

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA



**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y FACULTAD DE
CIENCIAS EXPERIMENTALES**

TITULACIÓN DE INGENIERO AGRÓNOMO

PROYECTO FIN DE CARRERA:

**GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE
ELEVACIONES EN ZONAS AGRÍCOLAS A PARTIR DE
IMÁGENES COMERCIALES DE SATÉLITE DE ALTA
RESOLUCIÓN**

ALUMNO:

MANUEL PALENZUELA ARDILA

DIRECTORES:

D. MANUEL ÁNGEL AGUILAR TORRES

Dña. MARÍA DEL MAR SALDAÑA DÍAZ

ALMERÍA, MARZO 2013

AGRADECIMIENTOS.

Este proyecto ha sido subvencionado por el Ministerio de Innovación y Ciencia del Gobierno de España y la Unión Europea (Fondos FEDER) en el marco del Proyecto de Investigación del Plan Nacional, con referencia CTM2010-16573, titulado: “Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes de los satélites GeoEye-1 y WorldView-2”.



Agradecer también el apoyo de la Junta de Andalucía a través del Proyecto de Investigación de Excelencia denominado: “Integración y análisis exploratorio de datos geoespaciales multifuente para el seguimiento y modelado de la evolución y vulnerabilidad de áreas costeras. Aplicación a una zona del Levante de Almería”, con referencia RNM-3575.



ÍNDICE:

1.- RESUMEN	8-10
2.- INTRODUCCIÓN	11-28
2.1.- FUENTES DE INFORMACIÓN GEORREFERENCIADA	15-28
2.1.1.- Satélites <i>VHR</i>	15-23
2.1.1.1.- GeoEye-1	18-19
2.1.1.2.- WorldView-2	20-22
2.1.2.- Modelos Digitales y sus aplicaciones	23-27
2.1.3.- Sensores <i>CCD (Pushbroom)</i>	27-28
3.- INTERÉS Y OBJETIVOS	29-30
3.1.- INTERÉS	30
3.2.- OBJETIVOS	30
4.- MATERIAL Y MÉTODOS	31-49
4.1.- ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA	32-38
4.1.2.- Zona de Estudio	32
4.1.3.- Datos de los Satélites <i>VHR</i> utilizados	33-36
4.1.3.1.- GeoEye-1	33-34
4.1.3.2.- WorldView-2	35-36
4.1.4.- Datos <i>LiDAR</i> 2011	36-37
4.1.5.- Medición de Puntos de Control	37-38
4.2.- METODOLOGÍA	39-49
4.2.1.- Estéreo pares considerados	39-41
4.2.2.- Extracción de <i>DSM</i> a partir de Imágenes de Satélite <i>VHR</i>	41-47
4.2.2.1.- Fase de Orientación del Sensor	41-46
4.2.2.2.- Fase de Extracción del <i>DSM</i>	46-47
4.2.3.- Evaluación de Calidad de los <i>DSMs</i>	47-49
5.- RESULTADOS	50-63
5.1.- CARACTERÍSTICAS RADIOMÉTRICAS	51-53
5.2.- PRECISIÓN DE LOS <i>DSMs</i>	53-59
5.3.- COMPLETITUD DEL <i>DSM</i>	60-63
6.- DISCUSIÓN	64-66
7.- CONCLUSIONES	67-69
8.- BIBLIOGRAFÍA	70-79

8.1.- SITIOS WEBS	79
ANEXO 1.- CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE TRABAJO.	80-93
1.- HARDWARE	81
2.- SOFTWARE	81-93
2.1.- GEOMATICA v.10.3	81-91
2.2.- RAPIDFORM	91-93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen del lanzamiento y del Satélite <i>GE1</i>	18
Figura 2. Características del Satélite <i>GE1</i>	19
Figura 3. Comparación entre las longitudes de onda de las bandas almacenadas por los satélites QuickBird y <i>WV2</i> , tanto en <i>PAN</i> como en <i>MS</i>	20
Figura 4. Imagen y principales características del Satélite <i>WV2</i>	21
Figura 5. Representación del terreno mediante Modelos Digitales de Elevaciones (<i>DEMs</i>)	24
Figura 6. Representación de un Modelo Digital del Terreno y un Modelo Digital de Superficies. La diferencia entre los dos nos permitiría obtener un Modelo Digital de alturas de Objetos (<i>MDO</i>)	25
Figura 7. Dispositivos característicos de un vuelo <i>LiDAR</i>	26
Figura 8: Procedimiento de captura de imágenes de los escáner de satélite (<i>pushbroom</i>)	27
Figura 9. Localización de la Zona de Estudio	32
Figura 10. Esquema de la toma del estéreo par puro de <i>GE1</i> , producto <i>GeoStereo</i> (30° <i>off nadir</i>) y de la imagen <i>Geo</i> ($< 10^\circ$ <i>off nadir</i>) sobre la zona piloto	34
Figura 11. <i>DSM</i> datos <i>LiDAR</i>	37
Figura 12. Situación de los 120 puntos de control, 51 <i>GCPs</i> (marcados como cruces) y 69 <i>ICPs</i> (marcados como círculos) sobre la zona de trabajo	38
Figura 13. Configuración estéreo par mixto (izquierda) y estéreo par puro (derecha), así como ángulo de convergencia (δ) y ratio B/H	40
Figura 14. Distribución de los 45 <i>GCP</i> (cruces), 12 <i>GCP</i> (círculos grandes) y 7 <i>GCP</i> (círculos pequeños) superpuestos sobre una ortoimagen pancromática de <i>GE1</i>	46
Figura 15. Diferentes áreas para la evaluación de la calidad del <i>DSM</i> , superpuestas en una ortoimagen de <i>GE1</i> . Las zonas urbanas están representadas con una línea blanca, las zonas sin cambios en color negro sólido y toda la zona de trabajo en línea negra discontinua	48
Figura 16. Análisis visual sobre un área urbana limitada (112 m x 150 m): (a) Imagen <i>PAN</i> original <i>GE12</i> , (b) Imagen <i>PAN</i> original <i>WV23</i>	52
Figura 17. Histogramas de los <i>DNs</i> de las seis imágenes <i>PAN</i> de los satélites <i>VHR</i> sobre el área de trabajo. (a) <i>GE11</i> , (b) <i>WV21</i> , (c) <i>GE12</i> , (d) <i>WV22</i> , (e) <i>GE13</i> y (f) <i>WV23</i>	53
Figura 18. Distribución espacial de las diferencias de cota y el histograma correspondiente para del <i>DSM</i> derivado del <i>LiDAR</i> – <i>DSM</i> puro de <i>GE1</i> (arriba) y <i>DSM</i> derivado de <i>LiDAR</i> – <i>DSM</i> puro de <i>WV2</i> (abajo)	57
Figura 19. Análisis visual sobre un área urbana limitada (112 m x 150 m): (a) <i>DSM</i> derivado del <i>LiDAR</i> , (b) <i>DSM</i> derivado del estéreo par <i>GE12-GE13</i> (ID 1), (c) <i>DSM</i> derivado del estéreo par <i>WV22-WV23</i> (ID 2), y (d) Residuos verticales procedentes de la comparación entre el <i>DSM</i> derivado del <i>LiDAR</i> y el <i>DSM</i> de <i>WV2</i>	58

Figura 20. Estadísticas de las diferencias de cota dentro de la zona sin cambios correspondientes a la comparación entre cada <i>DSM</i> extraído de imágenes de satélite <i>VHR</i> y los datos de elevación <i>LiDAR</i> en función del ángulo de convergencia. Los estéreo pares puros se resaltan dentro del círculo de línea discontinua	59
Figura 21. Completitud de cada <i>DSM</i> extraído de estéreo pares de satélite <i>VHR</i> dentro del área de trabajo en función de: (a) la diferencia entre la fecha de adquisición, y (b) ángulo de convergencia	60
Figura 22. Completitud dentro de un área limitada de estudio (1.160 m x 1620 m): (a) Imagen <i>PAN</i> original <i>WV21</i> , (b) <i>score channel</i> del <i>DSM</i> ID 2, y (c) <i>score channel</i> del <i>DSM</i> ID 13	61
Figura 23. Completitud de cada <i>DSM</i> derivado del estéreo par <i>VHR</i> dentro de las zonas urbanas y sin cambios, dependiendo del ángulo de convergencia. Líneas de tendencia lineal. Los resultados del estéreo par puro se destacan dentro de la elipse con línea discontinua	62
Figura 24. Ortoimagen pansharpened de <i>WV2</i> (primera fila), <i>DSM</i> y <i>score channel</i> del estéreo par de <i>GE1</i> (segunda fila), <i>DSM</i> y <i>score channel</i> del estéreo par de <i>WV2</i>	63
Figura 25. Pasos a seguir para crear un nuevo proyecto en OrthoEngine	83
Figura 26. Introducción de las imágenes <i>PAN</i> para generar las Epipolares	84
Figura 27. Pasos a seguir para introducir los Puntos de Control en cada una de las imágenes que formarán las Epipolares	85
Figura 28. Posición de las seis imágenes <i>PAN</i> de <i>GE1</i> y <i>WV2</i>	86
Figura 29. Homología entre dos fotogramas	86
Figura 30. Generación de las Imágenes Epipolares	87
Figura 31. Generación del <i>DSM</i>	88
Figura 32. <i>Geocoded</i> del <i>DSM</i>	89
Figura 33. Pasos a seguir para recortar una zona determinada en el <i>DSM</i>	90
Figura 34. Pasos a seguir para exportar el <i>DSM</i>	91
Figura 35. Pasos para triangular los <i>DSMs</i> .	92
Figura 36. Comparación de <i>DSM LiDAR</i> con los <i>DSM VHR</i>	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Satélites <i>VHR</i> existentes en la actualidad_____	17
Tabla 2. Comparativa de los satélites de <i>GE1</i> y <i>WV2</i> _____	22
Tabla 3. Características de las imágenes <i>PAN</i> de <i>GE1</i> (Productos <i>Geo</i> y <i>GeoStereo</i>) adquiridas en el área de estudio_____	34
Tabla 4. Características de las imágenes <i>PAN</i> de <i>WV2</i> (Productos <i>ORS2A</i>) adquiridas en el área de estudio_____	36
Tabla 5. Geometría de la Imagen, posición del sol y diferencias en las fechas de adquisición de cada estero par considerado a partir de las seis imágenes <i>PAN</i> originales descritas en las Tablas 3 y 4____	41
Tabla 6. Resultado de la orientación del sensor para estéreo pares puros (misma fecha y <i>along-track</i>) de <i>GE1</i> y <i>WV2</i> (ID 1 y ID 2) y Resultados estadísticos (media y desviación estándar) de la comparación del <i>DSM LiDAR</i> con los <i>DSMs VHR</i> sobre zonas sin cambios_____	55

CAPÍTULO 1

RESUMEN

1.- RESUMEN.

La última generación de satélites comerciales de muy alta resolución (*Very High Resolution, VHR*), como GeoEye-1 y WorldView-2, abre nuevas posibilidades para las aplicaciones cartográficas y de teledetección. Este proyecto se centra en la generación de Modelos Digitales de Superficie (*Digital Surface Model, DSM*) en zonas agrícolas a partir de imágenes comerciales de satélite *VHR*. Para ello, se utilizarán quince estéreo pares generados por la combinación de imágenes pancromáticas (*PAN*) de GeoEye-1 (*GEI*) y WorldView-2 (*WV2*). Dos de ellos serán estéreo pares puros (compuesto por dos imágenes tomadas en la misma fecha y en la misma órbita), uno por cada satélite *VHR*, mientras que los otros trece son estéreo pares mixtos (formados por dos imágenes tomadas en distinta fecha, en distinta órbita e incluso, en algunos de ellos por satélites diferentes). El objetivo fundamental del proyecto es estudiar el nivel de calidad alcanzable, en condiciones operacionales, en los *DSMs* generados a partir de imágenes de los dos satélites comerciales *VHR* más novedosos e inexplorados que existen en la actualidad (*GEI* y *WV2*), que implica tanto la precisión altimétrica como la completitud (i.e. grado de superficie cubierta por los datos altimétricos).

Concretamente se pretende estudiar cómo influyen, en el resultado de la precisión y de la completitud final de los *DSMs* generados automáticamente, factores como (i) el modelo de triangulación utilizado en la orientación del sensor, (ii) el número de puntos de control (*Ground Control Points, GCP*), (iii) las características radiométricas de cada imagen de satélite *VHR*, (iv) la geometría de la imagen de satélite (principalmente el ángulo de convergencia), (v) el tiempo transcurrido entre la fecha de adquisición de la imagen y (vi) el tipo de cubierta del terreno. Todos los *DSMs* generados a partir de imágenes de satélites *VHR* han sido comparados con un *DSM* derivado de un *LiDAR (Light Detection And Ranging)*, cuyos datos eran de alta precisión y han sido considerados como referencia (*Ground Truth*). En general, se lograron mejores resultados, tanto en la precisión como en la completitud del *DSM* utilizando las funciones racionales 3D refinadas por un ajuste polinómico de orden cero (*RPC0*) usando 7 o 12 *GCP*. En cuanto a los estéreo pares puros, el *DSM* extraído de imágenes de *GEI* alcanzó mejor precisión vertical en términos de desviación estándar de los residuos altimétricos ($\sigma_z = 0.44$ m), pero menor completitud (74.5%) que en el caso de *WV2* (0.61 m y 83.35%). La hipótesis que se está investigando es que las imágenes *PAN* más borrosas de *WV2* podrían haber influido en la mejora del porcentaje de éxito en el proceso de búsqueda de puntos homólogos (*matching*), pero reduciendo la precisión vertical de los

puntos extraídos. Cuando se consideraron los quince estéreo pares, la precisión vertical va desde 0.44 m a 1.93 m, principalmente en función del ángulo de convergencia del estéreo par. Además, la diferencia entre las fechas de adquisición fue el factor más influyente en la completitud.

CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN

2.-INTRODUCCIÓN.

Con el lanzamiento del satélite IKONOS en Septiembre de 1999 comienza una era completamente nueva en teledetección. Este satélite fue el primero de una nueva familia de satélites comerciales de muy alta resolución (*Very High Resolution, VHR*), capaces de capturar imágenes pancromáticas (*PAN*) de la superficie de la Tierra con un tamaño de píxel de 1 m, e incluso menos. Los satélites ópticos *VHR* ya han demostrado su capacidad para proporcionar productos cartográficos precisos, como ortoimágenes (Kay *et al.*, 2003; Davis y Wang, 2003; Aguilar *et al.*, 2007a; Aguilar *et al.*, 2008a) y Modelos Digitales de Superficies (*Digital Surface Models, DSM*) (Toutin, 2004a; Poon *et al.*, 2007; Eckert y Hollands, 2010; Deilami y Hashim, 2011; Capaldo *et al.*, 2012).

La capacidad de formación de imágenes estéreo de los nuevos satélites *VHR*, permiten generar fuertes estéreo geometrías con una relación Base-Altura (B/H) mayor de 0.5. La geometría de la imagen de satélite, en particular el ratio B/H o el ángulo de convergencia, juega un papel muy importante en la mejora de la precisión vertical de los *DSMs* (Li *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2007), aunque, en las zonas urbanas, para incrementar la semejanza entre las dos imágenes que forman el estéreo par y, en consecuencia, mejorar el proceso de búsqueda de puntos homólogos (*matching*), se prefieren pequeños ratios B/H (Eckert y Hollands, 2010). Por otro lado, su gran agilidad para la toma de imágenes, les permite generar estéreo pares de imágenes en la misma fecha y en la misma órbita, reduciendo las variaciones radiométricas y mejorando la tasa de éxito del proceso de *matching* (Toutin, 2000; Toutin, 2004a). Además, los datos estéreo *VHR* pueden ser adquiridos rápidamente sobre cualquier lugar de la Tierra, con un tiempo de revisita pequeño y a un precio razonable. De esta manera, la extracción de información tridimensional (*3D*) a partir de imágenes de satélites *VHR* ha sido objeto de una amplia investigación fotogramétrica en la última década, principalmente llevada a cabo de tres formas diferentes:

- (i) Analizando diferentes modelos de sensores físicos y empíricos en la fase de triangulación (Fraser *et al.*, 2002b; Toutin, 2003; Toutin, 2006; Fraser y Ravanbakhsh, 2009; Capaldo *et al.*, 2012)
- (ii) Comparando las precisiones de los *DSMs* obtenidos a partir de diferentes estéreo pares puros de satélites *VHR*, es decir, que los estéreo pares están formados por dos

imágenes adquiridas por el mismo sensor, en la misma fecha y en la misma órbita (*along-track*), además presentan ángulos óptimos para la visión estéreo (Toutin, 2004a; Toutin, 2006; Capaldo *et al.*, 2012), incluso comparar la precisión en *DSMs* generados a partir de estéreo pares mixtos, los cuales combinan imágenes tomadas en diferentes órbitas (*across-track*) y por diferentes sensores (Li *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009).

- (iii) Comparando diferentes módulos comerciales de generación automática de *DSMs* (Poon *et al.*, 2007; Eckert y Hollands, 2010; Capaldo *et al.*, 2012) o diferentes algoritmos de *matching* para la generación de *DSMs* (Zhang y Gruen, 2006; Alobeid *et al.*, 2010).

GeoEye-1 (*GEI*) (GeoEye, Inc, 2009), lanzado en 2008, es el satélite comercial *VHR* con la mayor resolución geométrica, tanto en *PAN* como en multiespectral (*MS*), con un tamaño de píxel (*Ground Sample Distance, GSD*), de 0.41 m en *PAN* y 1.65 m en *MS* en la posición más nadiral. El 4 de enero de 2010, con 0.46 m y 1.84 m de tamaño de píxel en *PAN* y *MS* respectivamente, empezaron a comercializarse imágenes del primer satélite comercial *VHR* capaz de capturar imágenes *MS* con ocho bandas (cuatro más que los demás satélites *VHR*) conocido como WorldView-2 (*WV2*) (DigitalGlobe, Inc, 2010). Todas las imágenes de *GEI* y *WV2* se comercializan remuestreadas a 0.5 m en *PAN* y 2 m en *MS*, como requisito impuesto por el Gobierno de los EE.UU. De hecho, hoy día *GEI* y *WVI* son los satélites comerciales *VHR* más innovadores e inexplorados. De este modo, los primeros resultados de precisiones verticales obtenidos a partir de estéreo pares de imágenes *PAN* de *GEI* y *WV2*, aunque muy variables, fueron superiores a los que se habían obtenido hasta ahora utilizando imágenes de otros satélites comerciales *VHR* como IKONOS o QuickBird. Por ejemplo, trabajando con estéreo pares de *GEI*, Fraser y Ravankhsh (2009) y Mitchell y MacNabb (2010) consiguieron una precisión vertical de 0.25 m, mientras que Wang y Zhao (2011) y Meguro y Fraser (2010) obtuvieron 0.44 m y 0.7 m respectivamente. Croft (2008), incluso llegó a calificar de prodigiosas las capacidades de *GEI* para la generación de mapas. Por otro lado, y utilizando estéreo pares de *WV2*, Mitchel y MacNabb (2010) lograron una precisión vertical de 0.31 m, mientras que Hobi y Ginzler (2012) consiguieron 1.2 m en una zona de trabajo cuya cubierta del terreno era vegetal. De hecho, además de la densidad y la distribución de los datos de origen, la precisión vertical de un *DSM* depende de la rugosidad de la superficie (Aguilar *et al.*, 2005; Li, 1992) y de la cubierta del terreno (Poon *et al.*, 2005;

Toutin, 2006; Hobi y Ginzler, 2012).

El procedimiento para evaluar la calidad de un Modelo Digital de Elevaciones (*Digital Elevation Models, DEMs*) o *DSM* incluye un análisis de la precisión vertical y de la completitud (Butler *et al.*, 1998; Höhle y Potuckova, 2006).

La precisión vertical del *DSM* puede obtenerse calculando diferencias de altura entre los puntos de comprobación (*Independent Check Points, ICPs*) y los puntos planimétricos correspondientes a esos *ICPs* en el *DSM*. Los *ICPs* deben ser al menos tres veces más precisos que la precisión esperada para ser verificados y el tamaño mínimo de muestra requerido para garantizar una evaluación fiable de la precisión no es fácil de especificar (Aguilar *et al.*, 2007b). Además, los *ICPs* tienen que cubrir toda el área de trabajo. Teniendo en cuenta estas premisas, muchos investigadores han propuesto el uso de un *DSM* de alta precisión obtenido a partir de datos *LiDAR (Light Detection And Ranging)* como el modelo de referencia (*Ground Truth*) para comprobar la precisión de los *DSMs* generados a partir de imágenes de satélite *VHR* (Toutin, 2004a; Capaldo *et al.*, 2012; Toutin, 2006; Mitchell y MacNabb, 2010).

Por otra parte, y teniendo en cuenta que los *DSMs* generados de manera automática no pueden ser determinados en todas las áreas debido a problemas de *matching* provocados por textura insuficiente, oclusión o por artefactos o fallos radiométricos, la precisión del *DSM* debe completarse con la completitud del *DSM*, que puede definirse como el porcentaje de puntos homólogos correctamente detectados en el área de trabajo o, en otras palabras, la cantidad de área correctamente definida en relación con el total de área de trabajo (Höhle y Potuckova, 2006).

Los objetivos de este proyecto son evaluar y comparar los *DSMs* extraídos de estéreo pares puros de imágenes *PAN* de satélites *VHR* de *GE1* y *WV2*, exactamente en la misma área de trabajo y con las mismas condiciones, mediante el uso como *Ground Truth* de un *DSM* generado a partir de datos *LiDAR* de alta precisión. También se evalúan los *DSMs* extraídos de estéreo pares combinados (estéreo pares mixtos) entre imágenes de *GE1* y *WV2*. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto en la precisión vertical de los *DSMs* y en su completitud, de varios factores como: (i) el modelo de sensor utilizado en la fase de orientación del sensor, (ii) el número de *GCPs* utilizados para ajustar los modelos de sensor,

(iii) las características radiométricas de cada imagen de satélite *VHR*, (iv) el tiempo transcurrido entre la fecha de adquisición de cada imagen empleada en cada *DSM*, (v) los tipos de cubierta terrestre o de usos del suelo, y (vi) la geometría del estéreo par formado por las imágenes de satélite.

2.1.- FUENTES DE INFORMACIÓN GEORREFERENCIADA.

2.1.1.- Satélites *VHR*.

Croft (2008) comienza su reportaje dedicado a *GEI* recordando como un artículo publicado en el magazine estadounidense *Ladies Home Journal* en el año 1900, que hacía predicciones para el próximo siglo, decía; “Habrá máquinas voladoras equipadas con potentes telescopios que tomarán fotografías de la Tierra tan nítidas y grandes como si hubiesen sido tomadas desde el otro lado de la calle”. Esa predicción de hace un siglo se ha cumplido, y casi en el tiempo pronosticado.

En 1972 se puso en órbita el primero de la serie de satélites *ERTS (Earth Resource Technology Satellite)* destinados, como su propio nombre indica, al estudio de los recursos naturales. A partir del segundo lanzamiento, el programa se denominó *LANDSAT*, con un gran rendimiento en cuanto a explotación de información se refiere. Este hito puede ser considerado el comienzo de la exploración de la superficie terrestre mediante imágenes de satélite, sin embargo, todavía faltaba mucho para llegar a la situación actual.

Unos años más tarde, se ponen en órbita dos satélites, familia *SPOT*, uno en 1986 y otro en 1990, con varias estaciones terrestres de recepción de datos. La principal característica que los distingue de la serie *LANDSAT* es su capacidad de giro lateral, que aumenta la resolución temporal, pudiendo observarse cualquier punto de la superficie terrestre con una periodicidad de entre uno y varios días. Esto hace posible generar incluso pares estereoscópicos de la zona observada, con la consiguiente generación de *DEMs*.

La aplicación de la fotogrametría digital a las imágenes de satélite en la década de los 90 supuso una verdadera revolución en la generación de información espacial, tanto topográfica como temática, para su integración en Sistemas de Información Geográfica (*GIS*). Sin embargo, no fue hasta 1999 cuando aparecieron los satélites comerciales *VHR*.

Actualmente existen orbitando sobre la tierra y recogiendo imágenes de su superficie doce satélites comerciales *VHR* (Tabla 1). Estos satélites se caracterizan por tener una gran resolución tanto geométrica, con un tamaño de píxel en la banda *PAN* de 1 m e incluso inferior, como radiométrica. La gran proliferación de este tipo de satélites en los últimos años ha supuesto una mejora en la disponibilidad y coste de estos productos.

El lanzamiento de IKONOS (propiedad de *GeoEye*), en septiembre de 1999, supone un hito muy importante en el campo de la teledetección ya que fue el primer satélite *VHR* puesto en órbita y el primero en poder captar imágenes terrestres con una resolución espacial muy alta, tanto en *PAN*, con 0.82 m (remuestreadas a 1 m) de tamaño de píxel, como multiespectrales (*MS*), con un tamaño de píxel de 3.28 m (remuestreado a 4 m) y con cuatro bandas en *MS* (Rojo (*Red*), Verde (*Green*), Azul (*Blue*) e Infrarrojo cercano (*Near InfraRed*, *NIR*)). Entre sus aplicaciones más importantes tenemos la elaboración de mapas (de áreas urbanas y rurales de reservas naturales y de desastres naturales), cartografía catastral, análisis de agricultura y forestales, y la detección de cambios en la minería y en la construcción. También puede proveer información relevante a la mayoría de los aspectos de estudio ambiental. Las imágenes de IKONOS han sido utilizadas en la industria cinematográfica, aportando vistas aéreas y fotos satelitales de diversas áreas alrededor del mundo. Su banco de datos de alta resolución es una contribución integral a la seguridad nacional, a la supervisión costera y facilita el análisis del terreno en 3D.

En 2001 fue lanzado el satélite QuickBird, de *DigitalGlobe* (USA), con una resolución de 0.61 m y 2.44 m en *PAN* y *MS* (*Red*, *Green*, *Blue* y *NIR*) respectivamente, para imágenes con *off-nadir* 0°, lo que le otorgó durante mucho tiempo el honor de ser el satélite comercial que presentaba la mayor resolución espacial. Utiliza un sensor remoto exclusivo Sensor BGIS 2000. Sus imágenes son tan precisas que se pueden visualizar automóviles, señalizaciones de tráfico y personas. Su elevada calidad geométrica y radiométrica hacen de QuickBird una interesante alternativa a la fotografía aérea, especialmente en aquellos casos en que la superficie a cubrir no es muy elevada y/o cuando se necesita tener información actualizada con gran frecuencia temporal.

