior. with particular Reference to the Eucalyptus Plantation of Portugal". Imperial College of Science Technology and Medicine. University of London. MSc Report.
- [Rosenholm, D. \(1987\)](#): "Multi-point matching using least-squares techniques for evaluation of three-dimensional models". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 53(6), 621-626.
- [Sasowski, K.C., Petersen, G.W., Evans, B.M., \(1992\)](#): "Accuracy of SPOT digital elevation model and derivatives: utility for Alaska's North slope". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 58(6), 815-824.
- [Schneider, Th., Manakos, I., Reinartz, P., Müller, R., \(1999\)](#): "The evaluation of spectral and angular signatures from MOMS-2/P mode D data sets an application case study for land use purposes". Working Group IV/4. 4. Sensors amd mapping from space 1999. Hanover. Germany. September 27th 30th.
- [Slama, C. C. \(1980\)](#): "Manual of Photogrammetry". 4ª Ed. ASPRS. 1056 p.
- [Solaas, G.A. \(1994\)](#): "ERS-1 Interferometric Baseline Algorithm Verification". ESA report ES-TN-DPE-OM-GS02.
- [Thapa, K., Bossler, J. \(1992\)](#): "Accuracy of spatial data used in Geographic Information Systems". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 58. 6, 836-841.
- [Tejero, F. \(1986\)](#): "Topografía General Aplicada". Dossat. S.A. Barcelona. 1986.
- [Torlegard, K., Östman, A., & Lindgren, R.\(1986\)](#): "A comparative test of photogrammetrically sampled digital elevation model". Photogrammetria. 41 (1), 1-16.
- [Toutin, T., & Cheng, P., \(2001\)](#): DEM generation with ASTER stereo data. Earth Observation Magazine. 10 (6), 10-13.
- [Toutin, T., & Cheng, P., \(2001\)](#): "Demystification of IKONOS". Earth Observation Magazine. 9 (7), 17-21.
- [Toutin, T. \(2001\)](#): "DEM generation from new VIR sensors: IKONOS". ASTER and Landsat-7. IEEE-IGARSS 2001 Proceedings. Sydney. Australia.
- [Toutin, T., Chénier, R., & Carbonneau Y. \(2001\)](#): "3D geometric modelling of IKONOS GEO". ISPRS Joint workshop "High resolution Mapping from space". Hannover. Germany. September 19-21.
- [USGS. \(1997\)](#): "Standards for Digital Elevation Models. Part 3: Quality Control". U.S. Department of Interior. U.S. Geological Survey. National Mapping Division. Reston. Virginia. 10 p. <http://mapping.usgs.gov/standards/index.html>
- [Samet, H., Rosenfeld, A., Shaffer, C. A., Webber, R.E. \(1984\)](#): "A geographic information system using quadrees". Pattern Recognition. 17(6), 647-656
- [Samper, F.J., Carrera, J., \(1990\)](#): Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea. ISBN 84-404-6045-7, 480 pp.
- [Schenk, T. \(1999\)](#): "Digital Photogrammetry". Terra Science.
- [Schenk, A.F. \(1996\)](#): "Automatic Generation of DEM'S. Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry". Chapter 6. ASPRS. Greve. C.
- [SPOT Image Corporation. 1988](#). "SPOT User's Handbook".
- [SPOT Image Corporation.1998](#). "SPOT System". <http://www.spot.com>.

- [Strang, G., \(1989\):](#) "Introduction to applied mathematics". Wellesley-Cambridge Press, 510 pp
- [Wadge, G., Young, P.A.V., & McKendrick, I.J. \(1994\):](#) "Mapping lava flow hazards using computer simulation". J. Geophys. Res. 99. 489-504.
- [Welch, R. & Remillard, M. \(1994\):](#) "Integration of GPS, Digital Image Processing and GIS for Resource Mapping Applications". International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30. Part 4, 10-14.
- [Zhang, B., Miller, S. \(1997\):](#) "Adaptative Automatic Terrain Extraction". Proceeding of SPIE. Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision. Volume 3072. pp 27-36.
- [Zheng, Y.J. \(1993\):](#) "Inverse und schlecht gestellte probleme in der photogrammetrischen objektrekonstruktion". DGK-C 390.