

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

TITULACIÓN DE INGENIERO AGRÓNOMO

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE
MODELOS DIGITALES DE SUPERFICIES SOBRE
INVERNADEROS A PARTIR DE ESTÉREO PARES DEL
SATÉLITE GEOEYE-1**

ALUMNO:

JUAN MANUEL ARJONA LÓPEZ

DIRECTORES:

D. MANUEL ÁNGEL AGUILAR TORRES

D. FERNANDO JOSÉ AGUILAR TORRES

ALMERÍA, FEBRERO 2014

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de investigación se ha podido realizar por la colaboración del Ministerio de Innovación y Ciencia del Gobierno de España y La Unión Europea (Fondos FEDER) dentro del marco del Proyecto de Investigación del Plan Nacional, con referencia CTM2010-16573, con título: “Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes de los satélites GeoEye-1 y WorldWiew-2”.



También se agradece el apoyo aportado por la Junta de Andalucía mediante el Proyecto de Investigación de Excelencia denominado: “Integración y análisis exploratorio de datos geospaciales 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
1.	ABSTRACT	9
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1.	SATÉLITES VHR.....	13
2.1.1.	GeoEye-1	16
2.1.2.	Tipo de imágenes	20
2.2.	MODELOS DIGITALES Y SUS APLICACIONES	23
2.3.	ALGORITMOS DE CORRELACIÓN AUTOMÁTICA	27
2.4.	EXTRACCIÓN AUTOMÁTICA DE DSM A PARTIR DE STEREO PARES DE SATÉLITES VHR.....	29
2.5.	CALIDAD DEL DSM	31
3.	INTERÉS Y OBJETIVOS	33
3.1.	INTERÉS	33
3.2.	OBJETIVOS	33
4.	MATERIAL Y MÉTODOS.....	36
4.1.	ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS DE INICIO.....	36
4.1.1.	Área de Estudio	36
4.1.2.	Datos del Satélite VHR GE1	38
4.1.3.	Datos LiDAR 2009.....	40
4.1.4.	Medición de Puntos de Control	41
4.2.	METODOLOGÍA.....	42
4.2.1.	Orientación de la Imagen	42
4.2.2.	Extracción del DSM	44
4.2.3.	Tipos de DSMs	47
5.	RESULTADOS	50
5.1.	IMAGEN DE TODA LA ZONA DE ESTUDIO.....	50
5.2.	INVERNADEROS.....	54
5.3.	INVERNADEROS TIPO MALLA	58

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

5.4.	INVERNADEROS TIPO PLÁSTICO	62
6.	DISCUSIÓN.....	68
7.	CONCLUSIONES.....	71
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	74
	ANEXO 1. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE TRABAJO	82
1.	HADWARE	82
2.	SOFTWARE	82
2.1.	GEOMATICA v.2013	82
2.2.	RAPIDFORM	96
	ANEXO 2.DATOS COMPLETOS ANALIZADOS.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Satélites VHR existentes en la actualidad.	14
Tabla 2.	Características GE1	18
Tabla 3.	Características de las imágenes <i>PAN</i> de <i>GE1</i> (Productos <i>Geo</i> y <i>GeoStereo</i>) tomadas en la zona de trabajo.....	39
Tabla 4.	Estrategias empleadas en los DSMs extraídos	48
Tabla 5.	Distancia media de imagen de la zona de estudio	100
Tabla 6.	Desviación estándar de la imagen de la zona de estudio.....	100
Tabla 7.	Compleitud de la zona de estudio.....	101
Tabla 8.	Distancia media de los invernaderos de la zona de estudio.....	101
Tabla 9.	Desviación estándar de los invernaderos de la zona de estudio.....	102
Tabla 10.	Compleitud de los invernaderos de la zona de estudio	102
Tabla 11.	Distancia media de los invernaderos tipo malla de la zona de estudio	103
Tabla 12.	Desviación estándar de los invernaderos tipo malla de la zona de estudio	103
Tabla 13.	Compleitud de los invernaderos tipo malla de la zona de estudio.....	104
Tabla 14.	Distancia media de los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio.....	104
Tabla 15.	Desviación estándar de los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio.....	105
Tabla 16.	Compleitud de los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución y superficie de invernaderos en la zona mediterránea	11
Figura 2. Imagen del lanzamiento y del satélite GE1 en órbita.	17
Figura 3. Esquema de adquisición de imágenes de GE1 en sentido directo (A) e inverso (B) ..	19
Figura 4. Bandas espectrales del espectro electromagnético	21
Figura 5. GE1 PAN 0.5 m GSD.....	22
Figura 6. GE1 MS 2 m GSD.....	22
Figura 7. PANSHARPENED 0.5 m GSD	23
Figura 8. Representación del terreno con DEMs.....	24
Figura 9. Representación de un Modelo Digital del Terreno y un Modelo Digital de Superficie	25
Figura 10. Dispositivos que forman un vuelo LiDAR.....	26
Figura 11. Situación y distribución de invernaderos analizados en la zona de estudio.....	37
Figura 12. Esquema de adquisición de un estéreo par de GE1	40
Figura 13. DSM datos LiDAR	41
Figura 14. Distribución de todos los puntos en toda la comarca, incluyendo los 12 GCP (círculos grandes). Las cruces identifican los 69 ICPs	44
Figura 15. Proceso de extracción de DSMs con Geomatica 2012	45
Figura 16. Proceso de extracción de DSMs con Geomatica 2013	46
Figura 17. Distribución de la media de puntos obtenidos para toda la zona de estudio	51
Figura 18. Desviación estándar para toda la zona de estudio	52
Figura 19. Completitud obtenida para toda la zona de estudio	52
Figura 20. Imagen Focus Geomatica puntos DSM usando estrategia 1	53
Figura 21. Imagen RapidForm puntos DSM estrategia 1 PAN 2013.....	54
Figura 22. Media de puntos obtenidos para todos los invernaderos de la zona (malla y plástico)	55
Figura 23. Distribución de los datos de desviación estándar para todos los invernaderos de la zona (malla y plástico).....	55
Figura 24. Representación de forma estadística de la completitud obtenida para todos los invernaderos de la zona (malla y plástico)	56
Figura 25. DSM de los invernaderos malla y plástico representados en Focus (Geomatica). Estrategia 1, todas las bandas (ALL 2013).	57

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Figura 26. Invernaderos RapidForm puntos DSM estrategia 1 ALL 2013.....	58
Figura 27. Distribución mediante datos estadísticos de la media de puntos obtenidos para los invernaderos tipo malla de la zona de estudio.....	58
Figura 28. Representación de los datos de desviación estándar para los invernaderos tipo malla de la zona de estudio.....	59
Figura 29. Representación de la completitud obtenida para los invernaderos tipo malla de la zona de estudio.....	60
Figura 30. Invernaderos malla Focus Geomatica puntos DSM estrategia 1 ALL 2013.....	61
Figura 31. Invernaderos malla RapidForm puntos DSM estrategia 1 ALL 2013.....	62
Figura 32. Representación de la media de puntos obtenidos para los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio.....	62
Figura 33. Datos de desviación estándar para los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio.....	63
Figura 34. Representación de la completitud obtenida para los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio.....	64
Figura 35. Invernaderos plástico Focus Geomatica puntos DSM estrategia 12 GREEN 2013..	65
Figura 36. Invernaderos plástico RapidForm puntos DSM estrategia 12 GREEN 2013.....	66
Figura 37. Pasos para abrir un nuevo proyecto en OrthoEngine.....	84
Figura 38. Pasos para insertar datos de localización.....	85
Figura 39. Introducción de las imágenes para la generación de Epipolares.....	86
Figura 40. Pasos para introducir Puntos de Control en cada una de las imágenes que forman las Epipolares.....	87
Figura 41. Cálculo y corrección de errores producidos por los puntos.....	88
Figura 42. Proceso de generación de Epipolares a partir de OrthoEngine.....	88
Figura 43. Generación de <i>Clip región</i>	89
Figura 44. Generación de DSM a partir de OrthoEngine.....	90
Figura 45. Creación de imágenes pansharpened a partir de OrthoEngine.....	91
Figura 47. Abrir en Focus un DSM.....	93
Figura 48. Recorte del DSM a partir de Focus para invernaderos de la zona.....	95
Figura 49. Exportar datos DSM a txt con OrthoEngine.....	96
Figura 50. Triangulación DSM LiDAR y DSM VHR.....	97
Figura 51. Comparación DSM LiDAR y DSM VHR.....	98

CAPÍTULO 1.

RESUMEN

1. RESUMEN

La nueva generación de satélites ópticos comerciales de muy alta resolución (*very high resolution, VHR*) tales como GeoEye-1 y WorldView-2, abre paso a nuevas posibilidades en actuaciones cartográficas y de teledetección. Este trabajo de investigación en concreto se centra en la generación Modelos Digitales de Superficie (*Digital Surface Model, DSM*) en zonas agrícolas invernadas a partir de estéreo pares de imágenes de satélite VHR. Para llevar a cabo este proyecto se emplean estéreo imágenes pancromáticas (PAN) y multiespectrales (MS) obtenidas a partir del satélite GeoEye-1 (GE1). GE1 es actualmente el satélite VHR que presenta la mayor resolución geométrica tanto en PAN (0.41 m) como en MS (1.65 m). A partir de las imágenes PAN y MS, se obtienen imágenes fusionadas (pansharpened) con la resolución geométrica de la imagen PAN y la resolución espectral de la MS.

El objetivo fundamental de este Trabajo de Investigación es la optimización de la precisión y calidad que se pueden alcanzar, en condiciones de trabajo operacionales, en el proceso de extracción automática de DSMs a partir de estéreo pares del satélite GE1, sobre una zona agrícola que cuenta con invernaderos de tipo malla y plástico. Los distintos DSMs a testar son generados sobre la zona de estudio mediante el módulo fotogramétrico del software Geomatica, denominado OrthoEngine. Las variables sometidas a estudio para la optimización de la calidad de los DSMs extraídos sobre cubiertas de invernaderos han sido: (i) versión de OrthoEngine empleada (2012 ó 2013), (ii) selección de parámetros del módulo de extracción automática de DSMs en el caso de OrthoEngine 2013, como filtro de Wallis, o tipo de terreno (OrthoEngine 2012 carece de dichos parámetros), y (iii) analizar la influencia en la calidad del DSM obtenido del uso de las diferentes bandas proporcionadas por GE1 en su imagen PAN y fusionada (i.e., PAN, Red, Blue, Green, Nir y todas las bandas de la imagen fusionada) para la extracción por correlación automática.

La evaluación de la calidad de los DSMs extraídos a partir de imágenes de satélite, se realiza por comparación con datos LiDAR (*Light Detection And Ranging*) de mayor precisión, generados sobre la zona de estudio que son considerados como referencia o verdad terreno (*Ground Truth*). Para la estimación de la calidad de los DSMs, se han tenido en cuenta tanto la precisión vertical como la cobertura de datos sobre el terreno (i.e., la completitud).

Por lo general la calidad de los DSMs extraídos mediante las diferentes estrategias y bandas empleadas en Geomatica 2013 no mejoraron los resultados reportados por la banda PAN de la versión de OrthoEngine incluida en Geomatica 2012. Sólo, en invernaderos tipo plástico, algunas de las estrategias usadas en Geomatica 2013 con la banda GREEN consiguieron mejorar considerablemente los resultados reportados por la versión 2012, tanto para la precisión vertical como para la completitud. Sin embargo, estos resultados no se mantuvieron para invernaderos tipo malla, ni para la totalidad de la zona de estudio.

1. ABSTRACT

The new generation of optical and commercial very high resolution (VHR) satellite imagery such as GeoEye-1 and WorldView-2, opens new possibilities in of mapping and remote sensing fields. This research work is based in the generation of Digital Surface Models (DSM) over agricultural zones presenting greenhouses, by using stereo pairs of VHR satellite imagery. Panchromatic (PAN) stereo images and multispectral (MS) ones from GeoEye-1 (GE1) satellite are used to carry out this project. Currently, GE1 is the VHR satellite presenting the best geometric resolution in both PAN (0.41 m) and MS (1.65 m) mode. It is noted that a new pansharpened image can be generated by fusing the PAN and MS images. The pansharpened image has the same geometric resolution of PAN image and the spectral resolution of MS one.

The main objective of this research work is the optimization of both accuracy and quality that can be attain, in operational conditions, in the automatic extraction of DSMs from stereo pairs of GE1, over an agricultural area with greenhouses covered by mesh or plastic film. The different DSMs to be tested are generated over the study area through the photogrammetric module of Geomatica software, named OrthoEngine. The studied variables for the quality optimizations of DSMs extracted over a greenhouse area have been: (i) OrthoEngine version used (2012 or 2013), (ii) parameters setting of automatic extraction module of DSMs in the case of OrthoEngine 2013, such as Wallis filter, or terrain type (OrthoEngine 2012 doesn't have these parameters), and (iii) to analyze the influence in the DSM quality related to the use from the different bands included in GE1 PAN and pansharpened images (i.e., PAN, Red, Blue, Green, Nir and considering all the bands together) in DSMs extraction by using automatic image matching.

The quality assessment of DSMs extracted from satellite imagery are carried out by direct comparison with more accurate LiDAR (Light Detection And Ranging) elevation data which were generated on the study area and are considered as the ground truth. Both the vertical accuracy and the completeness (i.e. the data coverage on the terrain) have been taken in account for the DSMs quality assessment.

Overall, the quality assessment of DSMs extracted through the different strategies and bands used in Geomatica 2013 did not improve the results reported by the OrtoEngine version included in Geomatica 2012 using the PAN band. Only in plastic greenhouses some of these strategies tested in Geomatica 2013 with the GREEN band significantly improved the results achieved by 2012 version, for both vertical accuracy and completeness. However, these results were not maintained nor for mesh greenhouses neither for the whole study area.

CAPÍTULO 2.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En la actualidad la superficie invernada en el mundo se distribuye principalmente en dos zonas geográficas: (i) el Extremo Oriente, en países como China, Japón y Corea en los cuales se concentra el 80% de la superficie con invernaderos del mundo, y (ii) la cuenca mediterránea con un 15% de esta superficie. El 5% restante se concentra en países de América central y en países del sur de África.

En concreto, se está produciendo un crecimiento lento de la superficie bajo plástico en países europeos que pertenecen a la zona mediterránea, mientras que en países mediterráneos de África y Oriente Medio hay un crecimiento bastante más rápido, en torno a un 15-20% anual.

El área mediterránea presenta unas 400,000 ha de superficie invernada, siendo España el país de referencia debido al rápido desarrollo de los invernaderos en los últimos 50 años, situándose con una superficie superior a 53,000 ha (Magrama, 2008). Este elevado crecimiento se ha frenado un poco en los últimos años. En cuanto a superficie invernada y después de España, se encuentran otros países de la cuenca mediterránea como Italia, Turquía y Marruecos (Fig. 1).



Figura 1. Distribución y superficie de invernaderos en la zona mediterránea

Los dos últimos países mencionados son economías en crecimiento y nuevos mercados en cuanto a agricultura bajo invernadero. Concretamente, Marruecos

contaba con una superficie de 10,000 ha en 1999 (FAO, 2002) y pasó a tener más de 17,000 ha en 2006 (Torrens, 2006).

El tomate es el principal producto que se exporta desde Marruecos a la Unión Europea (UE). La presencia de tomate de Marruecos en el mercado comunitario ha aumentado constantemente en los últimos años. Esto es debido a la firma en 2009 de un convenio agrícola para la concesión de la importación de frutas y hortalizas a la UE. Esta firma fue muy criticada por agricultores de España, principalmente de Andalucía, Canarias, Murcia o Valencia.

Además Marruecos exporta a la UE otros productos como fresas, calabacines, pepinos, ajos y clementinas. Turquía es otro de los países que realiza grandes exportaciones de hortalizas a la UE, principalmente a países centroeuropeos como Austria, Bélgica, Alemania y Reino Unido.

Es importante tener en cuenta que el Acuerdo Agrícola UE-Marruecos marca cuotas máximas de importación libre para algunos productos especialmente sensibles que entran en competencia directa con productos europeos como son tomates, pepinos, fresas, mandarinas, ajos, calabacín y azúcar. De estos productos, tomates, pepinos y calabacín son usualmente cultivados en invernaderos. A esto hay que añadir que, desde la perspectiva de los productores españoles, existe un mal funcionamiento de los controles en frontera que están afectando de manera importante a la competitividad de los productos hortícolas producidos en España, especialmente el tomate. De hecho, existen sospechas de fraude por parte de los productores marroquíes en el sistema de cuotas y de precios de entrada, por lo que se están exigiendo a la Comisión Europea mejores sistemas de control que eviten este tipo de actuaciones fraudulentas.

Debido a estas sospechas de fraude en la entrada de productos hortícolas desde Marruecos a la UE, existe la necesidad de conocer la superficie invernada en estos países. Con esta superficie de invernaderos se podría realizar una estimación de la producción de cultivos hortícolas. Estas estimaciones de superficie invernada se han realizado tradicionalmente mediante la generación de mapas de invernaderos a través de imágenes de sensores remotos y trabajando de forma manual. Por ello, resultan trabajos lentos que necesitan técnicos especializados, lo que hace que estas tareas sean caras económicamente. Por ese motivo existe la necesidad de implantar algún método de detección y clasificación automática de invernaderos que se pueda llevar a cabo a partir de imágenes de satélites de muy alta resolución (*very high resolution*,

VHR). Para este tipo de clasificación automática de invernaderos se ha comprobado que el poder contar con datos altimétricos en forma de Modelo Digital de Superficies (*Digital Surface Model*, DSM) mejora enormemente las precisiones obtenidas usando únicamente información espectral de las imágenes de satélite (Vicente, 2011; Montalbán, 2013). Dado que esa información altimétrica puede ser generada a partir de estéreo pares de imágenes de satélites VHR (Palenzuela, 2013; Aguilar et al., 2014), en este trabajo de investigación se pretende optimizar la estrategia de extracción automática de DSMs a partir de estéreo pares de imágenes de satélites VHR (concretamente del satélite GeoEye-1, en adelante GE1) en zonas agrícolas que presentan parcelas con cubiertas elevadas correspondientes a superficies invernadas.

2.1. SATÉLITES VHR

En 1972 se lanzó el primer satélite de la serie ERST (*Earth Resource Technology Satellite*) como su nombre indica, para el estudio de los recursos naturales. Con un segundo lanzamiento, el programa pasó a denominarse LANDSAT, con alto rendimiento en cuanto a exploración se refiere. Este satélite marca el inicio de la exploración de la superficie terrestre mediante imágenes de satélite, aunque faltaba mucho para llegar a la situación actual.

Tras esta serie de satélites (ERST y LANDSAT), aparece la familia SPOT, que lanzó dos satélites, uno en 1986 y otro en 1990 incluyendo varias estaciones terrestres para la recepción de datos. Se diferencian principalmente de la familia LANDSAT en su capacidad de giro lateral, que aumenta su resolución temporal, por lo que puede observarse cualquier punto de la superficie terrestre con una periodicidad de entre uno y varios días. Esto provoca que se generen pares estereoscópicos de la zona observada, y la posibilidad de generación de modelos digitales de elevaciones (*Digital Elevation Models*, DEMs) o DSMs.

El empleo en la fotogrametría digital de imágenes de satélite en la década de los 90 fue una auténtica revolución en la generación de información espacial, tanto topográfica como temática, y su inclusión en Sistemas de Información Geográfica (GIS).

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Casi 10 años después, la irrupción de los nuevos satélites *Very High Resolution* (VHR) supuso una nueva revolución. Croft (2008) empieza su artículo dedicado a GE1 haciendo mención a una publicación del magazine estadounidense *Ladies Home Journal* del año 1900, en el cual se hacían predicciones para el próximo siglo. Una de ellas 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”. Esta predicción de hace un siglo se ha cumplido con la llegada de los primeros satélites ópticos VHR (i.e, IKONOS y QuickBird lanzados en 1999 y 2001 respectivamente), y casi en el tiempo pronosticado.

En la actualidad se encuentran orbitando la tierra y obteniendo imágenes de su superficie doce satélites comerciales VHR. Estos satélites VHR tienen la característica de tener una gran resolución geométrica con un tamaño de píxel en la banda Pancromática (PAN) de 1 m e incluso inferior, así como una alta resolución radiométrica (Tabla 1).

Tabla 1. Satélites VHR existentes en la actualidad.

Satélite	País	Lanzamiento	Resolución PAN (m)	Resolución MS (m)	Tamaño Escena (km)
IKONOS	US	24/09/1999	1.0	4	11
QuickBird	US	18/10/2001	0.61	2.44	16
EROS B1	Israel	25/04/2006	0.7		7
Resurs DK-1	Rusia	15/06/2006	1.0	3	28
KOMPSAT-2	Corea	28/07/2006	1.0	4	15
IRS Cartosat 2	India	10/01/2007	0.8		10
WorldView-1	US	18/09/2007	0.5		16
GeoEye-1	US	09/06/2008	0.41*	1.65*	15
WorldView-2	US	10/08/2009	0.46*	1.84*	16
Pleidades-1	Francia	16/12/2011	0.7	2.8	20
Pleidades-2	Francia	02/12/2012	0.7	2.8	20
KOMSAT-3	Corea	02/12/2012	0.7	3.2	20
WorldView-3	US	Previsto 2014	0.31*	1.24*	16

*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.

En Septiembre de 1999 comenzó una nueva era en el campo de la teledetección dentro de los satélites VHR, con el lanzamiento de IKONOS, perteneciente a la compañía SpacelImage (absorbida después por GeoEye, USA). IKONOS fue el primero de este nuevo tipo de satélites comerciales. IKONOS capta imágenes terrestres en modo PAN, con 0.82 m *Ground Sample Distance* (GSD) (remuestreadas a 1 m) de tamaño de píxel, y en modo Multiespectral (MS), con un tamaño de píxel de 3.28 m GSD (remuestreado a 4 m) y cuatro bandas (Red, Green, Blue y NIR). En el año 2001 se lanzó el satélite QuickBird, de DigitalGlobe (USA), con una resolución en el nadir de 0.61 m GSD en PAN y 2.44 m en MS (Red, Green, Blue y NIR) lo cual le otorgaba ser el satélite comercial con la mayor resolución espacial en ese momento. A partir de las imágenes captadas por estos satélites ópticos VHR se puede obtener información cartográfica precisa, como ortoimágenes (Kay et al., 2003; Davis y Wang, 2003; Aguilar et al., 2007; Aguilar et al., 2008) y DSMs (Toutin, 2004a; Poon et al., 2007; Eckert y Hollands, 2010; Deilami y Hashim, 2011; Capaldo et al., 2012).

Desde el lanzamiento de estos dos primeros satélites VHR, IKONOS y QuickBird, los investigadores los han considerado como posibles sustitutos de las clásicas imágenes aéreas para la obtención de cartografía a grandes escalas (Fraser, 2002; Fraser et al., 2002a; Kay et al., 2003; Chmiel et al., 2004; Pecci et al., 2004; Aguilar et al., 2006; Aguilar et al., 2007). Además estos dos satélites tienen la posibilidad de generar ortoimágenes de forma rápida y precisa, capaces de competir en resolución y calidad con las obtenidas a partir de vuelos aéreos convencionales, por ejemplo, la cartografía en blanco y negro de la Junta de Andalucía de 2002 (Aguilar et al., 2008).

También las imágenes de satélites VHR han sido utilizadas para numerosas aplicaciones como son: (i) la detección de edificios (Fraser et al., 2002b; Weber y Ranchin, 2003; Lee et al., 2003; Kim et al., 2006; Mayunga et al., 2007; Gamba et al., 2007), (ii) mapeado automático de carreteras (Yan y Zhao, 2003; Jin y Davis, 2005), (iii) clasificación de vegetación (Nichol y Lee, 2005; Castillejo-González et al., 2009; Martínez-Casasnovas et al., 2009), (iv) detección de invernaderos (Agüera et al., 2006; Agüera et al., 2008), e incluso (v) localización de daños ocasionados por desastres naturales (Al-Khudhairi et al., 2005).

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

A partir del 4 de enero de 2010 comenzaron a comercializarse imágenes de WorldView-2 de DigitalGlobe, Inc. Este satélite tienen un GSD de 0.46 m en PAN y 1.65 m en MS. Además es el primer satélite comercial VHR que puede capturar imágenes MS con ocho bandas (cuatro bandas más que los anteriores satélites VHR comerciales). Estas bandas son: Coastal Blue, Blue, Green, Yellow, Red, Red-Edge, NIR-1 y NIR-2. Su alta resolución espacial lo capacita para detectar detalles pequeños y la alta resolución espectral de la que dispone, añade información detallada sobre la calidad de superficies asfaltadas, profundidad del mar o incluso información sobre el estado de salud de un cultivo.

Las dos compañías más importantes en la comercialización de imágenes de satélite VHR, DigitalGlobe y GeoEye, alcanzaron un acuerdo de fusión el verano de 2012, y actualmente componen la nueva y ampliada DigitalGlobe. La empresa GeoEye tenía previsto el lanzamiento de GeoEye-2 en 2014, pero tras la fusión se paralizó este proyecto. Actualmente la nueva DigitalGlobe tiene previsto lanzar WorldView-3, el cual tendrá una resolución en PAN y MS impensable hace tan sólo una década. Contará también con 8 bandas espectrales como su antecesor (WorldView-2) con 1.24 m de GSD en el nadir, y otras 8 nuevas bandas en el infrarrojo de onda corta (*Short Wave Infrared, SWIR*) que va desde los 1400 nm a los 3000 nm. Estas nuevas bandas en el infrarrojo de onda corta en WorldView-3 tendrán una resolución de 3.7m GSD y le permitirá trabajar en condiciones adversas (niebla, humos, polvo en suspensión,...).

También como en el caso anterior para el año 2014 está previsto el lanzamiento de Ingenio que será el primer satélite comercial español perteneciente a Astrium España. Generará imágenes en PAN y MS, con una resolución de 2.5 m y 10 m respectivamente. Trabaja en una órbita sincrónica con el sol y prestará servicio en el ámbito civil, para cartografía, seguimiento de cambios en el terreno, fronteras, planificación urbana, agricultura, gestión de las aguas, seguimiento del medio ambiente y gestión de riesgos y seguridad.

2.1.1. GeoEye-1

El 6 de septiembre de 2008 se lanzó el satélite estadounidense VHR denominado GeoEye-1 (GE1) de GeoEye, Inc (actualmente perteneciente a DigitalGlobe). El principal inversor y cliente para este satélite es *National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)* de los Estados Unidos, mientras que el segundo inversor y más

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

conocido cliente es Google, que tiene acceso a las imágenes con las que actualiza su famoso visor cartográfico Google-Earth. El satélite tiene su órbita a 681 km de altura (Fig. 2).



Figura 2. Imagen del lanzamiento y del satélite GE1 en órbita.

En la actualidad GE1 es el satélite comercial con la mayor resolución geométrica, tanto en la imagen PAN como en MS con un tamaño de píxel de 0.41 m de GSD en PAN y de 1.65 de GSD en MS en la posición más nadiral. Aunque el gobierno de Estados Unidos pone unas limitaciones, ya que no permite la comercialización de las imágenes de satélite con una resolución superior a 0.50 m GSD en PAN y 2 m en MS.

El sensor de este satélite tiene la capacidad de adquirir 350,000 km² de imágenes MS diarias. La agilidad de captar imágenes le permite registrar en una sola pasada una superficie contigua de 300 km por 50 km, a pesar de que el ancho de barrido es de 15,2 km en la vertical. El ángulo de visión lateral del sensor puede alcanzar hasta 30 grados. Este satélite realiza 15 órbitas al día a una altitud de 681 km con una velocidad de órbita de unos 7.5 km/s o 27,200 km/h.

GE1 tiene la posibilidad de captar imágenes con un rango dinámico de 11 bits y con un tamaño de píxel, como máximo, de 0.41 m en PAN (con un rango espectral desde 450 hasta 800 nm) y 1.65 m en MS, compuesta por las cuatro bandas espectrales: Blue (450 hasta 510 nm), Green (510 hasta 580 nm), Red (655 hasta 690

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

nm) y NIR (780 hasta 920 nm). Estas cuatro bandas son las que suelen presentar la mayoría de los satélites VHR. Las características técnicas de GE1 se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características GE1

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	
Presentación	CE90% geo: 5 m	CE90% geo: 15 m
	CE90% geoProfesional: 10 m	CE90% geoProfesional: 10 m
Ancho de barrido (Swath Width)	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 estéreos	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	

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Este satélite puede realizar la toma de imágenes en sentido de escaneo directo e inverso (Fig 3). Cuando las imágenes son adquiridas en sentido directo, el satélite escanea la superficie terrestre en la misma dirección de la órbita seguida por el satélite, pero cuando trabaja capturando imágenes en sentido inverso, captura las imágenes de la superficie que ha sobrevolado. Esta posibilidad le permite obtener una mayor cantidad de imágenes en la misma pasada.