Desde el lanzamiento de los satélites IKONOS y QuickBird, muchos investigadores los han considerado como posibles sustitutos de las clásicas imágenes aéreas para la obtención de cartografía a grandes escalas (Fraser, 2002a; Kay *et al.*, 2003; Chmiel *et al.*, 2004; Pecci *et*

al., 2004; Aguilar *et al.*, 2007c; Aguilar *et al.*, 2006). De hecho, IKONOS y QuickBird ofrecen la posibilidad de generación rápida y precisa de ortoimágenes, capaces de competir con las generadas a partir de vuelos aéreos convencionales, como por ejemplo, la ortofotografía en blanco y negro de la Junta de Andalucía de 2002 (Aguilar *et al.*, 2008a). Hay que tener en cuenta que la Consejería de Vivienda y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) están colaborando en la generación de nuevas ortoimágenes de la Comunidad Andaluza en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Estas ortofotografías aéreas, que se elaboran de forma sistemática en toda España, y también en Andalucía, desde 1999, son imágenes aéreas corregidas con una resolución geométrica que oscila entre 1 metro y los 50 centímetros.

Tabla 1. Satélites VHR existentes en la actualidad.

Satélite	País	Lanzamiento	Res.PAN (m)	Res. MS (m)	Tamaño Escena (km)
IKONOS-2	US	24/09/99	1.0	4	11
QuickBird-2	US	18/10/01	0.61	2.44	16
EROS B1	Israel	25/04/06	0.7	-	7
Resurs DK-1	Rusia	15/06/06	1.0	3	28
KOMPSAT-2	Corea	28/07/06	1.0	4	15
IRS Cartosat 2	India	10/01/07	0.8	-	10
WorldView-1	US	18/09/07	0.5	-	16
GeoEye-1	US	09/06/08	0.41*	1.65*	15
WorldView-2	US	10/08/09	0.46*	1.84*	16
Pleiades 1	Francia	16/12/11	0.5	2	20
Pleiades 1b	Francia	02/12/12	0.7	2	20
KOMPSAT-3	Corea	17/05/12	0.7	2.8	16.8

*La distribución y uso de imágenes con una resolución mejor de 0.5 m en pancromático y de 2 m en multiespectral estará sujeta a la aprobación por el Gobierno de los Estados Unidos.

2.1.1.1.- GeoEye-1.

En la actualidad, *GEI*, lanzado el 6 de Septiembre de 2008 (Fig. 1) y financiado al 50% por la empresa *GeoEye* y el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, es el satélite comercial *VHR* con mayor resolución geométrica, tanto en *PAN* como en *MS*. *GEI* ofrece la posibilidad de tomar imágenes con un *GSD*, como máximo, de 0.41 m en *PAN* y 1.65 m en *MS*, estando compuesta esta última imagen por las clásicas 4 bandas (*Blue* (450-510 nm de longitud de onda), *Green* (510-580 nm), *Red* (655-690 nm) y *NIR* (780-920 nm)) que suelen acompañar a la mayoría de los satélites *VHR*. Las características técnicas más relevantes del satélite *GEI* se resumen en la Fig. 2.

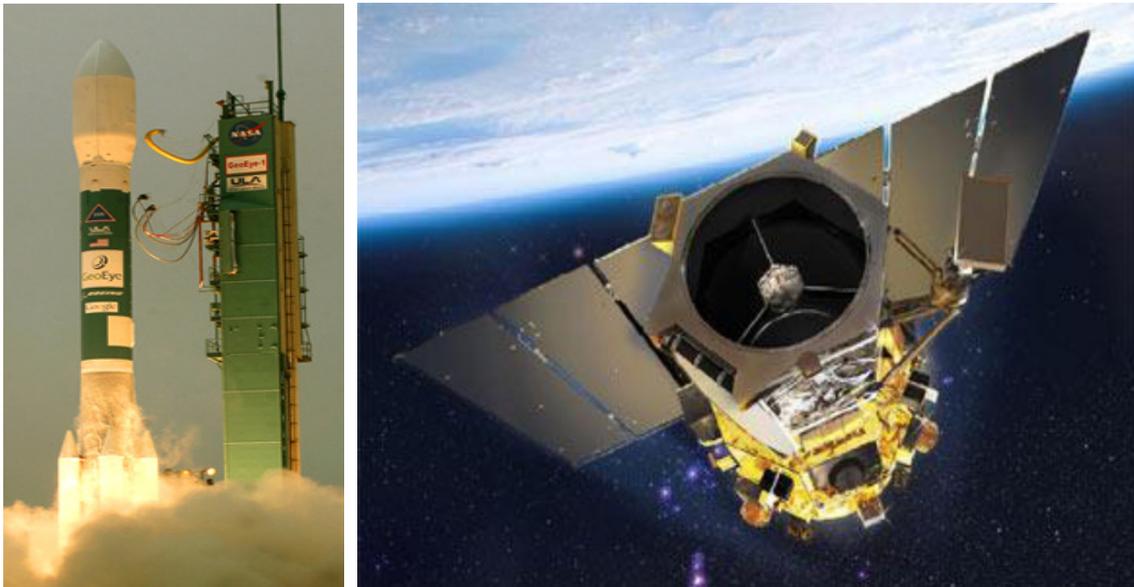


Figura 1. Imagen del lanzamiento y del Satélite *GEI*.

GEOEYE - 1 (Características técnicas)		
Sensor	Pancromático	Multiespectral
Resolución espacial	0,41 m (0,5 m comercial)	1,65 m (2 m comercial)
Resolución espectral (nm)	450 - 900	450 - 520 BLUE
		520 - 600 GREEN
		625 - 695 RED
		760 - 900 NEAR IR
Resolución radiométrica	11 bits/píxel	
Precisión	CE90% geo: 5 m	CE90% geo: 15 m
	CE90% geoProfesional: 10 m	CE90% geoProfesional: 10 m
Ancho de barrido (<i>Swath Width</i>)	15,2 Km (Nadir)	
Off-NADIR	Por encima de los 60°	
Tamaño de escena	Pedido mínimo 49 Km ² de archivo y 100 Km ² de programación	
Pares estéreo	Sí	
	Precisión: CE90% estéreo: 4 m LE90% estéreo: 6 m	
Revisita	Menos de 3 días (8,3 días Nadir)	
Programable	Sí	
Altitud	681 Km	
Formato de entrega	GeoTIFF	
Lanzamiento	6 Septiembre 2008	

Figura 2. Características del Satélite *GEI*.

GEI está equipado con la tecnología más avanzada en sensores remotos de teledetección de uso comercial. Hace 15 órbitas por día a una altitud de 681 kilómetros con una velocidad de órbita de alrededor de 7.5 km por segundo ó 27,200 km/hora. La totalidad del satélite es capaz de girar rápidamente en su órbita apuntando la cámara en las áreas terrestres que se encuentran directamente debajo del mismo, de lado a lado y de adelante hacia atrás. Esta característica le permite obtener mayor cantidad de imágenes durante la misma pasada.

La casa *GeoEye* comercializa diferentes productos del satélite *GEI* con diferentes niveles de procesamiento y coste. Además, ofrece productos derivados de estas imágenes, incluyendo *DEMs* y *DSMs*, mosaicos de grandes áreas y mapas caracterizados. Dentro de estos productos encontramos imágenes con bajo nivel de procesamiento, ideales para generar productos georreferenciados de alta calidad, imágenes ortorrectificadas mediante procesos patentados por *GeoEye* y estéreo pares puros compuestos por dos de las imágenes anteriores.

2.1.1.2.- WorldView-2.

El 8 de octubre de 2009 hay que remarcar otro hito en la corta historia de los satélites *VHR*, el lanzamiento del satélite *WV2* de *DigitalGlobe*. Este nuevo satélite presenta una gran resolución geométrica en *PAN* (0.46 m) y *MS* (1.84 m), aunque ligeramente inferior a la obtenida por *GE1*. Su principal novedad es que tiene la capacidad de almacenar 8 bandas en la imagen *MS* (Fig. 3): *Coastal Blue* (400-450 nm), *Blue* (450-510 nm), *Green* (510-580 nm), *Yellow* (585-625 nm), *Red* (630-690 nm), *Red-Edge* (705-745 nm), *NIR-1* (770-895 nm) y *NIR-2* (860-1040 nm). Su alta resolución espacial permite la detección de detalles pequeños, y su alta resolución espectral lo capacita para obtener información detallada sobre la calidad de superficies asfaltadas, profundidad del mar, o incluso sobre el estado de salud de un cultivo. Los principales beneficios que le aportan las 8 bandas *MS* a este satélite son: mayor precisión de color, una clasificación más precisa y menor tiempo de procesamiento. Las cuatro bandas adicionales con respecto a los demás satélites *VHR* incorporan aplicaciones como: (i) el uso de la banda *Coastal Blue*, gracias a su mayor penetración en el agua podría estar indicada en estudios batimétricos, (ii) el uso de la banda *Red-Edge* tendría importancia especialmente en medidas de salud de plantas y clasificación de vegetación, (iii) la banda *Yellow* en estudios de clasificación, que además, junto con la tradicional banda *Green*, es muy útil para poder discriminar entre diferentes tipos de cubiertas vegetales, y (iv) el nuevo *NIR-2* que presenta las mismas características que el *NIR* tradicional pero, en este caso, se ve menos afectado por la influencia atmosférica y se puede usar en estudios de la biomasa.

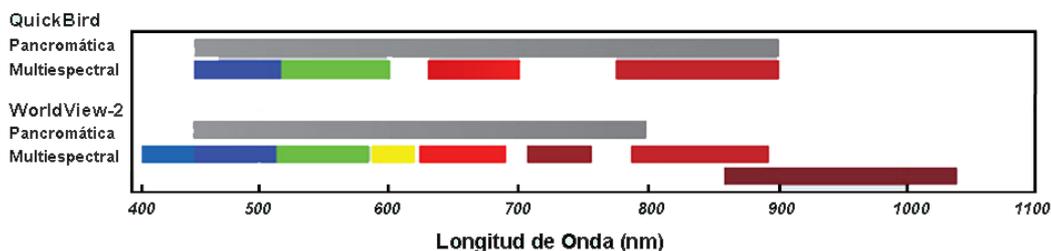


Figura 3. Comparación entre las longitudes de onda de las bandas almacenadas por los satélites QuickBird y *WV2*, tanto en *PAN* como en *MS*.

Las imágenes de este nuevo satélite *VHR* se empezaron a comercializar a partir del 4 de enero de 2010, por lo que aun no hay demasiados estudios realizados sobre aplicaciones

reales con imágenes de este satélite.

WV2 tiene una capacidad para tomar imágenes de hasta 975,000 km² por día (en PAN) (equivalente a la superficie de Francia y Alemania juntas), y un promedio tiempo entre nuevas tomas de 1.1 días y capacidades estéreo de grandes superficies. La combinación de una mayor altitud, gran agilidad, detectores bidireccionales y múltiples estaciones en terreno, permiten a WV2 alcanzar altos índices en cuanto a la toma de imágenes. La altitud de órbita de 770 km en combinación con un giroscopio de control de momento (*Control Moment Gyroscope, CMG*) de vanguardia ofrece una rápida búsqueda de objetivos. Y con los sensores de pista longitudinales de dos direcciones, el *CMG* maniobrará al satélite de manera muy óptima para captar una superficie máxima mayor de 10,000 km² con un simple paso por la vertical. La agilidad y el escaneo en dos direcciones permitirán, de manera muy eficiente, la toma de imágenes estéreo y longitudinales de más de 5,000 km². Otras características de este satélite se pueden observar en la Fig. 4.

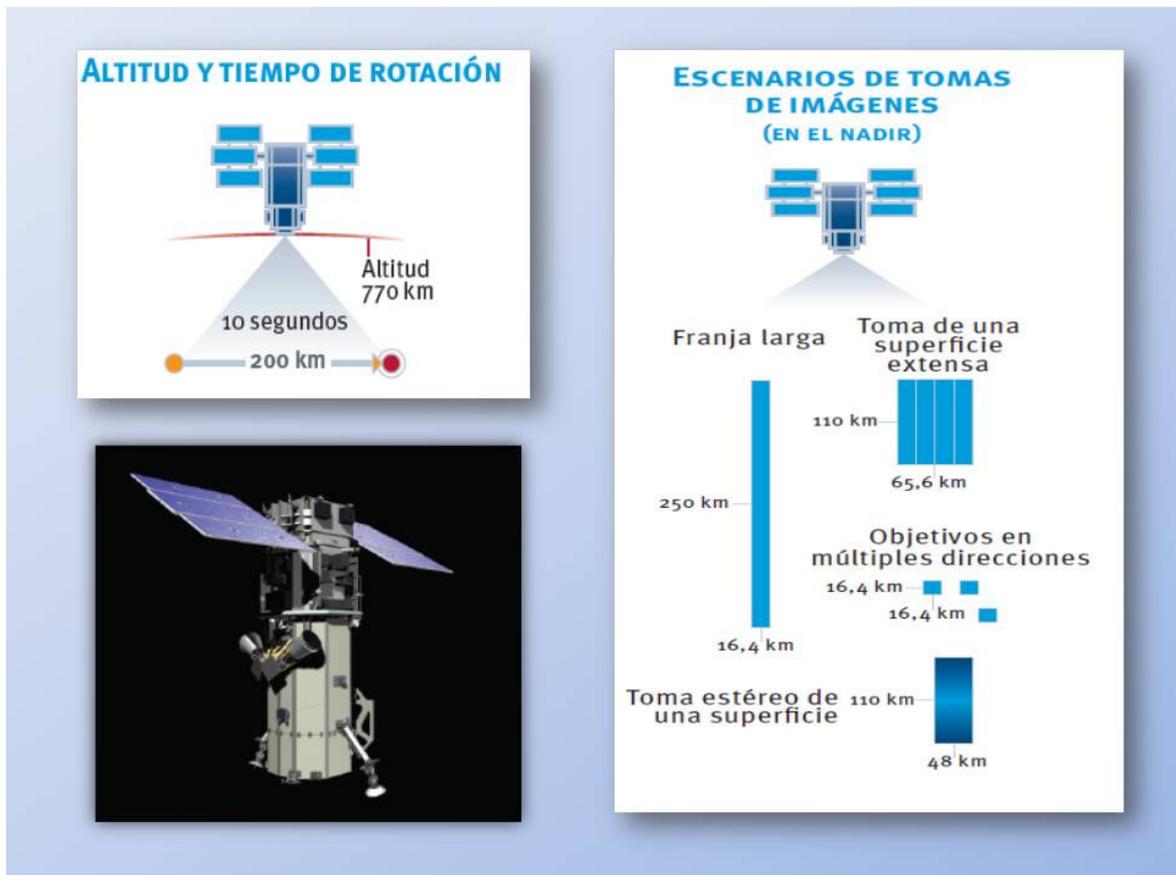


Figura 4. Imagen y principales características del Satélite WV2.

DigitalGlobe ofrece una amplia gama de productos de *WV2*, entre los que encontramos imágenes con escaso nivel de precesamiento, sólo corregidas radiométricamente, imágenes con el relieve topográfico normalizado respecto al elipsoide de referencia (tienen correcciones del terreno pero no son ortorrectificadas), imágenes que no tienen normalizado el relieve topográfico, por lo que son ideales para producir productos ortorrectificados de alta precisión y estereo pares puros formados por dos de las imágenes anteriores.

Las principales diferencias entre los satélites de *GEI* y *WV2* se especifican en la Tabla 2.

Tabla 2. Comparativa de los satélites de *GEI* y *WV2*.

	<i>GEI</i>	<i>WV2</i>
Fecha de lanzamiento	6 de septiembre de 2008	8 de octubre de 2009
Lanzadera	Delta II. Boeing Corporation	Delta 7920
Lugar de lanzamiento	Vandenberg Air Force Base, California	Base de la Fuerza Aérea en Vandenberg, California
Peso por satélite	1,959 kg	2,800 kg
Altura de órbita	681 km	770 km
Ciclo de vida previsto	7 años	7.5 años
Velocidad orbital	7.5 km / seg o 27,200 km / h	20 km / seg o 72,200 km / h
Tipo de órbita	Órbita solar / 98 minutos	Órbita solar / 100 minutos
Bandas de los Sensores	<ul style="list-style-type: none"> • 1 BANDA PANCROMÁTICA: 450-800 nm • 4 BANDAS MULTIESPECTRALES: <ul style="list-style-type: none"> - <i>Blue</i>: 450-510 nm - <i>Green</i>: 510-580 nm - <i>Red</i>: 655-690 nm - <i>NIR 1</i>: 780-920 nm 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 BANDA PANCROMÁTICA: 450-800 nm • 8 BANDAS MULTIESPECTRALES: <ul style="list-style-type: none"> - <i>Blue</i>: 450-510 nm - <i>Green</i>: 510-580 nm - <i>Red</i>: 630-690 nm - <i>NIR 1</i>: 770-895 nm - <i>Red Edge</i>: 705-745 nm - <i>Coastal Blue</i>: 400-450 nm - <i>Yellow</i>: 585-625 nm - <i>NIR 2</i>: 860-1040 nm
Tiempo de Revisita	< 3 días	1.1 días con 1 metro de <i>GSD</i> o menos y 3.7 días a 20° fuera del nadir o menos (0.52 metros de <i>GSD</i>)
Resolución espacial	<ul style="list-style-type: none"> • 0.41 m(*) Pancromático (nominal en Nadir) • 1.65 m(*) Multiespectrales (nominal en Nadir) 	<ul style="list-style-type: none"> • 0.46 m(*) Pancromático (nominal en Nadir) • 1.84 m(*) Multiespectrales (nominal en Nadir)
Rango Dinámico	11 bits por píxel	11 bits por píxel
Capacidad de captura	Hasta 700,000 km ² / día en modo pancromático.	Hasta 975,000 km ² / día en modo pancromático.
Almacenamiento y descarga	1 terabits, X-banda de descarga (150 MB / seg)	524 gigabits, X-banda de descarga (800 MB / seg)

Una de las aplicaciones más comunes de imágenes procedentes de sensores remotos es la extracción de información de usos de la superficie del suelo. Esta información será útil para que los gobiernos municipales puedan optimizar la planificación y gestión del territorio, tanto en ambientes urbanos como rurales y/o agrícolas.

Los satélites *VHR* también ofrecen la posibilidad de generar *DSMs* a partir de estéreo pares de imágenes, pudiendo obtener errores medios cuadráticos de entre 1 a 2 veces el tamaño de píxel de la imagen original. Estos errores dependen, entre otros factores, de lo accidentado de la orografía, del sensor usado, del modelo de sensor utilizado en la triangulación, la calidad de puntos de control (Ridley *et al.*, 1997; Toutin 2004b; Toutin 2006; Aguilar *et al.*, 2007d). Estos errores han sido mucho menores, en torno a 0.5 veces el tamaño del píxel, cuando el *DSM* fue generado a partir de un estéreo par de *GEI* (Fraser y Ravanbakhsh, 2009).

2.1.2.- Modelos Digitales y sus aplicaciones.

Los Modelos Digitales son una fuente de información de alto valor para la extracción de elementos en una determinada zona.

Un Modelo Digital del Terreno (*Digital Terrain Model, DTM*) constituye una representación numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Cuando la variable representada son las cotas o elevaciones del terreno, el *DTM* pasa a denominarse *DEM*.

Los *DTMs* o *DEMs* deben cumplir dos condiciones adicionales: (i) la primera es que debe existir una estructura interna de los datos que represente las relaciones espaciales entre los mismos y, (ii) que la variable a representar debe de ser variable continua y de tipo cuantitativo. En un *DTM*, las variables a representar son extraordinariamente diversas, aunque la más frecuente sin duda es la representación de la cota o altitud de los puntos que definen la superficie del terreno, dando lugar a los *DEMs*. Los *DEMs* pueden considerarse la versión digital de los mapas topográficos clásicos (planos analógicos basados en curvas de nivel) (Fig. 5).

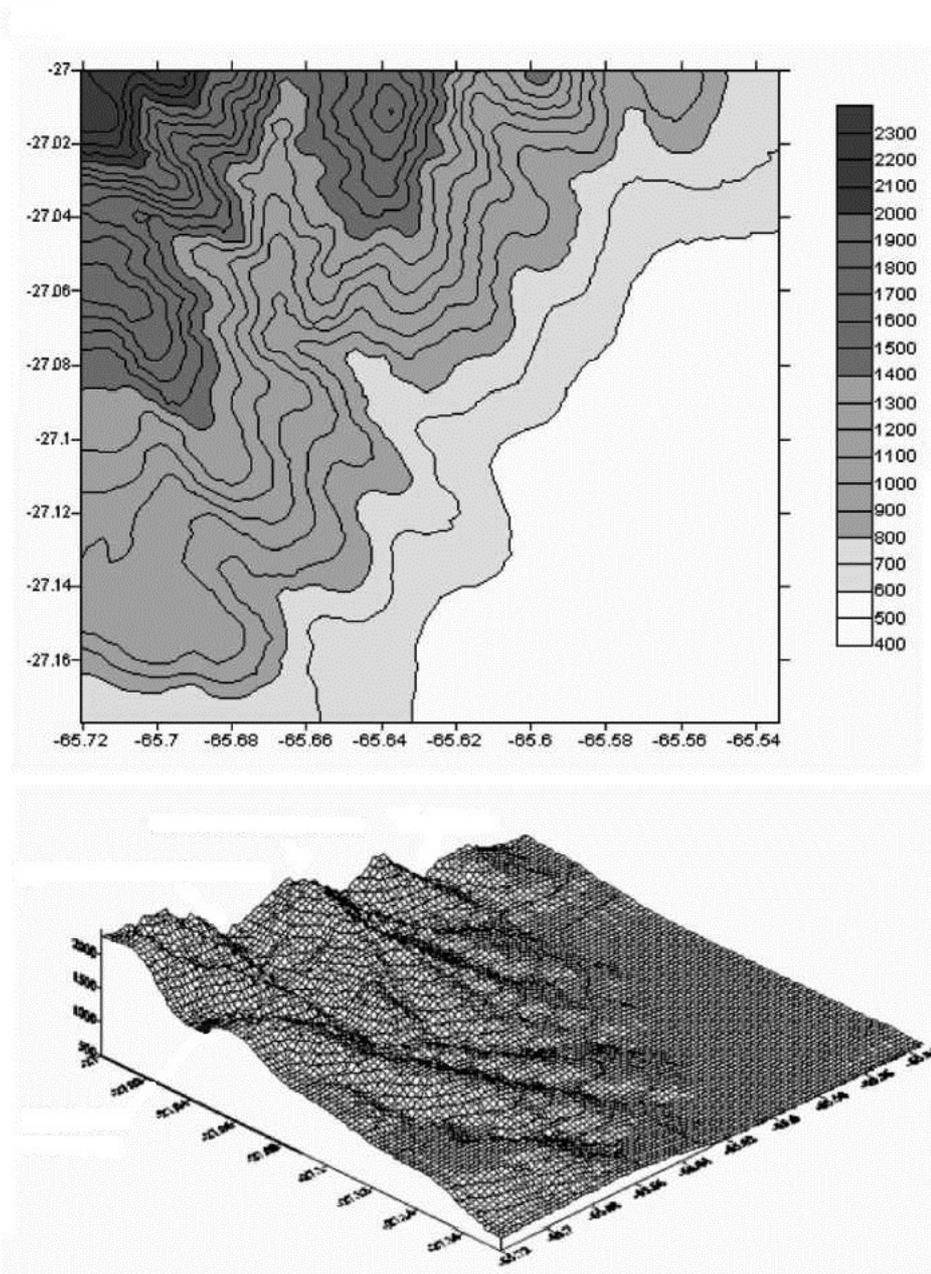


Figura 5. Representación del terreno mediante Modelos Digitales de Elevaciones (*DEMs*).

Se acepta que la elevación representada en un *DEM* es 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 *DSM*. Este término se está usando cada vez con mayor frecuencia debido a que algunos nuevos métodos de captura de datos de elevación, como es el caso de la tecnología *LiDAR*, incluyen todos los elementos superficiales, sin aislar el terreno de estructuras (Cuartero, 2003).

En la Fig. 6 puede observarse la diferencia entre un *DEM* del terreno y un *DSM*. En este último se tiene en cuenta el denominado micro-relieve (vegetación, edificios, etc.) que se asienta sobre el terreno desnudo. De esta forma, la diferencia entre un *DSM* y el *DEM* del suelo desnudo correspondiente nos proporcionaría lo que se denomina un Modelo Digital de altura de Objetos (*MDO*).

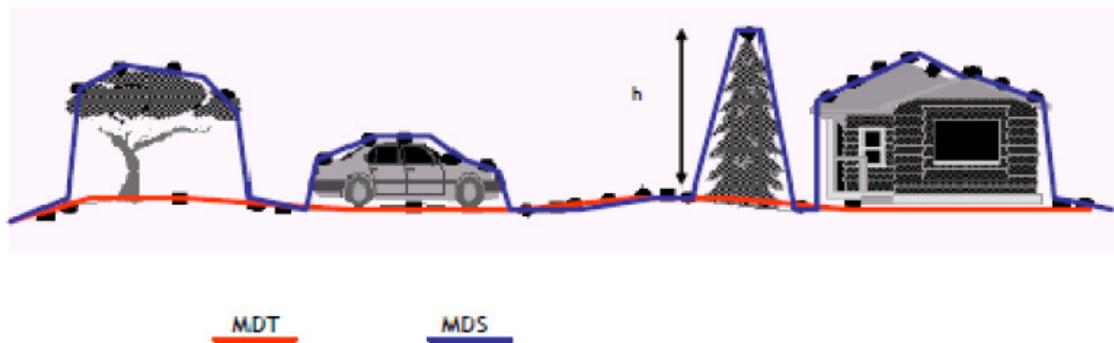


Figura 6. Representación de un Modelo Digital del Terreno y un Modelo Digital de Superficies. La diferencia entre los dos nos permitiría obtener un Modelo Digital de alturas de Objetos (*MDO*).