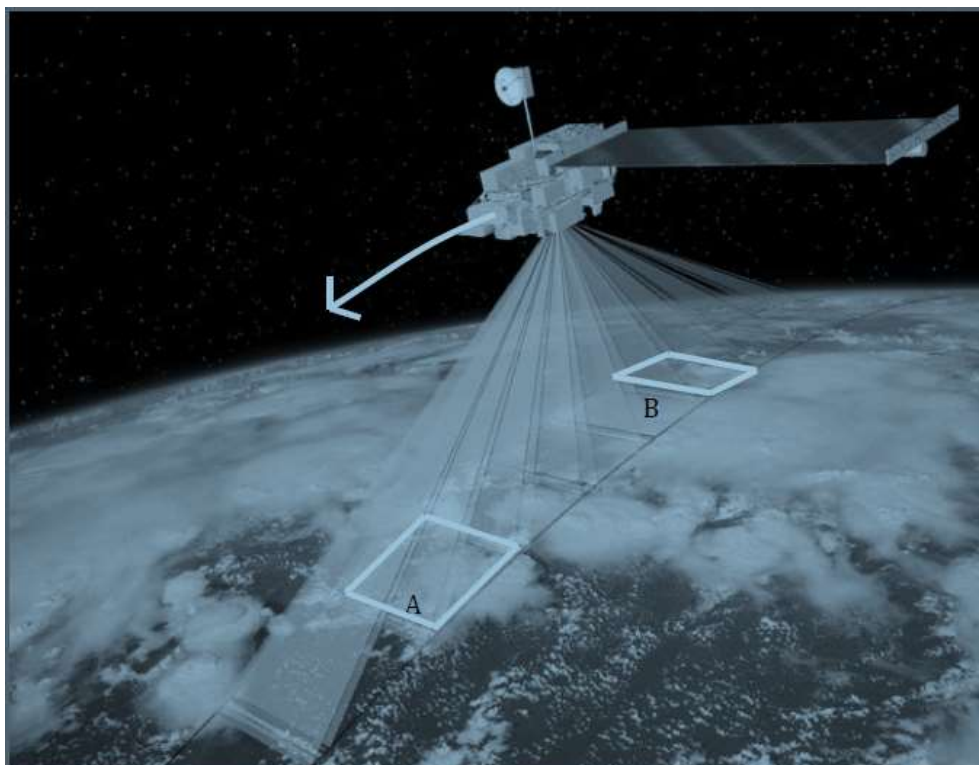


Figura 3. Esquema de adquisición de imágenes de GE1 en sentido directo (A) e inverso (B)

Las imágenes del satélite GE1 se ofertan en diferentes formatos:

- a) Geo: Son el formato de imagen de GE1 con el menor nivel de procesamiento, tanto radiométrico como geométrico. Están proyectadas sobre un sistema cartográfico mediante el uso de un DEM de altura constante. Son las imágenes que un operador con capacidades fotogramétricas debería usar para generar productos georreferenciados de la máxima calidad. El precio de una imagen PAN+MS de este producto es de 25 dólares por km².

- b) GeoProfessional y GeoProfessional Precision: Son productos ortorrectificados con dos niveles diferentes de precisión. Los precios de mercado están en torno a los 35 y los 40 dólares por km².
- c) GeoStereo: Producto que se compone de dos imágenes con estéreo geometría, indicado para la obtención de DSMs y DEMs. Su precio ronda los 40 dólares por km².

2.1.2. Tipo de imágenes

La mayoría de los satélites VHR tienen la capacidad de obtener imágenes tanto en PAN como en MS. En MS generalmente captan cuatro bandas (Red, Green, Blue y Nir), aunque WorldView-2 es capaz de captar hasta ocho bandas en ese modo:

- a) PAN: el sensor es visible a todas las longitudes de ondas del espectro visible y del infrarrojo cercano, siendo el producto final una imagen en tonos grises.
- b) MS: el sensor es capaz de distinguir diferentes bandas espectrales en el espectro visible y en el infrarrojo cercano, originándose una imagen individual para cada intervalo de longitudes de onda.

La resolución espectral de un sensor viene determinada por el número y la anchura de bandas que puede captar dicho sensor (Fig. 4).

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

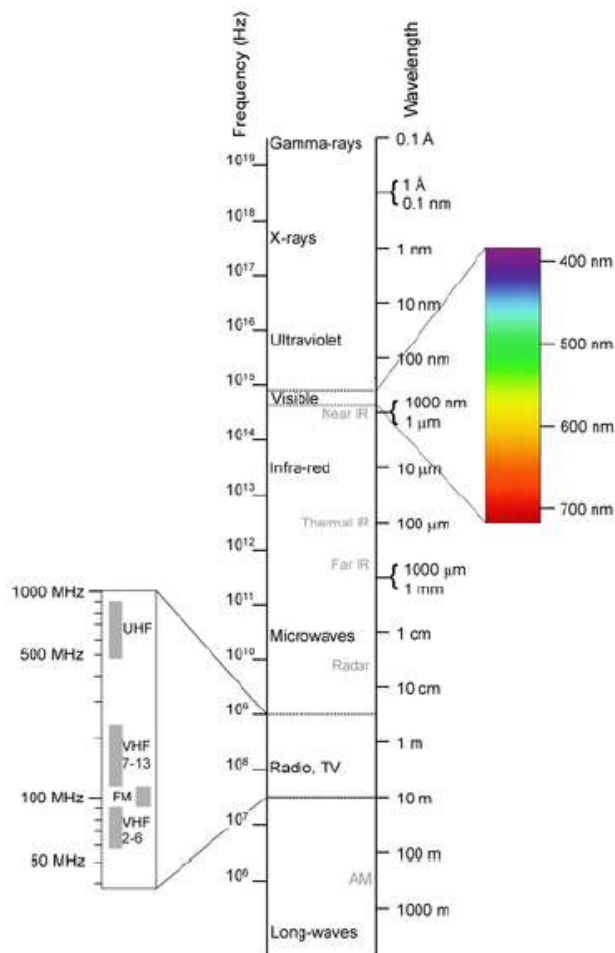


Figura 4. Bandas espectrales del espectro electromagnético

Las imágenes de GE1 son comercializadas remuestreadas a 0.5 m en PAN y 2 m en MS, debido a un requisito impuesto por el Gobierno de los EE.UU. En la actualidad, GE1 es uno de los satélites comerciales VHR más innovadores. Los primeros resultados de estudios realizados con precisiones verticales a partir de estéreo pares de imágenes PAN de GE1 y WorldView-2 fueron superiores a los obtenidos hasta ahora utilizando imágenes de otros satélites comerciales VHR como IKONOS o QuickBird. Fraser y Ravankhsh (2009) y Mitchell y MacNabb (2010) consiguieron una precisión vertical de 0.25 m trabajando con estéreo pares de GE1. También Wang y Zhao (2011) obtuvieron 0.44 m y Meguro y Fraser (2010) de 0.7 m con GE1. Por otro lado, Mitchell y MacNabb (2010), trabajando con estéreo pares de WorldView-2, obtuvieron una precisión vertical de 0.31 m. Además Hobi y Ginzler (2012) en una zona de trabajo con una cubierta de terreno vegetal lograron 1.2 m. La precisión vertical de un DSM depende de la precisión de los datos muestreados, la densidad y la distribución de los datos de origen, de la rugosidad de la superficie

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

(Aguilar et al., 2005; Li, 1992) y también de la cubierta del terreno (Poon et al., 2005; Toutin, 2006; Hobi y Ginzler, 2012).

La banda MS siempre tiene menor resolución geométrica que la PAN, por lo que existe la interesante posibilidad en satélites VHR, y en concreto GE1, de fusionar la gran resolución geométrica de la banda PAN (0.5 m GSD) con la riqueza espectral de las bandas MS (2 m GSD). De hecho el software Geomatica 2013 incluye un algoritmo de fusión muy usado por la comunidad científica (módulo PANSHAP) para generar imágenes con la resolución geométrica de las imágenes PAN, pero conteniendo la resolución espectral de la imagen MS. Mediante este algoritmo se llega a obtener un producto fusionado o pansharpened con 0.5 m GSD y que tiene la misma información espectral de la banda MS (Fig. 5, 6 y 7).

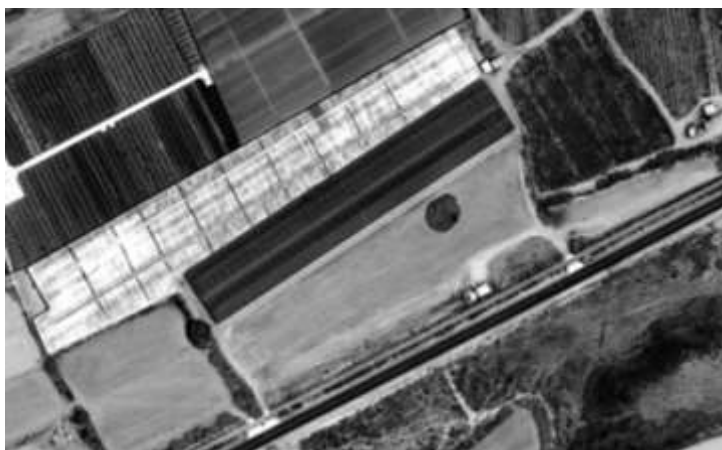


Figura 5. GE1 PAN 0.5 m GSD



Figura 6. GE1 MS 2 m GSD



Figura 7. PANSHARPENED 0.5 m GSD

2.2. MODELOS DIGITALES Y SUS APLICACIONES

Los Modelos Digitales ofrecen una amplia información para poder extraer elementos en una zona determinada.

El Modelo Digital del Terreno (*Digital Terrain Model*, DTM) forma una representación numérica de datos que ofrecen una distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Una vez que la variable a representar son las cotas o elevaciones del terreno, el DTM pasa a denominarse DEM.

Los DTMs o DEMs deben cumplir dos condicionantes más: a) la primera es que debe existir una estructura interna de los datos que represente las relaciones espaciales entre los mismos y, b) que la variable representada debe ser 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. 8).

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

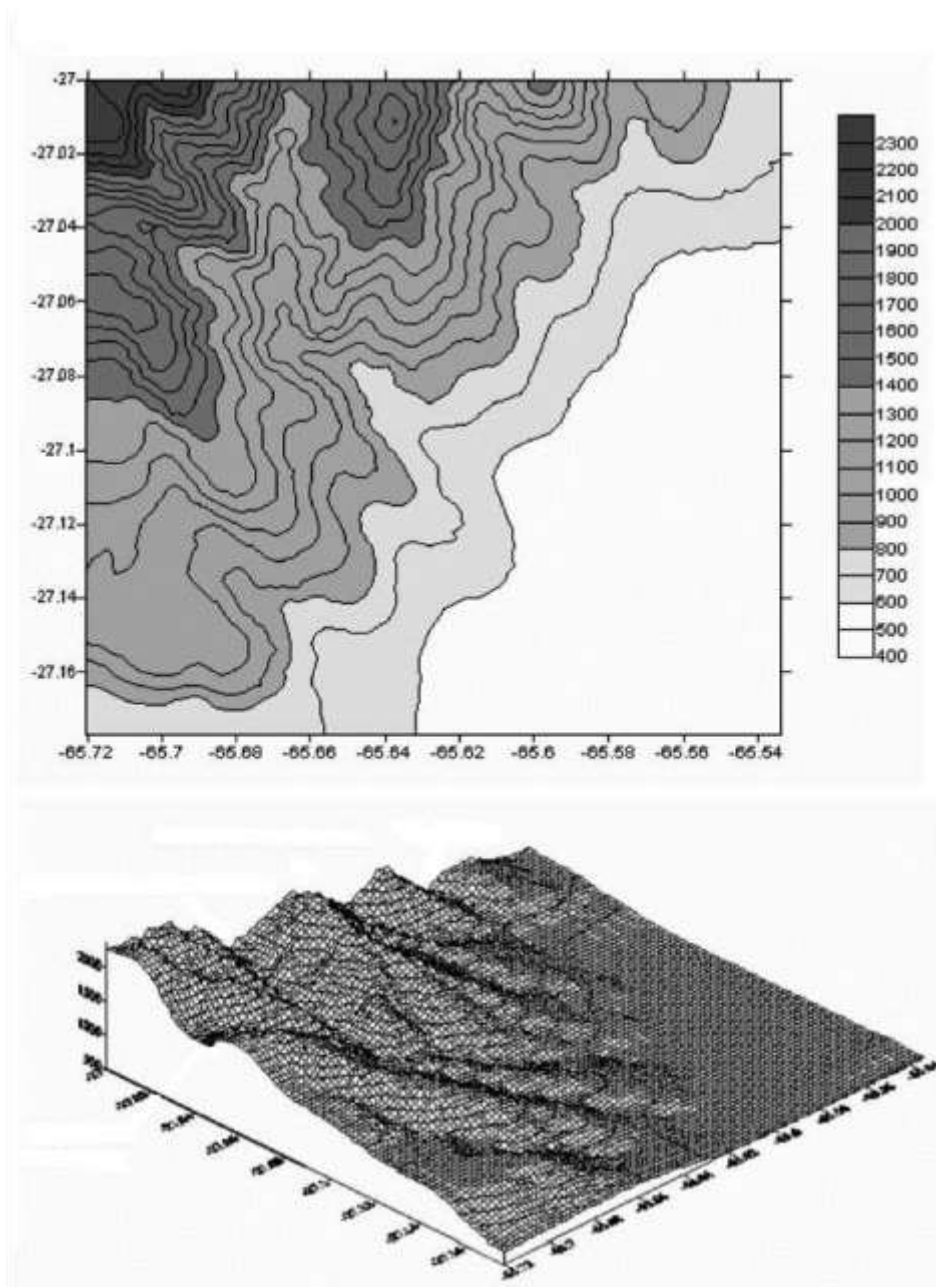


Figura 8. Representación del terreno con DEMs

Se considera que la elevación que se representa en un DEM es la elevación de la superficie del terreno, por lo que no se tiene en cuenta estructuras como edificios u otros elementos como árboles. Una vez que se incluyen estos elementos, se comienza a hablar de DSM.

Se puede observar en la Fig. 9 la diferencia entre un DEM del terreno y un DSM. En el caso del DSM se tiene en cuenta el denominado micro-relieve (vegetación, edificios, etc.) que se asienta sobre el terreno desnudo. Por tanto la diferencia entre un

DSM y el DEM del suelo desnudo de la zona proporciona lo que se denomina un Modelo Digital de altura de Objetos.

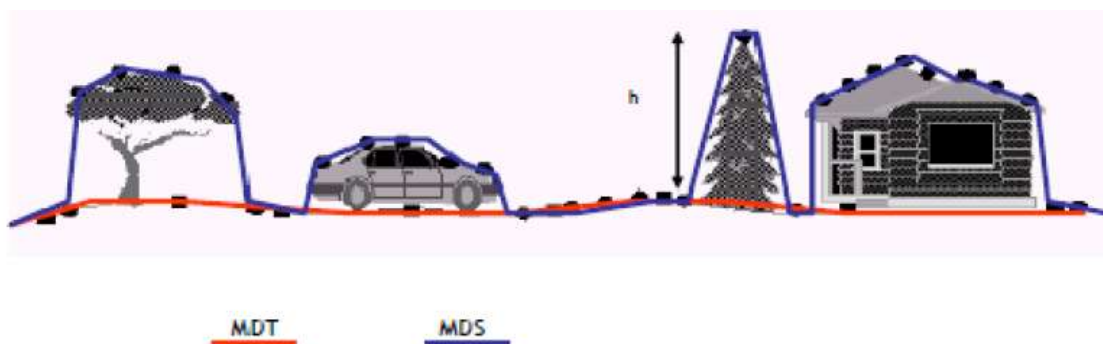


Figura 9. Representación de un Modelo Digital del Terreno y un Modelo Digital de Superficie

Cada vez más la tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*) se está imponiendo para la captura de datos altimétricos o DEMs, constituyendo uno de los nuevos métodos de captura de datos de elevación, que incluye todos los elementos superficiales, sin aislar el terreno del resto de estructuras (Cuartero, 2003). Los DEMs también pueden ser obtenidos a partir de vuelos fotogramétricos.

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). Por medio de relojes con una precisión alta, se determina el tiempo que tarda cada pulso en volver al emisor y por tanto la distancia al objeto reflector.

La tecnología LiDAR es un método empleado alternativamente a los métodos de medida indirecta a partir de fotografías aéreas (fotogrametría) o medida directa en campo a través de sistemas GPS, para obtener de forma automática DSMs, que respondan a las necesidades del sector de la teledetección de búsqueda y desarrollo de nuevos procesos de adquisición de datos que puedan llevarse a cabo tareas propias del sector de formas cada vez más eficientes y que den cabida a un mayor número de aplicaciones.

En la Fig. 10 se pueden observar los parámetros de orientación externa del sensor que son obtenidos en cada momento mediante el post-proceso de los datos aportados por dos subsistemas complementarios: a) GPS diferencial cinemático de precisión en torno a 10 cm, que está formado por un GPS montado en el avión y una o varias estaciones de referencia en tierra para transmitir correcciones diferenciales (posición X, Y, Z del sensor respecto al sistema de referencia WGS84), y b) Sistema

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

IMU (*Inertial Measurement Unit*) para obtener datos de los ángulos de orientación ω , ϕ , κ .

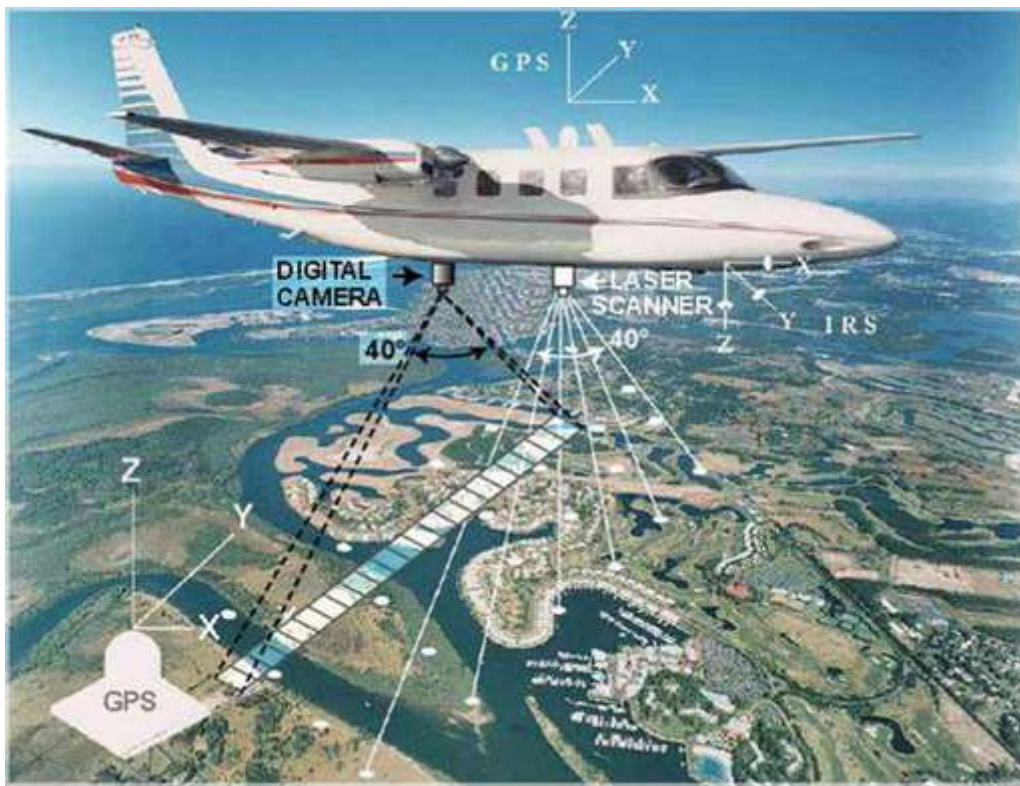


Figura 10. Dispositivos que forman un vuelo LiDAR

La integración de ambos conjunto 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. Así, se puede obtener una nube de puntos muy densa que están georreferenciados, los cuales, en función 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. Por lo que se pueden obtener DSMs con una altísima resolución espacial (hasta 10 puntos/m²) y en un reducido periodo de tiempo.

En el campo agrícola es muy importante la obtención de información espacial de calidad a partir de imágenes que proceden de sensores remotos comerciales de alta resolución, como es el caso de la información georreferenciada obtenida de los DSMs. Estos datos son cada vez más empleados en distintos campos de la Ingeniería, incluyendo la agronomía. De hecho, los productos georreferenciados (principalmente DSMs y ortofotos) obtenidos a partir de imágenes de satélites VHR, como es el caso

de GE1, aparecen como serios competidores directos en calidad y precio de los obtenidos a partir de vuelos fotogramétricos a grandes o medias escalas. Además tienen la gran ventaja de poder ser tomados sobre cualquier lugar de la tierra, sin tener en cuenta las posibles circunstancias geopolíticas de la zona.

2.3. ALGORITMOS DE CORRELACIÓN AUTOMÁTICA

Los nuevos satélites VHR tienen capacidad de tomar imágenes estéreo con fuertes geometrías, i.e. con una relación Base-Altura (B/H) mayor de 0.5. Este hecho es fundamental para la generación de información altimétrica. Para obtener una mejora de la precisión vertical de los DSMs debemos mejorar la geometría de las imagen de satélite que conforman el estéreo par, en particular, aumentar el ratio B/H o el ángulo de convergencia (Li et al., 2007). Pero para zonas urbanas, unos grandes ángulos de convergencia provocarían oclusiones del terreno, además de una pérdida de la semejanza entre las dos imágenes que forman el estéreo par y, en consecuencia, un empeoramiento del proceso de búsqueda de puntos homólogos por correlación automática (*matching*). Por todo ello, en zonas urbanas se prefieren pequeños ratios B/H (Eckert y Hollands, 2010). También la gran agilidad que tienen estos satélites para la toma de imágenes, les permite generar estéreo pares de imágenes en la misma fecha y en la misma órbita, lo que reduce las variaciones radiométricas y mejora la tasa de éxito del proceso de *matching* (Toutin, 2000; Toutin, 2004a). Los estéreo pares VHR se pueden adquirir de forma rápida sobre cualquier superficie de la Tierra, con un precio razonable y un tiempo de revisita pequeño. Por ello, la extracción de información tridimensional (3D) a partir de imágenes de satélites VHR ha sido objeto de una amplia investigación en la última década, principalmente en estos tres campos:

- a) Análisis de 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).
- b) Comparación de las precisiones de los DSMs obtenidos a partir de diferentes estéreo pares puros de satélites VHR. Esto quiere 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*), incluso presentando ángulos óptimos para visión estéreo (Toutin, 2004a; Toutin, 2006; Capaldo et al., 2012). En este

punto también se compara la precisión en DSMs que se han generado 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).

- c) Comparación de 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).

Hay dos técnicas comúnmente usadas para encontrar puntos homólogos por correlación automática de imágenes: las basadas en áreas (*Area based matching*, ABM) y las basadas en figuras (*Figure based matching*, FBM).

Los métodos basados en áreas hacen un ajuste radiométrico de puntos o superficies en una o varias imágenes. Se basan en encontrar el mismo patrón de píxeles usando ventanas móviles a lo largo de las imágenes que forman el estéreo par. Emplean mínimos cuadrados para llegar a la solución óptima.

Los *Figure based matching* se basan en la comparación y determinación de figuras homólogas básicas. Trabajan sobre ciertas figuras básicas fácilmente distinguibles y que se obtienen de las imágenes originales (esquinas, intersecciones, aristas, líneas, etc.).

Últimamente también se están empleando con gran profusión otras nuevas técnicas de *matching* como estrategias con nuevos píxel con funciones, empleando técnicas de programación dinámica. También se ha puesto en marcha un método bastante prometedor, *semi-global matching* (SGM) algoritmo que se ha aplicado en imágenes aéreas (e.g., Capaldo et al., 2012). Los principales componentes de este método son el coste de cálculo y el coste de agregación. El cálculo de este *matching* es un valor similarmente a los píxeles de *matching* en dos imágenes. Usando la geometría epipolar, el *matching* es calculado por todo el potencial de píxeles *matching* en el par de imágenes, esto incluye el coeficiente de correlación de cálculo de *matching* en dos ventanas (d'Angelo y Reinartz., 2011).

Otra herramienta de importancia en la extracción de imágenes es el empleo del filtro de Wallis el cual es muy útil, ya que mejora la precisión del cálculo de la elevación sobre datos extraídos de zonas desérticas o zonas con sombreados importantes tales como zonas urbanas, zonas montañosas o vegetación muy densa.

2.4. EXTRACCIÓN AUTOMÁTICA DE DSM A PARTIR DE ESTÉREO PARES DE SATÉLITES VHR

Para la orientación de la imagen influyen variables como son: el modelo de sensor empleado, el número de puntos de control que se emplean para el cálculo de cada modelo de sensor, y por último, la distribución de todos estos puntos de control para cada uno de los trabajos realizados.

El 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 los últimos años se han probado diferentes modelos matemáticos para poder orientar imágenes de satélites VHR y realizar su geoposicionamiento 3D. Aunque sólo se recomiendan dos de ellos por la mayoría de autores (Toutin, 2004b; Wolniewicz et al., 2004; Aguilar et al., 2007; Dollof y Sttergren 2010). De estos dos modelos, en este trabajo de investigación se va a emplear uno de ellos, ya que con ese modelo se obtuvieron los mejores resultados en trabajos de investigación anteriores (Palenzuela, 2013).

El modelo empleado fue, Modelo empírico basado en las funciones racionales 3D, que trabaja construyendo una relación matemática entre la posición de los píxeles en el espacio imagen (2D) y su localización en el terreno (3D). La relación descrita se basa en fracciones de polinomios. Para una transformación del espacio terreno al espacio imagen este modelo se expresa según la siguiente ecuación:

$$x = \frac{P1 (X, Y, Z)}{P2 (X, Y, Z)}$$

$$y = \frac{P3 (X, Y, Z)}{P4 (X, Y, Z)}$$

donde se obtiene que x e y es la representación de un determinado píxel en el espacio imagen, es decir, la fila y la columna que ocupa, X, Y, Z son las coordenadas del punto en el espacio terreno, y, Pi (i=1, 2, 3 y 4) son funciones polinómicas que presentan la siguiente forma general en la siguiente ecuación:

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

$$P_i = a_{1i} + a_{2i}X + a_{3i}Y + a_{4i}Z + a_{5i}XY + a_{6i}XZ + a_{7i}YZ + a_{8i}X^2 + a_{9i}Y^2 + a_{10i}Z^2 + a_{11i}XYZ + a_{12i}X^3 + a_{13i}XY^2 + a_{14i}XZ^2 + a_{15i}X^2Y + a_{16i}Y^3 + a_{17i}YZ^2 + a_{18i}X^2Z + a_{19i}Y^2Z + a_{20i}Z^3$$

Por lo general 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 nombrar, por medio de 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 Polynomila Camera; RPC*). Las siglas RPC hacen referencia a funciones racionales de tercer orden, mientras que RFC se usa para funciones racionales generales como las que dependen del terreno.

Para este trabajo de investigación se empleará el método empírico basado en 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) continuando con el modelo de ajuste de bloque que publicaron Grodecki y Dial (2003) para el espacio imagen.

$$\Delta x = x' - x = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

$$\Delta y = y' - y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2$$

En el que 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 de la imagen medidas para los nuevos GCP que se emplean para refinar los resultados (x' , y') y las coordenadas de la imagen obtenidas para los mismos GCP (x , y) por parte de los coeficientes racionales originales. Para la transformación de orden cero (RPC0), solo es preciso el uso de un GCP, ya que consiste en una simple traslación (a_0 y b_0) en la ecuación anterior.

Tras este proceso se procede a la generación de las imágenes epipolares. Una vez seleccionadas ambas imágenes, se generan las epipolares mediante Geomatica, seleccionando la imagen correspondiente a la derecha y a la izquierda para el par de imágenes.

Una vez obtenidas las imágenes epipolares se enlazan estas imágenes en Geomatica para la extracción del DSM a partir de estas imágenes. Por medio de Geomatica y con varias de sus opciones se obtienen los diferentes DSMs enlazando el par de epipolares generados anteriormente.

2.5. CALIDAD DEL DSM

La calidad de los datos de los DSMs que se extraen se debe cuantificar, estudiando, tanto la precisión vertical o error vertical de los datos obtenidos, como el grado de cobertura de los mismo o la completitud.

La precisión vertical o error vertical se puede obtener mediante el cálculo de las diferencias de altura entre los datos del DSM a evaluar, y un DSM de mayor calidad, generalmente generado mediante técnicas LiDAR.

El procedimiento para evaluar DSMs en cuanto a la calidad, se basa en el análisis de la precisión vertical y completitud de estos. La precisión vertical del DSM se puede obtener mediante la diferencia de altura entre puntos conocidos del terreno y sus correspondientes puntos del DSM. Estos puntos de comprobación de la precisión conocidos como ICPs (*independent check points*), deben ser al menos tres veces más precisos que los datos controlados. Por tanto, se debe verificar la precisión de los ICPs así como su número. De hecho, el número de ICPs con el que se controla la precisión de un DSM tendrá una influencia vital en la fiabilidad del resultado de precisión obtenido. Además, estos ICPs deben estar repartidos por toda el área de estudio.

Teniendo en cuenta todo lo mencionadas anteriormente, muchos investigadores han propuesto el uso del LiDAR de muy alta precisión como verdad terreno (*ground truth*) para compararlo con los DSMs generados a partir de imágenes de satélites VHR (Aguilar et al., 2014). Hay que tener en cuenta que el DSM automático no puede ser determinado en todas las zonas a causa de errores de *matching* provocados por insuficiente textura, oclusiones o por la existencia de artefactos radiométricos, por lo que la precisión vertical debe ser complementada por la completitud del DSM, que se define como la superficie del área de estudio sobre la que se ha podido extraer correctamente puntos 3D mediante correlación automática en relación con el total de área de trabajo.

CAPÍTULO 3.
INTERÉS Y OBJETIVOS

3. INTERÉS Y OBJETIVOS

3.1. INTERÉS

Después de todo lo expuesto en la revisión bibliográfica, se debe resaltar la importancia de la extracción de información espacial de calidad con imágenes procedentes de sensores remotos comerciales de alta resolución en el campo de la agricultura. Esta información georreferenciada podría consistir en DSMs, los cuales son muy utilizados en diferentes campos de la ingeniería, incluida la agronómica. En este trabajo de investigación hay un especial interés en la optimización de la extracción de DSMs a partir de estéreo pares de GE1, uno de los dos satélites comerciales VHR más modernos y precisos del mercado en la actualidad. Incluso se busca la aplicación de estas técnicas de extracción automática de DSM en terrenos agrícolas de nuestra comarca, con la presencia de parcelas con cultivos protegidos con invernaderos de malla y plástico. Especialmente sobre las cubiertas de invernadero constituidas por plástico o malla, los algoritmos de correlación automática usualmente empleados en software fotogramétrico suelen presentar gran dificultad en la correcta extracción de datos altimétricos, debido principalmente a la falta de textura de las estéreo imágenes, así como por los grandes cambios de reflexión de la luz que incide sobre la superficie plástica con distintos puntos de vista. Estas técnicas de extracción serán validadas en la zona agrícola conocida en el término municipal de Palomares, junto al río Almanzora.

3.2. OBJETIVOS

El objetivo fundamental del proyecto es estudiar el nivel de precisión y calidad que se puede alcanzar, en condiciones operacionales, en los DSM extraídos a partir de estéreo pares de GE1, empleando el módulo fotogramétrico del software Geomatica, denominado OrthoEngine.

Más concretamente se pretende obtener unas recomendaciones sobre la optimización del proceso de extracción de DSMs en función del tipo de cubierta (invernaderos tipo malla, invernaderos de plástico y la zona de estudio completa que incluye invernaderos de ambos tipos así como suelo desnudo, carreteras, caminos,

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

etc,...). Las variables sometidas a estudio para dicha optimización de la calidad de los DSMs extraídos sobre los distintos tipos de cubierta han sido: (i) versión de OrthoEngine empleada (2012 o 2013), (ii) selección de parámetros del módulo de extracción automática de DSMs en el caso de OrthoEngine 2013, como filtro de Wallis, o tipo de terreno (OrthoEngine 2012 carece de dichos parámetros), y (iii) analizar la influencia en la calidad del DSM obtenido del uso de las diferentes bandas proporcionadas por GeoEye-1 en su imagen PAN y fusionada (i.e., PAN, Red, Blue, Green, Nir y todas las bandas de la imagen fusionada) para la extracción por correlación automática.

CAPÍTULO 4.
MATERIAL Y MÉTODOS

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS DE INICIO

4.1.1. Área de Estudio

El área a estudiar en este trabajo se concentra junto a la costa oriental de Almería, España, concretamente es una pequeña zona junto a la desembocadura del río Almanzora en el término municipal de Palomares, donde se encuentran varios invernaderos tipo malla y plástico (Fig. 11). Esta zona se encuentra dentro de las coordenadas 608,597 m este y 4, 122,692 m norte, expresadas en el sistema *WGS84*. Esta área de estudio tiene una elevación media de unos 5 m, con un intervalo de unos 3 a 11 m sobre el nivel medio sobre el nivel del mar en Alicante. La zona en general junto al río Almanzora y los diferentes núcleos urbanos tienen la importancia de concentrar importantes urbanizaciones, que han tenido un gran desarrollo en los últimos años debido a la expansión inmobiliaria, por el gran desarrollo del sector turístico en la zona. Este gran desarrollo inmobiliario ha provocado importantes cambios en la zona, ha frenado la expansión de invernaderos en la zona y ha producido catástrofes naturales importantes, como la pérdida de unos 200 m de playa en Quitapellejos, Palomares.

Además esta zona de estudio es peculiar, ya que en esta comarca se encuentran un gran número de invernaderos tipo malla, no como la zona del poniente de Almería o zona del campo de Níjar. La zona elegida para este trabajo tiene más número de invernaderos tipo malla que de plástico, concretamente en esta área se concentran 8 invernaderos tipo malla y 5 invernaderos tipo plástico. Por lo que hace que sea un trabajo de investigación interesante para ver las diferencias que se producen en cuanto a la toma de DSMs entre estos dos tipos de invernaderos.

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

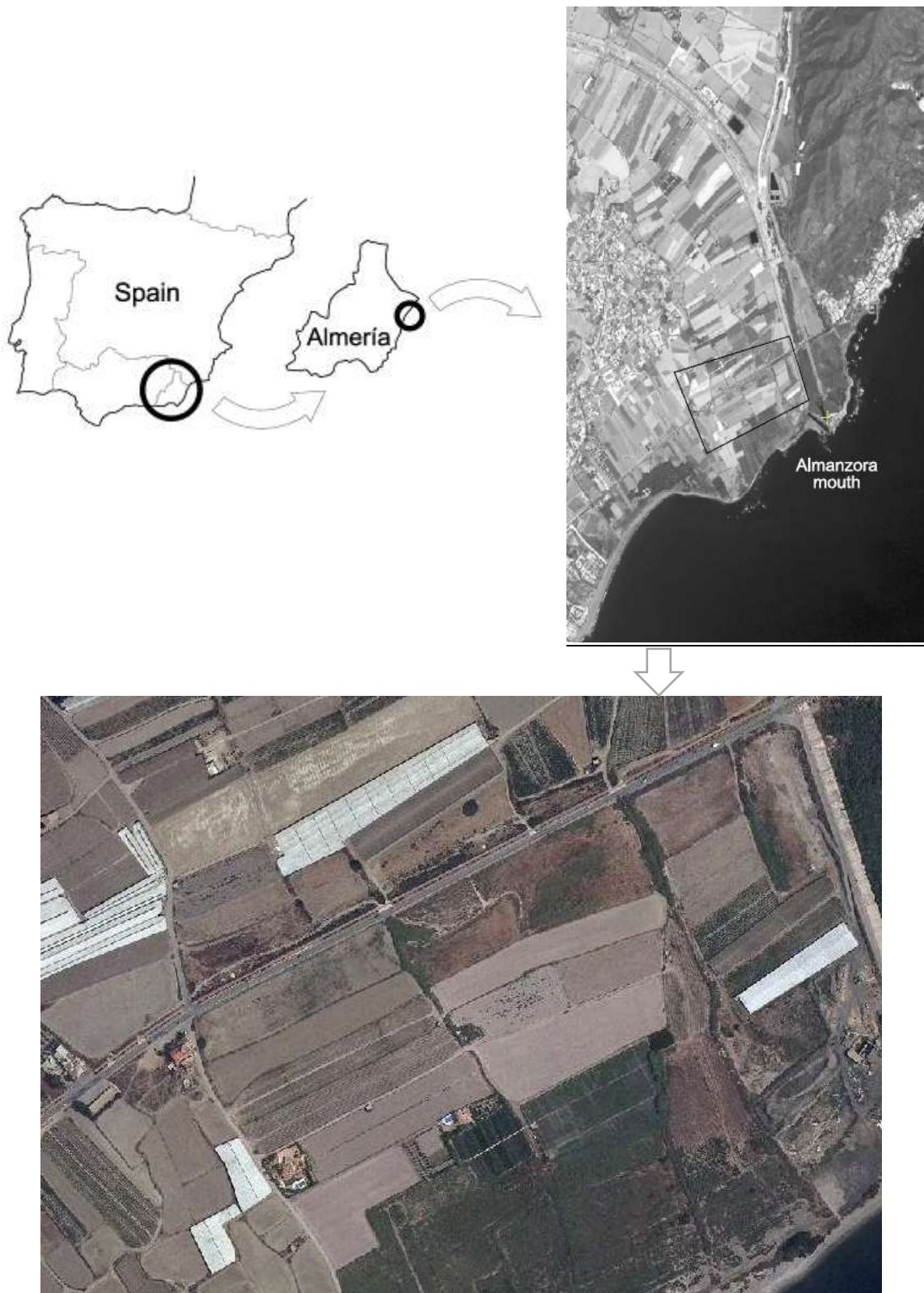


Figura 11. Situación y distribución de invernaderos analizados en la zona de estudio.

4.1.2. Datos del Satélite VHR GE1

Las dos imágenes de GE1 empleadas en el trabajo realizado en la zona se tomaron el día 27 de Agosto de 2011 (Tabla 3). Las dos imágenes que se utilizaron en el trabajo forman un estéreo par, por ello son imágenes GeoStereo que se caracterizan por tener ángulos off-nadir de 8.5° para la imagen denominada GE11 y 23.1° para la nombrada como GE12. Estas imágenes de GE1 se adquirieron en modo PAN y MS con un sentido inverso de escaneo. El satélite GE1 toma de forma simultánea la banda PAN, con un rango espectral desde 450 hasta 800 nm, y las cuatro bandas MS: Blue (450 hasta 510 nm), Green (510 hasta 580 nm), Red (655 hasta 690 nm) y NIR (780 hasta 920 nm). Todas las imágenes se tomaron con un rango dinámico de 11 bits por píxel sin ningún ajuste, manteniendo la precisión radiométrica absoluta y el rango dinámico completo para aplicaciones científicas. También cabe destacar que en el proceso de toma de las imágenes se utilizó la tecnología TDI con 16 etapas en las imágenes PAN.

Tabla 3. Características de las imágenes PAN y MS de GE1 (Productos GeoStereo) tomadas en la zona de trabajo.

ID de la imagen	GE11	GE12
Tipo de imagen	GE1 GeoStereo	Ge1 GeoStereo
Fecha de adquisición	27/08/2011	27/08/2011
Hora de adquisición (GTM)	10:55	10:56
Cobertura de nubes	0%	0%
Sentido de la toma	Inverso	Inverso
Azimut del Sol	144.1°	144.4°
Elevación del Sol	58.3°	58.4°
Elevación del Sensor	81.5°	66.9°
Azimut del Sensor	40.4°	183.6°
Tamaño Real píxel Col. (PAN)	0.416 m	0.480 m
Tamaño Real píxel Fila (PAN)	0.417 m	0.440 m
Tamaño de Píxel PAN	0.5 m	0.5 m
Tamaño Real píxel Col. (MS)	1.66 m	1.92 m
Tamaño Real píxel Fila (MS)	1.65 m	1.76 m
Tamaño píxel MS	2 m	2 m
Bits por píxel	11	11

Las imágenes Geo están proyectadas sobre una superficie de altura constante. Son imágenes que tienen el menor nivel de procesamiento que comercializa la empresa GeoEye, tanto radiométrico como geométrico, por lo que son imágenes propias para generar productos georreferenciados de alta calidad. Para esto, la empresa GeoEye ofrece los datos que se corresponden con el modelo de sensor en forma de coeficientes de polinomios racionales (*Rational Polynomial Coefficient*, RPCs) y además un archivo metadatos, que con la adición de puntos de control (GCPs), un modelo digital de elevaciones (DEM) y software comercial, proporcionan la

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

obtención de productos ortorrectificados muy precisos. También se debe destacar la capacidad de geoposicionamiento (fase de orientación del sensor) de las imágenes Geo utilizando sólo los RPCs proporcionados en la propia imagen lo cual ha mejorado considerablemente con respecto a satélites anteriores como IKONOS o QuickBird, centrándose en valores de unos 3 m de precisión planimétrica (GeoEye, Inc., 2009) medida como error medio cuadrático (RMSE).

En cuanto al producto GeoStereo (Fig. 12), consta de dos imágenes que forman un estéreo par con capacidad de generar productos como, por ejemplo, DEMs o DSMs. Cada una de las imágenes que forman el estéreo par tienen exactamente las mismas características que una imagen Geo (GeoEye, Inc., 2009).

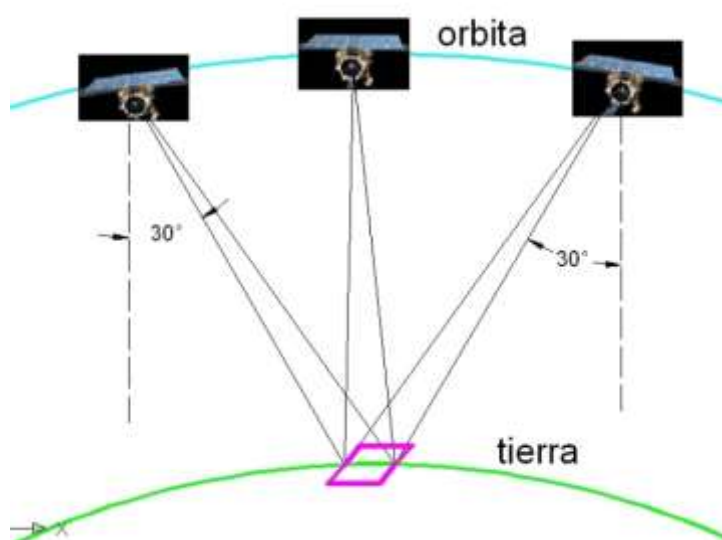


Figura 12. Esquema de adquisición de un estéreo par de GE1

4.1.3. Datos LiDAR 2009

El DSM empleado en este caso como referencia o verdad terreno (*Ground Truth*), fue generado a partir de datos LiDAR. Tiene una resolución de 1 m. Este DEM se realizó a partir de un vuelo combinado de fotogrametría y LiDAR, generado sobre la zona de estudio el 28 de Agosto de 2009. La altura del vuelo realizado fue de unos 1000 m, y se usó un escáner láser Leica ALS60 con 35° FOV.

También se empleó una estación GPS fija de referencia en el terreno. Para calcular la precisión vertical que se obtiene en el DSM LiDAR se emplearon 62 ICPs, los cuales

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

estaban distribuidos por toda la zona de trabajo. La precisión vertical obtenida para este DSM fue de 8.9 cm medido como RMSE.

Todos los procesos que pertenecen 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[®].

En la Fig. 13 se puede observar la precisión del DSM en los datos LiDAR empleados para este trabajo.

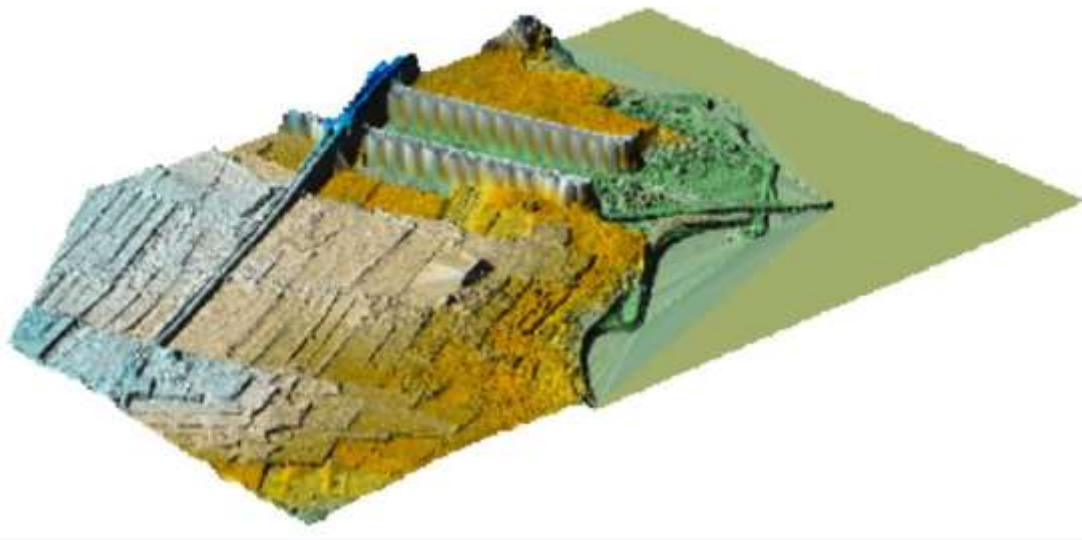


Figura 13. DSM datos LiDAR

4.1.4. Medición de Puntos de Control

Las diferentes coordenadas de los puntos del terreno fueron obtenidos por medio de DGPS empleando una estación total de trabajo GPS Topcon HiPer PRO que cuenta con navegación cinética en tiempo real (*Real Time Kinematic*, RTK), colocada desde el vértice geodésico “Juan Jordana” para cubrir toda la zona de trabajo. Los trabajos con DGPS se sustentan en once puntos de campo de coordenadas conocidas, de los cuales, cuatro de ellos son de la red geodésica nacional, uno pertenece a la red REGENTE (obtenido con técnicas de alta precisión espacial) y los

seis puntos restantes pertenecen a la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Los valores de RMSE que se obtuvieron en estos puntos tras los ajustes que se realizaron a las distintas radiaciones realizadas en RTK, fueron de 5.6 cm en X, 3.3 cm en Y y por último 7.6 cm en Z.

Por este método, se llegaron a medir las coordenadas de 120 puntos, distribuidos de forma homogénea por toda la comarca en la que está contenida la zona de trabajo (Fig. 14). Estas coordenadas están en el sistema de referencia European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) y en la proyección UTM. El Datum vertical se refiere al nivel medio del mar en Alicante (España), con cota ortométrica.

La finalidad se basó en obtener una medición fiable de los GCPs y los ICPs con una precisión mejor de 10 cm. De todos los puntos del terreno, 51 se seleccionaron como GCPs y 69 fueron utilizados como ICPs.

Para nuestro trabajo de todos los GCPs extraídos se emplearon solamente 12 de ellos, ya que en un trabajo de investigación anterior (Palenzuela, 2013) ese número de puntos obtuvo el mejor resultado en la fase de orientación y posterior extracción del DSM a partir de estéreo pares de GE1 y WorldView-2 en la misma zona de trabajo.

4.2. METODOLOGÍA

4.2.1. Orientación de la Imagen

Para orientar las imágenes empleando el modelo de funciones racionales refinadas de grado cero (RPC0) previamente descrito, se empleó el paquete de software fotogramétrico OrthoEngine de Geomatica 2013, creado por PCI Geomatics (PCI Geomatics, Richmond Hill, Ontario, Canadá).

Al seleccionar el modelo de funciones racionales, se debe orientar la imagen en la zona que se encuentra, asignándole un Datum. Para el presente trabajo se eligió ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989). También se le asigna zona UTM en este caso 30 Norte con 6° W y 0° E. Se le indica que la zona de trabajo se encuentra en el Hemisferio Norte y se asigna un tamaño de píxel de 0.5 m.

Al emplear imágenes individuales PAN de GE1, el modelo RPC0 es el modelo de sensor que mejores resultados obtiene (Aguilar et al., 2012; Aguilar et al., 2013). Hay que destacar que en el caso de RPC0, OrthoEngine calcula cada imagen individual con 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.

Se considera que los puntos están bien distribuidos cuando la posición de estos puntos a lo largo de toda la imagen esté lo más separados posibles. Para el conjunto de los 12 puntos, estos estaban localizados en zonas abiertas y despejadas en el terreno (Fig. 14). Por lo que se aplicó mediante Geomatica 2013 el modelo de sensor RPC0 con el conjunto de 12 GCPs para la orientación. Los 12 puntos empleados se introducen mediante un archivo .txt en el software, ya que tiene la posibilidad de importar este tipo de archivo de texto, o también se pueden introducir de forma manual.

En puntos definidos por estructuras elevadas, un pequeño error en el punteamiento del punto en imagen puede provocar un considerable error en la altura. Este error de procesamiento o marcación en el espacio imagen podría ser el mismo para todos los proyectos realizados en Geomatica, debido a que en cada imagen analizada, los puntos de campo (GCPs) fueron marcados una sola vez.



Figura 14. Distribución de todos los puntos en toda la comarca, incluyendo los 12 GCP (círculos grandes). Las cruces identifican los 69 ICPs

4.2.2. Extracción del DSM

Durante la fase de extracción del DSM se utilizó la opción de OrthoEngine de Geomatica v.2013 *DEM From Stereo*. En esta opción del software se emplea *extract DEM automatically*. Para el presente trabajo se realiza un clip área que realiza un recorte de toda la imagen, ya que solo se emplea una pequeña zona de toda la imagen. Este recorte se selecciona en la imagen con la opción *Ortho Generation*. Una vez realizada la clip área, se procede la extracción automática del DSM dentro de *extract DEM automatically* con las diferentes opciones a seleccionar, como son: (i) asignarle una precisión *High* o *Extra-high*, (ii) tipo de terreno empleado, *Hilly*, *Flat* y

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Mountainous, y (iii) aplicar el filtro de Wallis o no. La resolución del DSM de salida se fija siempre en 1 m. Para terminar el proceso en la extracción del DSM se le asigna un nombre al archivo de salida. En las Fig. 15 y 16 se puede observar las notables diferencias entre el módulo de extracción automática de DSMs de la versión de Geomatica 2012 y 2013 respectivamente.

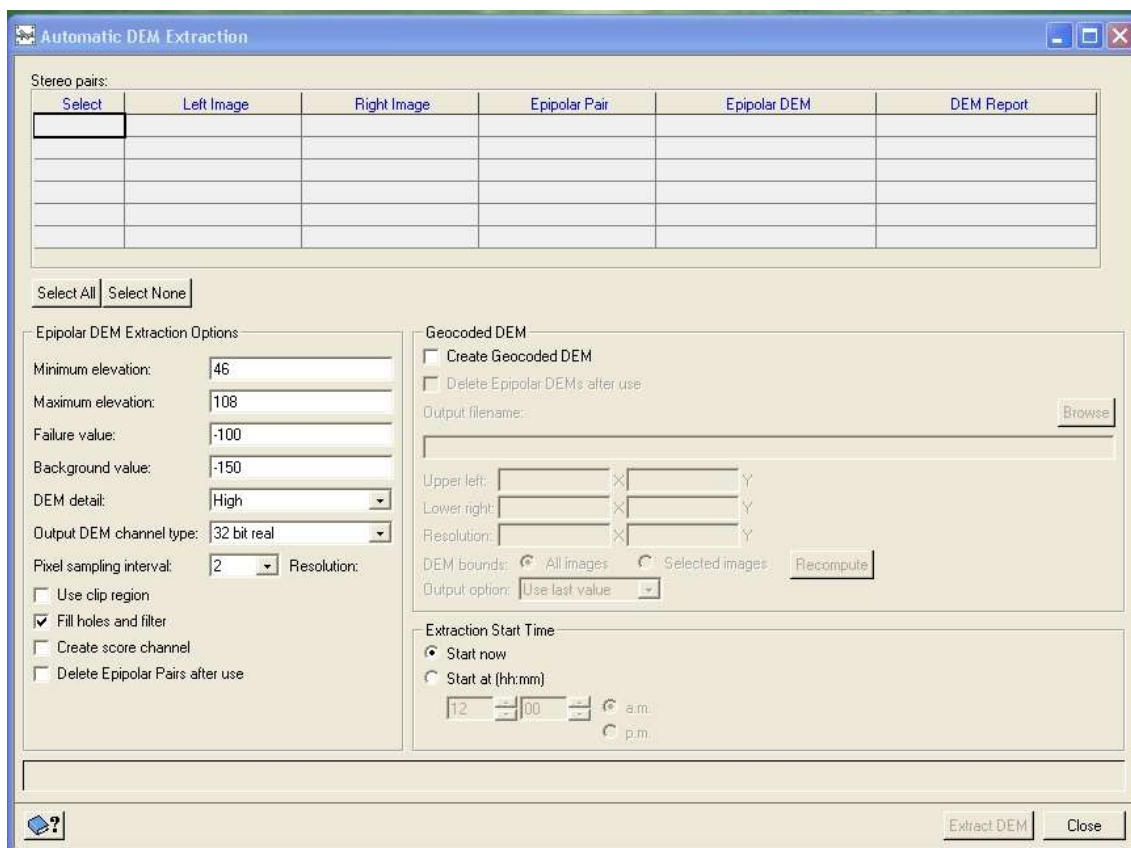


Figura 15. Proceso de extracción de DSMs con Geomatica 2012

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

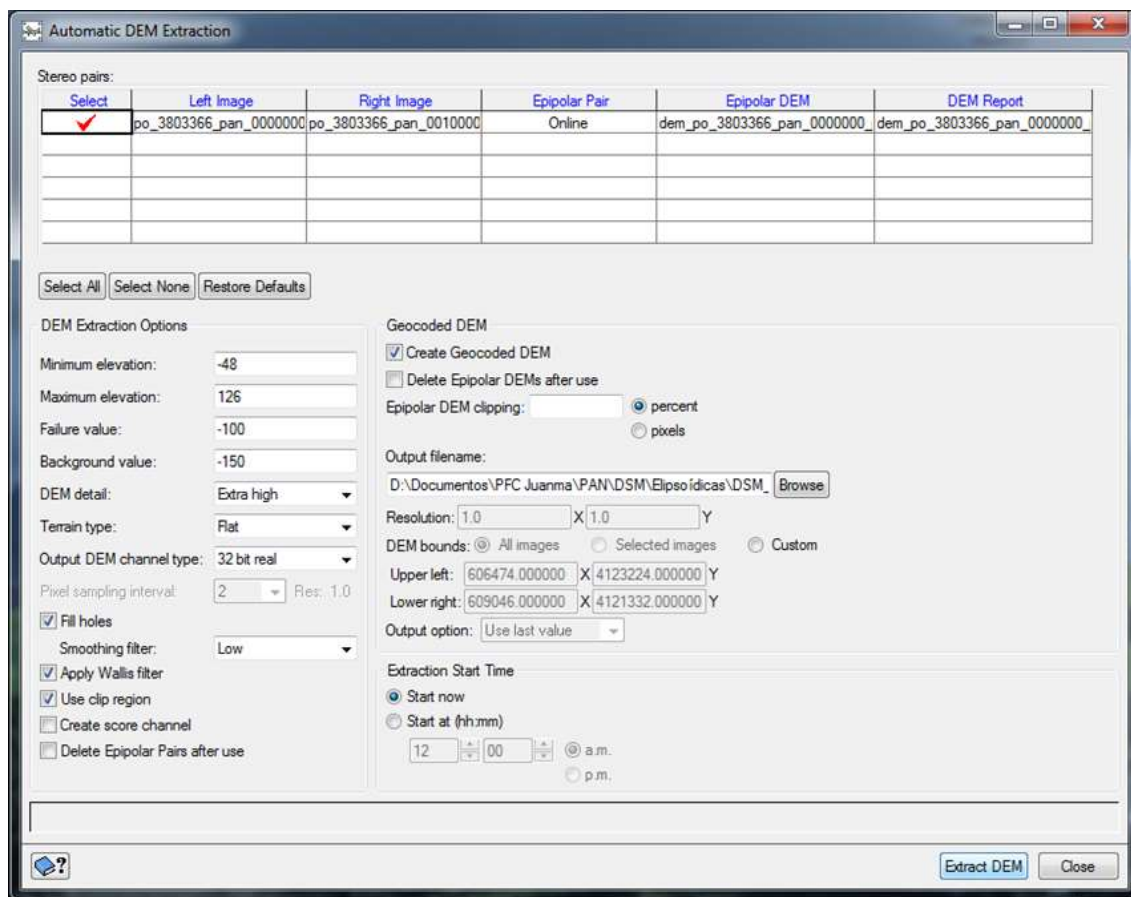


Figura 16. Proceso de extracción de DSMs con Geomatica 2013

En la extracción del DSM se trabajó con un proceso de correlación automática basado en áreas (*area based matching*), realizado sobre imágenes epipolares que se calcularon a partir de imágenes originales que formaban el estéreo par. El proceso de extracción automática está basado en una correlación cruzada normalizada media producida en diferentes pasos que generan coeficientes de correlación entre 0 y 1 para cada píxel correlado de la imagen, donde 0 representa una falta total de correlación y por tanto de datos y 1 hace referencia al *matching* perfecto. Cuando el coeficiente de correlación de un punto es inferior a 0.5, éste es eliminado y su altura no es calculada, por lo que se reduce la completitud del DSM. Además una superficie de segundo orden se ajusta usando los puntos con máximo coeficiente de correlación con el fin de mejorar la calidad del DSM y poder obtener así precisiones sub-píxel (Chen y Chaapel, 2008).

Para generar los DSMs con el software OrthoEngine 2012, solo los intervalos de muestreo y el nivel de detalle pueden ser ajustados por el usuario. Por lo que para cada DSM se seleccionó un gran nivel de detalle con 32 bits y un factor de muestreo

de píxel de 1, por lo que se genera DSMs con un paso de malla de 1 m. Con OrthoEngine 2013 además podemos seleccionar tipo de terreno y aplicar o no filtros de Wallis. Además se tiene en cuenta que estos DSMs generados con OrthoEngine van referidos al elipsoide WGS84, es decir, tienen cotas elipsóidicas, por lo que una vez extraídos todos los DSMs se empleó de nuevo OrthoEngine en la opción *utilities* y *convert DEM Datum* para convertir esas cotas elipsóidicas en ortométricas con una altura real de terreno.

Tras este paso y al obtener los DSMs con cotas ortométricas se exportó a archivos *.txt* cada uno de los estos DSMs, tanto los archivos correspondientes a *score channel* como los correspondientes a las alturas de cada punto analizado por Geomatica. El primero de los archivos para obtener la completitud de todos los puntos del DSM y el segundo archivo para analizar la precisión vertical de ellos a partir del programa de Rapid Form.

4.2.3. Tipos de DSMs

Para este trabajo se han considerado cuatro tipos de DSMs en función al recorte realizado mediante Geomatica: (i) para toda la zona de estudio, (ii) para invernaderos tipo malla y plástico que se encuentran en la zona de estudio, (iii) solo invernaderos tipo malla y (iv) DSM solo para invernaderos tipo plástico. También se lleva a cabo el mismo recorte en el DSM LiDAR de la zona de estudio, para poder obtener la precisión vertical y la completitud de los DSMs, ya que estos se comparan con la hoja LiDAR que se considera como el terreno verdadero.