La tecnología *LiDAR* representa un procedimiento alternativo a los métodos de medida indirecta a partir de fotografías aéreas (fotogrametría) o medida directa en campo a través de sistemas *GPS*, para la generación automática de *DSMs*, que responde a las necesidades del sector geomático de búsqueda y desarrollo de nuevos procedimientos de adquisición de datos que sean capaces de llevar a cabo tareas propias del sector de formas cada vez más eficientes y que den cabida a un mayor número de aplicaciones.

Un sistema *LiDAR* es un sensor activo aerotransportado que emite pulsos de luz infrarroja con una frecuencia muy elevada (en algunos modelos más de 150 kHz). Mediante unos relojes de elevada precisión, se determina el tiempo que tarda cada pulso en volver al emisor y por tanto la distancia al objeto reflector.

Los parámetros de orientación externa del sensor en cada momento se obtienen mediante el postproceso de los datos aportados por dos subsistemas complementarios representados en la Fig. 7: (i) *GPS* diferencial cinemático de precisión en torno a 10 cm., que consta de un *GPS* montado en el avión y una o varias estaciones de referencia en tierra para transmitir correlaciones diferenciales (posición *X,Y,Z* del sensor respecto al sistema de

referencia *WGS84*), y (ii) Sistema *IMU (Inertial Measurement Unit)* para la obtención de los ángulos de orientación ω , φ , κ .

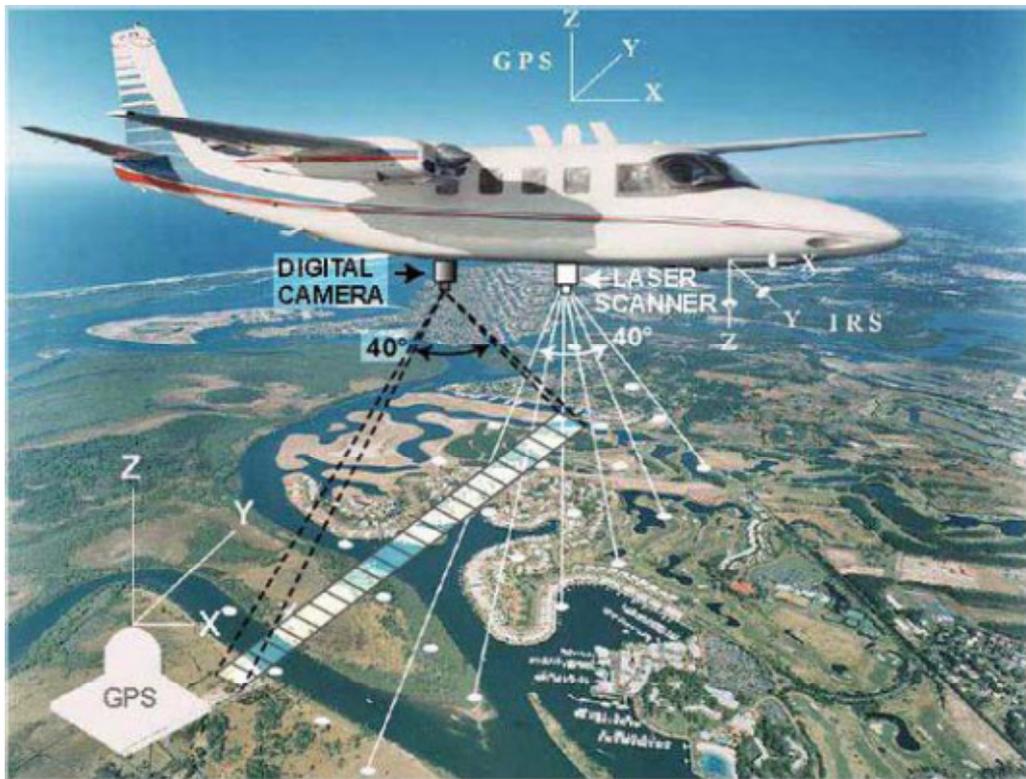


Figura 7. Dispositivos característicos de un vuelo *LiDAR*

La integración de ambos conjuntos de datos, junto con el ángulo de salida y la distancia recorrida por cada pulso láser, permiten reconstruir la línea imaginaria que ha descrito cada rayo en el espacio. De esta forma podemos obtener una nube muy densa de puntos georreferenciados que, dependiendo de la altura de vuelo, la velocidad del avión, el ángulo de escaneo del sensor y la frecuencia de repetición de los pulsos, pueden estar separados por distancias entre 0.25 m y 2 m. Es decir, se pueden obtener *DSMs* con una elevadísima resolución espacial (hasta 10 puntos/m²) y en un corto periodo de tiempo.

En el campo agrícola es de suma importancia la extracción de información espacial de calidad a partir de imágenes procedentes de sensores remotos comerciales de alta resolución, como es el caso de la información georreferenciada obtenida de los *DSMs*. Es por ello, que estos son cada vez más usados en distintos campos de la Ingeniería, incluida la agronomía. De hecho, los productos georreferenciados generados a partir de imágenes de satélites *VHR*, como es el caso de *GEI* y *WV2*, como los *DSMs*, se perfilan como competidores directos, en

calidad y precio, de los obtenidos a partir de vuelos fotogramétricos a grandes o medias escalas.

2.1.3.- Sensores CCD (*Pushbroom*).

A diferencia de las cámaras aéreas convencionales, las imágenes de satélite son tomadas con otro tipo de sistema de sensores, los dispositivos de cargas acopladas (*Charge Coupled Device, CCD*), también usados en la fotografía aérea actual mediante cámaras digitales. Estos sistemas pueden obtener un punto o una línea en un instante concreto. Este tipo de fotografías pertenecen a la fotografía dinámica. Por ejemplo, el método de formación lineal “*pushbroom*” de una cámara *CCD*, genera imágenes escaneadas en la dirección de vuelo por medio de sensores a lo largo del vuelo sobre la plataforma. Como podemos ver en los esquemas de la Fig. 8, su modelado y análisis resulta difícil, debido al movimiento de un satélite en órbita con respecto a la rotación de la tierra, y la no linealidad del modelo matemático que implique la dinámica orbital.

En el caso de fotografías panorámicas o sensores de escáner multiespectrales, sus escaneos laterales de la imagen se producen por los movimientos del obturador o giros de los espejos del escáner. A menudo es necesario reducir estas imágenes generadas por distintos tipos de sensores a una geometría básica antes de su posible uso, particularmente para investigar su correlación en análisis multiespectrales de una misma área o en la comparación de imágenes multitemporales (es decir, imágenes tomadas en tiempos diferentes). Esta es la razón de que se requiera el procesado de imágenes.

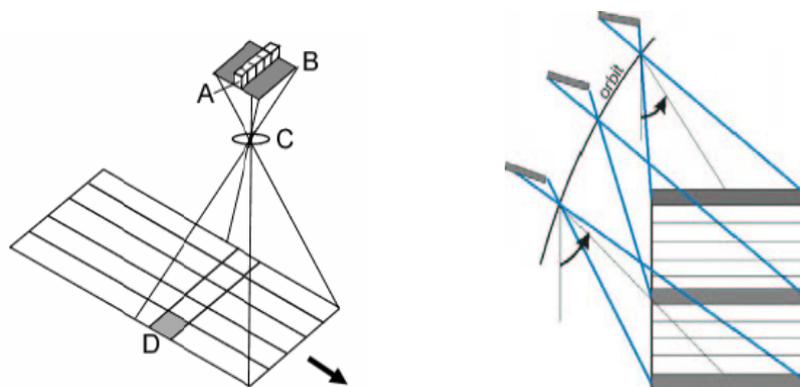


Figura 8: Procedimiento de captura de imágenes de los escáner de satélite (*pushbroom*).

Los sensores lineales *pushbroom*, están compuestos por una fila de elementos *CCD* perpendiculares a la dirección de la órbita (o vuelo), de manera que estos capturan las imágenes según una línea de proyección, así como las cámaras tienen centro de proyección (Fig. 8). Enumeramos algunas de las características de estos sensores:

- Los detectores se disponen en líneas, de modo que abarquen simultáneamente todo el campo de visión. La línea de detectores se va excitando ordenadamente con el movimiento del satélite.
- En general, estos sistemas aumentan la resolución espacial del sensor, pues al eliminar partes móviles minimizan el error introducido por la falta de sincronía entre el su movimiento y el de la plataforma.
- La captura de datos no se realiza píxel a píxel sino línea a línea.
- Presentan el inconveniente de la dificultad de calibrar toda la cadena de detectores, para que todos mantengan los mismos coeficientes de conversión de radiancia a nivel digital.

CAPÍTULO 3

INTERÉS Y OBJETIVOS

3.-INTERÉS Y OBJETIVOS.

3.1.- INTERÉS.

Después de todo lo expuesto en el capítulo de introducción, es conveniente matizar la importancia en el campo agrícola de la extracción de información espacial de calidad a partir de imágenes procedentes de sensores remotos comerciales de alta resolución. Entre esta información georreferenciada, los *DSMs* son cada vez más usados en distintos campos de la Ingeniería, incluida la agronómica. Esta investigación resulta de especial interés teniendo en cuenta que vamos a ensayar las capacidades para la extracción de *DSMs* de los dos satélites comerciales *VHR* más modernos y precisos del mercado (*GE1* y *WV2*). Además, se persigue la aplicación de estas técnicas de extracción automática de *DSMs* en terrenos agrícolas de nuestra comarca, que presentan la peculiaridad de la presencia de parcelas invernadas. Estas técnicas serán validadas en la zona agrícola conocida como El Bosque, en el término municipal de Palomares.

3.2.- OBJETIVOS.

El objetivo fundamental del proyecto es estudiar el nivel de calidad alcanzables, mediante el cálculo de la precisión y completitud, en condiciones operacionales, en los *DSMs* generados automáticamente a partir de imágenes de los dos satélites comerciales *VHR* más novedoso e inexplorados que existen en la actualidad (*GE1* y *WV2*) y para ello se estudiará la influencia en el resultado de la precisión y completitud final de los *DSMs*, factores como: (i) el modelo de sensor utilizado en la orientación del sensor, (ii) el número de *GCPs*, (iii) las características radiométricas de cada imagen de satélite *VHR*, (iv) la geometría de la imagen de satélite (principalmente el ángulo de convergencia), (v) el tiempo transcurrido entre la fecha de adquisición de la imagen y (vi) el tipo de cubierta del terreno.

CAPÍTULO 4

MATERIAL Y MÉTODOS

4.- MATERIAL Y MÉTODOS.

4.1.- ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA.

4.1.2.- Zona de Estudio.

La zona de estudio se sitúa en la costa de Almería, España, en una franja de aproximadamente 11 km de largo por 775 m de ancho (Fig. 9). Concretamente se sitúa entre los puertos de Garrucha y de Villaricos, centrada en las coordenadas *UTM* 650,870 m este y 4,119,869 m norte, expresadas en el sistema *WGS84*. La zona de estudio tiene una elevación media de 7 m aproximadamente, con un rango de 0 a 55 m sobre el nivel medio del mar en Alicante. La zona incluye la desembocadura de los ríos Almanzora y Antas, entre las que se encuentran urbanizaciones de gran importancia y que han experimentado un gran desarrollo durante los últimos años como consecuencia de la expansión inmobiliaria, resultado del desarrollo del sector turístico de la zona. Esto ha provocado cambios significativos en su paisaje, y ha producido catástrofes naturales, como ha sido la pérdida de aproximadamente 200 m de playa en Quitapellejos, Palomares.

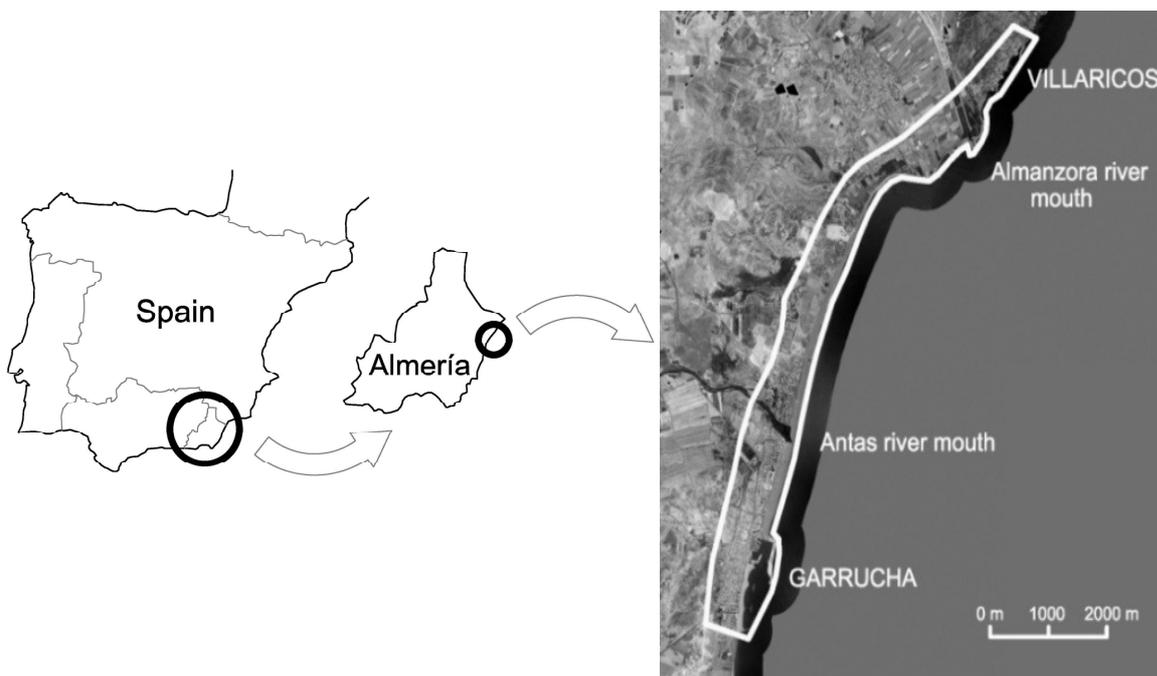


Figura 9. Localización de la Zona de Estudio.

4.1.3.- Datos de los Satélites *VHR* utilizados.

4.1.3.1.- GeoEye-1.

Para este proyecto se adquirieron tres imágenes *PAN* de *GEI*; una imagen *Geo* y un producto *GeoStereo* compuesto por dos imágenes *Geo*. Las características de estas imágenes de satélite se describen en la Tabla 3.

Las imágenes *Geo* (Fig. 10) tienen el menor nivel de procesamiento de todas las que comercializa la empresa *GeoEye*, tanto radiométrico como geométrico, por lo que son ideales para generar productos georreferenciados de alta calidad. Para ello, *GeoEye* proporciona los coeficientes de funciones racionales (*RPCs*), que junto con la participación de *GCPs*, y un software adecuado (normalmente comercial), permiten la obtención de *DSMs* de alta calidad. Cabe destacar que la capacidad de geoposicionamiento (fase de orientación del sensor) de las imágenes *Geo* de *GEI*, utilizando solamente los *RPCs* suministrados en la propia imagen (i.e. sin emplear ningún *GCP*) ha mejorado mucho respecto a satélites anteriores como *IKONOS* o *QuickBird*, situándose en torno a 3 m de precisión planimétrica (*GeoEye Inc.*, 2009), medido como error medio cuadrático (*Root Mean Square Error, RMSE*).

El producto *GeoStereo* (Fig. 10) está compuesto por dos imágenes *Geo* con la geometría estéreo adecuada (estéreo par puro) para soportar una amplia gama de aplicaciones de estéreo fotogrametría, como la creación de *DSMs*.

Estas imágenes fueron adquiridas con un rango dinámico de 11-bit por píxel y sin realizar ningún ajuste de rango dinámico (*dynamic range adjustment, DRA*) en el pre-procesamiento (se mantiene la precisión radiométrica absoluta y el rango dinámico completo para aplicaciones científicas). Además, en la adquisición de las tres imágenes de *GEI* se empleó la tecnología *TDI (Time Delay and Integration)* con 16 etapas para las imágenes *PAN*.

La primera imagen del tipo *Geo (GE11)* fue tomada el 29 de Septiembre de 2010, ocupando aproximadamente 49 km². El 27 de Agosto de 2011, se capturó un estéreo par puro *GeoStereo* formado por dos imágenes *Geo (GE12 y GE13)*. Se encargó un área de 100 km² para ambas imágenes, indicando siempre la zona de trabajo mencionada.

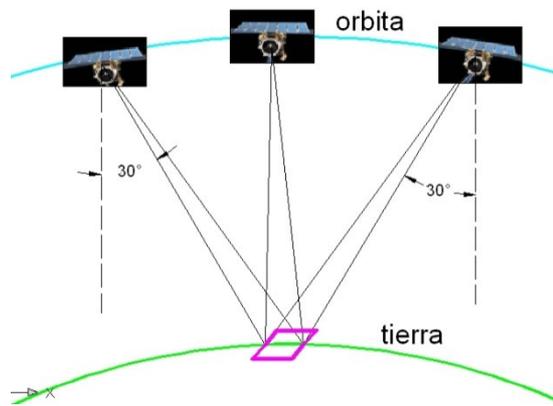


Figura 10. Esquema de la toma del estéreo par puro de *GE1*, producto *GeoStereo* (30° *off nadir*) y de la imagen *Geo* ($< 10^\circ$ *off nadir*) sobre la zona piloto

Tabla 3. Características de las imágenes *PAN* de *GE1* (Productos *Geo* y *GeoStereo*) adquiridas en el área de estudio

ID de la imagen	<i>GE11</i>	<i>GE12</i>	<i>GE13</i>
Producto	<i>GE1 Geo</i>	<i>GE1 GeoStereo</i>	<i>GE1 GeoStereo</i>
Fecha de Adquisición	29/09/2010	27/08/2011	27/08/2011
Hora de Adquisición (<i>GTM</i>)	11:01	10:55	10:56
Cobertura de Nubes	0%	0%	0%
Sentido de la Toma	inversa	inversa	inversa
Azimut Solar	159.3°	144.1°	144.4°
Elevación del Sol	48.4°	58.3°	58.4°
Elevación del satélite	69.4°	81.5°	66.9°
Azimut del satélite	221.9°	40.4°	183.6°
Tamaño Real del Píxel Columna	0.460 m	0.416 m	0.480 m
Tamaño Real del Píxel Fila	0.449 m	0.417 m	0.440 m
Tamaño de píxel del producto	0.5 m	0.5 m	0.5 m

4.1.3.2.- WorldView-2.

En este proyecto se han utilizado imágenes *PAN* del tipo *Ortho Ready Standard Nivel-2A (ORS2A)*.

Las imágenes *ORS2A* presentan correcciones radiométricas y geométricas, en un nivel similar al formato *Geo* de *GEI*. Las imágenes *ORS2A* están georreferenciadas en una proyección cartográfica utilizando una superficie con una altura constante y, como en el caso de *GEI*, incluyen los correspondientes *RPCs* en el modelo de sensor de la cámara y los archivos de metadatos. Cuando la imagen *ORS2A* se procesan con los *RPCs* suministrados por *DigitalGlobe*, y se usan algunos *GCPs* muy precisos para refinar la triangulación, se pueden generar *DSM* de alta calidad y precisión.

Se adquirieron tres imágenes *PAN* de *WV2 ORS2A* (Tabla 4). Los productos suministrados, sin ningún tipo de mejora radiométrica (sin *DRA*) y empleando 32 etapas *TDI*, tenían un rango dinámico de 11-bit, al igual que los productos adquiridos por *GEI*. La primera imagen (*WV21*) fue tomada el 19 de julio de 2011, y cubre toda el área de trabajo con 49 km². Más tarde, el 18 de agosto de 2011, se adquirió un estéreo par puro de *WV2* que contiene dos imágenes (*WV22* y *WV23*) *ORS2A* sobre el área de trabajo. Todas estas imágenes han sido remuestreadas a 0.5 m *GSD* como requisito impuesto por el Gobierno de los EE.UU.

Tabla 4. Características de las imágenes PAN de WV2 (Productos ORS2A) adquiridas en el área de estudio.

ID de la imagen	WV21	WV22	WV23
Producto	WV2 ORS2A	WV2 ORS2A	WV2 ORS2A
Fecha de Adquisición	19/07/2011	18/08/2011	18/08/2011
Hora de Adquisición (GTM)	11:23	11:22	11:23
Cobertura de Nubes	0%	0%	0%
Sentido de la Toma	directa	directa	inversa
Azimut Solar	142.5°	152.3°	152.8°
Elevación del Sol	70.5°	63.7°	63.8°
Elevación del satélite	85.0°	67.6°	80.0°
Azimut del satélite	279.9°	4.7°	216.1°
Tamaño Real del Píxel Columna	0.467 m	0.499 m	0.473 m
Tamaño Real del Píxel Fila	0.465 m	0.538 m	0.480 m
Tamaño de píxel del producto	0.5 m	0.5 m	0.5 m

4.1.4.- Datos LiDAR 2011.

El DSM utilizado en este caso como referencia o verdad terreno (*Ground Truth*), fue generado a partir de datos LiDAR. Este DSM se generó a partir de un vuelo combinado de fotogrametría y LiDAR, realizado sobre la zona de estudio el 30 de Agosto de 2011. La altura de vuelo fue de unos 350 m, y se utilizó un helicóptero con escáner láser desarrollado por AeroLaser System SL basado en un Q240i Riegl LMS y con 30° de campo de visión (*FOV*), alcanzó una cantidad de puntos promedio de más de 2 puntos/m². El DSM final tiene una resolución de 1 m (Fig. 11).

La precisión vertical del DSM obtenido a partir de datos LiDAR se calculó en 37 puntos medidos en campo abierto mediante sistema diferencial de posicionamiento global (*Differential Global Positioning System, DGPS*) distribuidos en toda la zona de trabajo,

obteniendo como resultado un valor de 0.085 m (medido como *RMSE*). Cabe destacar que la precisión vertical del *LiDAR* fue finalmente muy próxima a la alcanzada por los puntos *DGPS*.

Todos los procesos correspondientes al filtrado de puntos de la nube original del láser y al ajuste de las cuatro pasadas de vuelo necesarias para cubrir el área de trabajo fueron realizados mediante el software TerraMatch[®] y TerraScan[®] 010 del paquete TerraSolid[®].

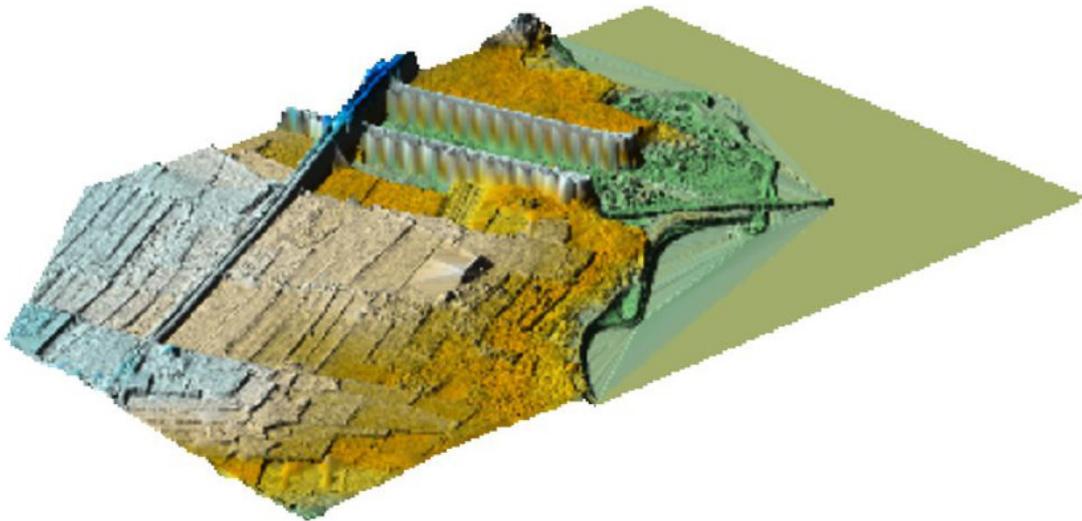


Figura 11. *DSM* datos *LiDAR*.

4.1.5.- Medición de Puntos de Control.

Las coordenadas de los puntos del terreno se obtuvieron mediante *DGPS* utilizando una estación total de trabajo *GPS* Topcon HiPer PRO con navegación cinética en tiempo real (*Real Time Kinematic, RTK*), desde el vértice geodésico “Juan Jordana” para cubrir toda la zona de trabajo. Los trabajos *DGPS* se apoyan en once puntos de campo de coordenadas conocidas, de los cuales, cuatro pertenecen a la red geodésica nacional, uno pertenece a la red REGENTE (obtenido con técnicas de alta precisión espacial), y seis puntos pertenecen a la Red de Información Ambiental de Andalucía (*REDIAM*). Los valores de *RMSE* obtenidos finalmente en estos puntos tras los ajustes realizados a las distintas radiaciones efectuadas en *RTK*, fueron de 5.6 cm, 3.3 cm, 7.6 cm en *X, Y, Z* respectivamente.

De esta manera, se midieron las coordenadas de 120 puntos, distribuidos de forma homogénea por toda el área de trabajo (Fig. 12), cuyas coordenadas están en el sistema de referencia *European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)*, y proyección *UTM*. El datum vertical está referido al nivel medio del mar en Alicante (España), cota ortométrica.

El objetivo era obtener una medición fiable de los *GCPs* y los *ICPs* con una precisión mejor de 10 cm. De todos los puntos del terreno, 51 fueron seleccionados como *GCPs* y 69 se utilizaron como *ICPs* (Fig. 12).

Se usó un gran número de puntos de comprobación (*ICPs*), ya que la fiabilidad del resultado que se obtenga en el valor de *RMSE* dependerá del número de *ICPs* que se utilicen. La *National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)* citada por el *Federal Geographic Data Committee (FGDC, 1998)* y el *Joint Research Centre European Commission (JRC, 2008)* recomiendan el uso de un mínimo de 20 *ICPs*, aunque algunos autores sugieren que el número de puntos debería ser mayor (Li, 1991; Ariza y Atkinson, 2005; Aguilar *et al.*, 2008b).



Figura 12. Situación de los 120 puntos de control, 51 *GCPs* (marcados como cruces) y 69 *ICPs* (marcados como círculos) sobre la zona de trabajo.

4.2.- METODOLOGÍA.

4.2.1.-Estéreo pares considerados.