La extracción de los DSMs con la versión nueva de Geomatica (versión 2013) se llevó a cabo mediante doce estrategias distintas (Tabla 4). En cuanto a la extracción de DSMs con la versión 2012 se empleó la misma estrategia para los cuatro tipos de DSMs, con un detalle de DSM *High*.

Tabla 4. Estrategias empleadas en los DSMs extraídos

Estrategia	DEM Detail	Terrain type	Apply Wallis filter
1	ExtraHigh	Flat	NO
2	ExtraHigh	Flat	SÍ
3	ExtraHigh	Hilly	NO
4	ExtraHigh	Hilly	SÍ
5	ExtraHigh	Mountainous	NO
6	ExtraHigh	Mountainous	SÍ
7	High	Flat	NO
8	High	Flat	SÍ
9	High	Hilly	NO
10	High	Hilly	SÍ
11	High	Mountainous	NO
12	High	Mountainous	SÍ

Además, las 12 estrategias seguidas para la extracción de los diferentes DSMs en la versión 2013, se aplican tanto para la banda PAN, como para cada una de las demás bandas de la imagen pansharpened de las cuales dispone GE1, es decir, la banda Blue, Green, Red, NIR y All. Esta última opción incluye la suma de todas las cuatro bandas clásicas bandas descritas anteriormente (i.e., Blue, Green, Red, NIR).

CAPÍTULO 5.

RESULTADOS

5. RESULTADOS

En los resultados que se han analizado, se ha realizado una evaluación de la precisión vertical o error vertical de los DSMs extraídos a partir de estéreo pares del satélite VHR GE1 y también una evaluación de la completitud, es decir, porcentaje de puntos medidos en toda el área de estudio a partir de dichos DSMs, comparado todo con datos LiDAR como *Ground Truth*. Mediante estos dos parámetros, se ha llevado a cabo un estudio de calidad de los DSMs extraídos sobre diferentes superficies: (i) estudio en toda la zona de estudio elegida, (ii) estudio seleccionando sólo todos los invernaderos que se encuentran en la zona, tanto tipo malla como plástico, (iii) solo invernaderos tipo malla, y (iv) solo invernaderos tipo plástico. Además, el empleo de 5 bandas diferentes (PAN, Red, Green, Blue y Nir) y 12 estrategias distintas (Tabla 4) con diferentes opciones de Geomatica 2013 para la extracción de DSMs, fueron comparadas con los resultados obtenidos con los resultados obtenidos mediante Geomatica 2012 usando la banda PAN.

Antes de la obtención de los DSMs, la precisión de la orientación del sensor del estéreo par de GE1 fue llevada a cabo mediante usando los 69 ICPs medidos sobre el terreno mediante DGPS. El modelo de sensor empleado fue RPC0, usándose 12 GCPs para el cómputo del modelo matemático. Recordar que los GCPs e ICPs fueron marcados sobre las imágenes PAN o pansharpened de GE1 exactamente en el mismo lugar, por tanto, las precisiones en la orientación obtenidas a partir de proyectos PAN o pansharpened fue exactamente la misma. Esta fase de orientación fue realizada en OrthoEngine, no habiendo ninguna diferencia entre la versión 2012 y la 2013. Los errores medios cuadráticos unidimensionales, i.e. en dirección X ($RMSE_x$) e Y ($RMSE_y$), obtenidos para los 69 ICPs empleados fueron de 0.273 m y 0.264 m respectivamente. Por su parte, el error planimétrico ($RMSE_{2d}$) resultó ser de 0.380 m.

Una vez finalizada la fase de orientación del sensor, se realizó el proceso de *matching* siguiendo las distintas estrategias consideradas para generar los diferentes DSMs.

5.1. ZONA DE ESTUDIO COMPLETA

En la Fig. 17 se observa la distribución de la Distancia Media (media de las diferencias de cotas en valor absoluto resultantes de la comparación entre el DSM

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

generado a partir del estéreo par de GE1 y las cotas LiDAR). Esta Distancia Media es obtenida a partir de los resultados analizados en Rapid Form para los DSMs extraídos en totalidad de la zona a estudiar, teniendo en cuenta las 12 estrategias llevadas a cabo. En esta gráfica se puede observar que la mayoría de las estrategias analizadas mejoran el resultado obtenido a partir de las imágenes PAN y usando la versión de Geomatica 2012 (PAN2012), i.e. se obtiene un valor más pequeño con Geomatica 2013 con casi cualquier estrategia.

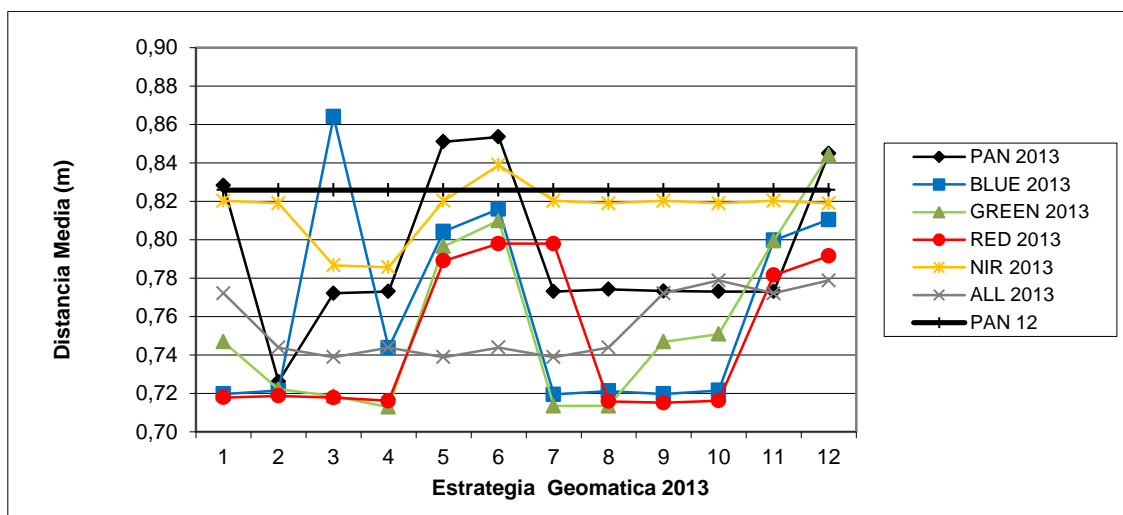


Figura 17. Distribución de la media de puntos obtenidos para toda la zona de estudio

En la Fig. 18 se observan los resultados de Desviación Típica para toda la zona de estudio, en la cual al, contrario que para Distancia Media, y de forma global, todos los resultados superan los obtenidos por la PAN2012, por lo que los resultados de la versión nueva no mejoran en general la versión 2012. Solo la estrategia 1 con las imágenes PAN y la 3 con la banda Blue de las imágenes pansharpened mejoraron claramente las Desviaciones Estándar provenientes de la PAN2012.

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

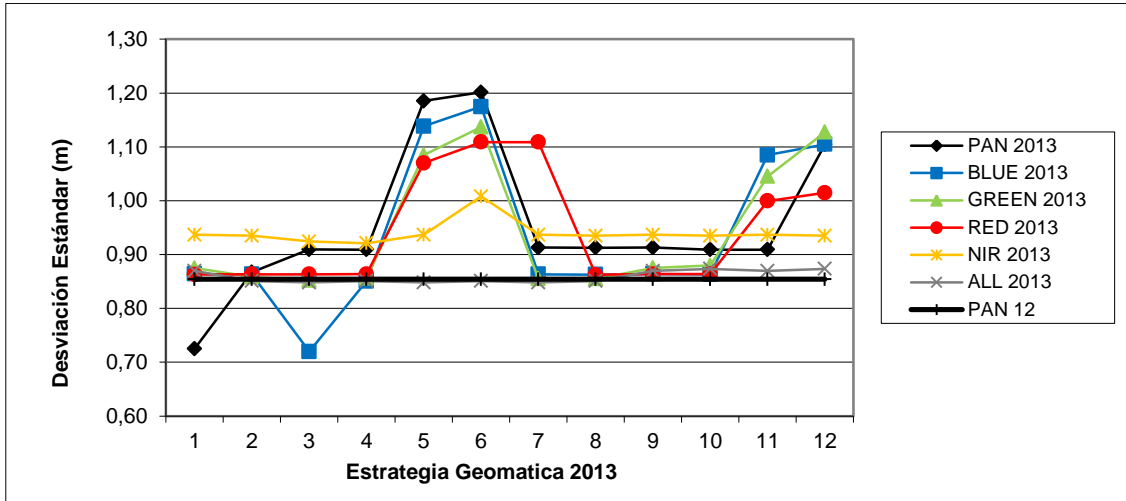


Figura 18. Desviación estándar para toda la zona de estudio

Por su parte, la Fig. 19 presenta el análisis para la completitud de toda la zona de estudio, en cuyos resultados se observa que, por lo general, los resultados de la versión 2013 no mejoran a los resultados aportados por la versión antigua (PAN2012), ya que por lo general todos los resultados reportados por la versión 2013 son menores a los de la versión anterior.

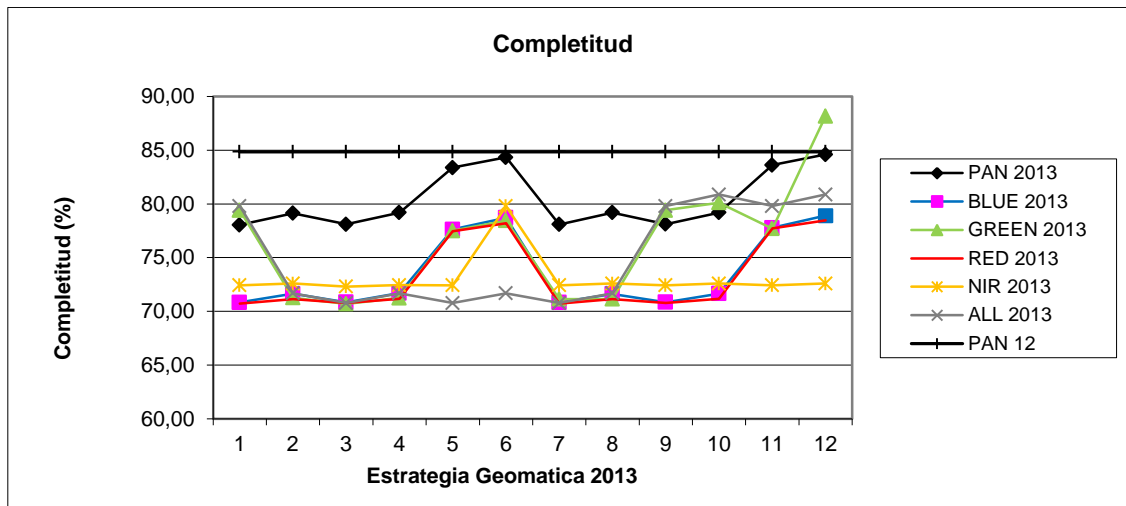


Figura 19. Completitud obtenida para toda la zona de estudio

La Fig. 20 es una imagen obtenida a partir del visualizador de Geomatica (Focus) donde se representa el DSM extraído sobre toda el área de estudio a partir del estéreo par de GE1 y usando la estrategia 1 de Geomatica 2013 (i.e., usando una configuración *DEM Detail=Extra High*, *Terrain type=Flat* y sin aplicar el filtro de Wallis). En esta representación se observan, en color negro, los distintos errores de

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

correlación automática que el programa reporta. En esos puntos no se realiza medición alguna por error de *matching*. La mayoría de estos puntos corresponden a invernaderos tipo malla o zonas con una vegetación muy densa.

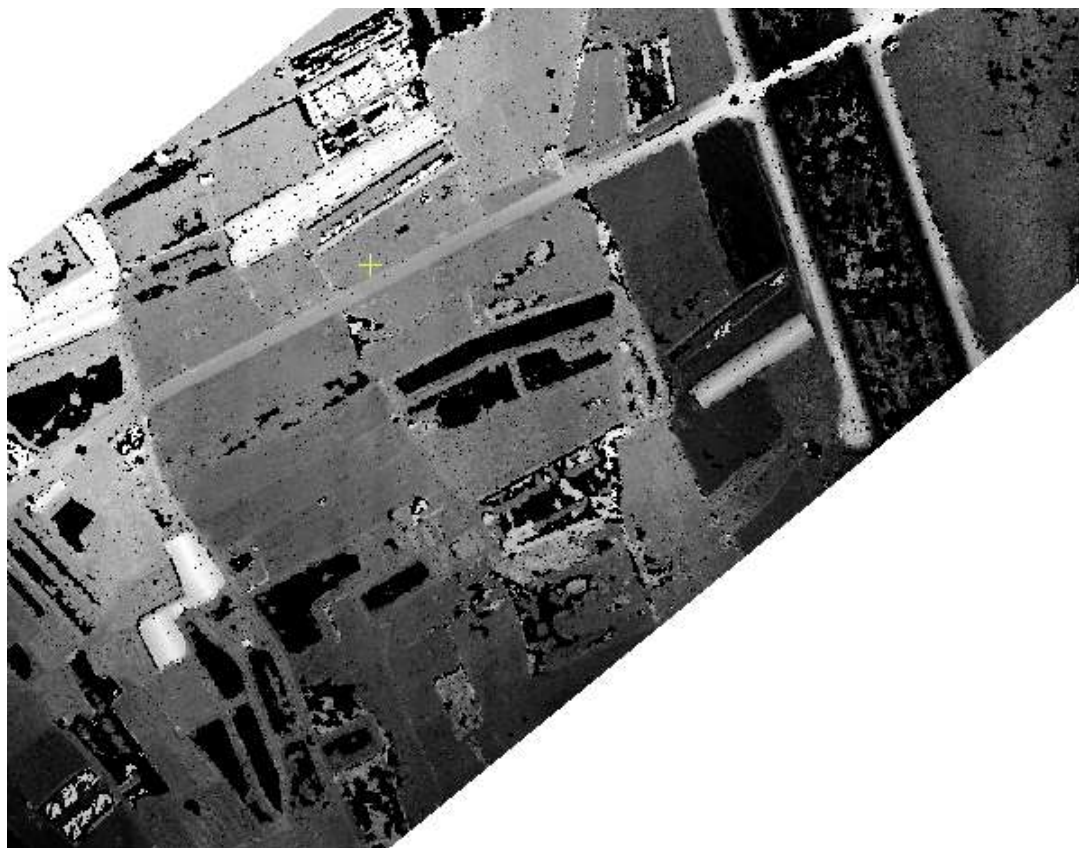


Figura 20. Imagen Focus Geomatica puntos DSM usando estrategia 1

En cuanto a la Fig. 21, se observa una imagen obtenida a partir de RapidForm donde se analiza tanto la desviación típica como la distancia media. Esta imagen pertenece a toda la zona de estudio con la estrategia 1, en la cual se observan los puntos en los que se puede realizar una correcta comparación con el DSM correspondiente al LiDAR (i.e. puntos donde se ha extraído correctamente el DSM a partir del estéreo par de GE1) y aquellos puntos que su comparación no realizan una medición correcta (huecos). Los mayores errores (valores amarillos y rojos) se producen principalmente en los invernaderos de malla, donde el DSM extraído de GE1 presenta cosas correspondientes al suelo y no a la cubierta. También se han obtenido zonas con errores altos en algún invernadero que en 2009 estaba cubierto y en 2011 estaba descubierto debido a una renovación del plástico (esquina inferior izquierda).

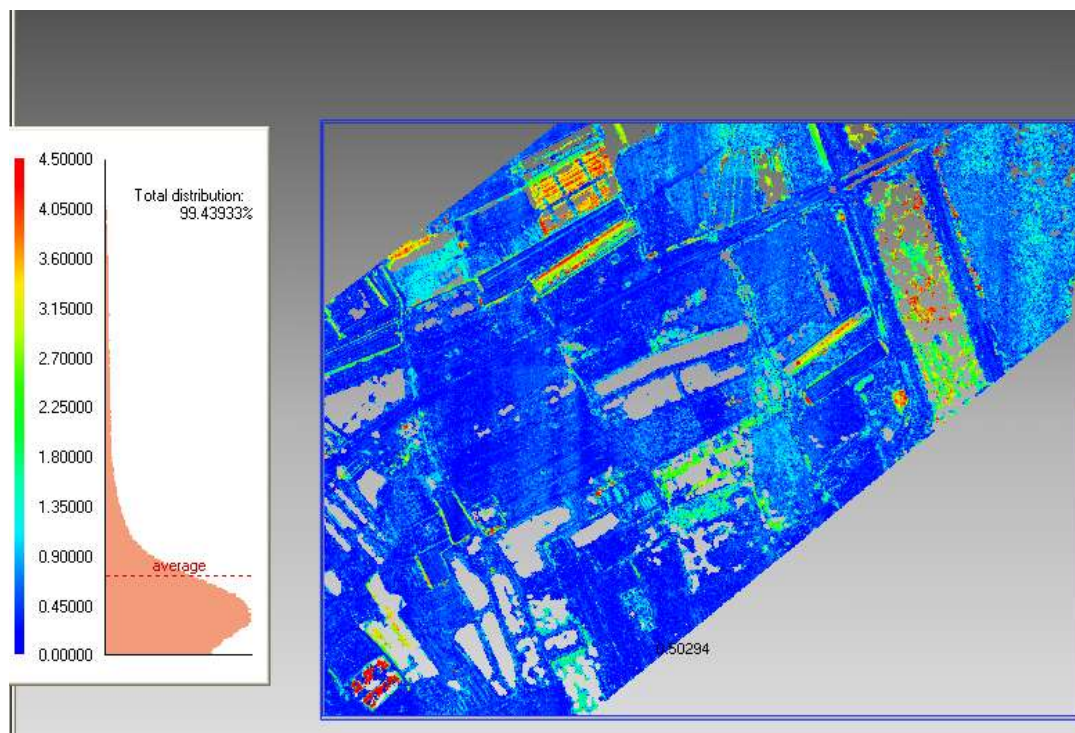


Figura 21. Imagen RapidForm puntos DSM estrategia 1 PAN 2013

En general no hay ninguna estrategia de las que se han analizado en Geomatica 2013 que mejore los resultados globales obtenidos con la PAN2012, referidos tanto a error vertical como a completitud. En este sentido sólo se pueden ver casos puntuales que mejoren esos resultados.

Para los distintos DSMs y diferentes estrategias analizadas se observa que en todas se presenta una curva similar de valores para Distancia Media, Desviación Estándar y Completitud. Esto quiere decir que los picos de las curvas para la precisión vertical (Desviaciones Estándar elevadas) se producen cuando las completitudes son también más altas en las mismas estrategias. Esto quiere decir que, aunque una elevada completitud indica que se miden más puntos por correlación automática (i.e. quedan menos huecos sin puntos 3D en el DSM), los puntos medidos tienen una pérdida de precisión vertical.

5.2. INVERNADEROS

En la siguiente figura (Fig. 22) se muestra el análisis de distancia media para todos los invernaderos instalados en la zona de estudio, tanto tipo malla como tipo plástico. Por lo general, todos los valores de distancia media reportados por la versión de Geomatica 2013 superan los valores obtenidos mediante la versión antigua, por lo

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

que, en cuanto a distancia media analizada para los invernaderos de la zona, no se mejora la versión anterior del software empleado.

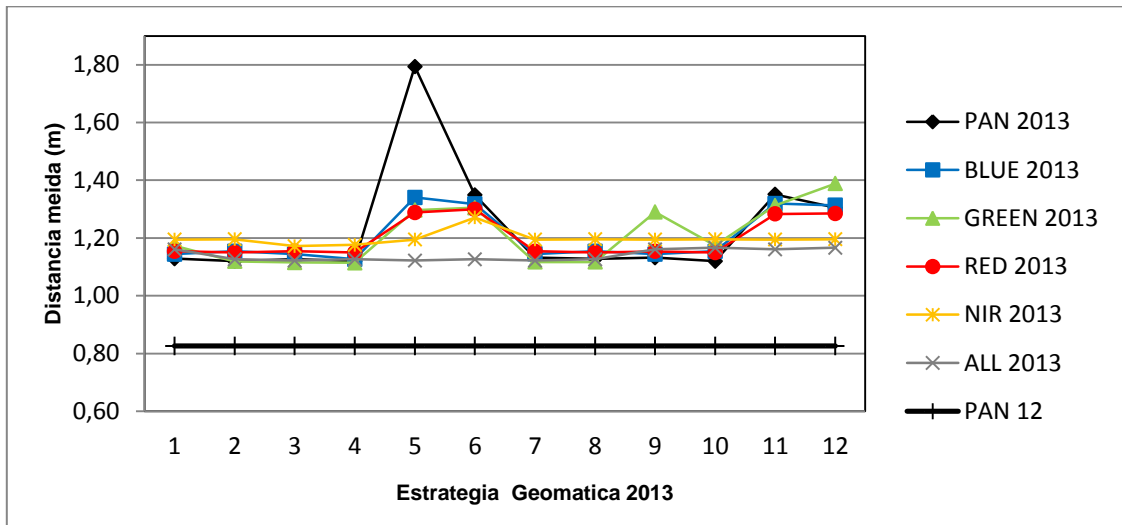


Figura 22. Media de puntos obtenidos para todos los invernaderos de la zona (malla y plástico)

En cuanto a la Fig. 23, se observa el análisis de datos de desviación típica, para invernaderos en la zona de estudio tanto tipo malla y plástico- Para este análisis se observa la misma tendencia de resultados que para la distancia media, por lo que los datos obtenidos por la versión nueva para invernaderos son mayores que para la versión nueva del software empleado. Por tanto, no se mejora la anterior versión de Geomatica.

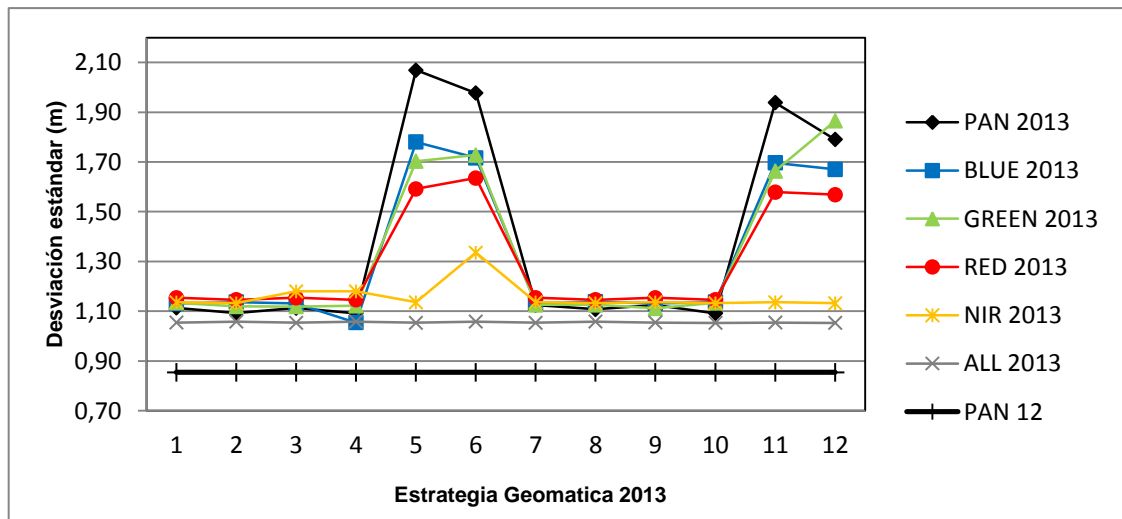


Figura 23. Distribución de los datos de desviación estándar para todos los invernaderos de la zona (malla y plástico)

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

En la Fig. 24 se observa un análisis de datos para la completitud de los invernaderos de la zona. Se observa que, por lo general, todos los porcentajes de completitud reportados por la versión 2013 tienen un valor inferior con respecto que los valores obtenidos por la PAN2012, a excepción de la banda Green con la estrategia 12. Por ello, los resultados en cuanto a completitud tampoco mejoran a los obtenidos por la versión antigua, ya que se obtiene un menor porcentaje de puntos analizados por el DSM.

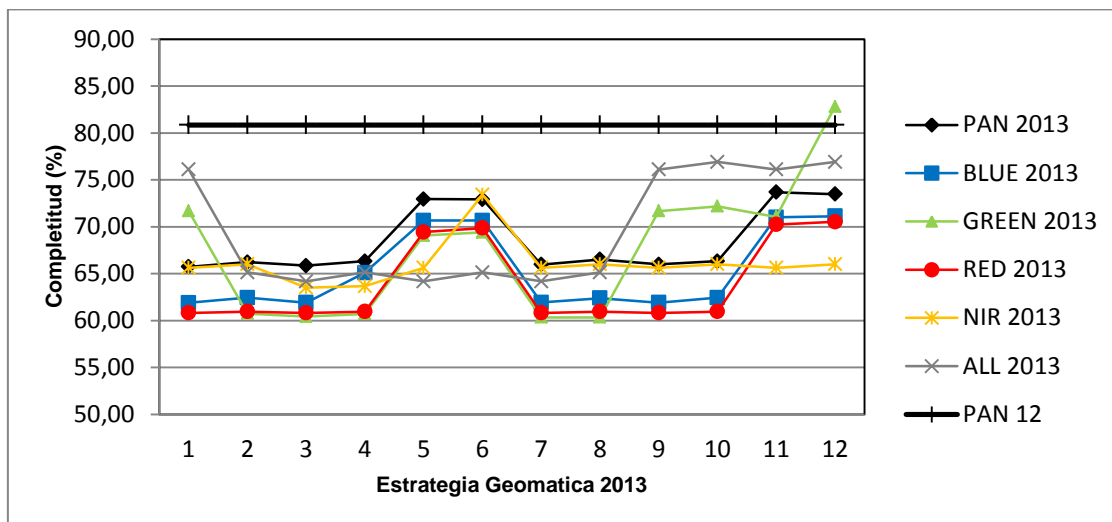


Figura 24. Representación de forma estadística de la completitud obtenida para todos los invernaderos de la zona (malla y plástico)

La Fig. 25 se corresponde con una imagen obtenida a partir de Focus de Geomatica, en la cual se puede observar la imagen del recorte realizado para los invernaderos, tanto tipo malla como plástico, que se encuentran en la zona. Esta figura muestra el caso de la estrategia 1, usando todas las bandas de la imagen pansharpened. En la figura se observa de forma clara que hay muchos puntos de la imagen que no obtienen resultados. La mayor parte de estos fallos de correlación del DSM generado a partir del estéreo par de GE1 se corresponden a invernaderos tipo malla.

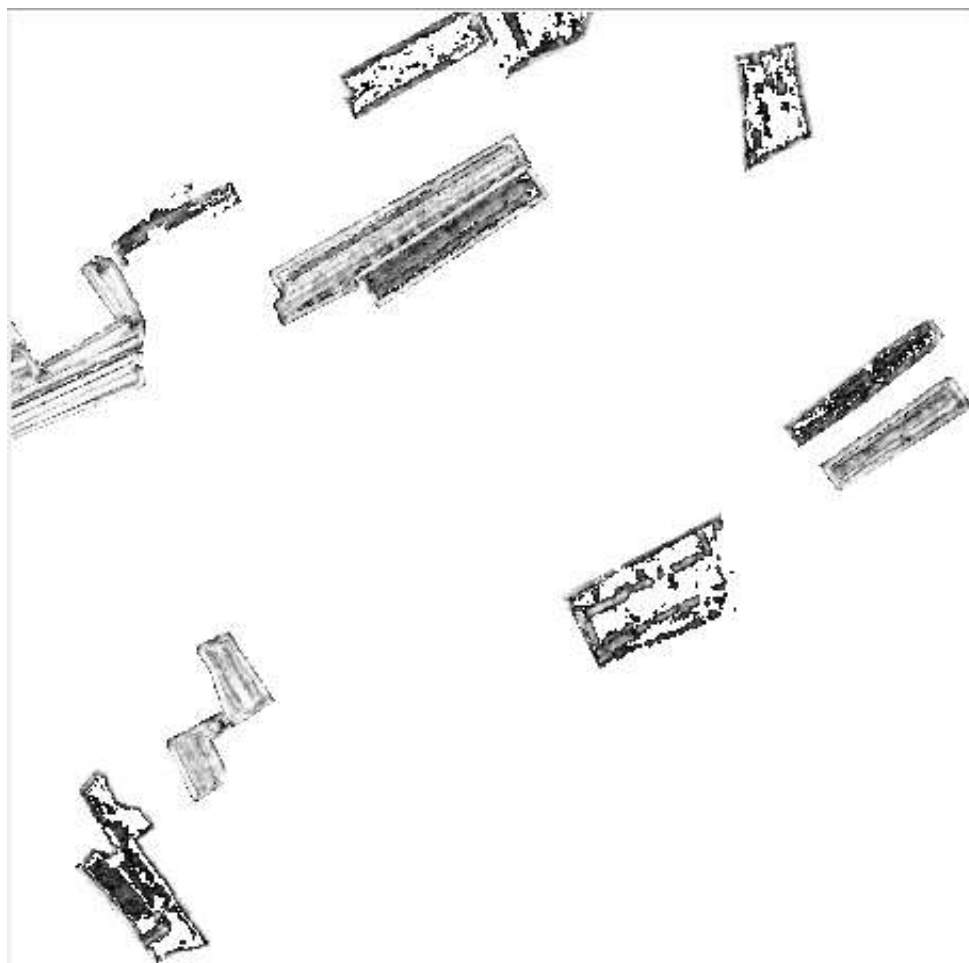


Figura 25. DSM de los invernaderos malla y plástico representados en Focus (Geomática). Estrategia 1, todas las bandas (ALL 2013).