Con la combinación de las seis imágenes *PAN* descritas en las Tablas 3 y 4, se obtienen 15 estéreo pares diferentes (Tabla 5). Para cada estéreo par, los principales factores que pueden afectar a la precisión y/o a la completitud de los resultados son la geometría de la imagen estéreo (ángulo de convergencia y el ratio B/H), la diferencia entre las fechas de adquisición de las dos imágenes que componen el estéreo par y los cambios en la posición del sol (ángulo de convergencia solar) (Tabla 5).

Como se puede apreciar en la Tabla 5, la diferencia de tiempo entre las imágenes que componen los estéreo pares mixtos (*across-track*) es mayor, y en consecuencia la probabilidad de que existan diferencias espectrales y espaciales en las imágenes es más elevada, contribuyendo a generar problemas de correlación (i.e. búsqueda de puntos homólogos en cada imagen) en las imágenes que forman ese estereo par. También influyen factores como son la cobertura de nubes, la vegetación, los reflejos de las masas de agua y la posición del sol entre otros.

En cuanto a la geometría de la imagen estéreo (Fig. 13), el ángulo de convergencia puede ser definido como el ángulo entre dos rayos que se cruzan en un punto común del terreno, uno de la imagen delantera y el otro de la imagen posterior, medido a lo largo del plano convergente o epipolar. Mientras que el ratio B/H se define por la separación del par dividido entre la altura del sensor. Teóricamente, un ángulo de convergencia entre 30° y 60° sería ideal, mientras que un ratio B/H entre 0.5 y 1 es el más adecuado para la generación de un *DEM* o *DSM*.

En este sentido, el ángulo de convergencia, δ , entre las dos imágenes que forman el estéreo par (Li *et al.*, 2007) y que tienen una posición acimutal en el momento de la adquisición y una elevación de (α_1, θ_1) y (α_2, θ_2) respectivamente, puede ser calculado como:

$$\cos \delta = \sin \alpha_1 \times \sin \alpha_2 + \cos \alpha_1 \times \cos \alpha_2 \times \cos (\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

Para calcular la diferencia entre las posiciones del sol para cada estéreo par (ángulo de convergencia solar) se ha utilizado la ecuación (1), pero en este caso se usaron los valores del azimut solar y la elevación solar. Hay que destacar que los estéreo pares puros (*along-track*) de *GE1* y *WV2* (ID 1 y 2 en la Tabla 5) tienen una configuración muy similar con ángulos de convergencia de alrededor de 30° y sin ninguna diferencia práctica de las condiciones de iluminación.

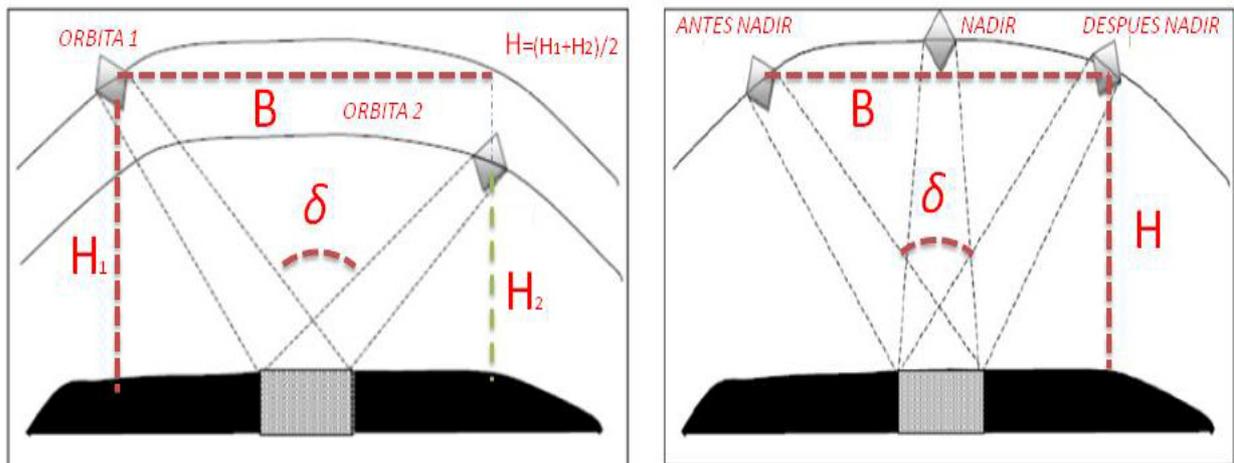


Figura 13. Configuración estéreo par mixto (izquierda) y estéreo par puro (derecha), así como ángulo de convergencia (δ) y ratio B/H.

Tabla 5. Geometría de la Imagen, posición del sol y diferencias en las fechas de adquisición de cada estero par considerado a partir de las seis imágenes PAN originales descritas en las Tablas 3 y 4.

ID	COMBINACIÓN DE IMÁGENES	ÁNGULO DE CONVERGENCIA (grados)	ÁNGULO DE CONVERGENCIA SOLAR (grados)	RATIO B/H	DIFERENCIA EN LA FECHA DE ADQUISICIÓN (días)
1	GE12-GE13	30.39	0.19	0.55	0
2	WV22-WV23	31.35	0.24	0.57	0
3	GE13-WV23	15.62	6.74	0.26	9
4	GE13-WV22	45.55	6.53	0.84	9
5	GE12-WV23	18.52	6.91	0.33	9
6	GE12-WV22	16.21	6.69	0.33	9
7	WV21-WV22	22.48	7.77	0.41	29
8	WV21-WV23	8.98	7.78	0.16	29
9	GE13-WV21	24.19	12.13	0.42	38
10	GE12-WV21	11.87	12.22	0.20	38
11	WV21-GE11	18.41	23.50	0.28	295
12	WV23-GE11	10.69	15.80	0.17	324
13	WV22-GE11	40.64	15.77	0.70	324
14	GE13-GE11	14.25	13.32	0.27	333
15	GE12-GE11	29.12	13.37	0.53	333

4.2.2.- Extracción de DSMs a partir de Imágenes de Satélite VHR.

4.2.2.1.- Fase de Orientación del Sensor.

En la fase de orientación se estudia la influencia de variables como son: el modelo de sensor utilizado, el número de puntos de control que se utilizan para el cálculo de cada modelo de sensor, y por último, la distribución de los mismos para cada estudio realizado.

Un modelo de sensor o modelo de corrección geométrica relaciona la posición de puntos en el espacio objeto (X , Y , Z) con su correspondiente posición bidimensional (2D) en

la imagen (x, y) . En las últimas décadas, se han probado varios modelos matemáticos para la orientación del sensor de satélites *VHR* y geoposicionamiento 3D. Pero sólo dos de ellos son los que recomiendan la mayoría de los investigadores (Toutin, 2004b; Wolniewicz *et al.*, 2004; Aguilar *et al.*, 2007a; Dolloff y Settergren, 2010). Por lo que éstos serán los que utilizaremos en este proyecto, y son los siguientes:

Modelo físico 3D desarrollado por Toutin (Toutin, 2003) en el Centro de Percepción Remota de Canadá (*CCRS*). Los modelos físicos, también conocidos como rigurosos, paramétricos o determinísticos, intentan reflejar la geometría física de la escena en el momento de la toma de la misma. Para ello, es necesario incluir en el modelo el tiempo exacto de la toma de las imágenes que componen la escena, información sobre la distancia focal y distorsiones, y un completo conjunto de datos sobre la situación exacta del satélite y efemérides. Este método, en teoría, ofrece la mayor precisión geométrica (Robertson, 2003) y es muy riguroso sobre toda la imagen usando sólo unos pocos *GCP* (Cheng *et al.*, 2003). Este modelo físico, inicialmente desarrollado para sensores de media resolución en la banda visible e infrarroja así como para señales radar (Toutin, 1995), fue más tarde adaptado para datos de satélite *VHR* (Toutin, 2004a). El modelo *CCRS* requiere un mínimo de seis *GCP*.

Modelo empírico basado en las funciones racionales 3D, que, al igual que cualquier otro modelo de sensor, construye una correlación entre la posición de los píxeles en el espacio imagen (2D) y su localización en el terreno (3D). Esta correlación está basada en fracciones de polinomios. Para una transformación del espacio terreno al espacio imagen el modelo se expresaría según la ecuación 2,

$$\begin{aligned}x &= \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \\ y &= \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)}\end{aligned}\tag{2}$$

dónde x e y representan la posición de un determinado píxel en el espacio imagen, es decir, la fila y columna que ocupa, X, Y, Z , son las coordenadas del punto en el espacio terreno, y, P_i

($i=1, 2, 3, \text{ y } 4$) son funciones polinómicas que presentan la siguiente forma general (ecuación 3):

$$\begin{aligned} P_i = & a_{1_i} + a_{2_i}X + a_{3_i}Y + a_{4_i}Z + a_{5_i}XY + a_{6_i}XZ + a_{7_i}YZ + a_{8_i}X^2 + a_{9_i}Y^2 \\ & + a_{10_i}Z^2 + a_{11_i}XYZ + a_{12_i}X^3 + a_{13_i}XY^2 + a_{14_i}XZ^2 + a_{15_i}X^2Y + a_{16_i}Y^3 \quad (3) \\ & + a_{17_i}YZ^2 + a_{18_i}X^2Z + a_{19_i}Y^2Z + a_{20_i}Z^3 \end{aligned}$$

Normalmente, las funciones racionales están compuestas por polinomios de tercer grado, aunque el grado y número de coeficientes en los polinomios puede ser reducido.

Hay diversas formas de referirse, mediante abreviaturas anglosajonas, a esos coeficientes polinómicos que forman parte de las funciones racionales (*Rational Function Coefficients; RFCs, Rational Polynomial Coefficients; RPCs, Rapid Positioning Capability; RPC, Rational Polynomial Camera; RPC*). Las siglas *RPC* suelen hacer referencia a funciones racionales de tercer orden, mientras que *RFC* es usado para funciones racionales generales como las dependientes del terreno.

Con el modelo físico del sensor disponible para las empresas suministradoras de imágenes de satélite, los *RPC* pueden ser resueltos usando una malla en el espacio terreno con sus nodos calculados a través del modelo físico (Tao y Hu, 2001). Estos 78 coeficientes, correspondientes a funciones racionales de tercer grado, son suministrados junto con las imágenes de satélite *VHR*, como *GE1* o *WV2*.

Este modelo puede ser aplicado sin *GCP*, por eso es conocido como independiente del terreno, aunque las precisiones geométricas en la fase de orientación del sensor así obtenidas no son muy buenas.

Una posibilidad muy interesante de este modelo es que el usuario puede mejorar esa precisión, refinando los coeficientes racionales mediante la introducción en el modelo de unos pocos *GCP*. Los *RPC* pueden ser refinados directa o indirectamente (Hu *et al.*, 2004).

Los métodos directos actualizan los *RPC* facilitados por la empresa suministradora (Hu y Tao, 2002), mientras que los métodos indirectos introducen transformaciones complementarias (normalmente polinómicas) en el espacio imagen o en el espacio terreno, no cambiando los *RPC* originales. Hay numerosas publicaciones sobre resultados obtenidos usando distintas variaciones de los métodos indirectos (Di *et al.*, 2003; Fraser y Hanley, 2003; Grodecki y Dial, 2003; Noguchi *et al.*, 2004).

Para este proyecto se utilizará el modelo empírico basado en las funciones racionales 3D de tercer grado con *RPCs* facilitados por la empresa suministradora y refinado por un ajuste polinómico de orden cero (*RPC0*) (Aguilar *et al.*, 2012) siguiendo el método de ajuste de bloque publicado por Grodecki y Dial (2003) para el espacio imagen.

$$\begin{aligned}\Delta x &= x' - x = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\ \Delta y &= y' - y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2\end{aligned}\tag{4}$$

Dónde a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 y b_2 son coeficientes de ajuste de la imagen, Δx y Δy expresan las diferencias entre las coordenadas imagen medidas para los nuevos *GCP* empleados para refinar los resultados (x', y') y las coordenadas imagen obtenidas para los mismos *GCP* (x, y) según los coeficientes racionales originales.

Para la transformación de orden cero (*RPC0*), solo es necesario el uso de un *GCP*, ya que se trata de un cambio simple (a_2 y b_0) en la ecuación 4.

Para probar estos dos tipos de modelos, se ha utilizado el paquete de software fotogramétrico OrthoEngine de Geomatica v.10.3, desarrollado por PCI Geomatics (PCI Geomatics, Richmond Hill, Ontario, Canadá).

Cuando se utilizan imágenes individuales *PAN* de *GE1* y *WV2*, el modelo de sensor que logra los mejores resultados es *RPC0* (Aguilar *et al.*, 2012; Aguilar *et al.*, 2013). Sin embargo, esto podría cambiar cuando se trata de estéreo pares. Cabe destacar que, en el caso de *RPC0*, OrthoEngine calcula cada imagen individualmente mediante el uso de los *GCPs* marcados en ella, pero no hay un ajuste de bloque 3D u orientación estéreo del sensor para compensar el espacio imagen residual para ambas imágenes al mismo tiempo. Por el

contrario, en el modelo *CCRS* se aplica una verdadera orientación estéreo del sensor (intersección 3D) entre las dos imágenes estéreo (Toutin, 2012). Por este motivo es interesante estudiar ambos modelos de sensor cuando trabajamos con estéreo pares de imágenes de satélite *VHR*.

En cuanto a los puntos de campo, se disponen de 120 puntos medios mediante técnicas *DGPS*, de los cuales 51 se toman como *GCPs*, y el resto, 69, se quedan como *ICPs*, utilizados para el cálculo de la precisión. De los 51 *GCPs* se probaron tres conjuntos diferentes y bien distribuidos de 7, 12 y 45 *GCPs* (Fig. 14). Se considera que los puntos están bien distribuidos cuando la posición de los mismos están, a lo largo de toda la imagen, lo mas separados posible. En el caso de pocos puntos, y se intentan que estén distribuidos por todas las zonas de la imagen y teniendo en cuenta el rango de cotas. Para las combinaciones de 7 y 12 *GCPs*, los puntos estaban localizados sobre el terreno en zonas abiertas y despejadas. En el caso de 45 *GCPs*, algunos puntos se encontraban en bordillos, esquinas de edificios u otras estructuras elevadas. En los puntos definidos en estructuras elevadas, un pequeño error en la introducción de las coordenadas imagen podría provocar un error significativo en altura. Este error de punteamiento o marcación en el espacio imagen sería el mismo para todos los proyectos considerados, ya que, para cada imagen analizada, los puntos de campo (*GCPs* y *ICPs*) se marcaron solo una vez.

No para todos los modelos de sensor se pueden utilizar todas las combinaciones posibles de *GCPs*. De esta manera, la orientación del sensor, para cada estéreo par de la Tabla 5, se llevó a cabo mediante el uso de cuatro estrategias diferentes: (i) aplicando el modelo de sensor *RPC0* y el conjunto de 7 *GCPs*, (ii) *RPC0* con 12 *GCPs* y (iii) *CCRS* con 12 *GCPs* y (iv) *CCRS* con 45 *GCPs*.

Una vez realizada la orientación del sensor, se calcula el error medio cuadrático (*RMSE*) para cada modelo de sensor y número de *GCPs* ensayado. De este modo, y para *RPC0*, se calculó el *RMSE* planimétrico a lo largo de los ejes *X* e *Y*, mientras que, para el modelo *CCRS*, se obtuvo un informe completo de la precisión, calculándose tanto el *RMSE* tanto planimétrico como altimétrico (es decir, una verdadera orientación del sensor).



Figura 14. Distribución de los 45 *GCP* (cruces), 12 *GCP* (círculos grandes) y 7 *GCP* (círculos pequeños) superpuestos sobre una ortoimagen panromática de *GEI*.

4.2.2.2.- Fase de Extracción del *DSM*.

Para la fase de extracción del *DSM* se utiliza OrthoEngine. La extracción del *DSM* se realizó mediante un proceso de correlación automática basado en áreas (*area based matching*), efectuado sobre imágenes epipolares calculadas a partir de las imágenes originales que formaban el estéreo par. Este procedimiento de extracción automática se basa en una correlación cruzada normalizada media realizada de forma jerárquica en siete pasos que genera coeficientes de correlación entre 0 y 1 para cada píxel correlado, donde 0 representa una falta total de correlación y 1 representa el *matching* perfecto. Cuando el coeficiente de

correlación de un punto es inferior a 0.5, éste es eliminado y su altura no se calcula, reduciendo así la completitud del *DSM*. Por último, una superficie de segundo orden se ajusta usando los puntos con máximo coeficiente de correlación con el fin de mejorar el estéreo matching y obtener así precisiones sub-píxel (Chen y Chaapel, 2008).

Para generar los *DSM* con el software OrthoEngine, solo los intervalos (i.e. la resolución deseada en el *DSM* final) de muestreo y el nivel de detalle (i.e. número de decimales de las cotas) pueden ser ajustados por el usuario. Así, para cada *DSM* se seleccionó un gran nivel de detalle con 32 bits y un factor de muestreo de píxel de 2, generándose de este modo, *DSMs* con un paso de malla de 1 m. Debido a que los *DSMs* generados por OrthoEngine están referenciados en el elipsoide *WGS84* (alturas elipsoídicas), se tuvo que utilizar el modelo de geoide *EGM96* para alcanzar las alturas ortométricas finales.

4.2.3.- Evaluación de Calidad de los *DSMs*.

La calidad de los *DSMs* extraídos se evaluó de dos formas diferentes: mediante la precisión vertical y la completitud. Teniendo en cuenta que la precisión vertical y la completitud dependen en gran medida de la cubierta del terreno, se han considerado diferentes zonas para evaluar la calidad de los *DSMs*, como son las zonas sin cambios a lo largo del tiempo y las zonas urbanas (Fig. 15).

Además, la evaluación de la precisión de los *DSMs* extraídos de cada estéreo par se llevó a cabo mediante el uso de un *DSM* muy preciso derivado de los datos *LiDAR*, utilizado como *Ground Truth*. Así, para toda el área de trabajo, que cubre una superficie total de 7.71 km², se dispuso de más de 18 millones de puntos 3D a partir de los datos *LiDAR*. Para las zonas urbanas, representadas por siete áreas de control y que ocupan una superficie de 1.22 km², se utilizaron casi tres millones de puntos *LiDAR*. Por último, se estudiaron 34 zonas sin cambios significativos a lo largo del tiempo, tales como campos de fútbol, pistas de baloncesto o tenis y similares, que ocupan alrededor de 0.03 km² y con 78,508 puntos *LiDAR*.



Figura 15. Diferentes áreas para la evaluación de la calidad del *DSM*, superpuestas en una ortoimagen de *GEI*. Las zonas urbanas están representadas con una línea blanca, las zonas sin cambios en color negro sólido y toda la zona de trabajo en línea negra discontinua.

El software utilizado para llevar a cabo la comparación entre el *DSM LiDAR* y los diferentes *DSMs* generados a partir de imágenes de satélite *VHR* fue RapidForm (INUS Technology INC., Seúl, Corea). Para cada caso, la triangulación inicial de los *DSMs* se realizó mediante la selección de una longitud de arista no mayor de 5 metros. A continuación, fueron extraídas las estadísticas de las diferencias de cota, entre el *Ground Truth* y los diferentes *DSMs*. Indicar que, debido a que ningún proceso de edición se aplicó en los *DSMs* de

imágenes de satélite *VHR*, las diferencias de cota superiores a ± 5 m en los residuos en *Z* se consideraron como errores salvajes (*outliers*) y se eliminaron.

Además de la evaluación de la precisión, también se calculó la completitud o el porcentaje cubierto de toda el área por los *DSMs* extraídos a partir de imágenes de satélites *VHR*, que incluían puntos cuyo coeficiente de correlación resultó ser mayor de 0.5 en OrthoEngine.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5. RESULTADOS.

5.1.- CARACTERÍSTICAS RADIOMÉTRICAS.

En teoría, los satélites *GE1* y *WV2* pueden capturar imágenes con un rango dinámico de 11 bits por píxel, por lo que el número digital (*Digital Number, DN*) de cada píxel puede alcanzar un valor de 2,048 (i.e., 2^{11}). Sin embargo, las compañías suministradoras de imágenes hacen una compresión del rango de los *DNs* para evitar que las superficies muy reflectantes produzcan destellos (McCarty, 2010). De hecho, las imágenes de satélite *VHR* rara vez superan los valores de 1,500 medidos como *DNs* y sin ningún tipo de corrección radiométrica especial o mejora del contraste. En el caso de imágenes de *GE1*, el 99% de los *DNs* varían entre 110 y 780 (Crespi *et al.*, 2010) mientras que para imágenes de *WV2* la información principal se distribuye entre 0 y 10 bits (0 y 1,024 *DNs*) (Poli *et al.*, 2010).

En general, para las imágenes de satélite *VHR*, el pico de los niveles de grises de los histogramas tiende hacia los valores más oscuros, con la parte derecha de los histogramas disminuyendo suave y lentamente hacia los valores más altos de *DN* (Baltsavias *et al.*, 2001; Poli *et al.*, 2010). Los seis histogramas de *DNs* de nuestras imágenes *PAN* (Fig. 17) muestran esta forma típica. Sin embargo, en el caso de las imágenes de *WV2*, los histogramas de *DNs* presentan una mayor compresión con respecto a los de las imágenes de *GE1* (Fig. 17). Para poder explicar esto de manera visual, si nos fijamos en la Fig. 16, se muestra claras diferencias entre la imagen *PAN* original *GE12* (Fig. 16 (a)) y la *PAN* original *WV23* (Fig. 16 (b)). Ésta última aparece más borrosa y por lo tanto muestra un contraste menor. De hecho, la calidad de una imagen puede ser evaluada usando la cantidad de bordes borrosos presentados en una imagen. El ruido también es un criterio importante para medir la calidad de la imagen. Con el fin de cuantificar estos efectos, se llevó a cabo, en el área de trabajo, una evaluación de la calidad de imagen, sin necesidad de imágenes de referencia (*No-Reference*), basada en el cómputo del ratio de borrosidad (*Blur ratio, Br*) y el ratio de ruido (*Noise ratio, Nr*) de la imagen según la metodología propuesta por Choi *et al.* (2009).

Los índices *Br* alcanzados en las imágenes *PAN* originales de *GE1* (0.392, 0.389 y 0.496 para *GE11*, *GE12* y *GE13* respectivamente) fueron mucho más bajos que los calculados para las imágenes de *WV2* (0.787, 0.919 y 0.902 para *WV21*, *WV22* y *WV23* respectivamente), lo que podemos confirmar visualmente en la Fig. 16(a) y 16(b). Para cada sensor, los valores

B_r fueron mayores al aumentar el ángulo *off-nadir*. A esto hay que añadirle el problema de la imagen borrosa provocada por la falta de estabilidad del estabilizador del sensor, ya publicado por Zhang (2005) trabajando con imágenes digitales de matriz lineal. Este problema resultó mayor en imágenes inclinadas que en imágenes nadirales. En cuanto al índice N_r , no se detectaron diferencias significativas entre las imágenes de *GEI* (0.375, 0.380 y 0.381) y las de *WV2* (0.394, 0.393 y 0.386).

La hipótesis planteada en este proyecto es que las diferencias en la calidad de imagen entre las imágenes individuales de los sensores de *GEI* y *WV2* podrían afectar al rendimiento del algoritmo de *matching*. Además, esas diferencias podrían deberse a aspectos operacionales en el momento de la adquisición de la imagen, tales como ángulo de visión del sensor, ángulo solar en el momento de la toma y las condiciones atmosféricas (Poli *et al.*, 2010), aunque los resultados apuntan que el factor más importante son las características radiométricas específicas de ambos sensores.

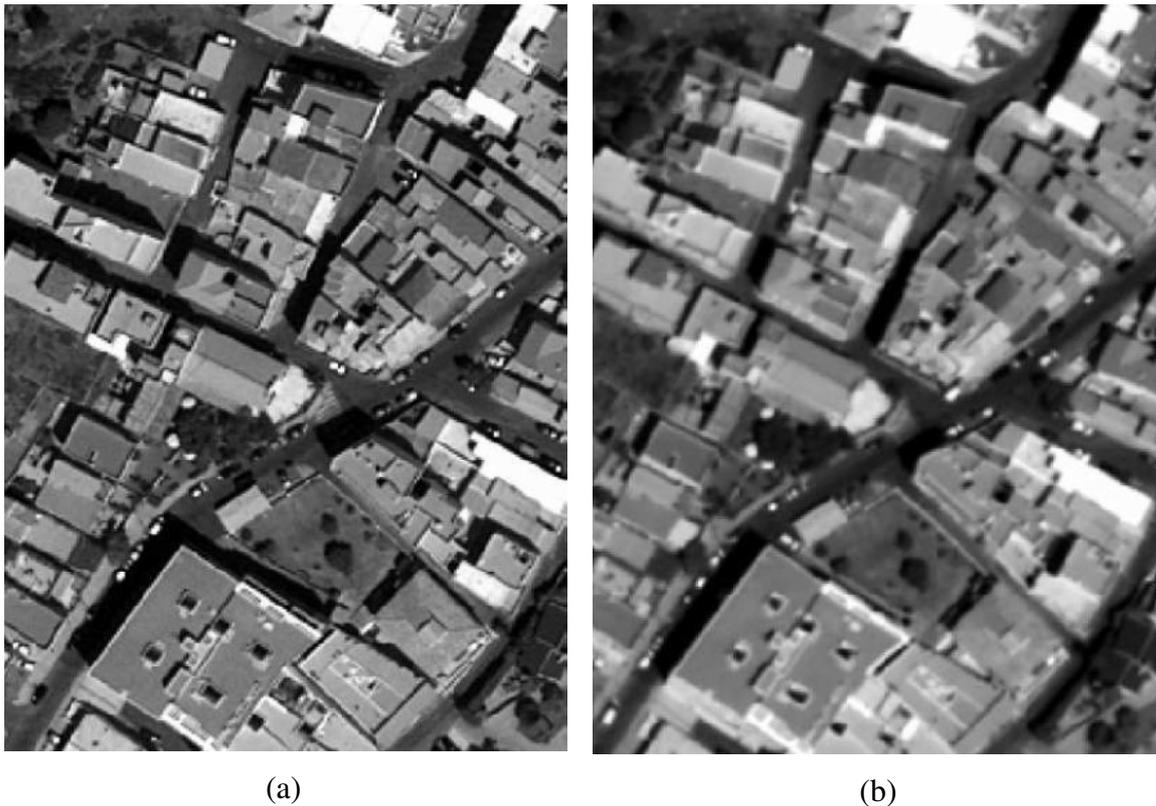


Figura 16. Análisis visual sobre un área urbana limitada (112 m x 150 m): (a) Imagen *PAN* original *GEI2*, (b) Imagen *PAN* original *WV23*.