La Fig. 26 representa la comparación entre DSMs (satélite VHR y LiDAR) analizada mediante RapidForm. Concretamente se realiza una comparación entre el DSM LiDAR correspondiente al recorte de los invernaderos de la zona y el DSM obtenido por la versión 2013 para la estrategia 1 y todas las bandas (ALL). En la imagen se observa que hay muchos puntos donde no se puede obtener una correcta medición de puntos para la precisión vertical. La mayoría de esos puntos se corresponden con invernaderos tipo malla.

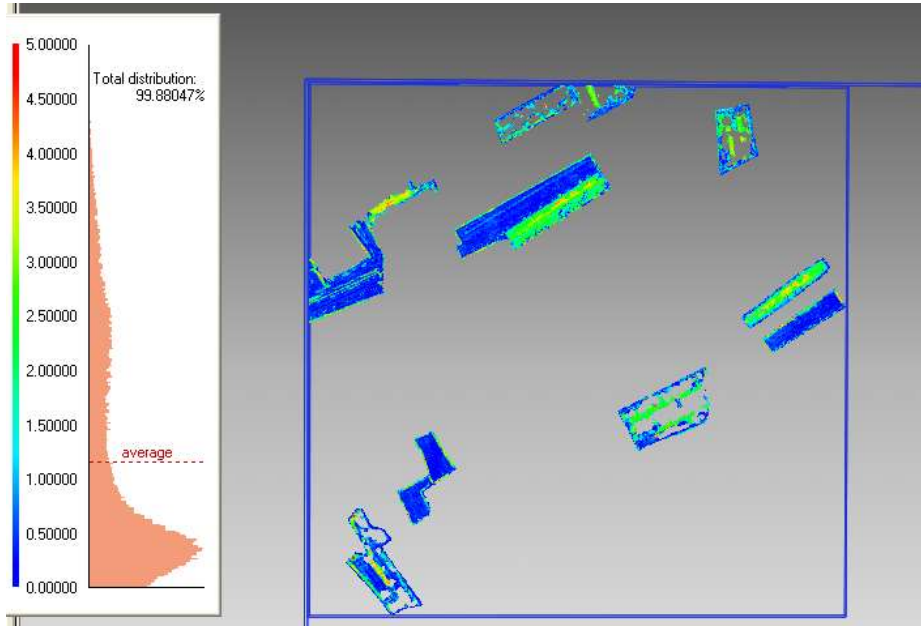


Figura 26. Invernaderos RapidForm puntos DSM estrategia 1 ALL 2013

5.3. INVERNADEROS TIPO MALLA

La Fig. 27 presenta el análisis de datos sobre distancia media para invernaderos tipo malla que se encuentran en la zona de estudio, donde se comparan todas las estrategias analizadas por la versión 2013 con la PAN 2012. En estos resultados, la versión nueva obtiene datos de mayor valor que la versión anterior en general, por lo que estadísticamente reporta peores resultados que la versión antigua.

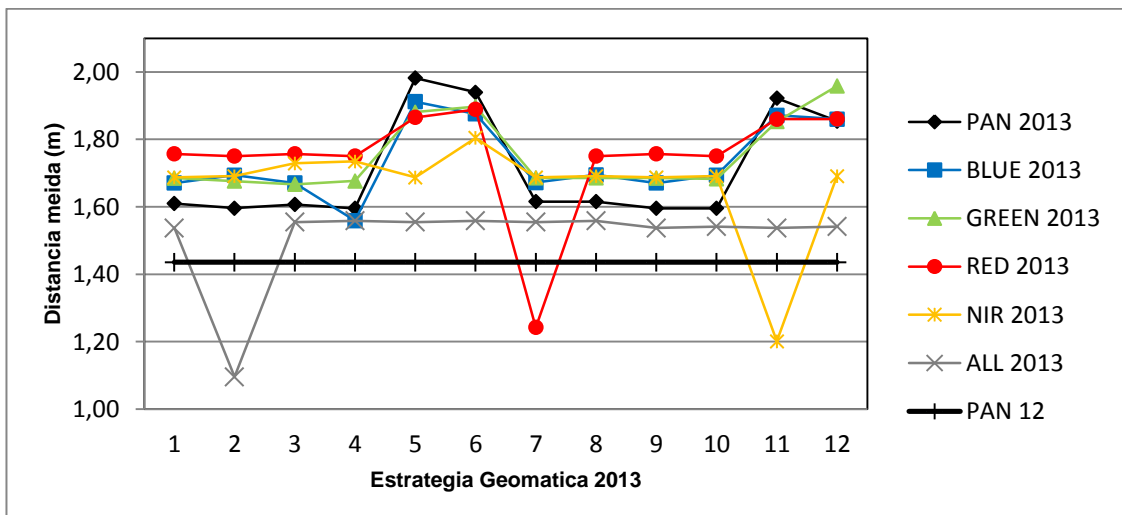


Figura 27. Distribución mediante datos estadísticos de la media de puntos obtenidos para los invernaderos tipo malla de la zona de estudio

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

En la Fig. 28 analiza la desviación típica para invernaderos tipo malla de la zona de estudio. En este análisis de datos reportados por Geomatica, se observa que estos datos para la versión 2013 son mayores que para la versión 2012, por tanto estos valores estadísticos indican que los datos proporcionados por la PAN 2012 son mejores que los de la versión 2013 para todas las estrategias ensayadas.

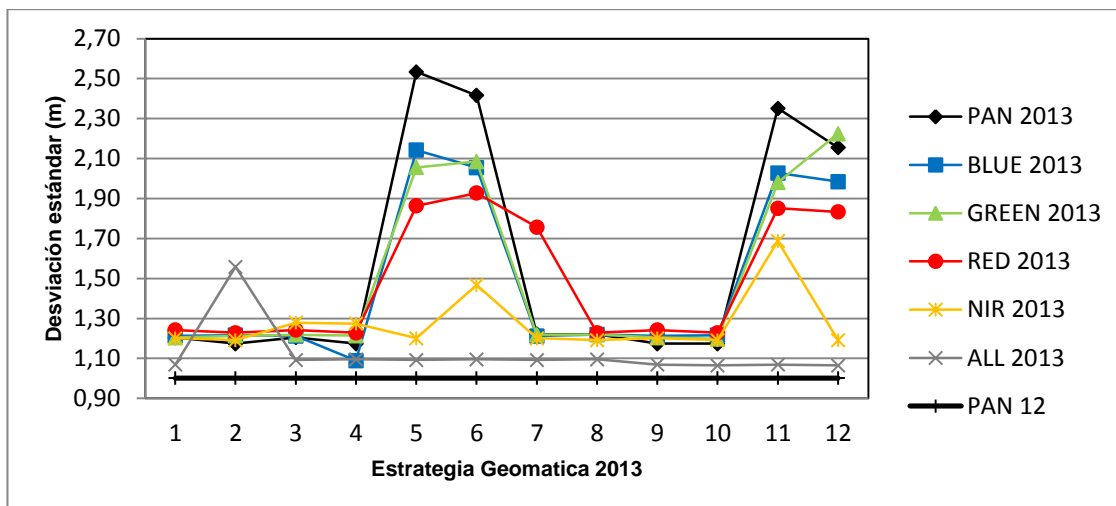


Figura 28. Representación de los datos de desviación estándar para los invernaderos tipo malla de la zona de estudio

En la Fig. 29 se puede observar los datos analizados en cuanto a completitud para los invernaderos tipo malla que se encuentran en la zona, en este análisis se observa que globalmente se obtienen valores de porcentajes inferiores de la versión 2013 que la de la PAN 2012, por lo que hay menores puntos medidos en la versión 2013. Sólo en dos casos puntuales mejoran la PAN 2012. Incluso se observa que hay valores de completitud inferior al 50% para varias de las bandas y estrategias analizadas. Esto se debe a que los invernaderos tipo malla, debido a su transparencia, originan los peores resultados de *matching* automático.

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

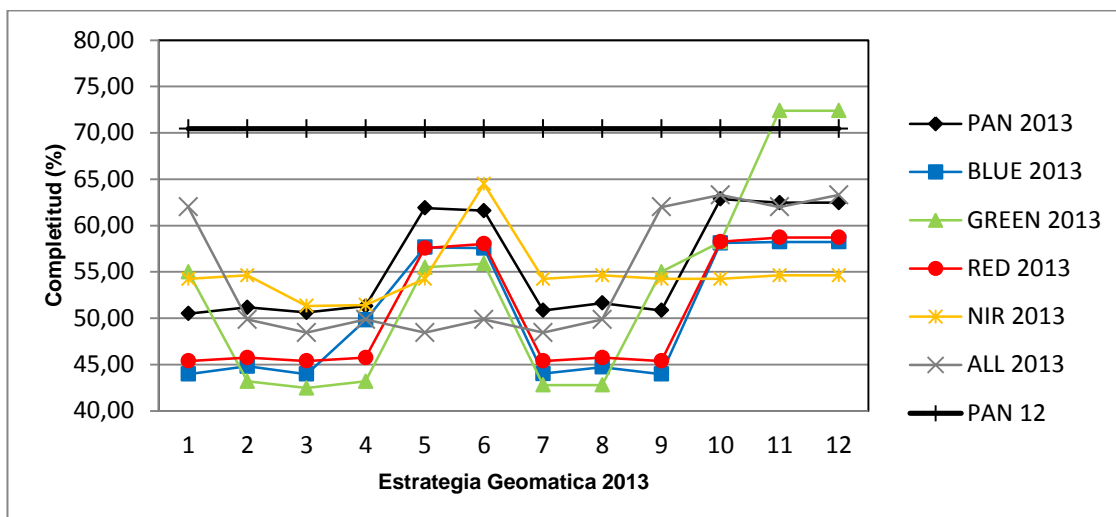


Figura 29. Representación de la completitud obtenida para los invernaderos tipo malla de la zona de estudio

Para la siguiente figura (Fig. 30) se presenta una imagen obtenida a partir del módulo Focus de Geomatica que proporciona una imagen del DSM extraído, el cual se corresponde con el DSM que incluye el recorte de los invernaderos tipo malla de la zona para la estrategia 1. En la imagen se observa que los invernaderos tipo malla tienen muchos fallos en la computación del matching automático y apenas presentan puntos correctamente medidos sobre los invernaderos seleccionados. Además, muchos de los puntos medidos por correlación, donde el score channel es mayor de 50, se encuentran posados en el suelo y no en el techo de este tipo de invernaderos.

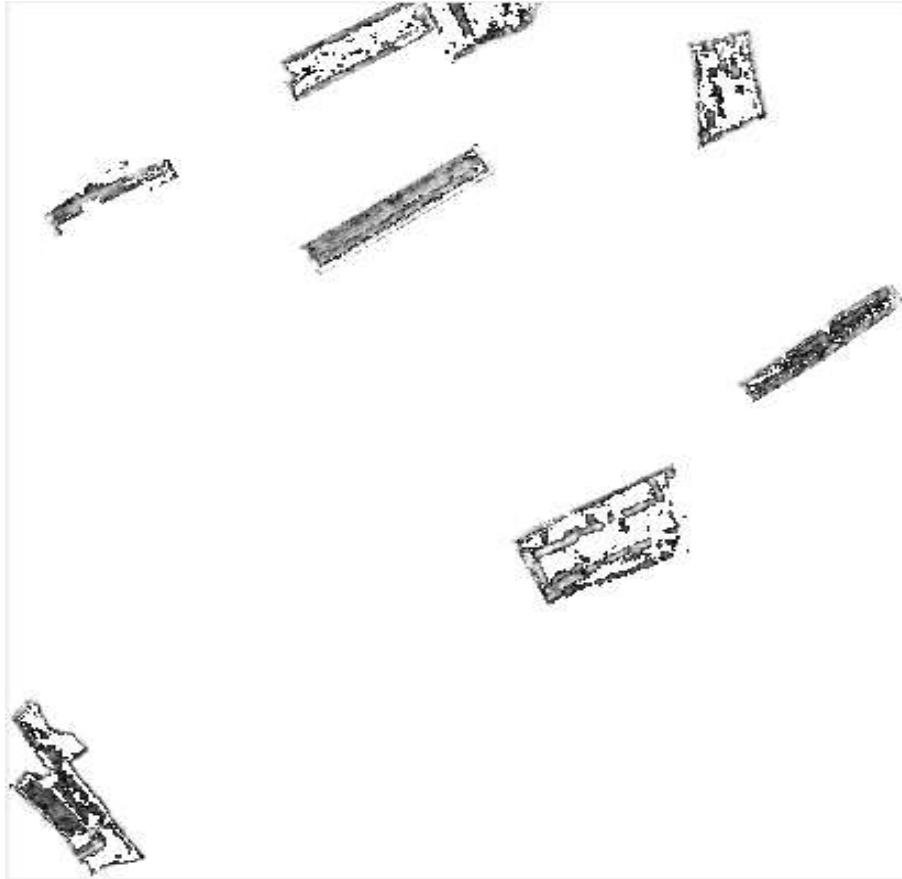


Figura 30. Invernaderos malla Focus Geomatica puntos DSM estrategia 1 ALL 2013

En la Fig. 31 se observa una imagen proporcionada por el software RapidForm en la cual se observa una comparación entre el DSM LiDAR y el DSM de Geomatica 2013 con la estrategia 1, ambos con el recorte para invernaderos tipo malla. La imagen verifica la falta de correlación de datos dentro de invernaderos tipo malla, y el error en la medición de puntos, que sitúa mediciones en el suelo del invernadero en lugar de en la cubierta.

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

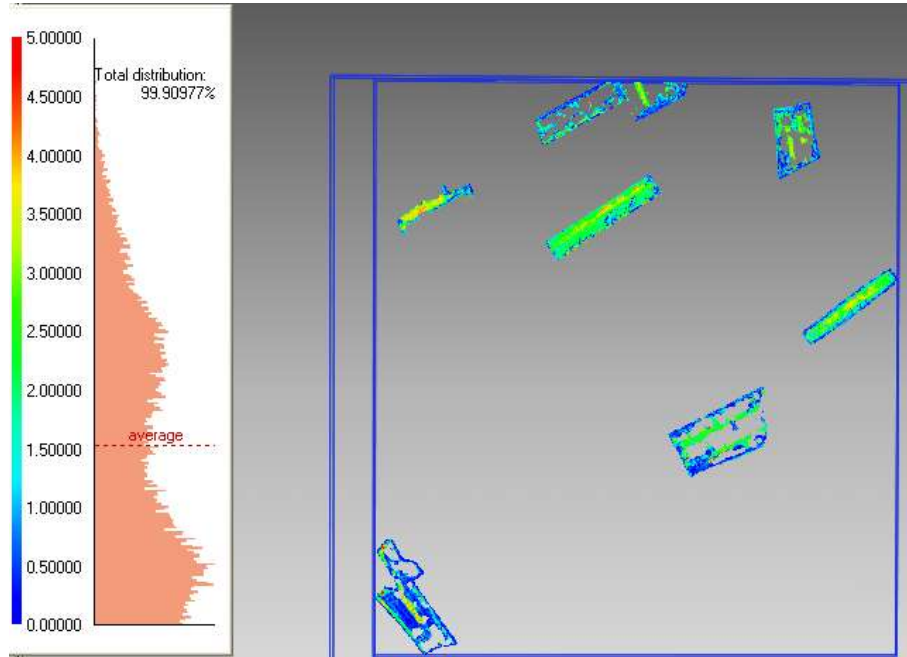


Figura 31. Invernaderos malla RapidForm puntos DSM estrategia 1 ALL 2013

5.4. INVERNADEROS TIPO PLÁSTICO

Para la Fig. 32 se ha realizado un análisis de la distancia media para invernaderos tipo plástico donde en general los resultados proporcionados por la versión del software de 2013 para la mayoría de las estrategias y bandas analizadas tienen menor valor que la de 2012, por lo que se obtiene un mejor resultado de forma estadística que la versión antigua.

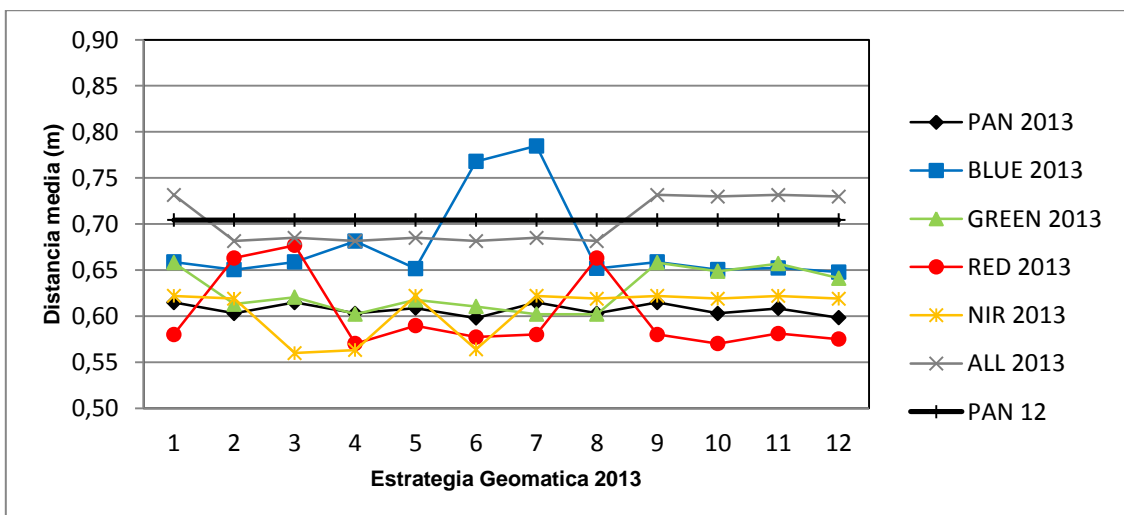


Figura 32. Representación de la media de puntos obtenidos para los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

En la siguiente figura (Fig. 33) se ha realizado un análisis sobre la desviación típica de los datos obtenidos de invernaderos tipo plástico de la zona. En este estudio los resultados reportados mediante la versión 2013 tienen menor valor que los reportados por la versión 2012 en general, por tanto, los resultados obtenidos por la nueva versión mejoran la versión antigua para la precisión vertical.

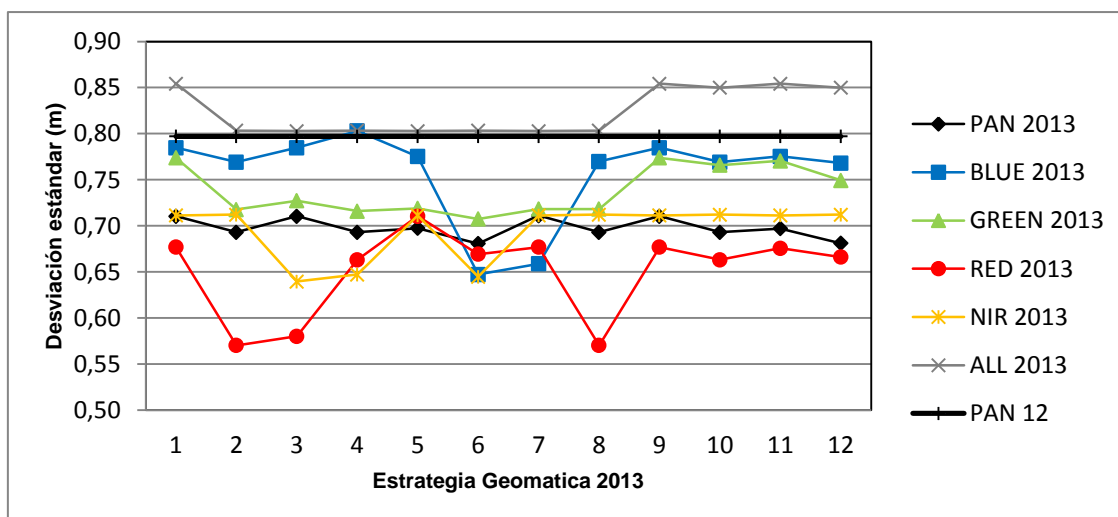


Figura 33. Datos de desviación estándar para los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio.

En la Fig. 34 se puede observar la completitud analizada para los datos reportados por invernaderos tipo plástico de la zona, donde para la mayoría de casos analizados no se mejora la completitud. Sin embargo, para la banda *Green* y las estrategias 1, 9, 10 y 12 se mejoran todos los resultados globales, es decir, error vertical (tanto Distancia Media como Desviación Estándar) y completitud en comparación con los resultados reportados por el algoritmo de la versión 2012 en la imagen PAN. Analizando esta mejora, no hemos encontrado ningún elemento del set de parámetros estudiado en la versión 2013 que influya claramente en estos resultados (i.e. no podemos señalar que el responsable directo de esta mejora sea el filtro de Wallis, tipo de terreno o el detalle del DSM elegido, *High* frente a *Extrahigh*). De hecho, los resultados resultan muy variables y poco predecibles. Quizás el reducido número de invernaderos de la zona influyan en esta falta de fiabilidad en los resultados.

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

También se observa que la banda *ALL* mejora en completitud lo mismo que la banda *Green*, pero esta mejora no se observa para la precisión vertical. En este caso se sigue con una influencia en la curva similar, pero con el resultado contrario, es decir, donde se produce una mejor completitud en esta banda se pierde en precisión vertical.

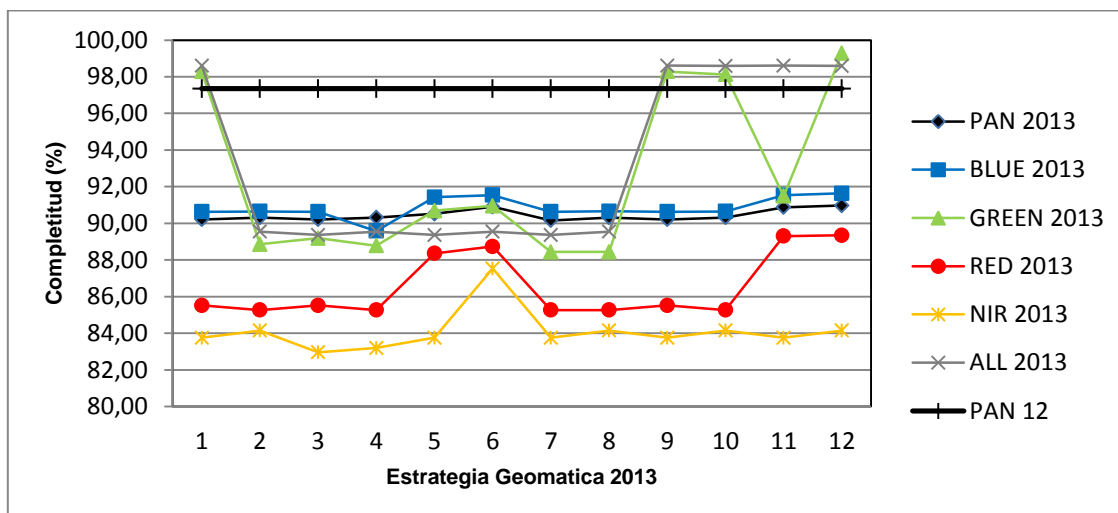


Figura 34. Representación de la completitud obtenida para los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio

En la Fig. 35 se observa una imagen obtenida mediante el módulo Focus de Geomatica a partir del DSM realizado a partir de la banda verde de las imágenes pansharpened de GE1, con el recorte para los invernaderos tipo plástico de la zona y con la estrategia 1. En esta imagen se confirma un alto porcentaje de puntos correctamente medidos.

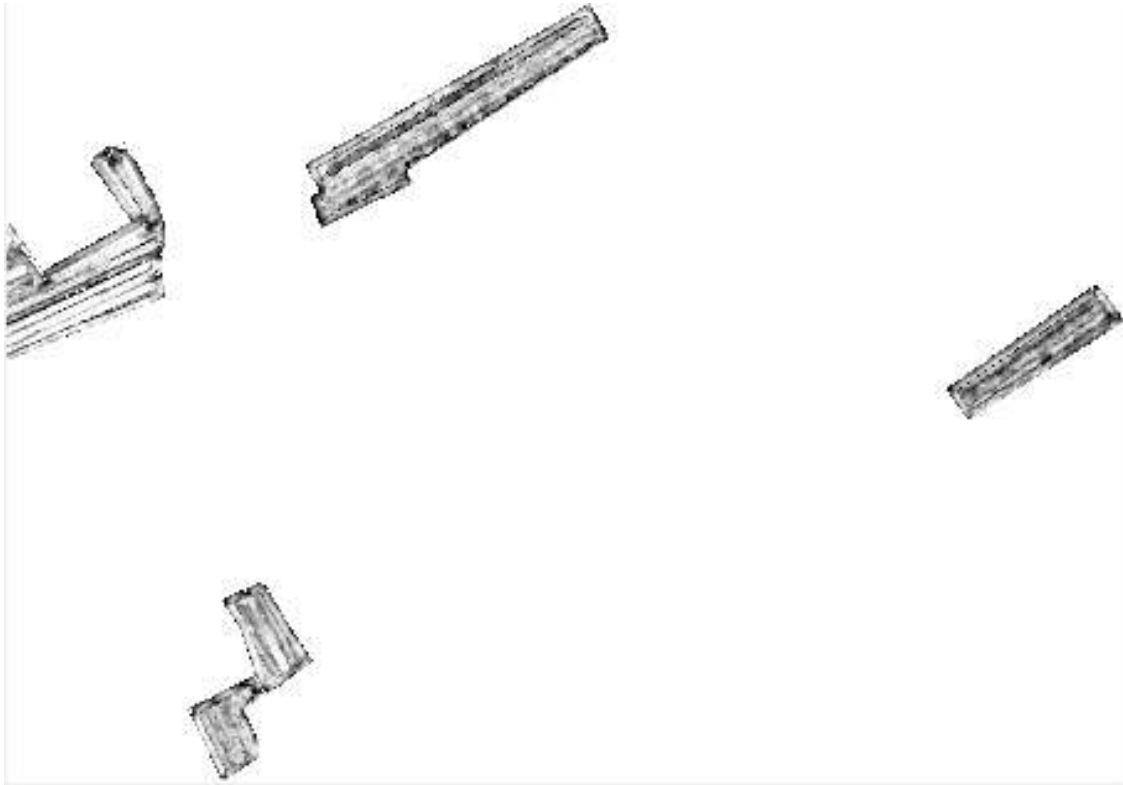


Figura 35. Invernaderos plástico Focus Geomatica puntos DSM estrategia 12 GREEN 2013

Para la siguiente figura (Fig. 36) se observa una imagen proporcionada por RapidForm donde se realiza una comparación entre el DSM LiDAR y el DSM de Geomatica 2013 para la estrategia 1 banda Green. Ambos DSMs se muestran para el recorte de invernaderos tipo plástico de la zona. En la imagen se puede observar de nuevo que hay un alto porcentaje de puntos que producen una medición correcta, ya que son invernaderos de plástico y para este tipo de cubierta no se suelen cometer errores de correlación. Por lo que estos resultados obtenidos sobre invernaderos de plástico mejoran en general los resultados analizados en las situaciones anteriores para cada uno de los parámetros analizados en este trabajo (Distancia media, Desviación estándar y completitud).

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

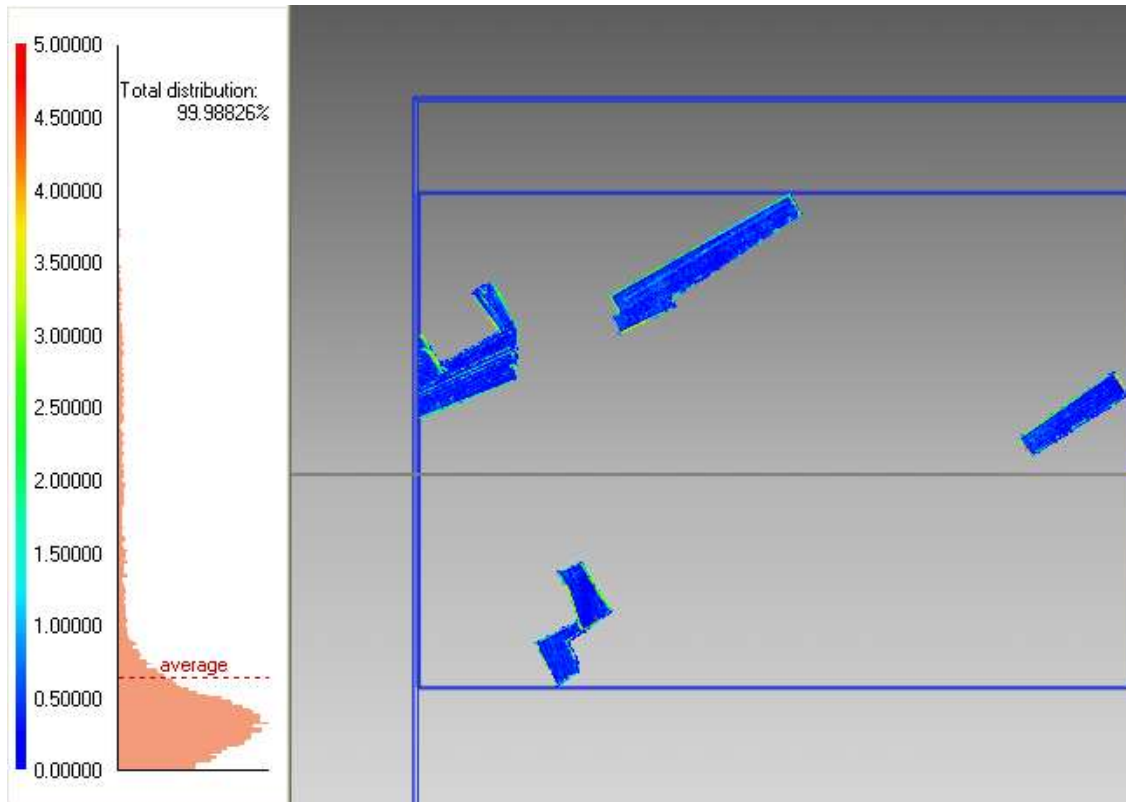


Figura 36. Invernaderos plástico RapidForm puntos DSM estrategia 12 GREEN 2013

CAPÍTULO 6.