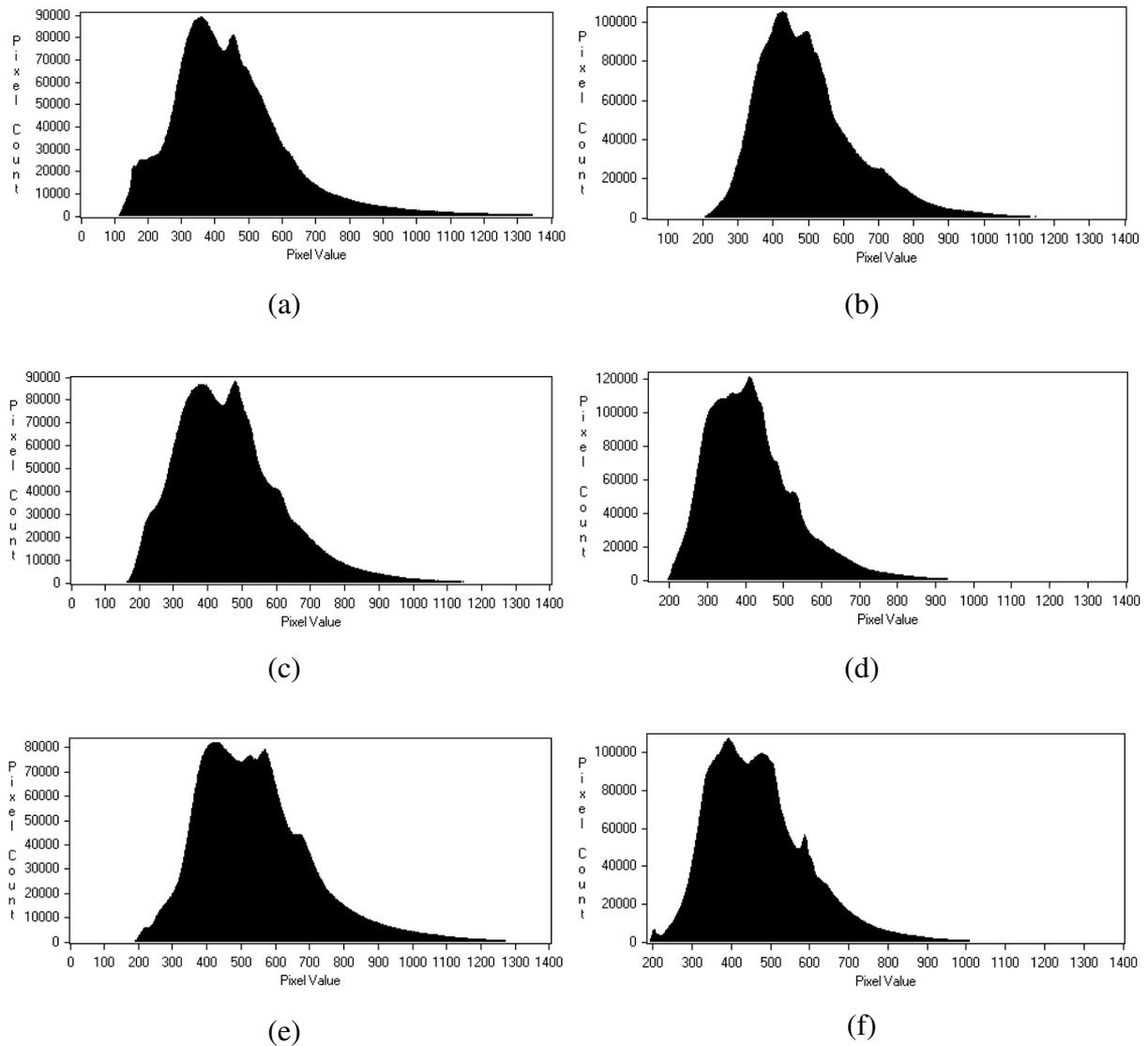


Figura 17. Histogramas de los *DN*s de las seis imágenes *PAN* de los satélites *VHR* sobre el área de trabajo. (a) *GE11*, (b) *WV21*, (c) *GE12*, (d) *WV22*, (e) *GE13* y (f) *WV23*.

5.2.- PRECISIÓN DE LOS *DSMs*.

La evaluación de la precisión de los *DSMs* extraídos a partir de estéreo pares de satélites *VHR* se llevó a cabo, en primer lugar, utilizando los 69 *ICPs* en la fase de orientación del sensor y, en una segunda etapa, mediante el uso de un *DSM* obtenido a partir de datos *LiDAR* como *Ground Truth*.

En la Tabla 6 se muestra el *RMSE* en los *ICPs* para cada una de las cuatro estrategias utilizadas en la orientación del sensor de cada estéreo par puro (misma fecha y *along-track*) tanto de *GEI* (ID 1), como de *WV2* (ID 2). Con respecto al efecto de los diferentes modelos de sensor y *GCPs* en la precisión planimétrica obtenida durante la fase de orientación, el modelo de sensor *CCRS* alcanzó ligeramente mejores resultados que *RPC0* cuando se usaron 45 *GCPs*. Sin embargo, trabajando con el mismo conjunto de 12 *GCPs*, la precisión planimétrica con ambos modelos de sensor, fue prácticamente la misma para ambos estéreo pares puros. Sin embargo, cuando se utilizan imágenes individuales, se ha demostrado (Aguilar *et al.*, 2012; Aguilar *et al.*, 2013) que la combinación del modelo de sensor *RPC0* con 7 *GCPs* obtiene unos resultados de precisión claramente superiores a los obtenidos con el modelo de sensor *CCRS*, aunque estas diferencias en la precisión se reducen, en gran medida, usando estéreo pares. En este sentido el modelo *CCRS* fue tan preciso como *RPC0* trabajando con un estéreo par de *IKONOS*, y mejor aún cuando el estéreo par era de *Quickbird* (Toutin, 2006). En cuanto a la precisión altimétrica en los *ICPs*, no se ha podido evaluar en la fase de orientación del sensor con el modelo de sensor *RPC0*, ya que ésta no estaba disponible en *OrthoEngine* para dicho modelo (Tabla 6).

Una vez finalizada la fase de orientación del sensor para las diferentes combinaciones de los modelos de sensor y números de *GCPs*, se realizó el proceso de *matching* para generar los diferentes *DSMs*. Para el cálculo de la precisión vertical se compararon los *DSMs* generados a partir de las imágenes de los satélites *VHR* sobre las zonas sin cambios, con el *DSM* derivado del *LiDAR*, descrito anteriormente como *Ground Truth*. En este ensayo el modelo *RPC0* con 7 o 12 *GCPs* logró una precisión vertical ligeramente mejor, en términos de desviación estándar, que el modelo *CCRS*. En cuanto a los sensores estudiados, los *DSMs* más precisos se obtuvieron a partir del estéreo par puro de *GEI* que para el estéreo par de *WV2* (mejorando la precisión vertical cerca de 0.17 m). Hay que tener en cuenta que la precisión vertical del *DSM* del estéreo par puro de *GEI* con *RPC0* y 12 *GCPs* era exactamente la misma que la media del tamaño real de píxel para las imágenes originales (0.439 m). En el caso de *WV2*, la combinación del modelo *RPC0* y 12 *GCPs* alcanzó una precisión vertical del *DSM* (0.613 m) un 23% mayor que su media del tamaño de píxel para las imágenes originales (0.498 m). Los errores sistemáticos verticales de alrededor de ± 0.20 m se encuentran ocasionalmente, tanto en los modelos de sensor como en los estéreo pares puros probados (Tabla 6).

Tabla 6. Resultado de la orientación del sensor para estéreo pares puros (misma fecha y *along-track*) de *GEI* y *WV2* (ID 1 y ID 2) y Resultados estadísticos (media y desviación estándar) de la comparación del *DSM LiDAR* con los *DSMs VHR* sobre zonas sin cambios.

ESTÉREO PAR	MODELO DE SENSOR	N° GCPs	RMSE con 69 ICPs En la Fase de Orientación del Sensor (m)				LiDAR- DSM VHR (m)	
			X	Y	XY	Z	Media	Desviación estándar (σ)
ID 1 GEI	RPCO	7	0.287	0.269	0.393	-	-0.118	0.444
	RPCO	12	0.273	0.264	0.380	-	-0.139	0.439
	CCRS	12	0.283	0.254	0.375	0.573	0.025	0.465
	CCRS	45	0.241	0.222	0.328	0.586	-0.213	0.485
ID 2 WV2	RPCO	7	0.365	0.370	0.520	-	0.026	0.609
	RPCO	12	0.338	0.349	0.486	-	0.095	0.613
	CCRS	12	0.282	0.398	0.488	1.008	0.239	0.676
	CCRS	45	0.274	0.347	0.442	0.770	-0.033	0.643

Después de reducir drásticamente el número de puntos de los *DSMs* por medio de un filtrado de datos de redundancia en RapidForm, se llevó a cabo una evaluación de la precisión en toda el área de trabajo de los estéreo pares puros, tanto de *GEI* como de *WV2*, tomando como referencia el *DSM* obtenido a partir de datos *LiDAR*. La reducción mediante filtrado del número de datos iniciales fue necesaria para poder incluir la totalidad del área de estudio en la comparación.

La Fig. 18 muestra los histogramas de las diferencias de cota para los *DSMs* de *GEI* y *WV2* en toda el área de trabajo, así como su distribución espacial centrada en la región más septentrional.

Las desviaciones estándar o errores aleatorios del área de trabajo oscilaron entre 1.110 m para *GEI* y 1.176 m para *WV2*, mientras que los sesgos o errores sistemáticos fueron de -0.193 m para *GEI* y -0.059 m para *WV2*. Debido a que en el área de trabajo se tiene en cuenta muchos tipos de cubiertas del terreno, tales como zonas urbanas, carreteras, playas y la vegetación, su precisión vertical estimada fue peor (i.e. valores más altos de desviaciones estándar) que la calculada en las zonas sin cambios. Sin embargo, las diferencias de cota en las zonas urbanas no se pudieron calcular correctamente, debido principalmente, a que el proceso de triangulación del *DSM* no funcionaba bien con superficies verticales, como las fachadas de los edificios. Este detalle puede ser observado en la esquina superior derecha de la Fig. 18, donde se encuentra el pueblo de Villaricos. Para poder calcular la precisión vertical de los *DSMs* generados en zonas urbanas, se realizó una prueba en una zona de más de 93,000 m² situada en el pueblo de Villaricos. En éste área seleccionada, los *DSMs* generados a partir de estéreo pares puros que usaron el modelo de sensor *RPC0* con 12 *GCPs*, se compararon con el *DSM* derivado del *LiDAR*, que fue interpolado a un paso de malla de 1 m mediante triangulación lineal. Una vez comparados ambos *DSMs*, se eliminaron los errores groseros o *outliers* de las poblaciones residuales, mediante la aplicación de la regla 3-sigma (Daniel y Tennant, 2001), obteniéndose 86,807 y 91,601 cotas residuales para *GEI* y *WV2* respectivamente. Por último, para el estéreo par puro de *GEI*, se alcanzaron unos valores de desviación estándar y sesgo de 2.669 m y 0.873 m respectivamente. Y en el caso de *WV2*, se alcanzaron valores muy similares de 2.740 m y 1.026 m.

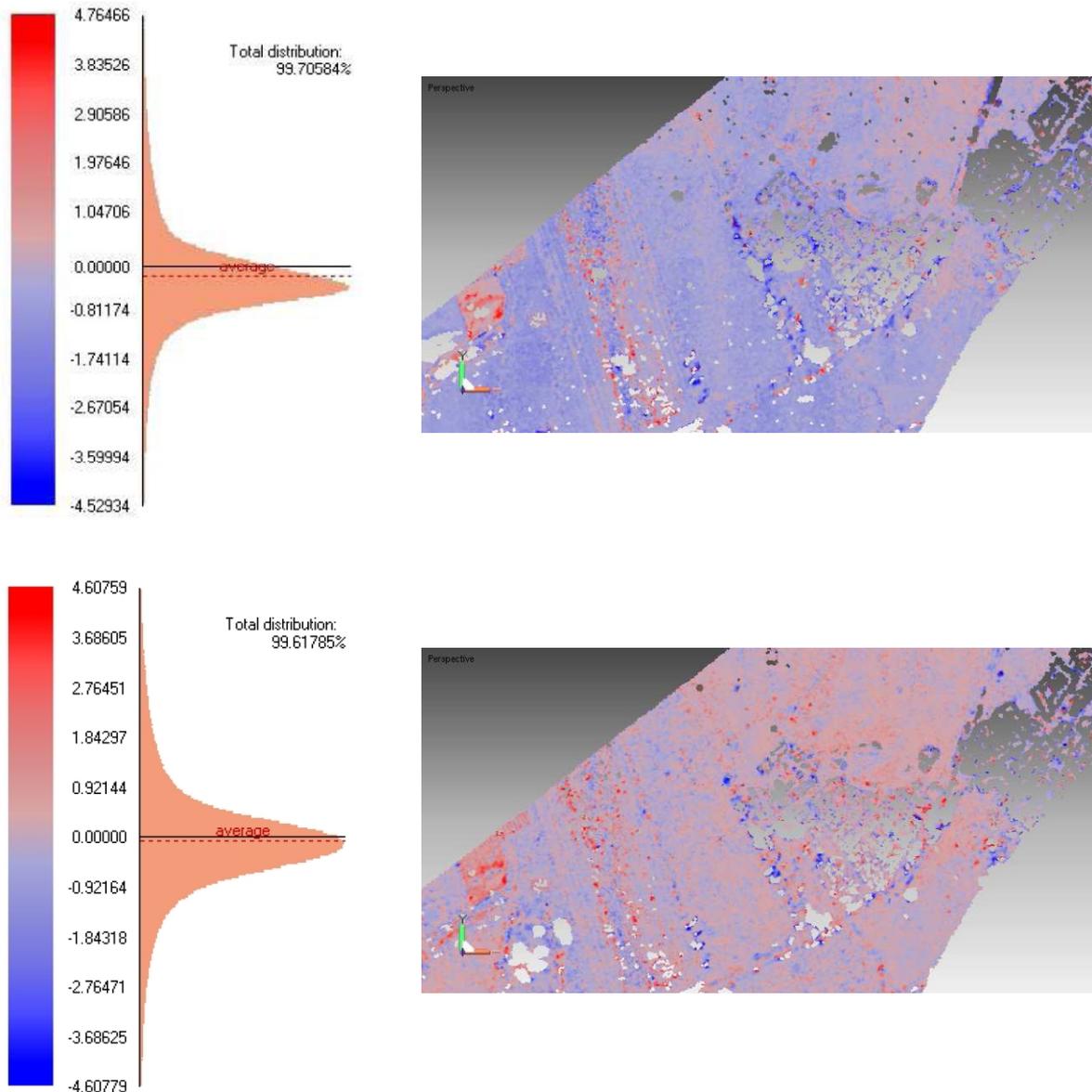


Figura 18. Distribución espacial de las diferencias de cota y el histograma correspondiente para del *DSM* derivado del *LiDAR* – *DSM* puro de *GEI* (arriba) y *DSM* derivado de *LiDAR* – *DSM* puro de *WV2* (abajo).

Por otra parte, en la Fig. 19, se puede observar, mediante un análisis visual de un área limitada de este ensayo sobre Villaricos, que los *DSMs* puros extraídos de imágenes de satélite *VHR*, deben ser editados considerablemente en las zonas urbanas, especialmente en los bordes de los edificios. Precisamente en esas zonas se produce un efecto de suavizado que provoca los mayores errores en los *DSMs* que han sido generados a partir de procesos de *matching* aplicados a imágenes de satélite *VHR* (Fig. 19(d)). Este hecho dio lugar a un aumento significativo del error sistemático.

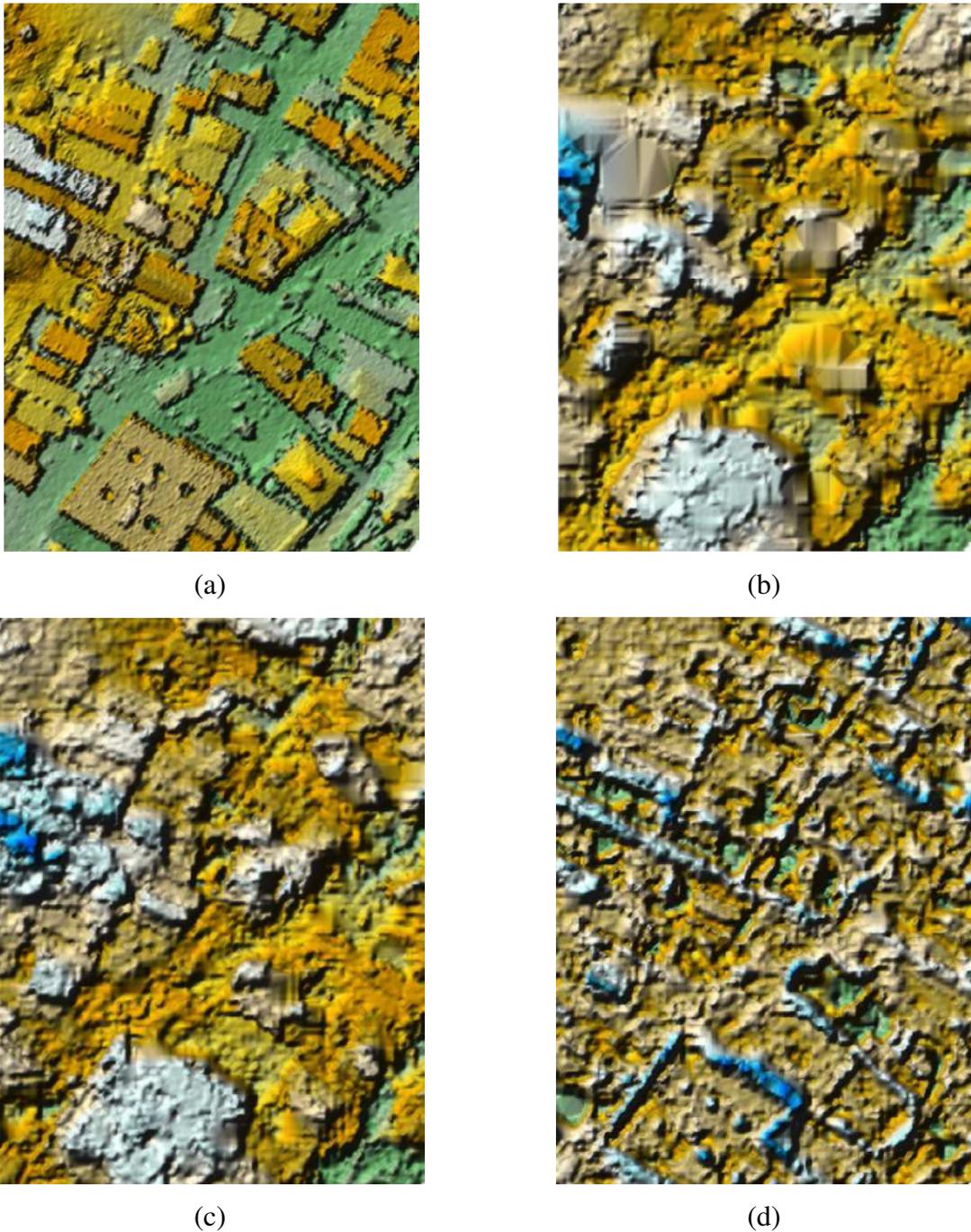


Figura 19. Análisis visual sobre un área urbana limitada (112 m x 150 m): (a) *DSM* derivado del *LiDAR*, (b) *DSM* derivado del estéreo par *GE12-GE13* (ID 1), (c) *DSM* derivado del estéreo par *WV22-WV23* (ID 2), y (d) Residuos verticales procedentes de la comparación entre el *DSM* derivado del *LiDAR* y el *DSM* de *WV2*.

En la Fig. 20 se puede analizar la precisión vertical de los *DSMs* obtenidos a partir de todos los estéreo pares considerados en este proyecto (ahora se incluyen estéreo pares mixtos y puros) sobre las zonas sin cambios. De esta manera, y en relación a la incertidumbre vertical medida como desviación estándar (Fig. 20(a)), su tendencia fue disminuir al aumentar el ángulo de convergencia (i.e. mejora la geometría de la imagen estéreo par) como ya hemos

podido contrastar con otras investigaciones (Li *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009). Debe señalarse que la precisión vertical para estéreo pares puros, dentro del círculo de línea discontinua en la Fig. 20(a), con ángulos de convergencia de 30.39° (*GE1*) y 31.35° (*WV2*) resultó ser mucho mejor que la de los mixtos. Esto se debió, probablemente, a que ambos estéreo pares puros se tomaron bajo condiciones ideales, sin ninguna diferencia entre las fechas de adquisición y con casi la misma posición del sol. En el caso de estéreo pares mixtos con una geometría de imagen estéreo similar (es decir, con ángulos de convergencia entre 22° y 30°) las precisiones verticales oscilaron de 1 a 1.1 m. En cuanto al sesgo de los *DSMs* (Fig. 20(b)), ángulos de convergencia menores que 18° o ratios B/H menores que 0.28 dan lugar a mayores errores sistemáticos verticales y, además, producen valores más variables. Por lo tanto, estas configuraciones sumamente débiles de estéreo pares deben usarse muy cuidadosamente. En cuanto a los modelos de sensores probados, no existe ninguna diferencia importante que pueda ser comentada.

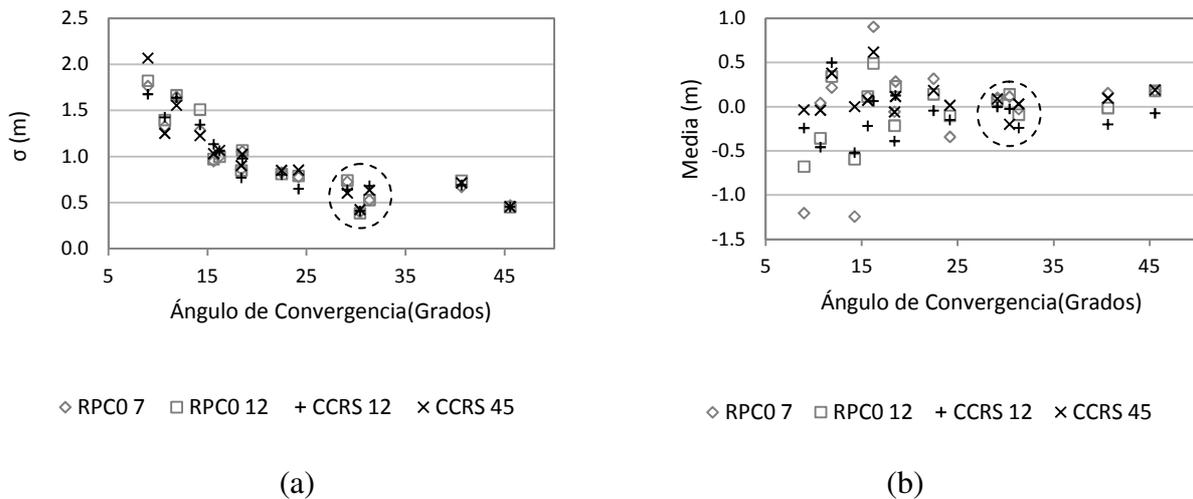


Figura 20. Estadísticas de las diferencias de cota dentro de la zona sin cambios correspondientes a la comparación entre cada *DSM* extraído de imágenes de satélite *VHR* y los datos de elevación *LiDAR* en función del ángulo de convergencia. Los estéreo pares puros se resaltan dentro del círculo de línea discontinua.

5.3.- COMPLETITUD DEL DSM.

En la Fig. 21 se puede apreciar que, en general, el modelo *RPC0* produjo mejores resultados en la completitud de los *DSMs* que el modelo *CCRS*. Estos resultados también se obtuvieron con estéreo pares de IKONOS (Toutin, 2006). Sin embargo, trabajando con productos *Basic stereo* de QuickBird (Toutin, 2006) e imágenes estéreo de alta resolución radar del satélite Radarsat-2 (Toutin, 2012), el modelo *CCRS* fue el que alcanzó mejores resultados en el proceso de *matching* en cuanto al porcentaje de superficie extraída con éxito (i.e. completitud). Si tenemos en cuenta solo los estéreo pares puros, *WV2* logró mucho mejor completitud (83.35% para el modelo *RPC0* y 81.58% para el modelo *CCRS*) que *GE1* (74.50% para el modelo *RPC0* y 73.64% para el modelo *CCRS*).

En la Fig. 21(a) se puede apreciar claramente, que el factor más importante, que afecta a la completitud del *DSM* en toda el área de trabajo, es la diferencia entre fechas de adquisición de las imágenes que forman los estéreo pares considerados en este proyecto. De hecho, los peores resultados se obtuvieron cuando la imagen *GE11* (septiembre de 2010) fue incluida en cada estéreo par (ID 11, 12, 13, 14 y 15), produciendo diferencias de fechas de adquisición de 295 a 333 días. Resumiendo, los valores de completitud fueron peores cuando se incrementó la diferencia entre la toma de las imágenes que forman cada estéreo par. Sin embargo, el ángulo de convergencia y la completitud no mostraron una clara relación (Fig. 21 (b)).