DISCUSIÓN

6. DISCUSIÓN

En este estudio se comparan los resultados de calidad de DSMs extraídos a partir de estéreo pares puros de GE1, tanto PAN como pansharpened, extraídos mediante OrthoEngine con la versión 2013 de Geomatica usando diferentes estrategias, con los obtenidos a partir de la versión 2012 de ese software y en la que solo se trabajó con imágenes PAN. Los resultados muestran que para la versión 2013, no hubo una mejora global comparada con la versión anterior. De hecho los resultados dependieron de que el tipo de invernadero extraído fuese de malla o plástico.

La calidad de los DSMs medida tanto en precisión vertical como en completitud, dependen en gran medida de parámetros de adquisición de las imágenes (sensor del satélite y la elevación del sol), de la orientación de la imagen, de la elección de los GCPs, la estrategia de *matching* llevada a cabo y las características del terreno (Poli y Caravaggi, 2013). En nuestro caso se optó por una orientación de la imagen basada en 12 GCPs, que produjo los mejores resultados en un trabajo de investigación anteriormente llevado a cabo en la zona de trabajo y con nuestra estrategia de *matching* (Palenzuela, 2013). También el tipo de *matching* empleado es el principal asunto sobre el que se está investigando en la actualidad (Capaldo et al, 2012). Los resultados en cuanto a la calidad del DSM dependen altamente del tipo de terreno (Capaldo et al, 2012). También cabe destacar que los DSMs extraídos en este trabajo se centran en la posibilidad de medir información altimétrica en cubiertas plásticas y de mallas de invernaderos. La idea final sería usar estos DSMs para mejorar la clasificación de invernaderos basada en objetos. Es decir, intentar diferenciar estas estructuras de otras parcelas agrícolas sin cubrir en base a la altura de su DSM. Un resultado interesante es que para cubiertas plásticas, alguna de las bandas y estrategias dieron unos resultados interesantes para la versión 2013 de Geomatica, tanto para precisión vertical como para completitud.

Analizando los resultados obtenidos sobre las diferentes bandas y estrategias de la versión 2013 para la imagen de la zona de estudio y para invernaderos, se observa que, cuando los resultados de precisión vertical son mejores, los resultados de completitud empeoran. Ocurre del mismo modo al contrario cuando los resultados de completitud son buenos los resultados de precisión vertical son peores. Se produce un efecto similar que cuando Palenzuela (2013) trabajó con GE1 y WorldView-2. Para GE1 se obtuvo una precisión vertical mejor y para WorldView-2 el resultado de la completitud fue mejor.

Todos los satélites trabajan con la tecnología TDI. Para imágenes digitales que se obtienen por barrido lineal con dispositivos CCD, como las extraídas por los satélites VHR, en la cual una línea en la imagen final se compone de varias líneas más pequeñas, las cuales se llaman etapas y están captadas por el sensor en movimiento. Ya que la velocidad de movimiento de estos satélites (alrededor de 7 km/s) y a que su GSD es pequeño, el tiempo para formar estas etapas es muy pequeño. Es decir, la tecnología TDI realiza la detección de patrones de carga y los desplaza a través del dispositivo CCD para conseguir la línea final. Pero la acumulación de la señal con la tecnología TDI provoca un aislamiento de ésta, sobre todo en la dirección del vuelo, debido a que las líneas TDI no son capaces de reproducir de una forma exacta la imagen de la misma escena de la superficie analizada, por lo que se produce una mezcla de señal (Baltasvias et al., 2001). Esto provoca pérdida de datos por la precisión de la imagen. En nuestro caso GE1 utiliza 16 etapas, estas etapas provocan la precisión de la imagen en aspectos operacionales en cuanto a la adquisición de ésta, que también pueden ser causados por las condiciones climáticas a la hora de la adquisición de la imagen o errores propios en los sensores. También se debe continuar investigando en esta línea con el empleo de otro software empleando diferentes tipos de *matching* a las imágenes del estéreo par, la orientación de las imágenes obtenidas y las diferencias radiométricas entre los sensores de satélite probados ya que pueden afectar tanto a la precisión vertical y a la completitud del DSM.

CAPÍTULO 7.
CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos realizado los análisis oportunos para la evaluación de la precisión vertical de los DSMs extraídos a partir de estéreo pares formados por imágenes PAN y Pansharpened del satélite VHR GE1. Para la orientación de los estéreo pares se utilizaron 12 GCPs y un modelo de sensor RPC0. Una vez realizada la triangulación se procedió a la extracción de DSMs en la zona de estudio utilizando diferentes estrategias. Los DSMs generados presentaron unas precisiones verticales medidas como desviaciones estándar que oscilaron para toda la zona de estudio entre los 0.72 m y los 1.20 m. Aislando únicamente todos los invernaderos de la zona (malla y plástico) las precisiones verticales variaron entre los 1.05 m y 2.07 m. Para los invernaderos tipo malla las desviaciones estándar estuvieron entre los 1.07 m y los 2.53 m, mientras que en los invernaderos tipo plástico, las precisiones mejoraron hasta situarse entre los 0.57 m y los 0.85 m. En cuanto a la comparación de las versiones de Geomatica 2012 y 2013, de forma general y según este estudio, las distintas estrategias seguidas con la versión 2013 en cuanto al uso de bandas y diferentes parámetros del módulo de extracción, no ha mejorado la versión anterior de Geomatica en cuanto a precisión vertical, por lo que no se recomienda para futuros trabajos.

Sin embargo, se pudo observar que existe una mejoría en un caso puntual, en el que la nueva versión mejora con respecto a la versión 2012. Se trata del caso de estudio para invernaderos tipo plástico. Sobre esta superficie peculiar, casi todas las bandas y todas las estrategias presentaron mejores precisiones verticales que cuando las imágenes PAN fueron empleadas con la versión 2012. Por ello, sería interesante seguir esta línea de investigación, y probar a utilizar las diferentes bandas de la imagen pansharpened para la extracción de DSMs sobre cubiertas de invernaderos de plástico, que por otra parte son los más habituales en Almería. Sin embargo quizás fuese aconsejable ensayar otros algoritmos de matching.

En cuanto a los análisis de completitud de los DSMs que se han extraído a partir de imágenes PAN y Pansharpened mediante el modelo matemático de sensor RPC0 y con 12 GCPs, se obtuvieron valores que oscilaron, en el caso de toda la zona de estudio, entre un 70.69% y un 88.18%. Para todos los invernaderos de la zona, incluidos malla y plástico la completitud varió entre un 60.35% y 82.80%. Diferenciando los resultados para los invernaderos tipo malla y plástico, los primeros presentaron una completitud de entre el 42.47% y el 72.40%, mientras que los

invernaderos tipo plástico presentaron una completitud mucho mayor, presentando valores de superficie cubierta por los DSMs extraídos de entre el 82.96% y el 99.28%. Como ocurrió para la precisión vertical, los resultados generales de completitud no fueron mejorados por parte de la versión del software de 2013 para todas las bandas, todas las estrategias y todas las zonas estudiadas en los distintos DSMs, con respecto a la versión de 2012. Sólo se observa una pequeña mejoría en cuanto a completitud para invernaderos tipo plástico en dos bandas, como son la banda Green y ALL, y solo para algunas de las estrategias llevadas a cabo.

En general, el uso de Geomatica 2013 no reportó mejoras con respecto a la versión antigua en la calidad de los DSMs extraídos a partir de estéreo pares de GE1, ni en precisión vertical ni en completitud. Sólo se podrían recomendar algunas de las estrategias seguidas y algunas de las bandas de las imágenes pansharpened ensayadas con la versión de Geomatica 2013 sobre invernaderos cubiertos de plástico. En este trabajo de investigación se han obtenido unos resultados, tanto en precisión vertical como en completitud, que han mejorado con diferencia la antigua versión de Geomatica.

Aunque los resultados obtenidos por la nueva versión de Geomatica 2013, en la cual se han estudiado diferentes parámetros novedosos que la diferenciaban de la antigua versión, no han sido tan buenos como se esperaba sobre la zona de estudio, se pretende continuar investigando en esta línea en posteriores estudios, incluyendo satélites VHR como GE1 o WorldView-2. También resultaría muy interesante analizar otros tipos de matching, además de analizar otro tipo de orientación de la imagen empleando diferentes grupos de GCPs.

CAPÍTULO 8.
BIBLIOGRAFÍA

8. BIBLIOGRAFÍA

Agüera, F., Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., 2006. Detecting greenhouses changes from QuickBird imagery on the Mediterranean coast. *International Journal of Remote Sensing*, 27(21): 4751-4767.

Agüera, F., Aguilar, F.J., Aguilar, M.A., 2008. Using texture analysis to improve per-pixel classification of very high resolution images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(6): 635-646.

Aguilar, F.J., Agüera, F., Aguilar, M.A., Carvajal, F., 2005. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on Grid DEM accuracy. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 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., 2007. Geometric accuracy assessment of QuickBird basic imagery using different operational approaches. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 73, no. 12, pp. 1321-1332.

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

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Saldaña, M.M., Fernández, I., 2012. Geopositioning accuracy assessment of GeoEye-1 Panchromatic and Multispectral imagery. *Photogramm. Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 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.

Aguilar, M.A., Saldaña, M.M., Aguilar, F.J., 2014. Generation and Quality Assessment of Stereo-Extracted DSM from GeoEye-1 and WorldView-2 Imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 52 (2), pp. 1259 - 1271

Al-Khudhairy, D.H.A., Caravaggi, I., Giada, S., 2005. Structural Damage Assessments from Ikonos Data Using Change Detection, Object-Oriented Segmentation, and Classification Techniques. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71(7): 825-837.

Alobeid, A., Jacobsen, K., Heipke, C., 2010. Comparison of Matching Algorithms for DSM Generation in Urban Areas from IKONOS Imagery. Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.76, no. 9, pp.1041-1050.

Anuario de Estadística del Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino. <http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/> (último acceso 15/12/2013).

Astrium España. <http://www.astrium.eads.net/es/programas/ingenio.html> (último acceso 12/12/2013)

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 International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Workshop "High Resolution Mapping from Space", Hannover, Germany, Sep. pp. 19-21.

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. Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 44, no. 1, pp. 41-53.

Castillejo-González, I.L., García-Castillo, R., García-Ferrer, A., Sánchez de la Orden, M., López-Granados, F., 2009. Grado de influencia de las variables espectrales y de forma en la detección de olivos mediante técnicas basadas en objetos. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Calatayud.

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

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

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.

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.

d'Angelo, P., Reinartz, P., 2011. Semiglobal matching results on the ISPRS stereo matching benchmark. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.38(4/W19), (on CD-ROM).

Davis, C. H., Wang, X., 2003. Planimetric accuracy of Ikonos 1 m panchromatic orthoimage products and their utility for local government GIS basemap applications. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 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.

Doloff, J., Settergren, R., 2010. An assessment of WorldView-1 positional accuracy based on fifty contiguous stereo pairs of imagery, *Journal of Photogrammetric Engineering and 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.

FAO 2002. *El cultivo protegido en clima mediterráneo*. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal 90, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 2002.

Fraser, C.S., 2002. 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., 2002a. Processing of Ikonos for submetre 3D positioning and building extraction. *International Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 177- 194.

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

Fraser, C.S., Ravanbakhsh, M., 2009. Georeferencing Accuracy of GeoEye-1 Imagery. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 75, no. 6, pp. 634-638.

Gamba, P., Dell'Acqua, F., Lisini, G., Trianni, G., 2007. Improved VHR urban area mapping exploiting object boundaries. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(8): 2676-2682

GeoEye, Inc., 2009. GeoEye Product Guide. http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/brochures/GeoEye_Product_Guide.pdf (último acceso 16/12/2013).

Grodecki, J., Dial, G., 2003. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 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.

Jin, X., Davis, C.H., 2005. An integrated system for automatic road mapping from high-resolution multi-spectral satellite imagery by information fusion. *Information Fusion*, 6: 257-273.

Kay, S., Spruyt, P., Alexandrou, K., 2003. Geometric quality assessment of orthorectified VHR space image data *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, no. 5, pp. 484-491.

Kim, T., Lee, T. Y., Kim, K. O., 2006. Semiautomatic building line extraction from Ikonos images through monoscopic line analysis. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72: 541-549.

Lee, S. D., Shan, J., Bethel, J., 2003. Class-guided buildings extraction from Ikonos imagery. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(2): 143-150.

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. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 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. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 75, no. 9, pp. 1119-1125.

Martínez-Casasnovas, J.A., Concepción Ramos, M., Vallés, D., 2009. Análisis de la relación entre las propiedades del suelo, el índice de vigor del cultivo y el rendimiento en un viñedo de la D.O. Costers del Segre (Lleida). XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Calatayud.

Mayunga, S. D., Coleman, D. J., Zang, Y., 2007. A semi-automated approach for extracting buildings from QuickBird imagery applied to informal settlement mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 28(10): 2343-2357

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 American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Conference*, San Diego, California, April 26-30.

Montalbán, M.A., 2013. Detección remota de invernaderos a partir de estéreo pares PAN y MS del satélite WorldView-2 aplicando técnicas de clasificación basada en objetos. Proyecto fin de Carrera Universidad de Almería.

Nichol, J., Lee, C.M., 2005. Urban vegetation monitoring in Hong Kong using high resolution multispectral images. *International Journal of Remote*, 26(5): 903-918.

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., Caravaggi, I., 2013. 3D modeling of large urban areas with stereo VHR satellite imagery: lessons learned. Natural Hazards, DOI 10.1007/s11069-013-0583-4.

Poon, J., Fraser, C.S., Chunsun, Z., Li, Z., Gruen, A., 2005. Quality assessment of digital surface models generated from IKONOS imagery. Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 20, no. 110, pp. 162-171.

Poon, J., Fraser, C.S., Zhang, C., 2007. Digital surface models from high resolution satellite imagery. Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 73, no. 11, pp. 1225-1232.

Palenzuela, M., 2013. Generación de modelos digitales de elevaciones en zonas agrícolas a partir de imágenes comerciales de satélite de alta resolución. Proyecto fin de Carrera Universidad de Almería.

Torrens, M. 2006. *El sector de Invernaderos en Marruecos*. Instituto Español de Comercio Exterior (ICEX). Nota Sectorial, 15 pp.

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. Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 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. Geoscience and Remote Sensing Society Membership, 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. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 72, no. 5, pp. 597-604.

Vicente, R., 2011. Optimización de la clasificación supervisada basada en objetos aplicada a ambientes rurales a partir de ortoimágenes de GeoEye-1. Proyecto fin de Carrera Universidad de Almería.

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.

Weber, C., Ranchin, T., 2003. Extraction of urban features in Strasbourg, France: Comparison of two fusion algorithms for Quickbird MS and Pan data. *2nd Geoscience and Remote Sensing Society Membership / International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Joint Workshop on "Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas"*.

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.

Yan, D., Zhao, Z., 2003. Road Detection from Quickbird Fused Image Using HIS Transform and Morphology. *2nd Geoscience and Remote Sensing Society Membership / International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Joint Workshop on "Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas"*.

Zhang, L., Gruen, A., 2006. Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 195-211.

ANEXO 1.

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE TRABAJO Y PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

ANEXO 1. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE TRABAJO

1. HADWARE

El hardware empleado para realizar este trabajo de investigación contenía los siguientes elementos y características:

- Estación de trabajo (Workstation): Modelo Dell XPS 502x
- Sistema operativo: Microsoft Windows 7
- Procesador: Intel Core i7-2670QM CPU
- Memoria RAM: 8.0 GB

2. SOFTWARE

Como programas informáticos empleados para este trabajo de investigación se detallan a continuación:

- Geomatica v. 2013 y v. 2012
- RapidForm 2004
- AutoCAD 2013
- Microsoft Excell 2010
- Microsoft Word 2010

2.1. GEOMATICA v.2013

En este trabajo se ha trabajado con el programa Geomatica para procesar las imágenes, ya que aporta unas características geoespaciales que son muy útiles para nuestras necesidades.

El programa Geomatica funciona a partir de módulos, en los cuales cada uno de ellos tiene un trabajo específico para realizar tareas. Estos módulos son:

- Focus
- PCI Modeler
- EASI
- OrthoEngine
- FLY

La tecnología de Base de datos Genérica que ofrece Geomatica (*Generic Data Base*, GDB) aporta la capacidad de transferir datos geoespaciales directamente, por lo que se puede importar, exportar o leer alrededor de 100 formatos ráster y vectoriales de forma directa.

Para este trabajo se ha empleado los módulos de fotogrametría (OrthoEngine) y visualización y manejo de datos georreferenciados (Focus).

OrthoEngine es una herramienta fotogramétrica diseñada para manejar de forma eficiente cargas de trabajos tanto pequeños como grandes, además de producir resultados geoespaciales de calidad. También 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 trabajos intuitivos.

Focus integra las tecnologías de PCI para la Teledetección, Procesamiento de Imágenes, SIG/Análisis Espacial, y Edición Cartográfica. Se puede emplear todas estas herramientas en un solo entorno de trabajo y visualización. Las tareas y procesamientos que necesitan más de una herramienta pueden ser 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 graduados 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.

TUTORIAL DE TRABAJO EN GEOMATICA

- OrthoEngine

1. Crear un proyecto nuevo

Para crear un nuevo proyecto se inicia el programa Geomatica y empleamos el módulo de OrthoEngine, dentro de éste seleccionamos nuevo proyecto (*File, New Project*), estos pasos los podemos ver en la Fig. 37.

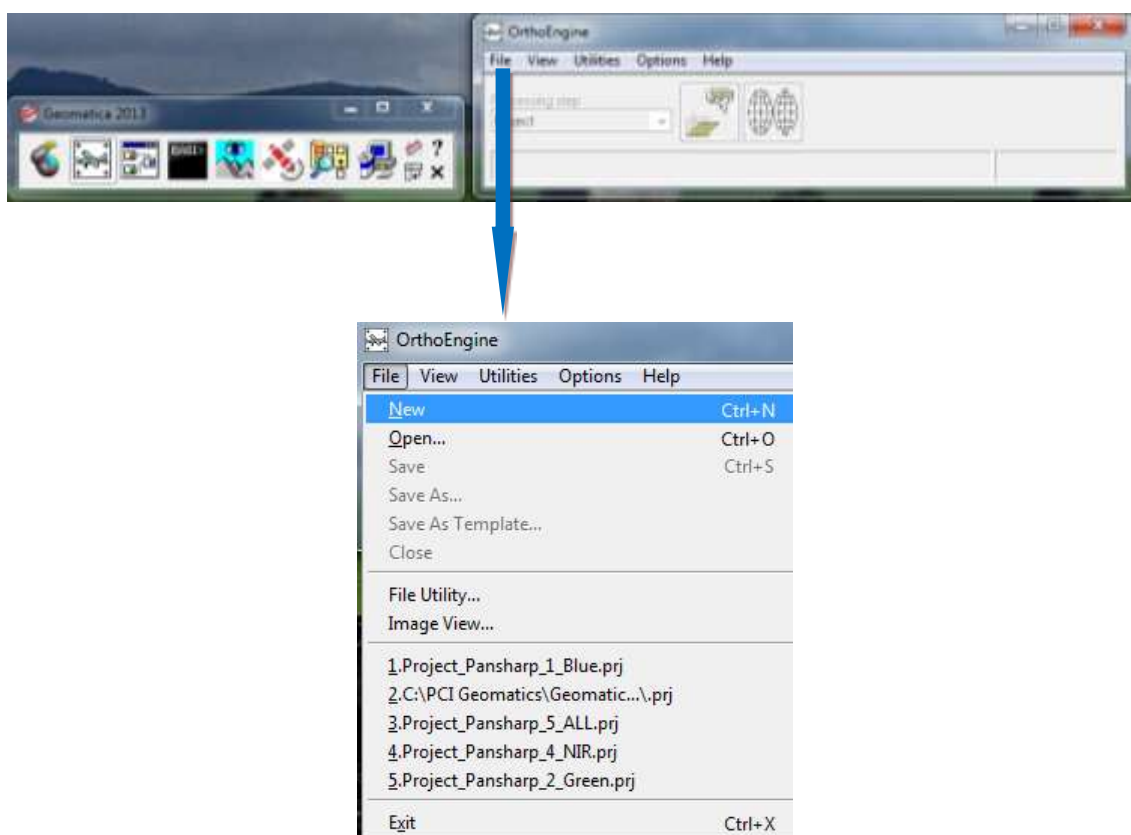


Figura 37. Pasos para abrir un nuevo proyecto en OrthoEngine

Una vez iniciado el nuevo proyecto se introducen en éste los datos necesarios para el trabajo a realizar. Estos datos que se van a introducir se refieren al sensor a emplear (paso 1, *Rational Function* en nuestro caso, Fig. 38), también a la localización de la zona de estudio (Huso, elipsoide, tamaño de píxel) que se puede ver en la Fig. 38.

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

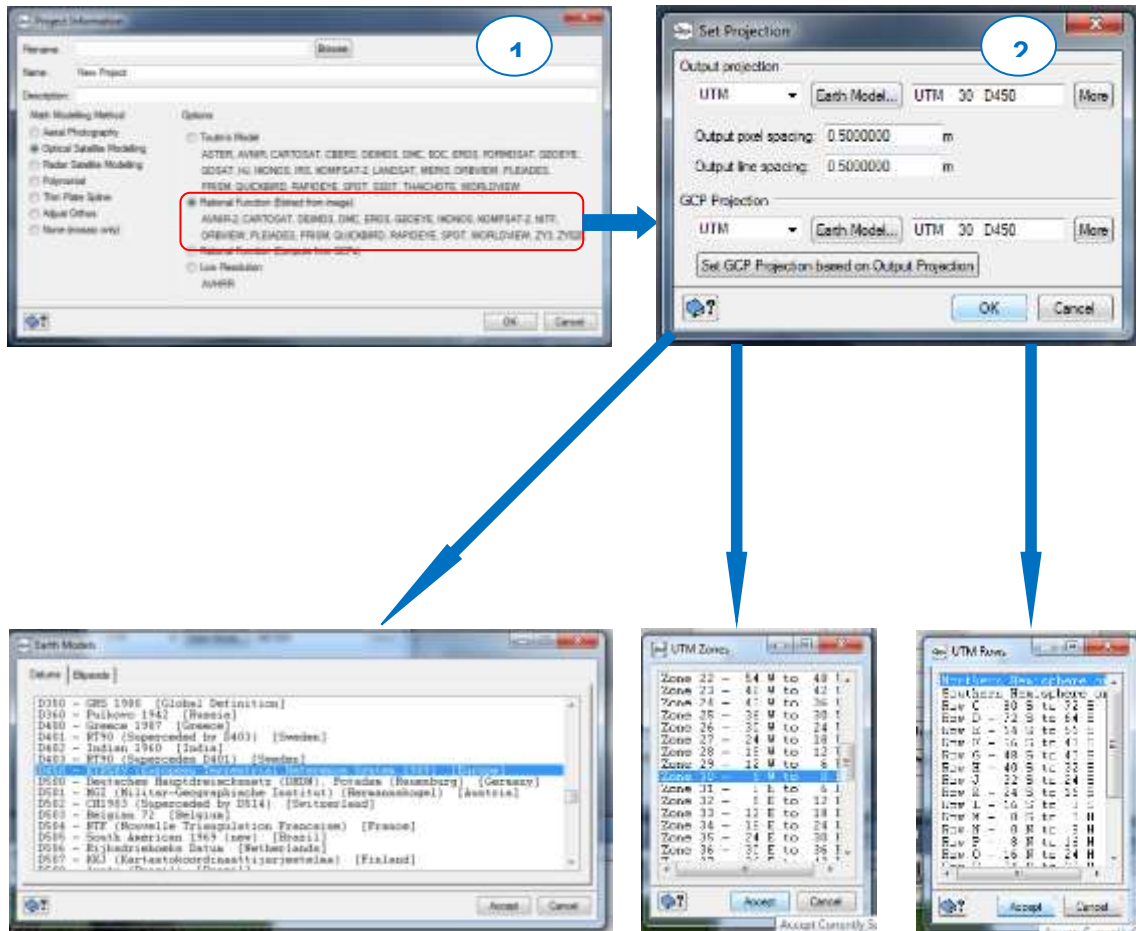


Figura 38. Pasos para insertar datos de localización

2. Introducción de imágenes para la generación de epipolares

La siguiente fase para la generación del proyecto se selecciona *Data Input*, aquí dentro se selecciona el icono *Open a New or existing image*, como se observa en la Fig. 39, así se introducen las dos imágenes PAN y Pansharpened que compondrán las Epipolares que se van a generar.

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

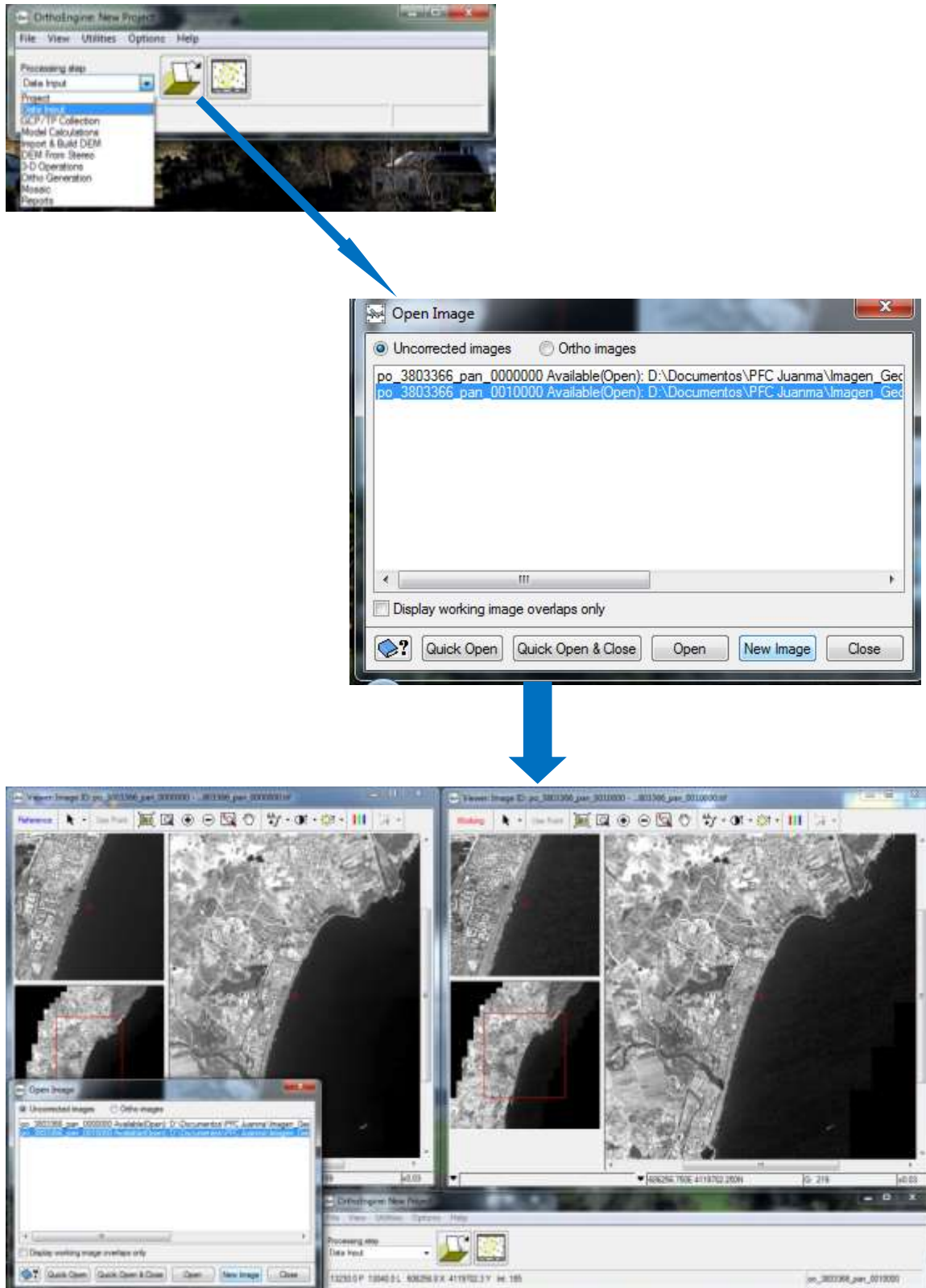


Figura 39. Introducción de las imágenes para la generación de Epipolares

3. Introducción del grupo de Puntos de Control (GCPs)

Para la siguiente fase en la cual vamos a introducir los puntos de control, se selecciona *GCP/TP Collection*, y dentro de este pinchamos el icono *Collect GCPs Manually* (paso 1 de la Fig. 40). Se selecciona la imagen a trabajar, se introducen desde el directorio los puntos de control correspondientes a esa imagen, es decir, se selecciona el archivo de puntos de control que corresponden con esa imagen (paso 3 de la Fig. 40). Una vez que los puntos se han cargado hay que asegurarse mediante la visualización de zonas estratégicas de la imagen que estos puntos se han cargado correctamente (paso 2, Fig. 40). Estos puntos se seleccionan como GCPs.