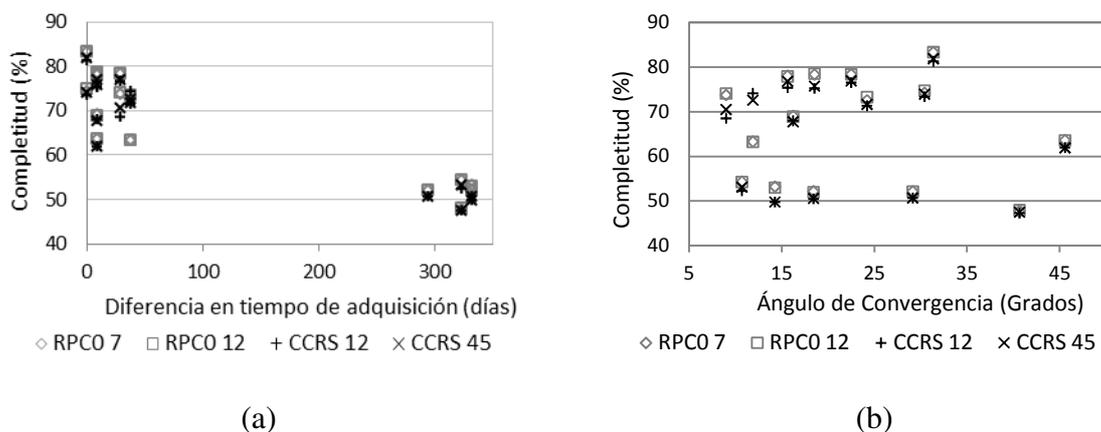


Figura 21. Completitud de cada *DSM* extraído de estéreo pares de satélite *VHR* dentro del área de trabajo en función de: (a) la diferencia entre la fecha de adquisición, y (b) ángulo de convergencia.

La Fig. 22 representa la completitud del *DSM*, en el caso particular del modelo *RPC0* con 12 *GCPs*, por medio de la representación de los coeficientes de correlación (*score channel*) generados en OrthoEngine tras efectuar el proceso de *matching* automático. En este caso, los píxeles más blancos (Fig. 22(a) y 22(b)) indican un coeficiente de correlación mejor (más cercano a 1), mientras que los píxeles negros indican los puntos con un coeficiente de correlación menor de 0.5, los cuales dieron lugar a la no obtención de cota originándose así un hueco en el *DSM*. Hay que señalar que en las zonas agrícolas, situadas en el oeste de la Fig. 22, la completitud del *DSM* fue mucho mejor usando imágenes con la misma fecha (Fig. 22 (b)) que empleando imágenes con fechas de adquisición que difieren en 324 días (Fig. 22(c)). Por otro lado, las zonas urbanas, relativamente sin cambios, situadas en el pueblo de Villaricos, en el noreste de la Fig. 22, no se vieron tan afectadas por la diferencia de tiempo de adquisición como las agrícolas.

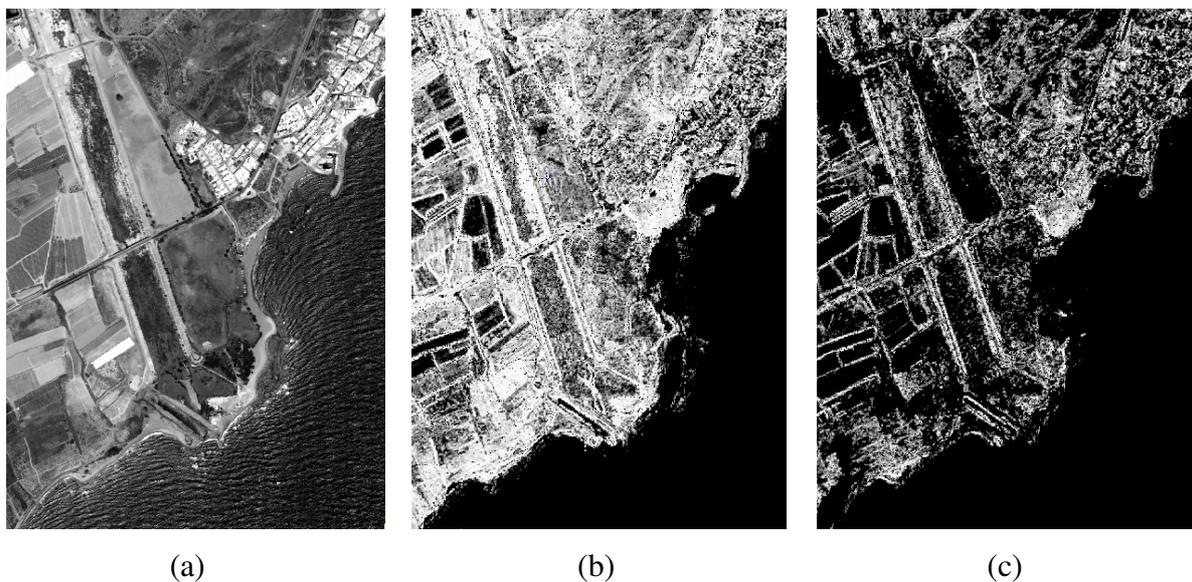


Figura 22. Completitud dentro de un área limitada de estudio (1.160 m x 1620 m): (a) Imagen *PAN* original *WV21*, (b) *score channel* del *DSM* ID 2, y (c) *score channel* del *DSM* ID 13.

Para evitar la gran influencia que tiene la diferencia de fechas de adquisición en los resultados de la completitud del *DSM*, se eliminaron los cinco estéreo pares que presentan más de 294 días entre las fechas de adquisición (ID 11, 12, 13, 14 y 15). El hecho de que se utilicen los *DSMs* generados a partir de estéreo pares con menos de 294 días de diferencia, nos permite cuantificar la influencia de otros factores en la completitud del *DSM*, tales como la cubierta del terreno y el ángulo de convergencia. Se puede observar en la Fig. 23 (para el

caso de *DSMs* con *RPC0* y 12 *GCPs*) que en las zonas llanas y sin cambios, el ángulo de convergencia no tiene ninguna influencia sobre la completitud. Así, para los estéreo pares sobre zonas urbanas, no es recomendable un gran ángulo de convergencia o un gran ratio B/H, debido a las diferentes perspectivas resultantes de la oclusión de edificios, muros y la creación de zonas de sombra (Eckert y Hollands, 2010). En cuanto a los estéreo pares puros, destacados dentro de la elipse con línea discontinua de la Fig. 23, de nuevo *WV2* mostró una mayor completitud que *GE1* para las zonas sin cambios (77.69% y 73.59% respectivamente) y zonas urbanas (78.83% y 63.23%).

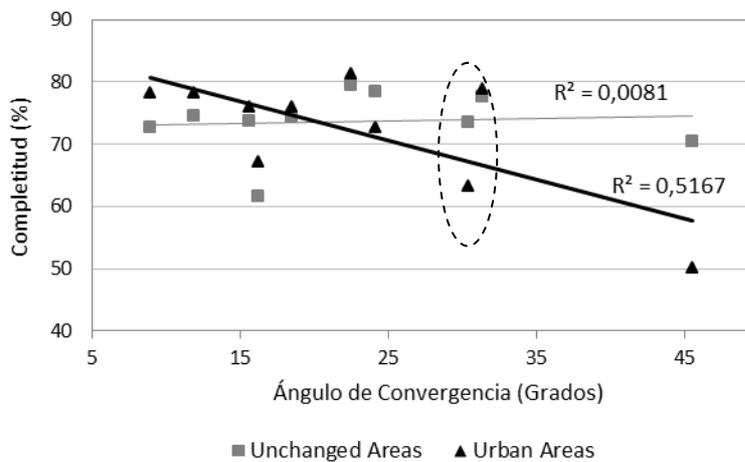


Figura 23. Completitud de cada *DSM* derivado del estéreo par *VHR* dentro de las zonas urbanas y sin cambios, dependiendo del ángulo de convergencia. Líneas de tendencia lineal. Los resultados del estéreo par puro se destacan dentro de la elipse con línea discontinua.

En cuanto a la posibilidad de registrar las alturas de invernaderos mediante *DSMs* extraídos a partir de imágenes de satélite *VHR*, en la Fig. 24 podemos ver el resultado obtenido a partir los estéreo pares puros de *GE1* y *WV2*. En la fila superior de la Fig. 24 podemos ver un trozo de una ortoimagen fusionada (*pansharpened*) de *WV2* tomada en agosto de 2011. En la segunda fila de la misma figura vemos el *DSM* (izquierda) y el *score channel* (derecha) extraídos del estéreo par de *GE1*. En la tercera fila se presenta el *DSM* (izquierda) y el *score channel* (derecha) extraídos del estéreo par puro de *WV2*. Podemos ver como la representación en ambos *DSMs* del invernadero que aparece totalmente cubierto de plástico e incluso blanqueado resulto excelente, arrojando un alto porcentaje de puntos con alto índice de correlación (*score channel*). Sin embargo, en los invernaderos tipo malla, la falta de densidad de la cubierta hizo que la generación automática de los *DSMs*, tanto para *GE1* como

para WV2, generase bastantes errores en forma de huecos (puntos no medidos), o puntos que eran posados en el suelo del invernadero en lugar de en la malla que lo recubría. Las diferencias encontradas entre ambos sensores fueron muy pequeñas, aunque es cierto que WV2 consiguió, nuevamente, mayor completitud en el modelo.

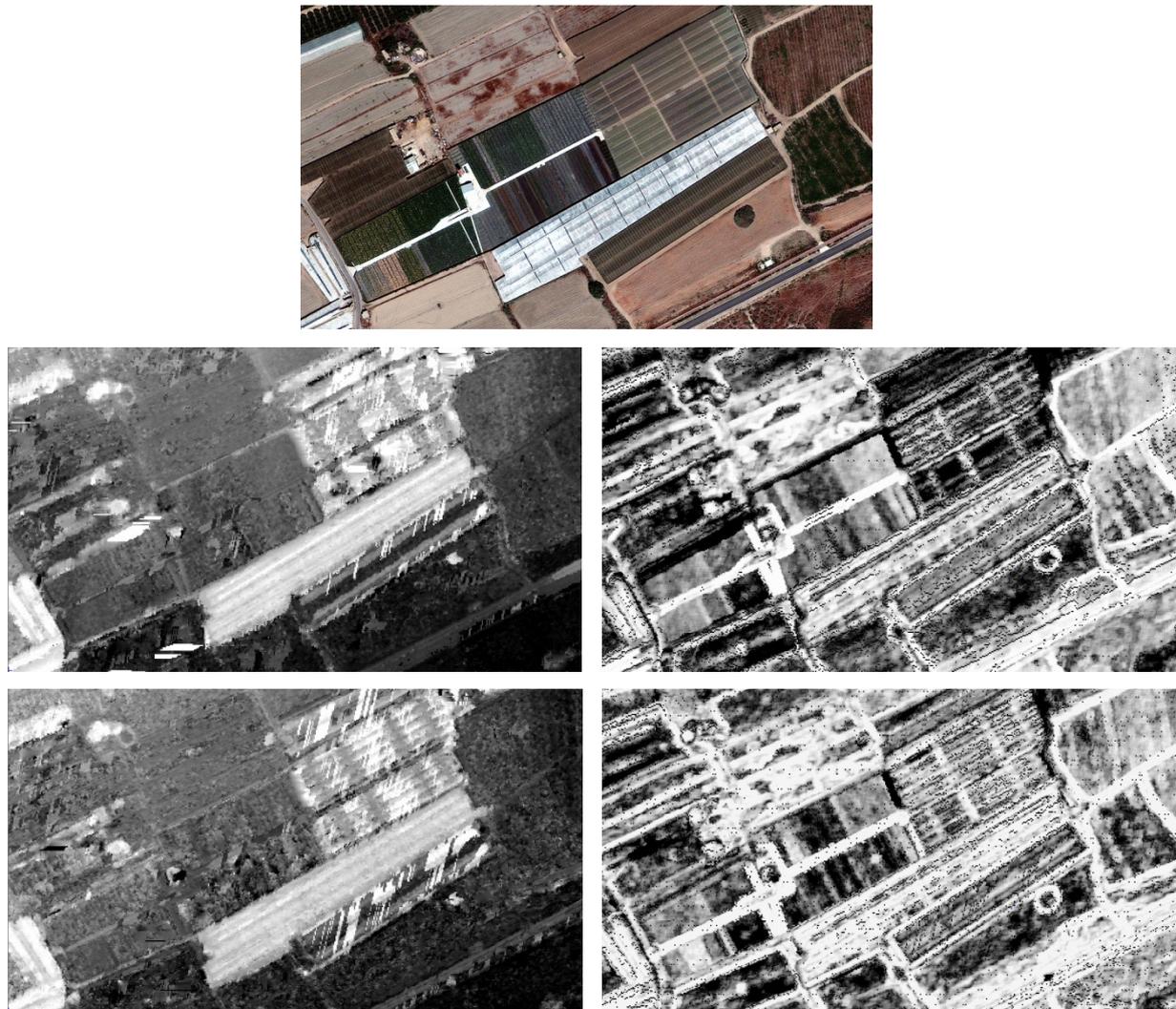


Figura 24. Ortoimagen pansharpened de WV2 (primera fila), *DSM* y *score channel* del estéreo par de *GE1* (segunda fila), *DSM* y *score channel* del estéreo par de *WV2*

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN

6.- DISCUSIÓN.

En cuanto a los estéreo pares puros de *GE1* y *WV2*, hay que señalar que la precisión vertical alcanzada a partir del *DSM* de *GE1* es mejor que la alcanzada por el *DSM* de *WV2*, aunque la completitud del *DSM* de *GE1* resultó ser claramente inferior a la de *WV2* para los diferentes tipos de terrenos estudiados. Las claras diferencias visuales entre las imágenes individuales de *GE1* y *WV2*, que se pueden observar a través de sus histogramas de *DN*s y mediante el uso de un índice de calidad cuantitativa como el *Br*, podrían estar relacionadas con estos resultados.

Cuando se aplica un procedimiento de *matching* automático basado en áreas, las imágenes borrosas podrían conducir a una mejora de la tasa de éxito en el proceso de correlación o búsqueda de homólogos, lo que produciría una mayor completitud del *DSM*. Sin embargo, la precisión vertical obtenida en esos puntos detectados por correlación automática sobre imágenes con un mayor índice de borrosidad (*Br*) sería inferior. De hecho, los trabajos previos realizados sobre *DSM* obtenidos mediante los procedimientos de *matching* implementados en software comerciales como son OrthoEngine y Leica IMAGINE OrthoBASE (ambos usando una estrategia de *matching* similar), revelaron que el efecto de suavizado de la imagen, debido a un cambio de formato TIF a JPG2000 con distintos grados de compresión, aportó mejor rendimiento del *matching* (i.e. una mayor completitud de los *DSMs*), pero también dio lugar a puntos de *matching* más imprecisos en los *DSMs* extraídos (Liu *et al.*, 2005; Shih y Liu, 2005). En nuestro caso, el efecto borrosos detectado en las imágenes *ORS2A PAN* de *WV2* produjo exactamente los resultados que ya habían sido reportados en los dos trabajos citados anteriormente.

De esta manera, las zonas urbanas presentan mayor diferencia *Br* entre imágenes de *GE1* y *WV2* que las zonas no urbanas. Por ejemplo, en Villaricos, la media de los valores de *Br* para imágenes de *GE1* fue de alrededor de 0.326, mientras que para imágenes de *WV2* fue de 0.869. En cuanto a las zonas agrícolas, los valores medios de *Br* fueron de 0.725 y 0.989 para *GE1* y *WV2* respectivamente. A partir de los resultados finales, las diferencias de completitud de los *DSMs* generados a partir de los estéreo pares puros de *GE1* y *WV2* en zonas urbanas fueron también mayores que en las zonas sin cambios o en toda el área de trabajo. Además, hay que destacar que los tres valores más altos de la completitud en las zonas urbanas, fueron

obtenidos a partir de los *DSMs* derivados de los tres estéreo pares compuestos por dos imágenes individuales de *WV2* (es decir, ID 2, 7 y 8).

Todos los satélites emplean la tecnología *TDI*. En imágenes digitales de barrido lineal mediante dispositivos *CCD*, como las captadas por los satélites *VHR*, una línea en la imagen final está realmente compuesta por varias líneas más pequeñas (también llamadas etapas) captadas por el sensor en movimiento. Debido a la gran velocidad de movimiento de estos satélites (en torno a los 7 km/s) y a su pequeño *GSD* el tiempo de integración de estas pequeñas líneas captadas (etapas) es muy pequeño. En otras palabras, la tecnología *TDI* básicamente detecta patrones de carga y los desplaza a través del dispositivo *CCD* para conseguir la línea final. Sin embargo, la acumulación de la señal con la tecnología *TDI* conduce a un aislamiento de ésta, especialmente en la dirección del vuelo, ya que las líneas *TDI* no pueden reproducir de manera exacta la imagen de la misma escena de la superficie y por tanto se produce una mezcla de señal (Baltsavias *et al.*, 2001). El hecho de que las imágenes *PAN* de *GE1* utilicen 16 etapas *TDI* mientras que las de *WV2* empleen 32 etapas *TDI*, podría estar contribuyendo al efecto borroso observado en *WV2*. Por lo tanto, sería interesante estudiar si las diferencias de calidad entre imágenes *PAN* de *GE1* y *WV2* se deben a aspectos operacionales de la adquisición de la imagen, ligados principalmente a factores climáticos existentes en el momento de toma de la imagen, o, por el contrario, son causadas por las características específicas propias de cada uno de los sensores (sistemas de lentes, procesamiento de la imagen, altura de la órbita). También, es muy importante continuar esta línea de investigación para estudiar si mediante el uso de otro software, aplicando diferentes algoritmos de *matching* a las imágenes del estéreo par, las diferencias radiométricas entre los sensores de satélite probados pueden afectar tanto a la precisión vertical final del *DSM* como a los resultados de la completitud.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

7.- CONCLUSIONES.

Las estudios de evaluación de la precisión vertical de los *DSMs* generados a partir de estéreo pares formados por imágenes *PAN* de satélites *VHR*, en los cuales se probaron diferentes combinaciones de *GCPs*, así como dos modelos de sensor (i.e. *RPC0* y *CCRS*), generaron precisiones similares en las que el rango de variación osciló entre los 0.44 m y los 1.93 m (ambos valores presentados como desviaciones estándar). El factor más influyente en la precisión vertical de los *DSMs* extraídos resultó ser, principalmente, del ángulo de convergencia del estéreo par. La precisión vertical calculada en zonas llanas no sometidas a cambios temporales fue siempre mayor a medida que aumentó el ángulo de convergencia o el ratio B/H (i.e. cuando la geometría estereoscópica mejoró). Por otra parte, los errores sistemáticos verticales eran muy grandes cuando se utilizaba estéreo pares cuya configuración no era demasiado sólida, es decir, con ángulos de convergencia inferiores a 18° (o ratios B/H por debajo de 0.28). En general, la calidad de los *DSM* extraídos dependió de la cubierta del terreno, siendo los *DSMs* generados sobre las zonas llanas y sin cambios más precisos que los obtenidos sobre zonas urbanas.

En cuanto a la completitud de los *DSMs*, el modelo de sensor *RPC0* con 7 o 12 *GCPs* fue el modelo matemático de sensor que alcanzó mejores resultados, proporcionando valores de completitud desde 47.94% hasta 83.35%, siendo la diferencia entre fechas de adquisición de las imágenes que componían el estéreo par, el factor más influyente. Las zonas agrícolas fueron las más afectadas por este factor. Hay que tener en cuenta que las parcelas agrícolas podían variar su estado (e.g. cultivada, recolectada, arada) en solo cuestión de días. En cuanto la completitud de los *DSMs* en zonas urbanas, se recomienda utilizar ángulos de convergencia inferiores a 25° para obtener una mayor similitud entre las dos imágenes que componen el estéreo par y así evitar la oclusión de las paredes de los edificios.

El posible efecto que sobre la precisión y/o la completitud de los distintos *DSMs* extraídos, pudiese tener las diferencias de la posición del sol en las dos imágenes del estéreo par, que indudablemente introduciría unas mayores diferencias radiométricas entre ellas, no se pudo demostrar en este trabajo. Probablemente este elemento podría haber estado enmascarado por otros factores más influyentes, como los ya comentados del ángulo de convergencia o la diferencia temporal en la toma de imágenes.

Aunque los *DSMs* extraídos de estéreo pares mixtos lograron muy buena calidad, la mejor precisión se obtuvo en el caso de estéreo pares puros (*along-track* y misma fecha), que presentaban ángulos de convergencia cercanos a 30° y las menores variaciones radiométricas en la imagen, tales como cambios temporales o debidos a diferencias en la iluminación solar. En estos estéreo pares puros, los valores más altos de completitud de los *DSMs* extraídos se obtuvieron a partir del estéreo par de *WV2* (83.35% para *WV2* y 74.50% para *GE1*). Se logró una mejor precisión vertical en las zonas llanas y sin cambios a partir del estéreo par puro de *GE1* (0.44 m y 0.61 m para *GE1* y *WV2* respectivamente) probablemente debido a su mejor contraste y calidad de imagen. Las precisiones verticales obtenidas en las zonas urbanas no presentaron diferencias significativas, obteniendo 2.67 m para *GE1* y 2.74 m para *WV2*. Las diferencias radiométricas entre las imágenes *PAN* de *WV2* y *GE1*, siendo las imágenes de *WV2* claramente más borrosas que las imágenes de *GE1*, parecen ser la principal causa de estos resultados.

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFÍA

8.- BIBLIOGRAFÍA.

Aguilar, F.J., Agüera, F., Aguilar, M.A., Carvajal, F., 2005. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on Grid DEM accuracy. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 71, no. 7, pp. 805-816.

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Carvajal, F., Agüera, F., Estrada, L., 2006. Geometric accuracy of Ikonos Geo Panchromatic Orthoimage Products. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 184, pp. 5-10.

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Agüera, F., Sánchez, J.A., 2007a. Geometric accuracy assessment of QuickBird basic imagery using different operational approaches. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 73, no. 12, pp. 1321-1332.

Aguilar, F.J., Agüera, F., Aguilar, M.A., 2007b. A theoretical approach to modeling the accuracy assessment of Digital Elevation Models. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 73, no. 12, pp. 1367-1379.

Aguilar, F.J., Carvajal, F., Aguilar, M.A., Agüera, F., 2007c. Developing digital cartography in rural planning applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 55, no. 2, pp. 89-106.

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Carvajal, F., Agüera, F., 2007d. Comparison of two commercial solutions for generating DSMs from QuickBird stereo imagery. 2007 Annual Conference of the Remote Sensing & Photogrammetry Society (RSPSoc2007). September 2007, NewCastle, U.K., unpaginated CD ROM.

Aguilar, M.A., Agüera, F., Aguilar, F.J., Carvajal, F., 2008a. Geometric accuracy assessment of the orthorectification process from very high resolution satellite imagery for Common Agricultural Policy purposes. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 29, no. 24, pp. 7181-7197.

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Agüera, F., 2008b. Assessing Geometric Reliability of Corrected Images from Very High Resolution Satellites. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 74, no. 12, pp. 1551-1560.

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Saldaña, M.M., Fernández, I., 2012. Geopositioning accuracy assessment of GeoEye-1 Panchromatic and Multispectral imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 78, no. 3, pp. 247-257.

Aguilar, M.A., Saldaña, M.M., Aguilar, F.J., 2013. Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 21, pp. 427-435.

Ariza, F.J., Atkinson, A.D.J., 2005. Sample size and confidence when applying the NSSDA. *Proceedings of the 21th International Cartographic Conference*, 9-16 July, A Coruña, Spain (The International Cartographic Association), unpaginated CD-ROM.

Alobeid, A., Jacobsen, K., Heipke, C., 2010. Comparison of Matching Algorithms for DSM Generation in Urban Areas from IKONOS Imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol.76, no. 9, pp.1041-1050.

Baltsavias, E., Pateraki, M., Zhang, L., 2001. Radiometric and geometric evaluation of IKONOS Geo images and their use for 3D building modeling. *Proceedings of the ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space"*, Hannover, Germany, Sep. pp. 19-21.

Butler, J.B., Lane, S.N., Chandler, J.H., 1998. Assessment of DEM quality for characterizing surface roughness using close range digital photogrammetry. *Photogramm. Rec.*, vol. 16, no. 92, pp. 271-291.

Capaldo, P., Crespi, M., Fratarcangeli, F., Nascetti, A., Pieralice, F., 2012. DSM generation from high resolution imagery: applications with WorldView-1 and GeoEye- 1. *Ital. J. Remote Sens.*, vol. 44, no. 1, pp. 41-53.

Chen, P., Chaapel, C., 2008. Automatic DEM Generation using WorldView-1 Stereo Data with or without Ground Control. *GeoInformatics*, vol. 7, pp. 34-39.

Cheng, P., Toutin, T., Zhang, Y., 2003. QuickBird-Geometric correction, data fusion, and automatic DEM extraction. *Proceedings of the 24th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2003) and 2003 International Symposium on Remote Sensing*, 03–07 November, Busan, Korea, unpaginated CD-ROM.

Chmiel, J., Kay, S., Spruyt, P., 2004. Orthorectification and geometric quality assessment of very high spatial resolution satellite imagery for Common Agricultural Policy purposes. *Proceeding of the XXth International Archives of the Photogrammetry*.

Choi, M.G., Jung, J.H., Jeon, J.W., 2009. No-Reference Image Quality Assessment using Blur and Noise. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 50, pp. 163-167.

Crespi, M., Colosimo, G., De Vendictis, L., Fratarcangeli, F., Pieralice, F., 2010. GeoEye-1: Analysis of Radiometric and Geometric Capability. *Personal Satellite Services, Second International ICST Conference, PSATS, Rome, Italy, Feb. 2010. Revised Selected Papers*, vol. 43, Part 7, pp. 354-36.

Croft, J., 2008. Prodigious Mapping Capabilities, Spatial resolution and Geo-location ability, GeoEye's next-generation Imaging Satellite. *GeoInformatics*, vol. 4, pp. 18-23.

Cuartero, A., 2003. Análisis de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados con imágenes SPOT-HRV y TERRA-ASTER. Tesis Doctoral. Universidad de Jaén.

Daniel, C., Tennant, K., 2001. DEM quality assessment, *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. D. F. Maune, editor, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, pp. 395-440.

Davis, C. H., Wang, X., 2003. Planimetric accuracy of Ikonos 1 m panchromatic orthoimage products and their utility for local government GIS basemap applications. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 24, no. 22, pp. 4267-4288.

Deilami, K., Hashim, M., 2011. Very High Resolution Optical Satellites for DEM Generation: A Review. *European Journal of Scientific Research*, vol. 49, no. 4, pp. 542-554.

Di, K., Ma, R., Li, R., 2003. Geometric processing of Ikonos Geo-stereo imagery for coastal mapping applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 69, no. 8, pp. 873-879.

DigitalGlobe, Inc., 2010. DigitalGlobe Core Imagery Products Guide. [Online]. Available: http://www.digitalglobe.com/downloads/DigitalGlobe_Core_Imagery_Products_Guide.pdf

Dolloff, J., Settergren, R., 2010. An assessment of WorldView-1 positional accuracy based on fifty contiguous stereo pairs of imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 76, no. 8, pp. 935-943.

Eckert, S., Hollands, T., 2010. Comparison of Automatic DSM Generation Modules by Processing IKONOS Stereo Data of an Urban Area. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 3, no. 2, pp. 162-167.

FGDC, 1998. Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy.

Fraser, C.S., 2002a. Prospect for mapping from high-resolution satellite imagery. The 23rd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2002), 25-29 November 2002, Kathmandu, Nepal, unpaginated CD ROM.

Fraser, C.S., Baltsavias, E., Gruen, A., 2002b. Processing of Ikonos for submetre 3D positioning and building extraction. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 56, pp. 177-194.

Fraser, C.S., Hanley, H.B., 2003. Bias compensation in rational function for Ikonos satellite imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 69, no.1, pp. 53-57.

Fraser, C.S., Ravanbakhsh, M., 2009. Georeferencing Accuracy of GeoEye-1 Imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 75, no. 6, pp. 634-638.

GeoEye, Inc., 2009. GeoEye Product Guide. [Online]. Available: http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/brochures/GeoEye_Product_Guide.pdf

Grodecki, J., Dial, G., 2003. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 69, no. 1, pp. 59-68.

Hobi, M.L., Ginzler, C., 2012. Accuracy Assessment of Digital Surface Models Based on WorldView-2 and ADS80 Stereo Remote Sensing Data. *Sensors*, vol. 12, pp. 6347-6368.

Höhle, J., Potuckova, M., 2006. The EuroSDR Test: Checking and Improving of Digital Terrain Models. EuroSDR, European Spatial Data Research, Official Publication N° 51, pp. 9-141.

Hu, Y., Tao, C.V., 2002. Updating solution of the rational function model using additional control information. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 68, no. 7, pp. 715-724.

Hu, Y., Tao, C.V., Croitoru, A., 2004. Understanding the rational function model: Methods and applications. *Proceeding of the XXth International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(Part B5), 12–23 July, Istanbul, Turkey, unpaginated CD-ROM.

JRC, Joint Research Centre, ISPRA, 2008. Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery, v 3.0. URL: [http://mars.jrc.it/mars/Bulletins Publications/Guidelines-for-Best-Practice-and-Quality-Checking-of-Ortho-Imagery-v 3.0](http://mars.jrc.it/mars/Bulletins_Publications/Guidelines-for-Best-Practice-and-Quality-Checking-of-Ortho-Imagery-v_3.0) (last date accessed: 6 April 2011).

Kay, S., Spruyt, P., Alexandrou, K., 2003. Geometric quality assessment of orthorectified VHR space image data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 69, no. 5, pp. 484-491.

Li, Z., 1991. Effects of check points on the reliability of DTM accuracy estimates obtained from experimental tests, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 57, no. 10, pp. 1333-1340.

Li, Z., 1992. Variation of the accuracy of digital terrain models with sampling interval. *Photogramm. Rec.*, vol. 14, no. 79, pp. 113-128.

Li, R., Zhou, F., Niu, X., Di, K., 2007. Integration of Ikonos and QuickBird imagery for geopositioning accuracy analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 73, no. 9, pp. 1067-1074.

Li, R., Niu, X., Liu, C., Wu, B., Deshpande, S., 2009. Impact of Imaging Geometry on 3D Geopositioning Accuracy of Stereo Ikonos Imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 75, no. 9, pp. 1119-1125.

Liu, J.K., Wu, J.H., Shih, T.Y., 2005. Effects of JPEG2000 on the information and geometry content of aerial photo compression. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 71, no. 2, pp. 157-167.

McCarty, B.A., 2010. Word of the Month - Bit Depth. eMap International's GeoViews. [Online]. Available: <http://www.emap-int.com/2010/June/article8.html>

Meguro, Y., Fraser, C.S., 2010. Georeferencing accuracy of GeoEye-1 stereo imagery: Experiences in a Japanese test field. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, vol. 38 (WG8), Kyoto, Japan, Aug. 9- 12, pp. 1069-1072.

Mitchell, G., MacNabb, K., 2010. High resolution stereo satellite elevation mapping accuracy assessment. *Proc. Annual ASPRS Conference*, San Diego, California, April 26-30.

Noguchi, M., Fraser, C.S., Nakamura, T., Shimono, T., Oki, S., 2004. Accuracy assesment of QuickBird stereo imagery. *The Photogrammetric Record*, vol. 19, no. 106, pp. 128-137.

Pecci, J., Cano, F. Maza, G. 2004. Generación de una ortoimagen QuickBird del año 2003 de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia: metodología y resultados. XI Congreso Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, 20-23 September 2004, Murcia, Spain, pp. 301-312.

Poli, D., Angiuli, E., Remondino, F., 2010. Radiometric and geometric analysis of WorldView-2 stereo scenes. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, vol. 38 (Part 1), Calgary, AB, Canada, June 15-18.

Poon, J., Fraser, C.S., Chunsun, Z., Li, Z., Gruen, A., 2005. Quality assessment of digital surface models generated from IKONOS imagery. *Photogramm. Rec.*, vol. 20, no. 110, pp. 162-171.

Poon, J., Fraser, C.S., Zhang, C., 2007. Digital surface models from high resolution satellite imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 73, no. 11, pp. 1225-1232.

Ridley, H., Atkinson, P., Aplin, P., Muller, J.P., Dowman, I., 1997. Evaluating the potential of the forthcoming commercial U.S. high-resolution satellite sensor imagery at the Ordnance Survey. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 63, no. 8, pp. 997-1005.

Robertson, B.C., 2003. Rigorous geometric modelling and correction of QuickBird Imagery, *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 21-25 July, Toulouse, France, pp. 797-802.

Shih, T.Y., Liu, J.K., 2005. Effects of JPEG 2000 compression on automated DSM extraction: evidence from aerial photographs. *Photogramm. Rec.*, vol. 20, no. 112, pp. 351-365.

Tao, C.V., Hu, Y., 2001. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 67, no. 12, pp. 1347-1357.

Toutin, T., 1995. Multi-source data integration with an integrated and unified geometric modelling. *EARSel Journal Advances in Remote Sensing*, vol. 4, no. 2, pp. 118-129.

Toutin, T., 2000. Elevation modeling from satellite data. *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation*, R. A. Meyers, Ed. Chichester, U.K.: Wiley, vol. 10, pp. 8543-8572.

Toutin, T., 2003. Error tracking in Ikonos geometric processing using a 3D parametric model. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 69, no. 1, pp. 43-51.

Toutin, T., 2004a. Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 42, no. 10, pp. 2121-2129.

Toutin, T., 2004b. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, no. 10, pp. 1893-1924.

Toutin, T., 2006. Comparison of 3D Physical and Empirical models for generating DSMs from Stereo HR Images. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 72, no. 5, pp. 597-604.

Toutin, T., 2012. Radarsat-2 DSM Generation With New Hybrid, Deterministic, and Empirical Geometric Modeling Without GCP. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 50, no. 5, pp. 2049-2055.

Wang, W., Zhao, L., 2011. Geolocation Accuracy Evaluation of GeoEye-1 Stereo Image Pair. *International Symposium on Image and Data Fusion, ISIDF, Yunnan, China, Aug. 9-11, Conference papers from IEEEExplore.*

Wolniewicz, W., 2004. Assessment geometric accuracy of VHR satellite images. *Proceeding of the XXth International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(Part B1), 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey, unpaginated CD ROM.

Zhang, L., 2005. Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images. Ph. D. Dissertation, no. 88, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.

Zhang, L., Gruen, A., 2006. Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., vol. 60, pp. 195-211.

8.1.- SITIOS WEBS.

www.DigitalGlobe.com

www.geoeye.com

<http://www.aeroterra.com/PDF/GeoEye-1.pdf>

http://infosatgeomatica.com/download/folleto_WW2_AGO09.pdf

www.pcigeomatics.com

http://dspace.usc.es/bitstream/10347/4350/1/rep_182_2012.pdf

<http://www.geosoluciones.cl/documentos/imagenes-alta-resolucion.pdf>

ANEXO 1

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE TRABAJO

ANEXO 1.- CARACTERISTICAS DEL EQUIPO DE TRABAJO.

1.- HARDWARE.

El hardware que se utilizó, disponía de los siguientes elementos y características:

- Estación de trabajo (Workstation): Modelo Packard Bell EasyNote LM.
- Sistema operativo: Microsoft Windows 7.
- Procesador: Intel Core i5-480M.
- Memoria RAM: 4.0 GB.

2.- SOFTWARE.

Los programas informáticos usados en este trabajo de investigación han sido fundamentalmente:

- Geomatica v.10.3
- RapidForm 2004
- Surfer 8
- Matlab
- TerraMatch ® y TerraScan ® 010 del paquete TerraSolid®.
- AutoCAD 2010
- Microsoft Excell 2007
- Microsoft Word 2007

2.1.- GEOMATICA v.10.3

Para este trabajo, en el procesado de imágenes, se trabajó con el software Geomatica, que ofrece aplicaciones geoespaciales que cumplen satisfactoriamente nuestras necesidades.

Geomatica trabaja a través de módulos, donde cada uno de ellos se especializa en la realización de tareas específicas. A continuación, se mencionan algunos de los módulos:

- Focus.
- PCI Modeler.

- EASI.
- OrthoEngine.
- FLY.

La tecnología de Base de datos Genérica de Geomatica (*Generic Data Base, GDB*) brinda la capacidad de transferencia directa de datos geoespaciales, que significa que se puede importar, exportar, o leer directamente alrededor de 100 formatos ráster y vectoriales.

Nosotros hemos utilizado los módulos de fotogrametría (OrthoEngine) y visualización y manejo de datos georreferenciados (Focus).

OrthoEngine es una herramienta fotogramétrica diseñada para manejar eficientemente cargas de trabajos pequeños y grandes así como producir resultados geoespaciales de calidad. Maneja imágenes de cámaras de video aéreas, digitales, estándares, y datos proporcionados por sensores remotos. La interfaz de OrthoEngine se organiza mediante flujos de trabajo lógicos para producir imágenes corregidas geométricamente y ortorectificadas, *DSMs*, vistas perspectivas dinámicas, y mosaicos. Esta estructura proporciona flujos de trabajo intuitivos.

Focus integra las tecnologías de PCI para Teledetección, Procesamiento de Imágenes, SIG/Análisis Espacial, y Edición Cartográfica. Ofrece todas estas herramientas en un sólo entorno de trabajo y visualización. Las tareas y procesos que requieren más de una herramienta pueden ser todas realizadas dentro de este entorno. Puede trabajar con docenas de formatos de datos geoespaciales incluyendo: vector, ráster, y datos ACSCII y la Biblioteca de Algoritmos, con más de 300 robustos algoritmos. Los resultados de sus algoritmos pueden ser mostrados directamente en el área de visualización de Focus, y pueden ser guardados en su medio de almacenamiento. La Biblioteca de Algoritmos tiene todas las funciones de procesamiento de datos de Geomatica para: Filtrado de Imágenes, Interpolación de Datos, Clasificación de imágenes, Análisis Espacial, Análisis *DSM*.

FLUJO DE TRABAJO EN GEOMÁTICA.

• OrthoEngine

1. Creamos un nuevo proyecto.

Introducimos en el programa los datos referidos a la información general del proyecto que vamos a crear. Estos datos hacen referencia al modelo de sensor que vamos a utilizar (paso 1 Fig. 25, a la localización del área de estudio (Huso, Datum, elipsoide, tamaño de píxel.) (paso 2 Fig. 25) y dónde queremos tener archivado nuestro proyecto (directorio).

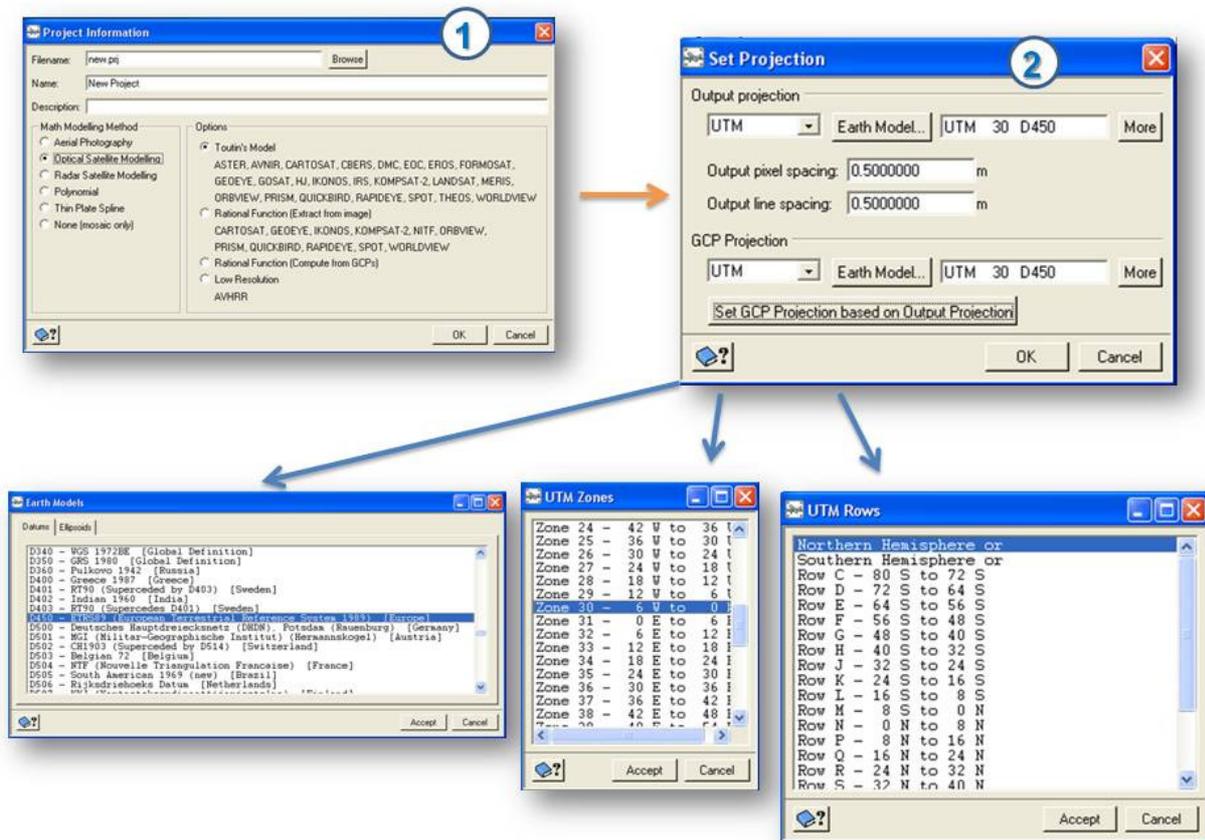


Figura 25. Pasos a seguir para crear un nuevo proyecto en OrthoEngine.

2. Introducimos las dos imágenes para generar las Epipolares.

En la etapa de procesamiento del programa, *GCP/TP Collection*, pinchamos en el icono *Open a New or existing image* (Fig. 26) y de esta manera introducimos, desde el directorio, las dos imágenes *PAN* que formarán las Epipolares que vamos a generar.

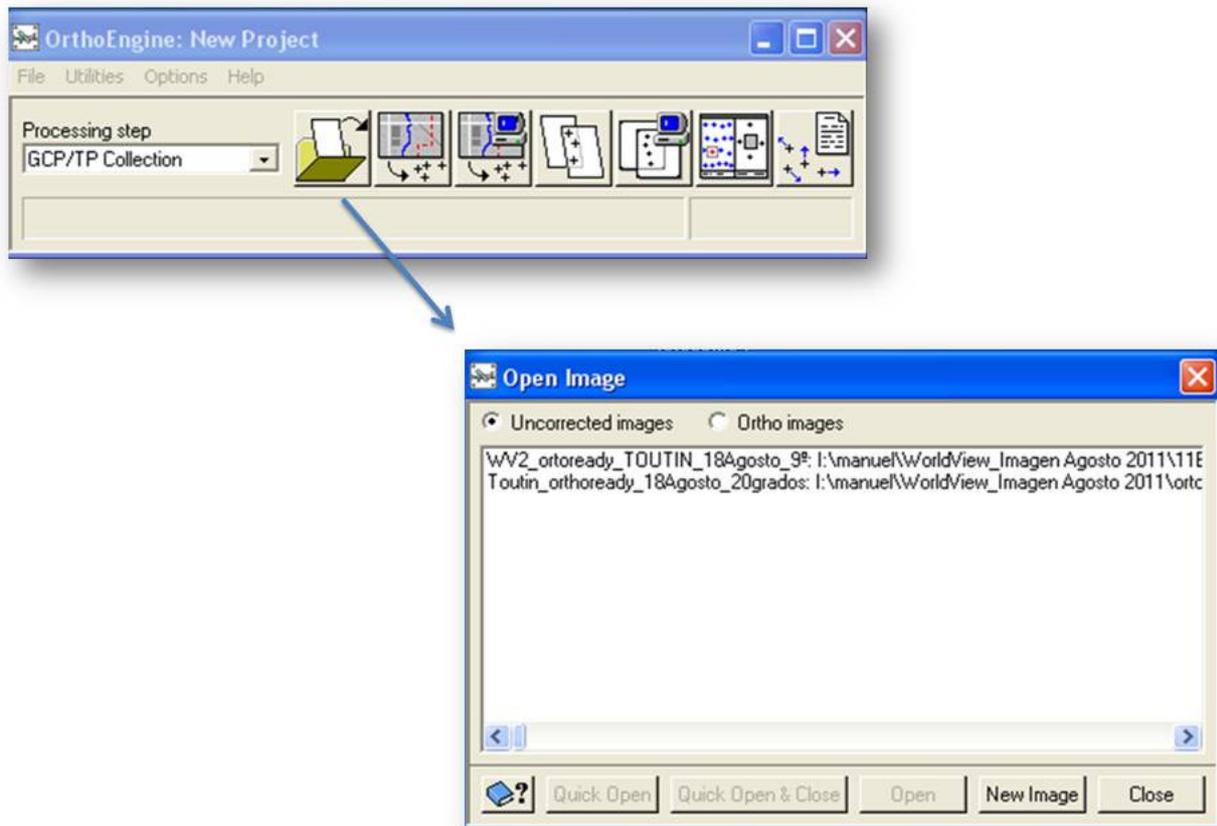


Figura 26. Introducción de las imágenes *PAN* para generar las Epipolares.

3. Introducimos el set de Puntos de Control (*GCPs*, *ICPs*).

En la etapa de procesamiento del programa, *GCP/TP Collection*, pinchamos en el icono *Collect GCPs Manually* (paso 1 de la Fig. 27). Seleccionando la imagen, introducimos, desde el directorio, los puntos de control correspondientes a la estrategia de proyecto que estamos utilizando, cada imagen tiene un archivo de puntos propio, por lo tanto lo hago para ambas imágenes (paso 2 de la Fig. 27). Una vez cargados los puntos es importante asegurarnos, mediante la visualización de zonas estratégicas de la imagen, de que los puntos se han cargado correctamente.

OrthoEngine selecciona por defecto todos los puntos como *GCPs*, por lo que hay que cambiar a *Check* los 69 puntos de control que utilizaré como *ICPs*. (Paso 3 Fig. 27))

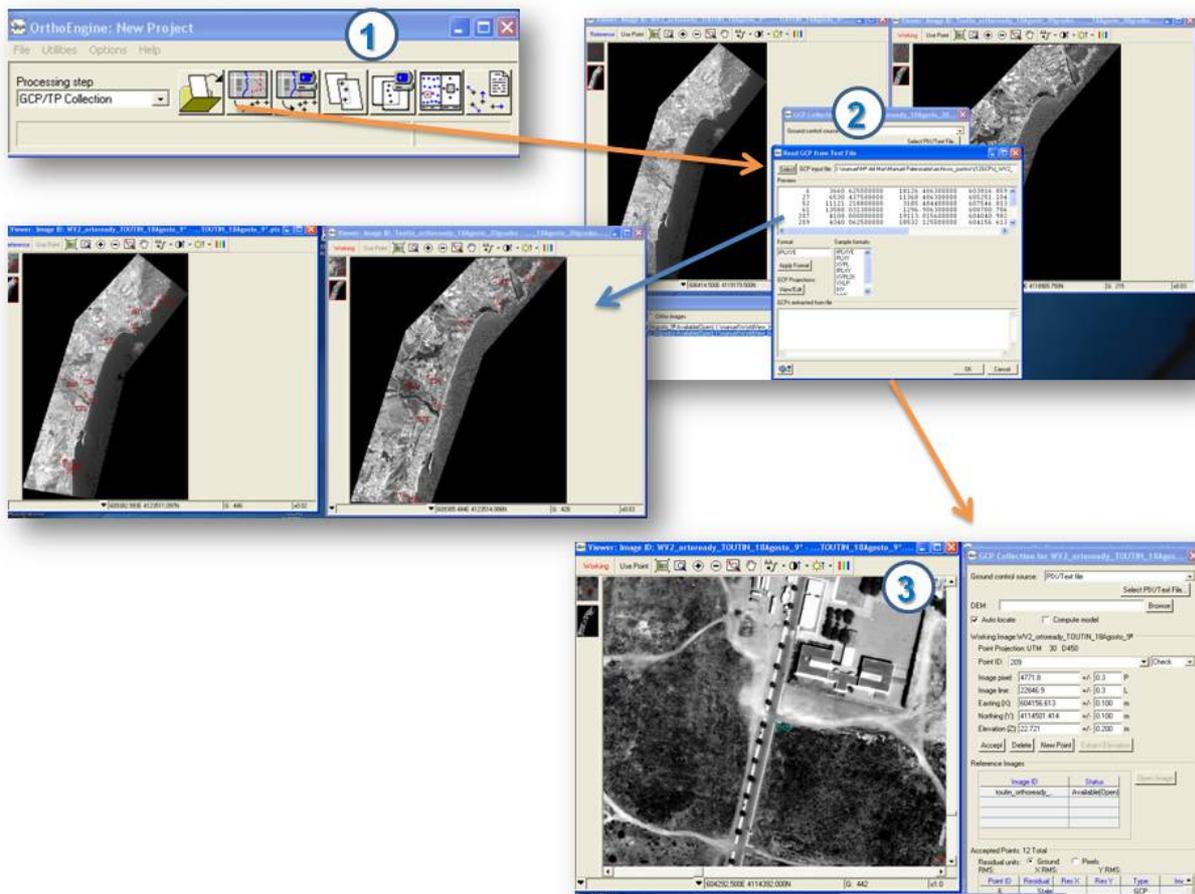


Figura 27. Pasos a seguir para introducir los Puntos de Control en cada una de las imágenes que formarán las Epipolares.

4. Generamos las Imágenes Epipolares.

Para que OrthoEngine genere las Imágenes Epipolares a partir de cada imagen, debemos de conocer la posición de una con respecto a la otra, como se puede apreciar en la Fig. 28.

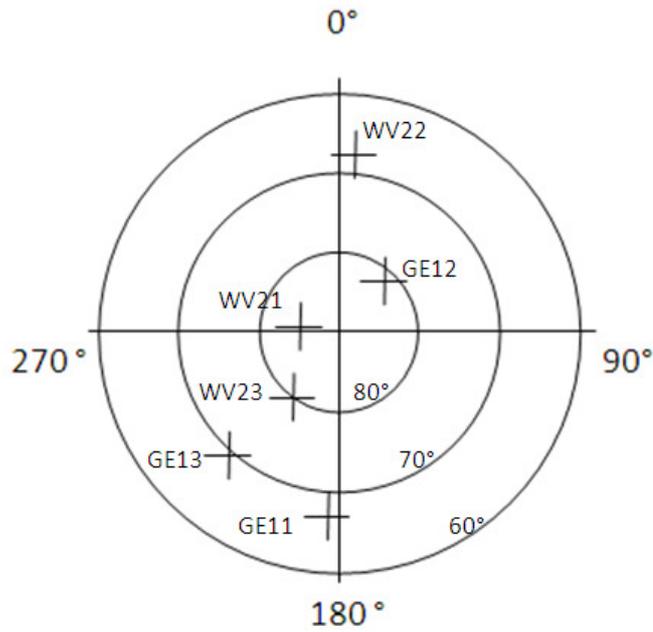


Figura 28. Posición de las seis imágenes PAN de GEI y WV2.

Posicionar bien las imágenes (Fig. 29) es muy importante, ya que OrthoEngine, para poder generar las imágenes epipolares (imágenes estereoscópicamente rectificadas), debe orientarlas buscando los puntos homólogos (e.g. P y P' en la Fig. 29).

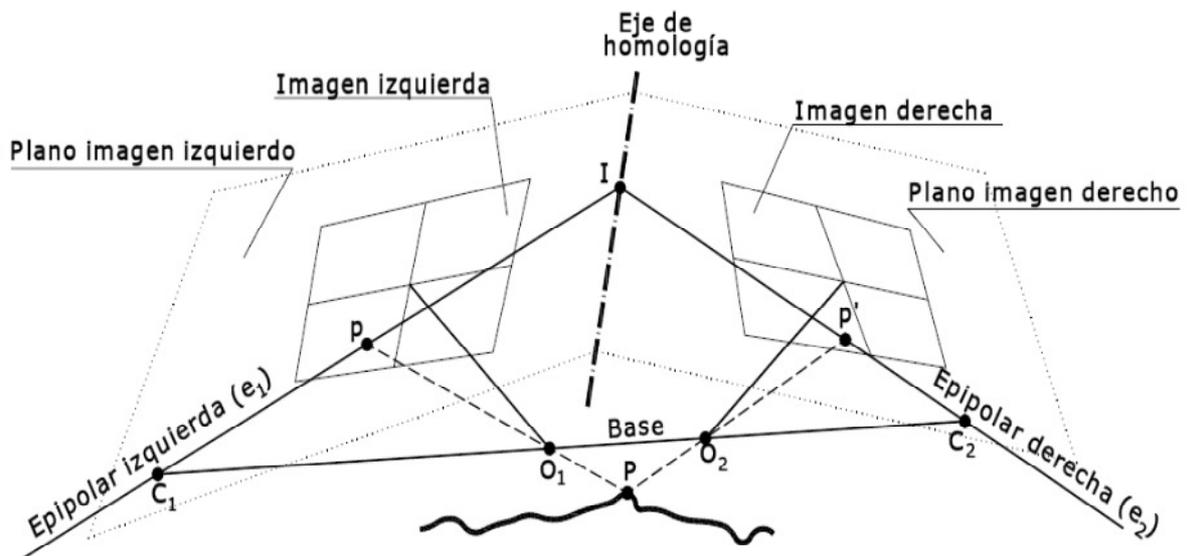


Figura 29. Homología entre dos fotogramas.