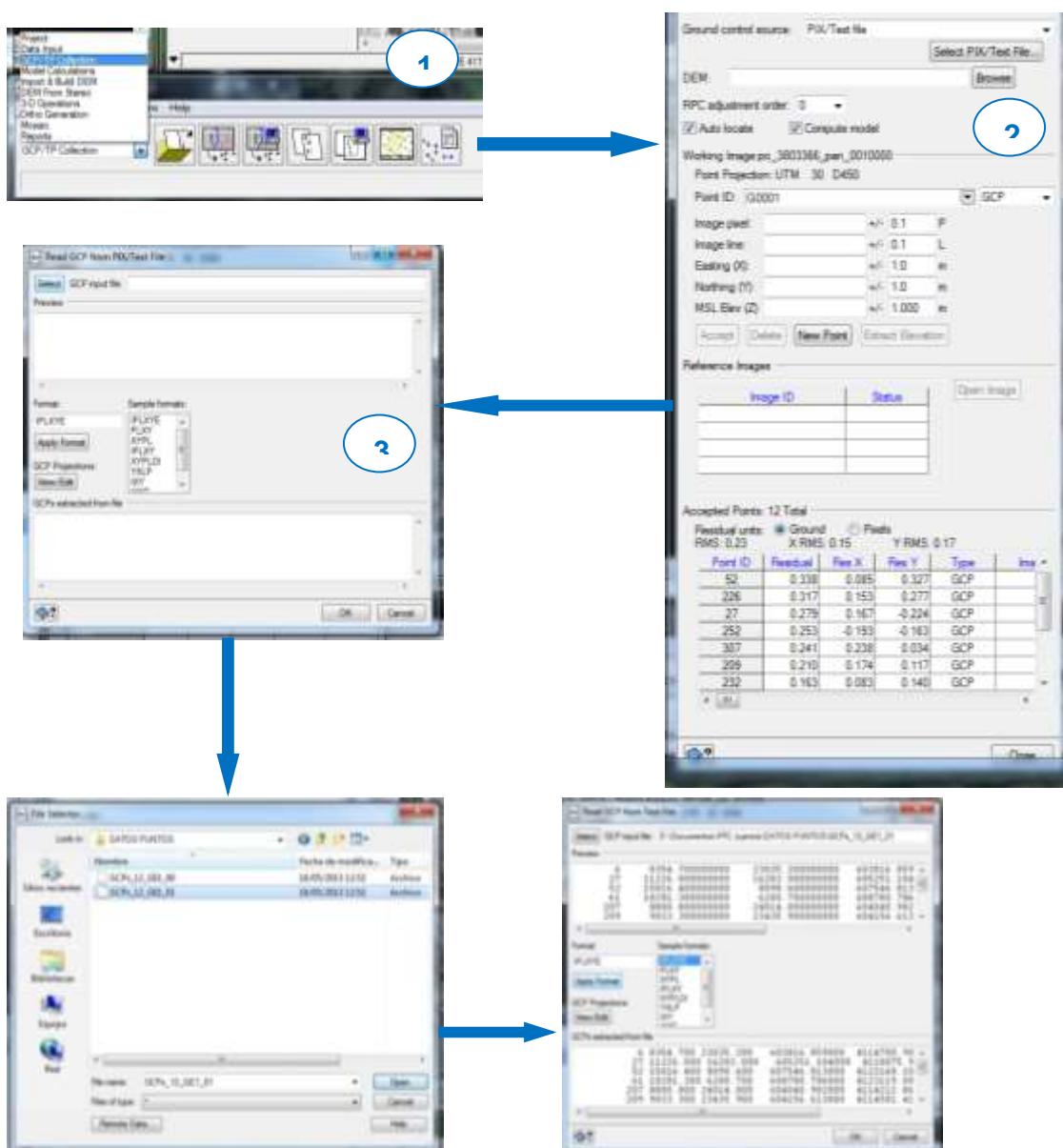


Figura 40. Pasos para introducir Puntos de Control en cada una de las imágenes que forman las Epiolares

4. Cálculo para la corrección de errores generados por los Puntos de Control

En este paso OrthoEngine calcula una corrección de errores producidos por los Puntos de Control y reajusta la imagen de forma que vuelve a orientar la imagen a los puntos introducidos teniendo en cuenta esos errores de los puntos y ajustando la orientación sin esos puntos, se puede observar este paso en la Fig. 41.

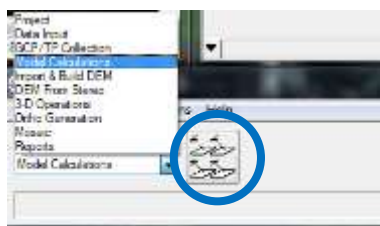


Figura 41. Cálculo y corrección de errores producidos por los puntos

5. Generación de las Imágenes Epipolares

Para la generación de imágenes Epipolares a partir de OrthoEngine se selecciona el módulo *DEM From Stereo*, y en este módulo se generan las epipolares, seleccionando cada una de ellas y generando el par de epipolares (*Generate Pairs*) todo ello se puede observar detalladamente en la Fig. 42.

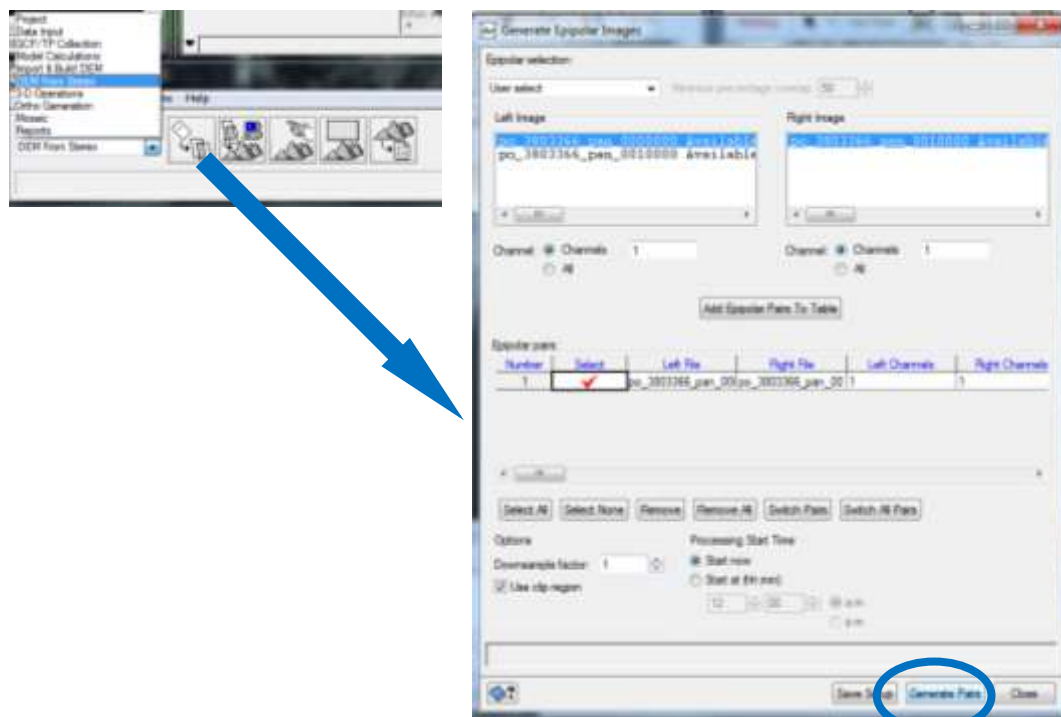


Figura 42. Proceso de generación de Epipolares a partir de OrthoEngine

6. Generación de región de corte o *Clip Region*

Esta opción se selecciona para la generación de un dentro de la imagen una región de recorte, para no emplear toda la imagen completa en la extracción del DSM. Para ello se selecciona mediante una región delimitada y trabajando con la imagen una región deseada dentro de la imagen, Fig 43.

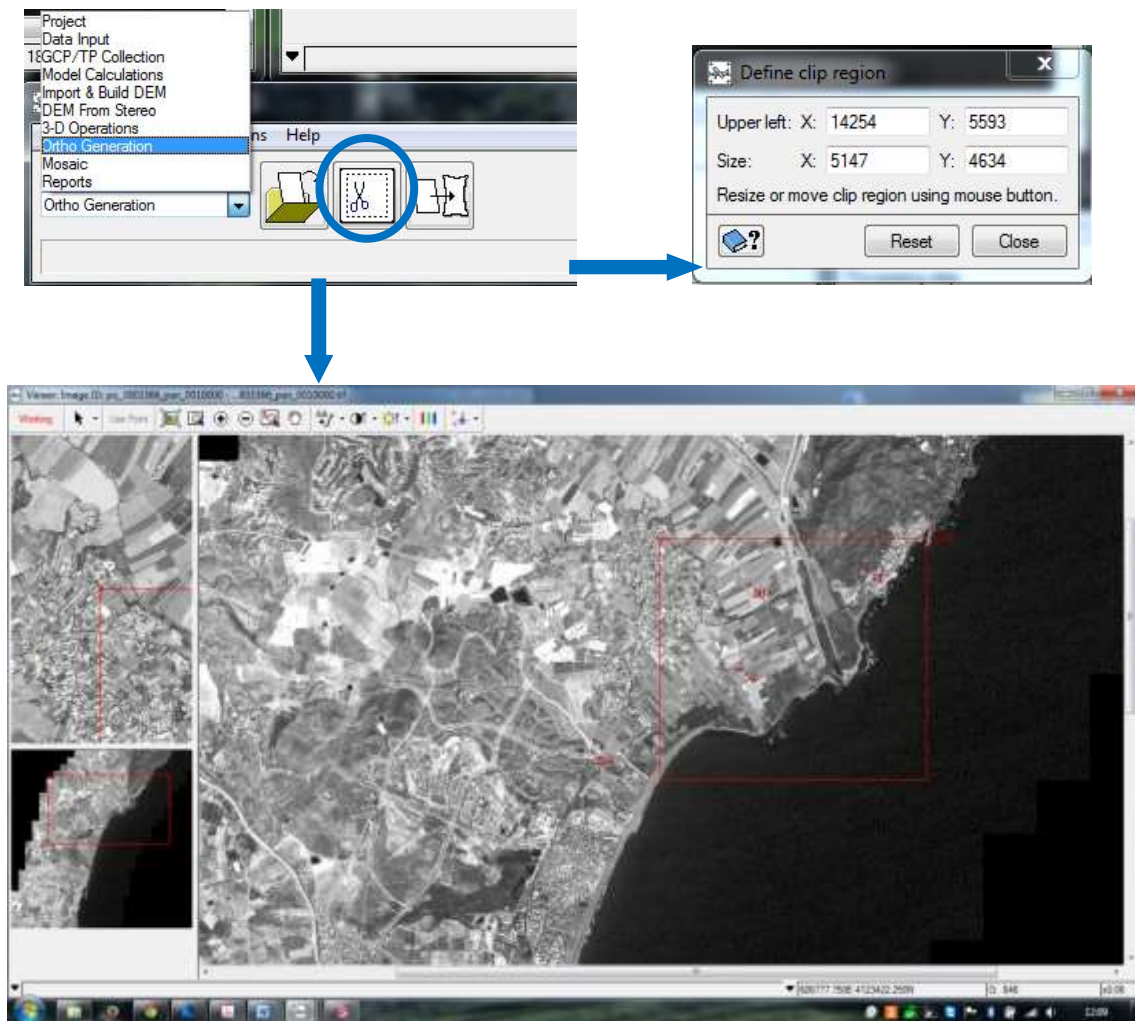


Figura 43. Generación de *Clip región*

7. Generación de DSMs

Una vez generadas las Epipolares y normalizadas las imágenes, se procede a extraer el DSM, para realizarlo se seleccionan diferentes características que contiene OrthoEngine en este módulos, ya que se selecciona entre Detalle DSM en *ExtraHigh* o *High*, también se selecciona el tipo de terreno entre ellos se ensaya con *Flat*, *Mountainous* o *Hilly*, se selecciona *Fill holes*, se ensaya también con aplicar o no el

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Filtro de Wallis y se selecciona *Clip región*. Para finalizar este proceso se especifica la creación del *Geocoded* del DSM y la ruta del directorio donde se va a guardar y se extrae el DSM, detallado en la Fig. 44.

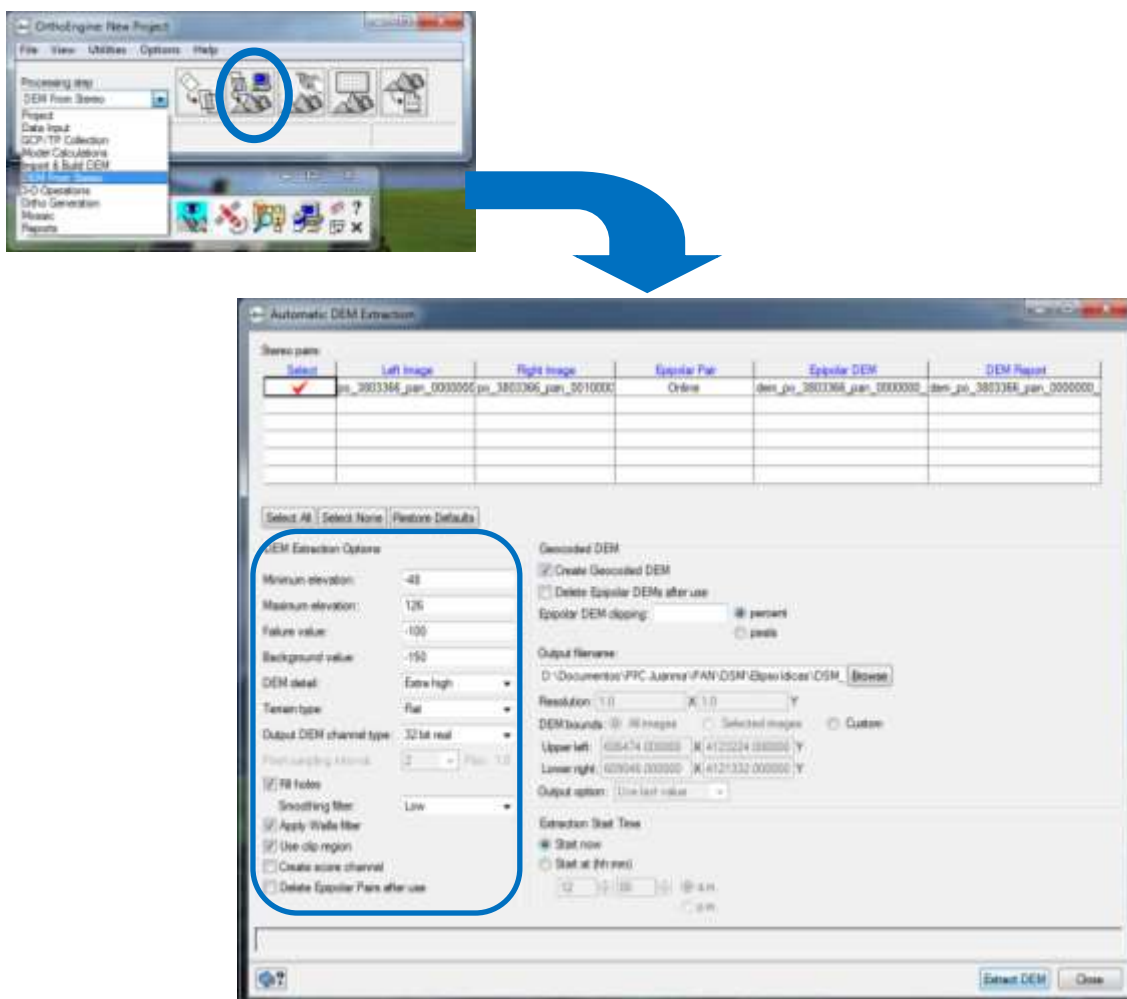


Figura 44. Generación de DSM a partir de OrthoEngine

8. Crear imágenes Pansharpened

Para formar imágenes fusionadas o Pansharpened a partir de imágenes pancromáticas se realiza a partir de OrthoEngine, en la pestaña *Utilities* y dentro de esta pestaña en *Merge/Pansharp Multispectral Imag*. Una vez dentro de esa opción se cargan en el programa la imagen multispectral que se desea fusionar, también se carga la imagen pancromática a fusionar y se selecciona un directorio y nombre al archivo de salida que va a ser fusionado, Fig. 45.

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

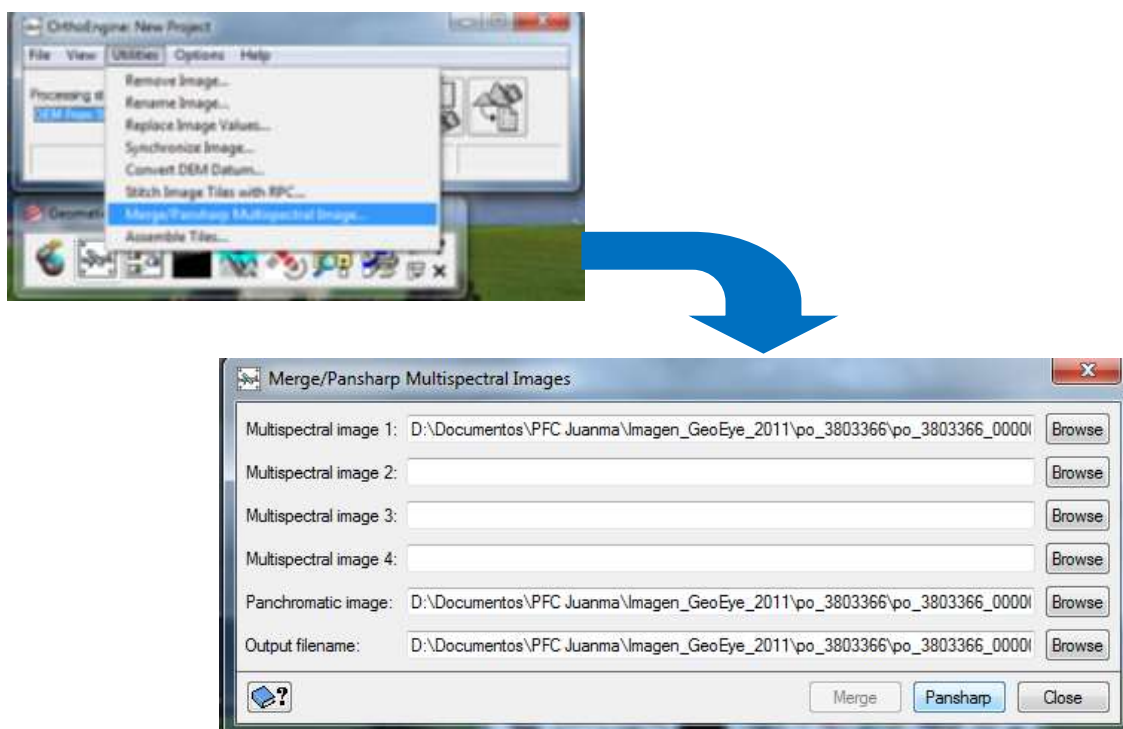


Figura 45. Creación de imágenes pansharpened a partir de OrthoEngine

9. Convertir DSMs de cotas elipsoidicas a cotas ortométricas

Para pasar de cotas elipsoidicas a ortométricas, se emplea OrthoEngine de nuevo en la pestaña *utilities*, dentro de esta pestaña se selecciona *Convert DEM Datum*, Dentro de esta sección se selecciona el archivo a convertir las cotas, como canal se deja 1, la dirección de conversión es de *Elipsoid to MSL* y como *Skip value* -100, se puede observar en la Fig. 46. El mismo archivo seleccionado cambia las cotas en el mismo directorio.

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

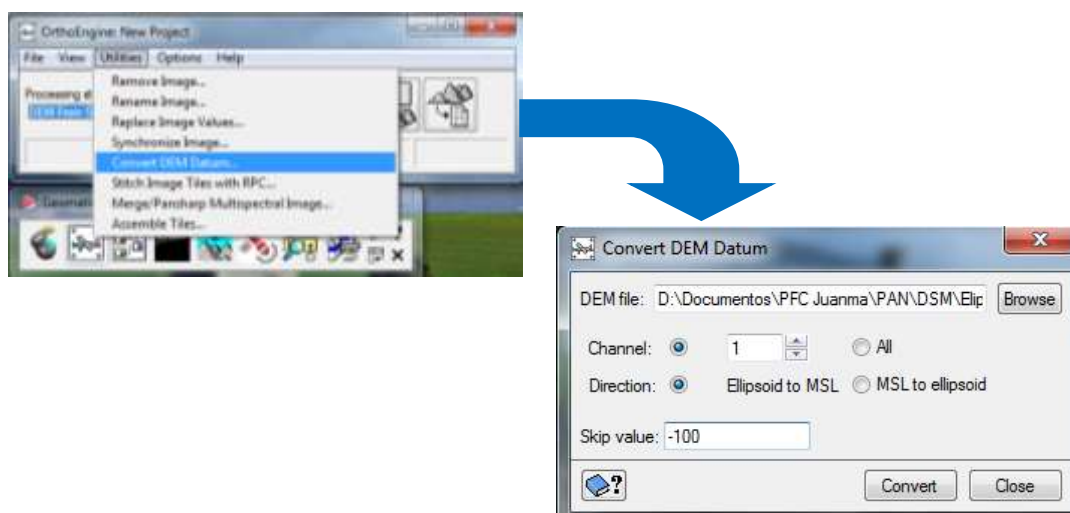


Figura 46. Convertir cotas elipsóidicas a cotas ortométricas de DSMs

- **Focus**

En relación a lo comentado anteriormente, tanto la precisión vertical como la completitud dependen de la cubierta del terreno, por lo que para poder evaluar de forma correcta, hay que tener en cuenta las zonas sin cambios y las superficies invernadas para observar los resultados. Empleamos Focus para tener unos primeros resultados y para recortar aquellas zonas de interés de los diferentes DSMs generados, tanto toda la imagen de la zona como invernaderos tipo malla y plástico.

1. Abrir un DSM en Focus

Para ello se selecciona un nuevo archivo en la sección de Focus, una vez abierto se puede observar toda la imagen y los diferentes datos de altura que puede originar, Fig. 47.

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

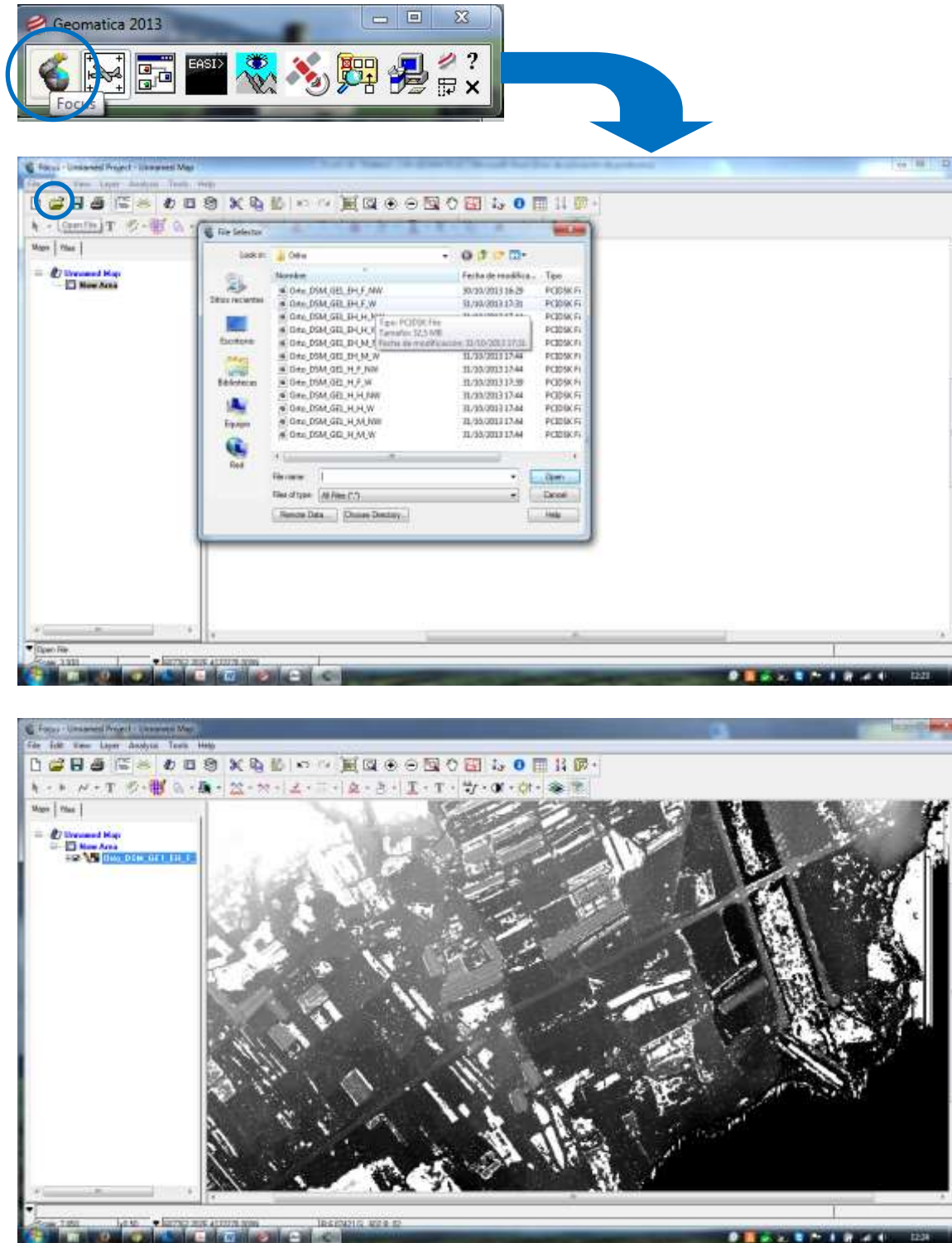
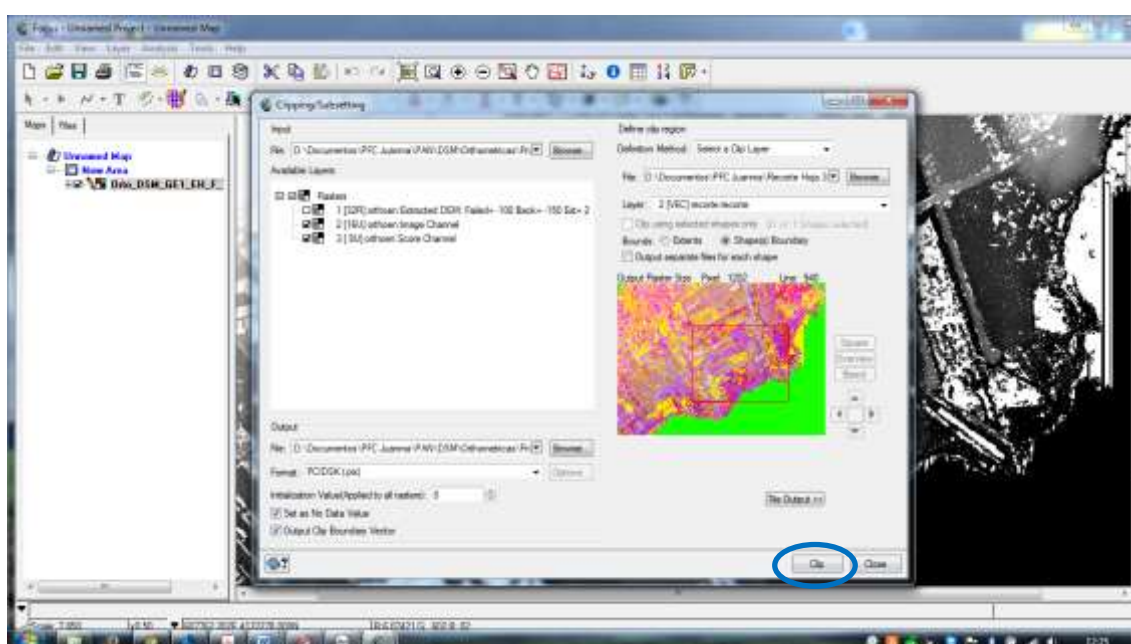
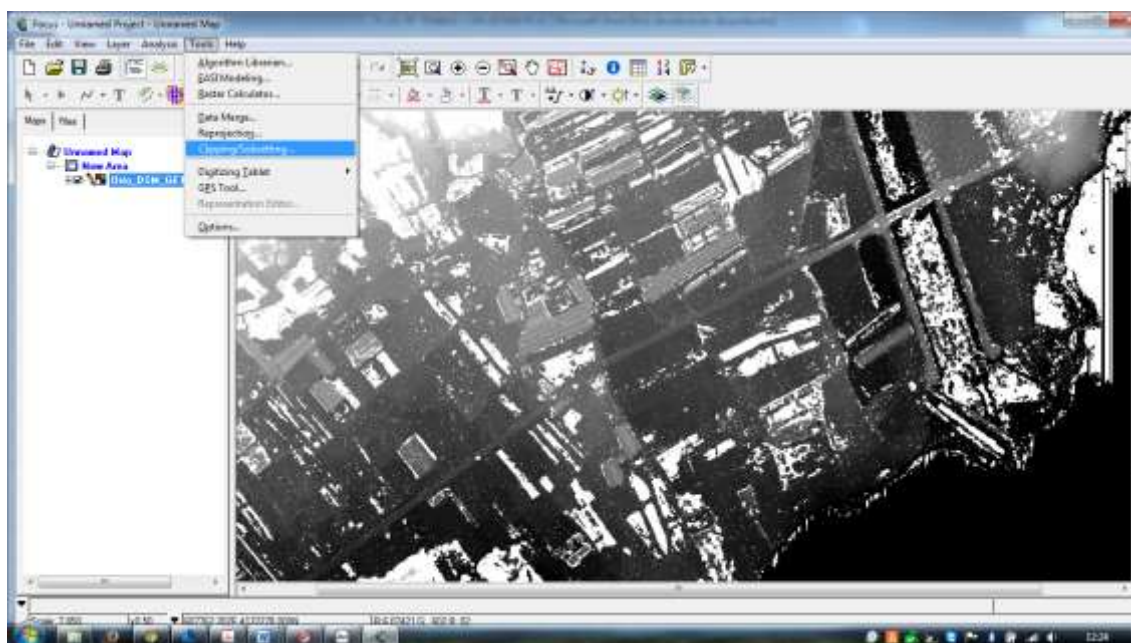


Figura 47. Abrir en Focus un DSM

2. Recorte del DSM en la zona de trabajo

Para recortar el DSM abierto en Focus, se selecciona Tools, dentro de esta pestaña se selecciona Clipping/Subsetting, dentro se selecciona la capa a recortar, se selecciona el directorio y un nombre que corresponde al archivo DSM nuevo que se va a generar con el recorte y se selecciona el archivo .dxf que contiene el recorte que se desea realizar en el DSM, por último se selecciona Clip para la generación del archivo, Fig. 48.



Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

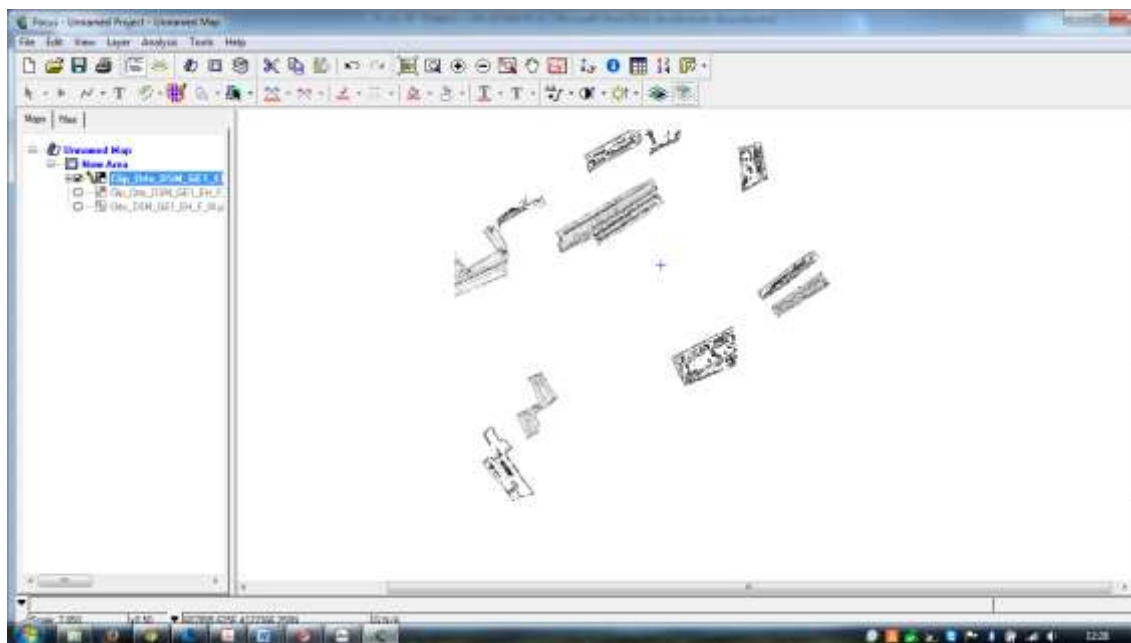


Figura 48. Recorte del DSM a partir de Focus para invernaderos de la zona

3. Obtención de archivos txt a partir de DSM generado con OrthoEngine

Como último paso hay que exportar el DSM generado con Focus para el recorte a un archivo *.txt* para poder compararlo con el DSM LiDAR y calcular tanto su precisión vertical como la completitud. Por lo que se emplea el módulo de Geomatica OrthoEngine.

En este módulo, de nuevo en *DEM From Stereo* se pincha en el icono *Export Extracted DEM*, dentro de este apartado se busca el directorio del archivo que se ha recortado para obtener los archivos de completitud se emplea canal 1 y para precisión vertical se emplea canal 2. Como paso de malla se emplea 1 m y por último se selecciona un directorio y un nombre para guardar el archivo *.txt* generado (Fig. 49).

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

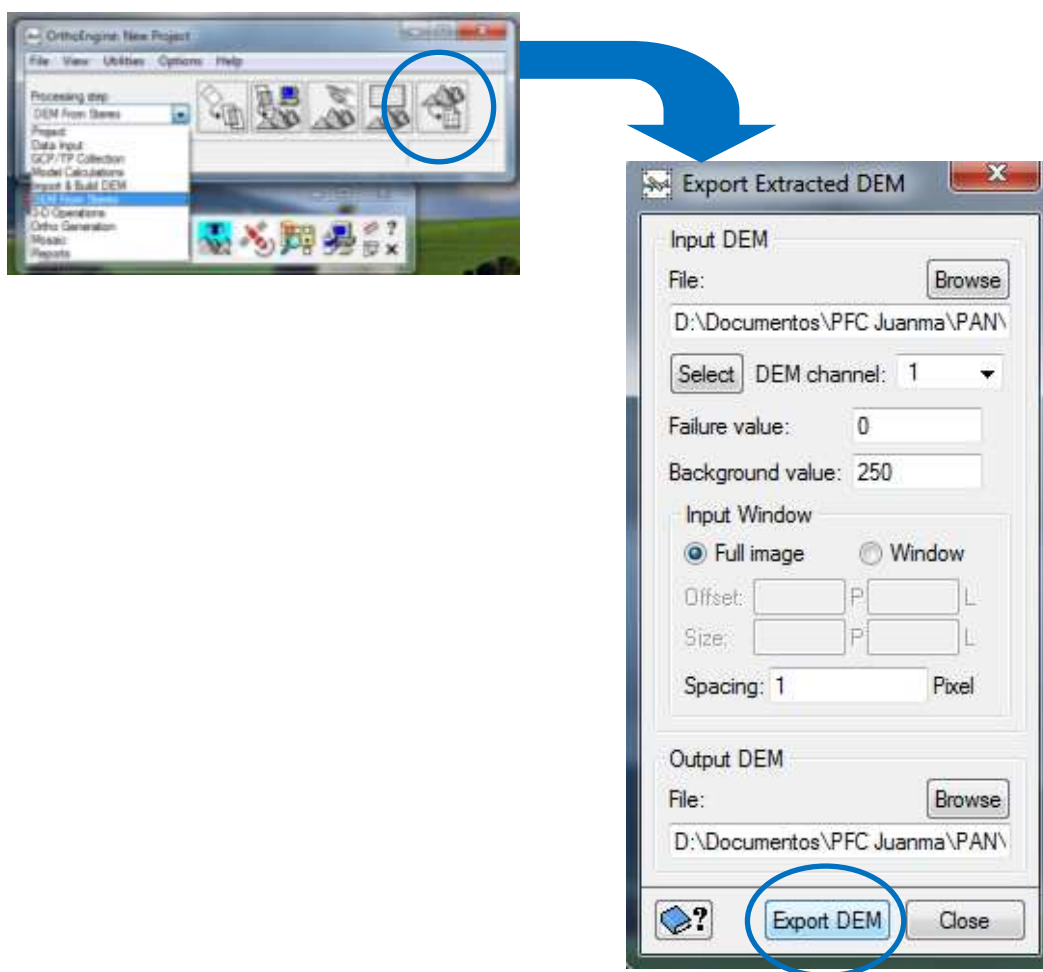


Figura 49. Exportar datos DSM a txt con OrthoEngine

2.2. RAPIDFORM

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

PROCESO DE TRABAJO EN RAPIDFORM

1. Triangulación del DSM VHR y DSM LiDAR

Para el proceso de triangulación de un DSM, se importa desde el directorio donde se encuentren guardados el DSM VHR y el DSM LiDAR. Por lo que se triangulan ambos DSMs mediante la herramienta *Build*, en ella se selecciona *Triangulate*,

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Surface y 2D (Fig. 50), por la cual se seleccionó una longitud de arista máxima de 5 metros en cada DSM.

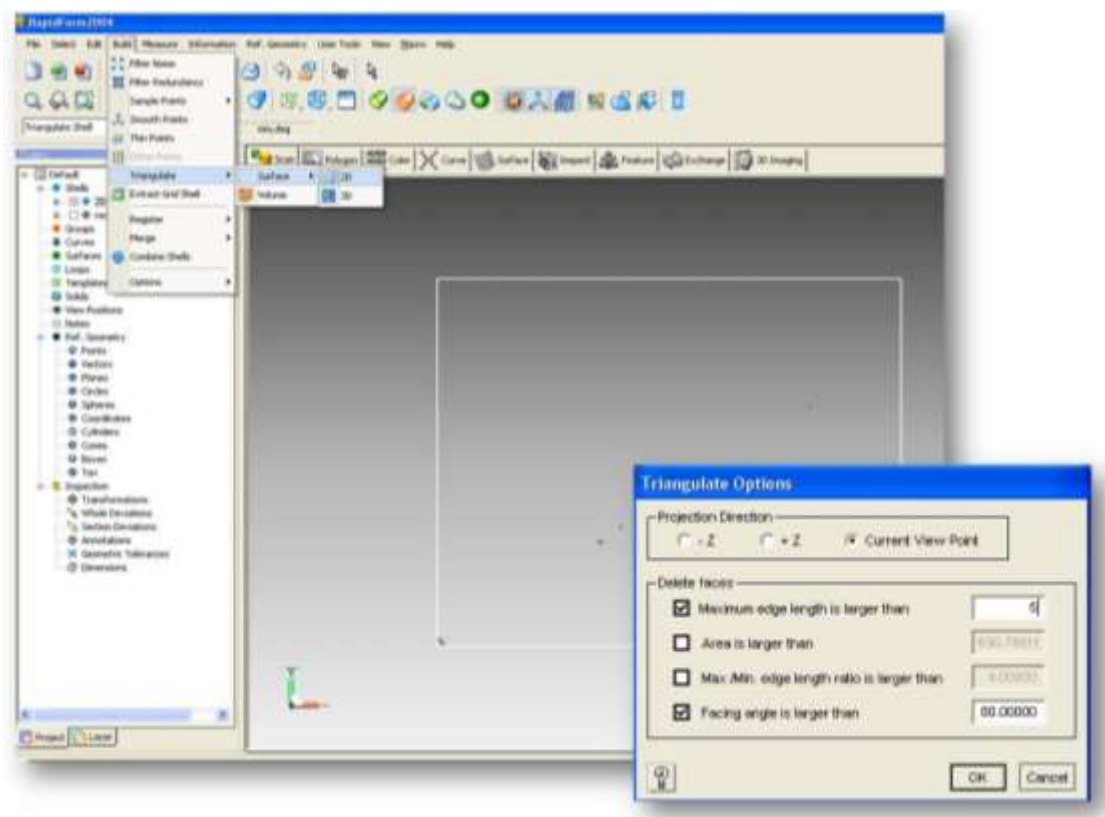


Figura 50. Triangulación DSM LiDAR y DSM VHR

2. Comparación del DSM LiDAR y el DSM VHR

Mediante RapidForm se compara el DSM LiDAR con el DSM VHR siempre en este mismo orden con la herramienta Measure donde se selecciona Shell/Shell Deviation. Las estadísticas que se extraen de esta comparación son las diferencias de cotas que se van a utilizar para calcular la precisión vertical de los diferentes DSMs (Fig. 51).

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

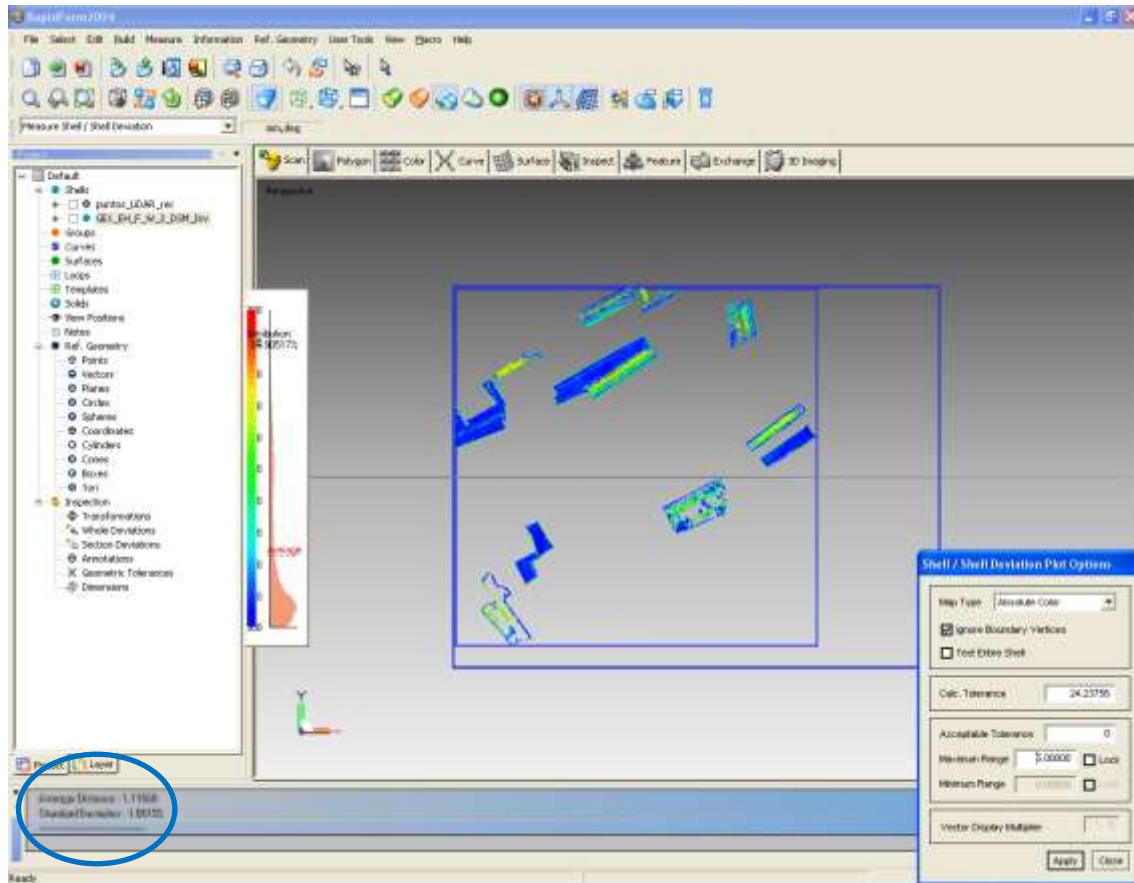


Figura 51. Comparación DSM LiDAR y DSM VHR

ANEXO 2.

DATOS COMPLETOS ANALIZADOS

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Tabla 5. Distancia media de imagen de la zona de estudio

Distancia media (m)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	0,8283	0,71977	0,7469	0,71787	0,8203	0,77214	0,8259
2	0,7261	0,72152	0,72213	0,71877	0,8189	0,7439	0,8259
3	0,7722	0,86399	0,71866	0,71786	0,7867	0,73893	0,8259
4	0,7731	0,74375	0,71291	0,71619	0,7857	0,7439	0,8259
5	0,8511	0,80428	0,79652	0,78905	0,8203	0,73893	0,8259
6	0,8535	0,81593	0,80994	0,79798	0,8388	0,7439	0,8259
7	0,7731	0,71952	0,71346	0,79798	0,8203	0,73893	0,8259
8	0,7743	0,72122	0,71346	0,71587	0,8189	0,7439	0,8259
9	0,7733	0,71976	0,7469	0,71516	0,8203	0,77214	0,8259
10	0,7731	0,72155	0,75091	0,71621	0,8189	0,77882	0,8259
11	0,7731	0,79969	0,79942	0,78151	0,8203	0,77214	0,8259
12	0,8448	0,81045	0,84409	0,79154	0,8189	0,77882	0,8259

Tabla 6. Desviación estándar de la imagen de la zona de estudio

Desviación estándar (m)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	0,7251	0,86403	0,87509	0,86304	0,93677	0,86962	0,8543
2	0,8673	0,86323	0,85855	0,86334	0,93506	0,85086	0,8543
3	0,9094	0,71976	0,85197	0,86351	0,92437	0,84831	0,8543
4	0,9092	0,85065	0,85632	0,8637	0,9212	0,85086	0,8543
5	1,1853	1,13826	1,08493	1,06995	0,93677	0,84831	0,8543
6	1,2016	1,17457	1,13679	1,10909	1,00823	0,85086	0,8543
7	0,9129	0,86333	0,85493	1,10909	0,93677	0,84831	0,8543
8	0,9128	0,8629	0,85493	0,86256	0,93506	0,85086	0,8543
9	0,9129	0,86399	0,87512	0,8638	0,93677	0,86962	0,8543
10	0,9092	0,86321	0,87958	0,86393	0,93506	0,87355	0,8543
11	0,9092	1,08499	1,04524	0,99948	0,93677	0,86962	0,8543
12	1,1045	1,10469	1,12732	1,01477	0,93506	0,87355	0,8543

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Tabla 7. Completitud de la zona de estudio

Completitud (%)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	78,0488	70,82873	79,41295	70,73162	72,4257	79,8066	84,8572
2	79,1403	71,63931	71,26772	71,12672	72,5872	71,6845	84,8572
3	78,1049	70,83988	70,68967	70,77441	72,2998	70,7738	84,8572
4	79,1953	71,69071	71,24845	71,1583	72,4374	71,6845	84,8572
5	83,3760	77,62436	77,50627	77,46493	72,4257	70,7738	84,8572
6	84,3289	78,72069	78,44597	78,2156	79,7862	71,6846	84,8572
7	78,0840	70,83224	71,14709	70,73162	72,4257	70,7738	84,8572
8	79,1962	71,62476	71,14697	71,12672	72,5872	71,6845	84,8572
9	78,1125	70,83988	79,41683	70,77441	72,4257	79,8066	84,8572
10	79,1953	71,64610	80,12242	71,15837	72,5872	80,8794	84,8572
11	83,6157	77,77348	77,70498	77,71359	72,4257	79,8066	84,8572
12	84,6006	78,90485	88,17769	78,46416	72,5872	80,8794	84,8572

Tabla 8. Distancia media de los invernaderos de la zona de estudio

Distancia media (m)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	1,12847	1,14425	1,17358	1,15405	1,19461	1,1608	0,8259
2	1,11960	1,15427	1,11894	1,1499	1,19543	1,12631	0,8259
3	1,12706	1,14425	1,11504	1,15405	1,17209	1,12224	0,8259
4	1,11982	1,12665	1,11417	1,1499	1,17647	1,12631	0,8259
5	1,7939	1,34016	1,29645	1,28846	1,19461	1,12224	0,8259
6	1,34854	1,31767	1,30517	1,29962	1,27127	1,12631	0,8259
7	1,13205	1,14492	1,11712	1,15405	1,19461	1,12224	0,8259
8	1,12773	1,15432	1,11712	1,1499	1,19543	1,12631	0,8259
9	1,13185	1,14425	1,28995	1,15373	1,19461	1,1608	0,8259
10	1,11982	1,15427	1,17456	1,1499	1,19543	1,16622	0,8259
11	1,351	1,3196	1,31247	1,28336	1,19461	1,1608	0,8259
12	1,30509	1,31311	1,38864	1,28519	1,19543	1,16622	0,8259

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estereo pares del satélite GeoEye-1

Tabla 9. Desviación estándar de los invernaderos de la zona de estudio

Desviación estándar (m)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	1,11325	1,13055	1,1339	1,15373	1,13615	1,0541	0,8543
2	1,09193	1,13677	1,11894	1,14541	1,13238	1,05784	0,8543
3	1,11291	1,13055	1,11833	1,15373	1,17991	1,05337	0,8543
4	1,09179	1,05449	1,12159	1,14541	1,17958	1,05784	0,8543
5	2,06898	1,77982	1,70277	1,59149	1,13615	1,05337	0,8543
6	1,97723	1,71624	1,72815	1,63509	1,33521	1,05784	0,8543
7	1,12456	1,13106	1,12591	1,15373	1,13615	1,05337	0,8543
8	1,10745	1,13768	1,12591	1,14541	1,13238	1,05784	0,8543
9	1,12429	1,13055	1,11128	1,15405	1,13615	1,0541	0,8543
10	1,09179	1,13677	1,13363	1,14541	1,13238	1,05315	0,8543
11	1,93868	1,69632	1,66372	1,57853	1,13615	1,0541	0,8543
12	1,79052	1,67	1,86527	1,56822	1,13238	1,05315	0,8543

Tabla 10. Completitud de los invernaderos de la zona de estudio

Completitud (%)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	65,7390	61,90701	71,66976	60,82276	65,6275	76,1138	80,8565
2	66,2338	62,44350	60,75288	60,95238	66,0174	65,1338	80,8565
3	65,8540	61,90814	60,42829	60,82276	63,5209	64,1927	80,8565
4	66,3319	65,11242	60,71344	60,95238	63,6697	65,1338	80,8565
5	72,9535	70,67342	69,05494	69,44153	65,6275	64,1927	80,8565
6	72,9163	70,66779	69,39983	69,87207	73,4043	65,1338	80,8565
7	65,9780	61,93744	60,34488	60,82276	65,6275	64,1927	80,8565
8	66,5291	62,38602	60,34488	60,95238	66,0174	65,1338	80,8565
9	65,9971	61,90814	71,66976	60,82276	65,6275	76,1138	80,8565
10	66,3319	62,44350	72,18934	60,95238	66,0174	76,9106	80,8565
11	73,6861	71,00591	71,05776	70,23274	65,6275	76,1138	80,8565
12	73,4753	71,11975	82,80304	70,53367	66,0174	76,9106	80,8565

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Tabla 11. Distancia media de los invernaderos tipo malla de la zona de estudio

Distancia media (m)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	1,60967	1,67048	1,68539	1,75702	1,68733	1,53699	1,43537
2	1,59584	1,69388	1,67614	1,75034	1,69085	1,09545	1,43537
3	1,60685	1,67048	1,66694	1,75702	1,72873	1,55472	1,43537
4	1,59539	1,55891	1,67654	1,75034	1,73467	1,55842	1,43537
5	1,98183	1,91184	1,88096	1,86501	1,68733	1,55472	1,43537
6	1,93999	1,87557	1,89683	1,88881	1,80446	1,55842	1,43537
7	1,61544	1,67175	1,68555	1,24232	1,68733	1,55472	1,43537
8	1,61544	1,69487	1,68555	1,75034	1,69085	1,55842	1,43537
9	1,59539	1,67048	1,68539	1,75702	1,68733	1,53699	1,43537
10	1,59539	1,69388	1,68298	1,75034	1,69085	1,54119	1,43537
11	1,92238	1,87145	1,85295	1,85998	1,20078	1,53699	1,43537
12	1,85429	1,85977	1,95815	1,86047	1,69085	1,54119	1,43537

Tabla 12. Desviación estándar de los invernaderos tipo malla de la zona de estudio

Desviación estándar (m)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	1,20463	1,21226	1,20451	1,24232	1,20078	1,069	1,00191
2	1,17409	1,21656	1,2134	1,22804	1,19134	1,55842	1,00191
3	1,20485	1,21226	1,21829	1,24232	1,27908	1,09228	1,00191
4	1,17374	1,08873	1,21414	1,22804	1,27416	1,09545	1,00191
5	2,53371	2,14255	2,05589	1,86377	1,20078	1,09228	1,00191
6	2,41576	2,05519	2,08508	1,92745	1,46743	1,09545	1,00191
7	1,22154	1,21274	1,21866	1,75702	1,20078	1,09228	1,00191
8	1,22154	1,21935	1,21866	1,22804	1,19134	1,09545	1,00191
9	1,17374	1,21226	1,20451	1,24232	1,20078	1,069	1,00191
10	1,17374	1,21656	1,19809	1,22804	1,19134	1,06506	1,00191
11	2,35099	2,02738	1,98017	1,85163	1,68733	1,069	1,00191
12	2,15534	1,98465	2,22449	1,83277	1,19134	1,06506	1,00191

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Tabla 13. Completitud de los invernaderos tipo malla de la zona de estudio

Completitud (%)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	50,5102	43,97347	55,01513	45,38579	54,2479	62,0038	70,4523
2	51,1681	44,82815	43,20625	45,75026	54,6342	49,8615	70,4523
3	50,6141	43,97164	42,47184	45,38579	51,3303	48,4546	70,4523
4	51,3212	49,80319	43,18985	45,75209	51,4269	49,8615	70,4523
5	61,9054	57,65572	55,49076	57,56278	54,2479	48,4546	70,4523
6	61,6047	57,57189	55,88621	58,02384	64,4822	49,8615	70,4523
7	50,8455	44,01903	42,80351	45,38579	54,2479	48,4546	70,4523
8	51,6401	44,73157	42,80351	45,75026	54,6342	49,8615	70,4523
9	50,8455	43,97164	55,01513	45,38579	54,2479	62,0038	70,4523
10	62,8676	58,12407	58,23705	58,25345	54,2479	63,3032	70,4523
11	62,4631	58,24434	72,40223	58,71633	54,6342	62,0038	70,4523
12	62,4631	58,24434	72,40223	58,71633	54,6342	63,3032	70,4523

Tabla 14. Distancia media de los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio

Distancia media (m)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	0,615	0,65894	0,65817	0,58028	0,62207	0,73172	0,70439
2	0,60317	0,65061	0,61315	0,66322	0,61907	0,68163	0,70439
3	0,6149	0,65894	0,62074	0,67702	0,56012	0,68515	0,70439
4	0,60317	0,68141	0,60228	0,57027	0,56330	0,68163	0,70439
5	0,60882	0,65184	0,61772	0,58968	0,62207	0,68515	0,70439
6	0,59815	0,76798	0,61058	0,57737	0,56403	0,68163	0,70439
7	0,6152	0,78472	0,60225	0,58028	0,62207	0,68515	0,70439
8	0,60318	0,65186	0,60225	0,66322	0,61907	0,68163	0,70439
9	0,615	0,65894	0,65817	0,58028	0,62207	0,73172	0,70439
10	0,60317	0,65061	0,64874	0,57027	0,61907	0,72992	0,70439
11	0,60856	0,65242	0,65721	0,5813	0,62207	0,73172	0,70439
12	0,59838	0,64795	0,64128	0,57526	0,61907	0,72992	0,70439

Optimización del proceso de generación de DSM sobre invernaderos a partir de estéreo pares del satélite GeoEye-1

Tabla 15. Desviación estándar de los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio

Desviación estándar (m)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	0,71049	0,78472	0,77385	0,67702	0,71135	0,8543	0,79712
2	0,69308	0,76916	0,71781	0,57027	0,71214	0,80338	0,79712
3	0,71038	0,78472	0,72737	0,58028	0,63953	0,80289	0,79712
4	0,69308	0,80302	0,71597	0,66322	0,64725	0,80338	0,79712
5	0,69743	0,77515	0,71889	0,71045	0,71135	0,80289	0,79712
6	0,68072	0,64732	0,70743	0,66928	0,64475	0,80338	0,79712
7	0,71116	0,65894	0,71825	0,67702	0,71135	0,80289	0,79712
8	0,69311	0,76983	0,71825	0,57027	0,71214	0,80338	0,79712
9	0,71049	0,78472	0,77385	0,67702	0,71135	0,8543	0,79712
10	0,69308	0,76916	0,76583	0,66322	0,71214	0,84986	0,79712
11	0,69711	0,77548	0,77047	0,67579	0,71135	0,8543	0,79712
12	0,68117	0,76817	0,74932	0,66622	0,71214	0,84986	0,79712

Tabla 16. Completitud de los invernaderos tipo plástico de la zona de estudio

Completitud (%)							
Estrategia	PAN 2013	BLUE 2013	GREEN 2013	RED 2013	NIR 2013	ALL 2013	PAN 2012
1	90,2095	90,63328	98,28732	85,51586	83,7502	98,6051	97,3456
2	90,3154	90,64799	88,85292	85,26572	84,1445	89,5444	97,3456
3	90,2095	90,63328	89,19133	85,51586	82,9615	89,3590	97,3456
4	90,3154	89,58272	88,77641	85,26572	83,1940	89,5444	97,3456
5	90,5126	91,42193	90,69213	88,3556	83,7502	89,3590	97,3456
6	90,9010	91,54258	90,95403	88,73521	87,5286	89,5444	97,3456
7	90,1594	90,63328	88,43799	85,26572	83,7502	89,3590	97,3456
8	90,3154	90,65388	88,43799	85,26572	84,1445	89,5444	97,3456
9	90,2095	90,63328	98,28732	85,51586	83,7502	98,6051	97,3456
10	90,3154	90,64799	98,12842	85,26572	84,1445	98,5874	97,3456
11	90,8716	91,53375	91,48666	89,30610	83,7502	98,6051	97,3456
12	90,9746	91,63675	99,27903	89,34435	84,1445	98,5874	97,3456