A continuación generamos las Epipolares (Fig. 30)

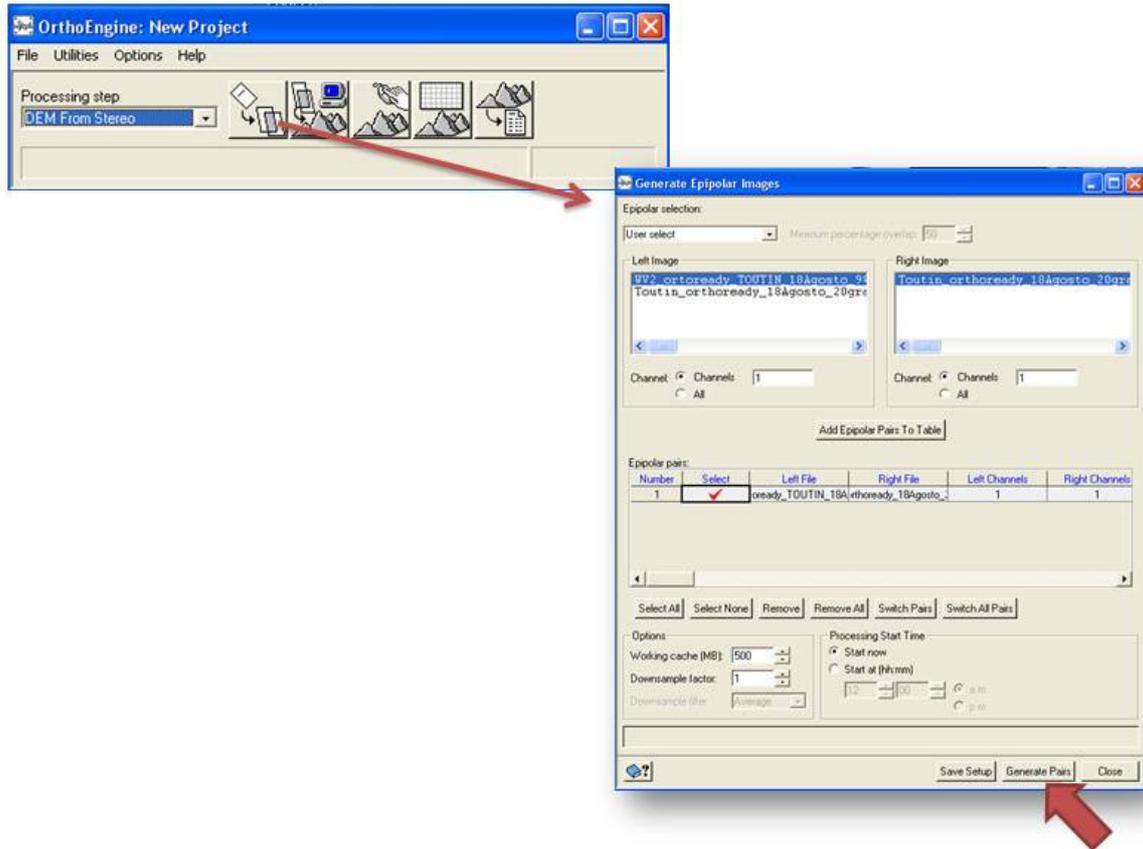


Figura 30. Generación de las Imágenes Epipolares.

5. Generamos el DSM.

Una vez normalizadas las imágenes, se procede a extraer el *DSM*, para ello introducimos los siguientes inputs (Fig. 31): Elevación mínima y máxima del *DSM* (0 y 150 m respectivamente), Nivel de detalle (alto a 32 bits), factor de muestreo de píxel (2), que use el *clip region* y que utilice el *score channel*. Por último se especifica tanto la creación del *Geocoded* del *DSM* como la ruta del directorio donde queremos guardarlo y se extrae el *DSM*

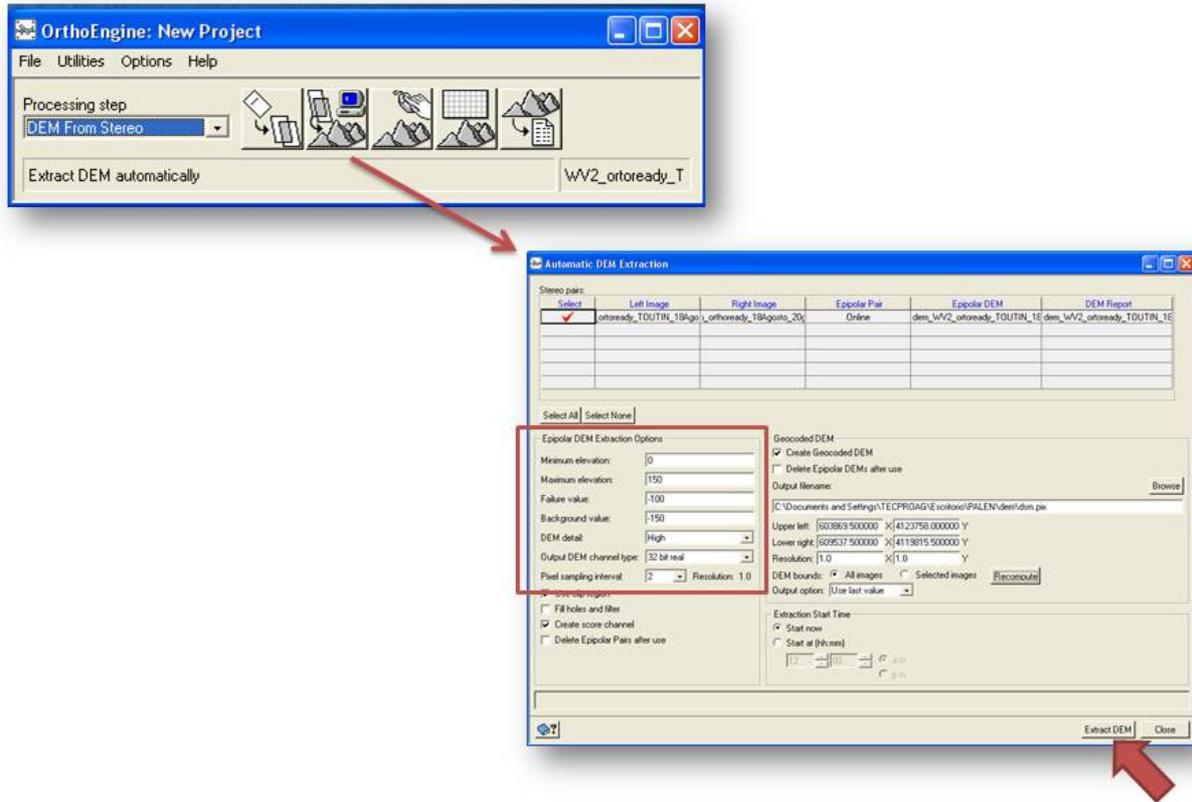


Figura 31. Generación del *DSM*.

- **Focus**

Como ya hemos comentado, tanto la precisión como la completitud dependen de la cubierta del terreno, por lo tanto, para poder evaluar éstas de manera satisfactoria, habrá que tener en cuenta diferentes zonas, como son las zonas sin cambios y las zonas urbanas. Para seleccionar estas zonas en los diferentes *DSMs* generados, utilizaremos el modulo Focus de Geomatica. La secuencia para recortar las diferentes zonas es la siguiente:

1. Abrimos el *DSM* correspondiente (*Geocoded*).

Desde el visor general de Geomatica, seleccionamos el módulo Focus y buscamos, en el directorio correspondiente, el *Geocoded* del *DSM* (Fig. 32).

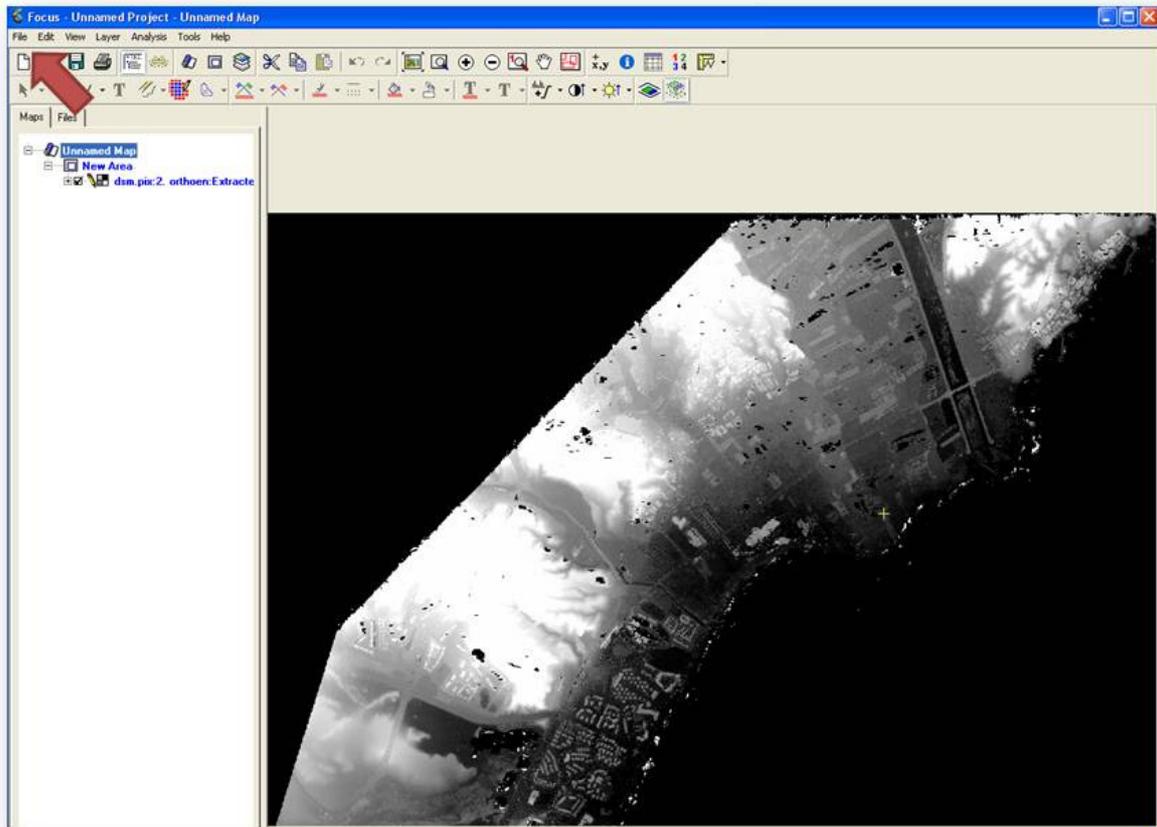


Figura 32. Geocoded del DSM.

2. Recortamos en el Geocoded la zona correspondiente.

Desde la ruta *Tools/Clipping/subsetting* seguimos los pasos indicados en la Fig. 33; en el paso 1, seleccionamos la capa 2, en el paso 2, buscamos, en el directorio, el archivo .dxf correspondiente al recorte que queremos realizar en el *DSM*, y por último en el paso 3, indicamos donde queremos guardar el *DSM* ya recortado (con extensión .pix).

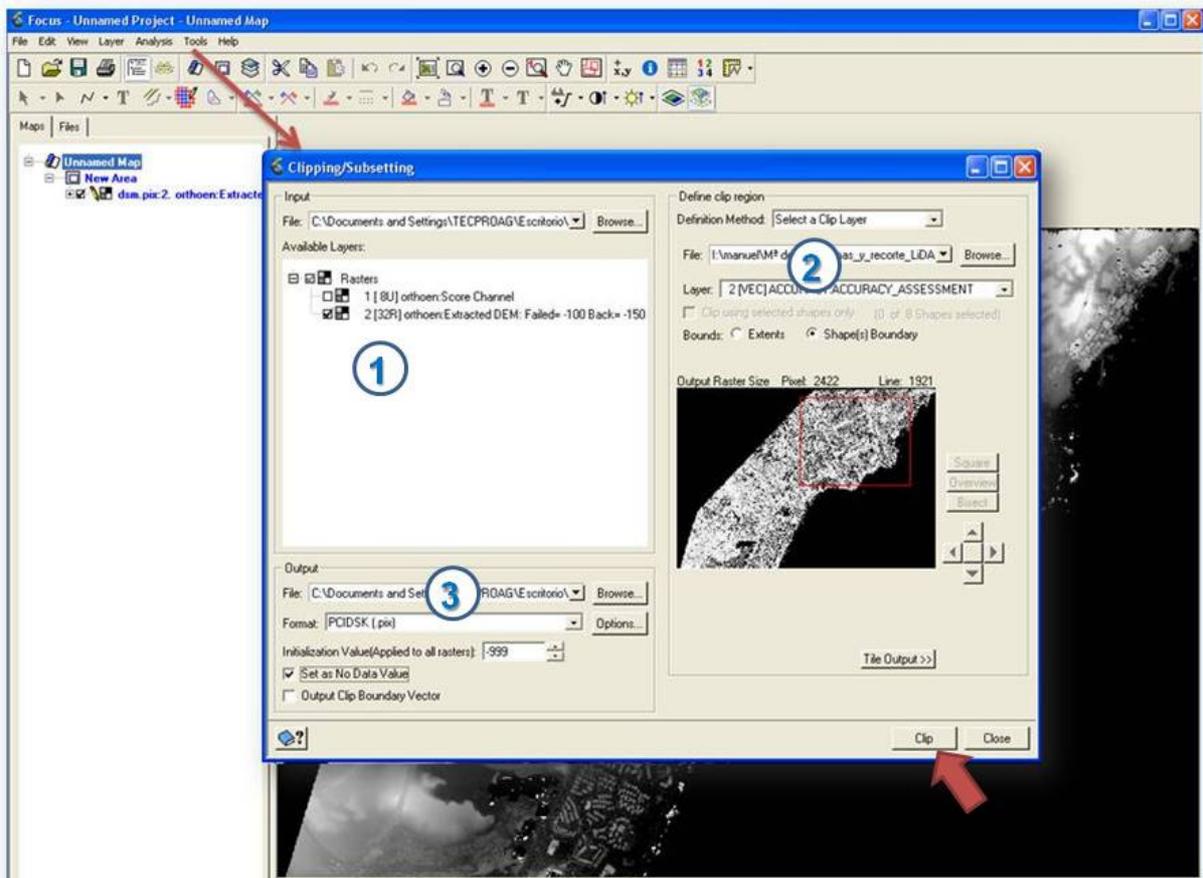


Figura 33. Pasos a seguir para recortar una zona determinada en el DSM.

Por último, hay que exportar el *DSM* generado (.pix) con la extensión .txf para poder compararlo con el *DSM LiDAR* y así calcular su precisión vertical. Para ello utilizamos, de nuevo, el módulo de Geomatica OrthoEngine.

Desde *DEM From Stereo* (Fig. 34) pinchamos en el icono *Export Extracted DEM*, a continuación buscamos, en el directorio, el *DSM* .pix que hemos recortado (paso 1), utilizo un paso de malla de 1 m (paso 2) e introducimos la ruta del directorio donde exportaremos el *DSM* con la extensión .txf

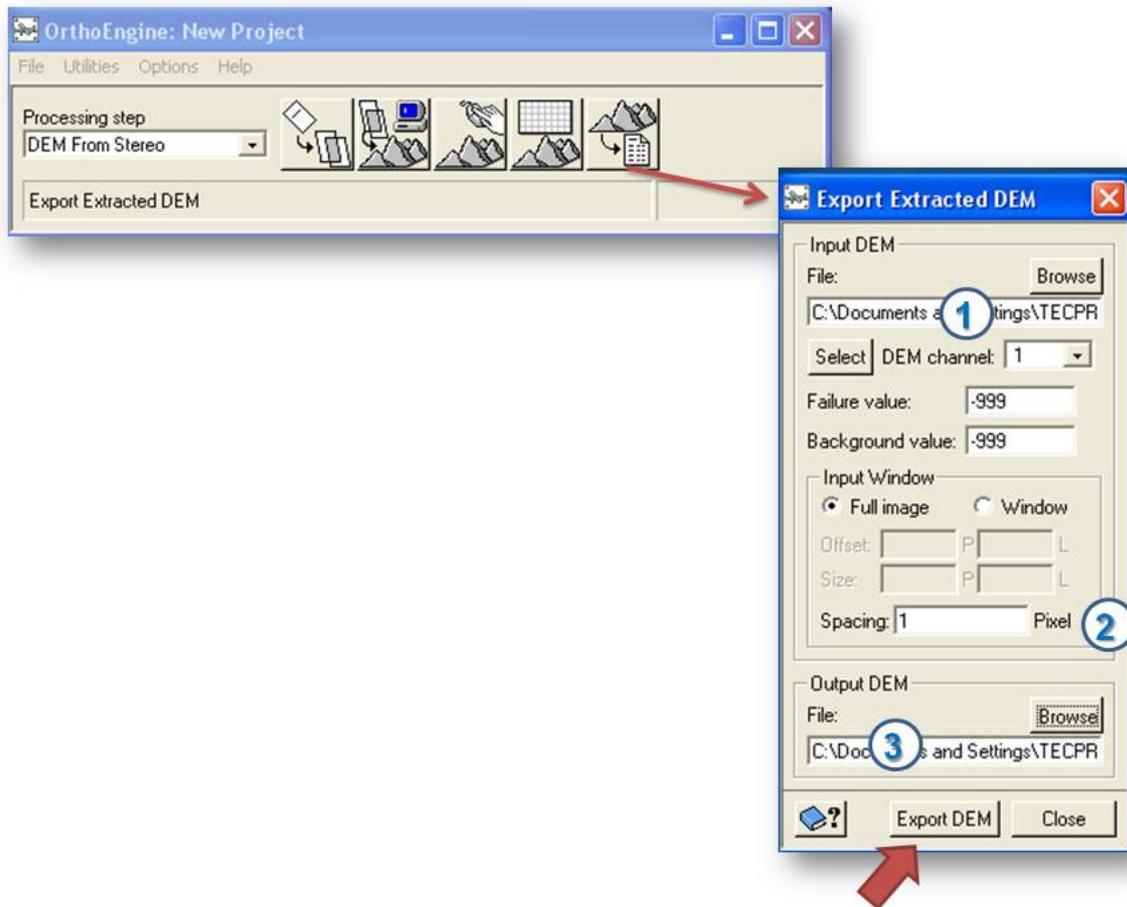


Figura 34. Pasos a seguir para exportar el *DSM*.

2.2.- RAPIDFORM.

RapidForm es el software utilizado para llevar a cabo la comparación entre el *DSM LiDAR* y los diferentes *DSMs* generados a partir de imágenes de satélite *VHR* y así calcular su precisión vertical.

FLUJO DE TRABAJO EN RADIDFORM.

1. Triangulación del *DSM VHR* y *DSM LiDAR*.

Importamos desde el directorio donde se encuentran guardados, el *DSM VHR* y el *DSM LiDAR*. A continuación triangulamos ambos *DSM* mediante la ruta

Build/Triangulate/surface/2D (Fig. 35), mediante la cual selecciono una longitud de arista máxima de 5 metros en cada *DSM*.

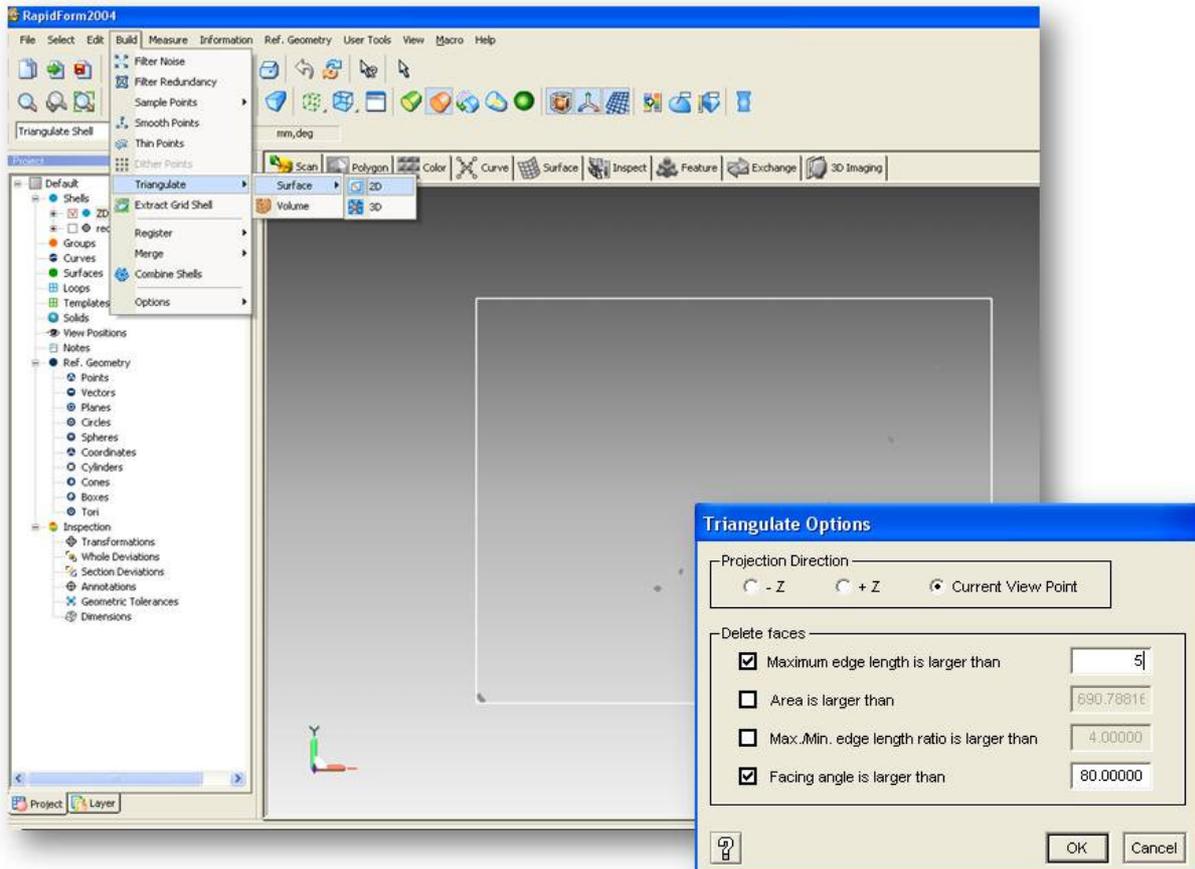


Figura 35. Pasos para triangular los *DSMs*.

2. Comparación del *DSM LiDAR* y el *DSM VHR*.

Comparamos el *DSM LiDAR* con el *DSM VHR* (siempre en este orden) mediante la ruta *Measure/Shell/Shell Deviation*, indicando una tolerancia de 5, como se indica en la Fig. 36. Las estadísticas extraídas de las diferencias de cota las utilizaremos para calcular la precisión vertical de los diferentes *DSMs*

Generación de Modelos Digitales de Elevaciones en zonas agrícolas a partir de imágenes comerciales de satélite de alta resolución

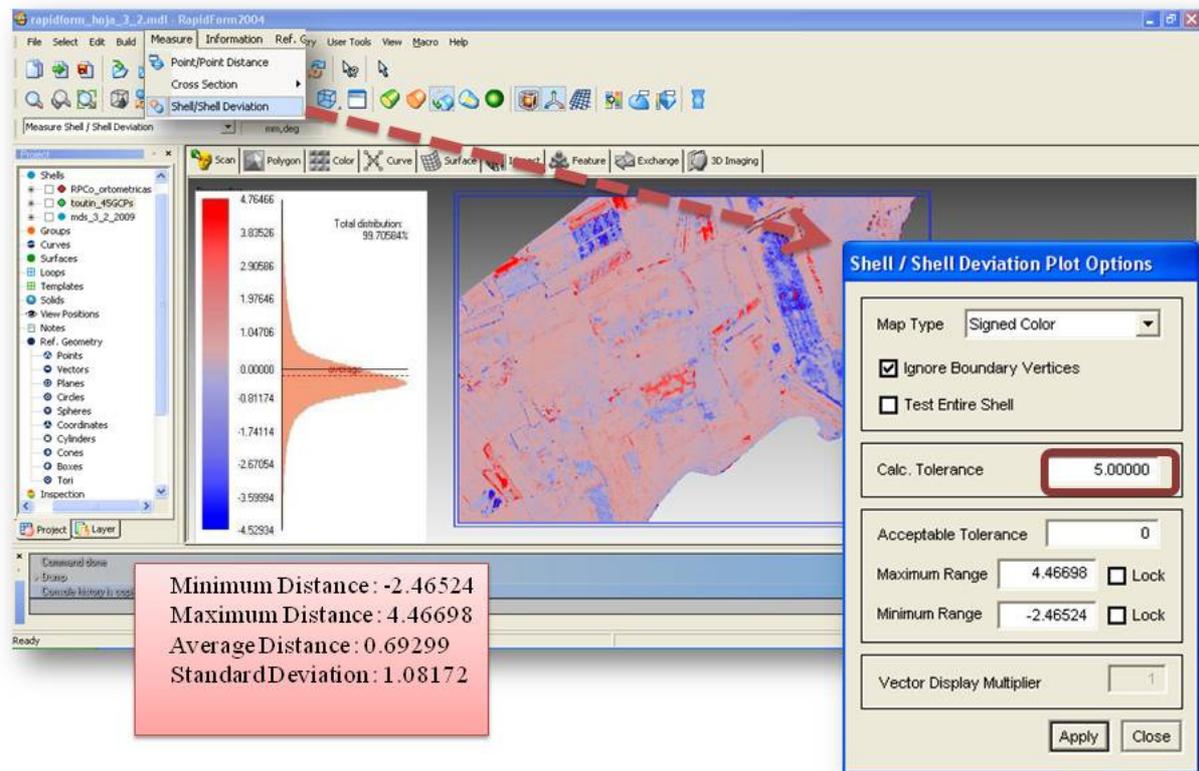


Figura 36. Comparación de *DSM LiDAR* con los *DSM VHR*.