



Universidad de Oviedo

COMPARACIÓN DE NUBES DE PUNTOS  
OBTENIDAS MEDIANTE LÁSER 3D Y SISTEMAS  
ESTEREOSCÓPICOS ÓPTICOS

- Máster en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica -

Trabajo Fin de Máster

Aitor Delgado Arenillas

Julio 2016

Tutor:

Prof. Silverio García Cortés (Universidad de Oviedo)

## AGRADECIMIENTOS

---

Quiero expresar mi agradecimiento al conjunto de profesores que integran el Master de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica en la Escuela Politécnica de Mieres. En especial a mi tutor de proyecto, el prof. Silverio García Cortés, por darme a conocer el proyecto y por su dedicación y orientación a lo largo del mismo. También me gustaría agradecer particularmente el trabajo de Ramón Arguelles Fraga.

A mis compañeros, en especial a Adriana y Ander, con los que comparto sueños laborales desde hace años. Deseo de corazón que los logréis junto con los propios personales.

Por último, me gustaría dar las gracias a mis padres y a mi hermana, imposible sin ellos.

## RESUMEN

---

Los avances acaecidos en todo lo concerniente a la informática han afectado positivamente a la fotogrametría desde el punto de vista metodológico. Surgen así nuevas formas de afrontar los procesos acontecidos sobre la superficie terrestre, hasta ahora únicamente abordados por la fotogrametría tradicional. Los nuevos algoritmos de estructura de movimiento (SFM) y de correspondencia densos permiten la reconstrucción de la superficie a partir de imágenes tomadas por vehículos aéreos controlados de forma remota con alta resolución.

No obstante, la aplicación de las nuevas técnicas de reconstrucción tridimensional no está exenta de errores. Uno de los mayores problemas surgidos es el denominado efecto domo (dome effect), que puede llegar a alterar los datos de manera significativa a menos que sea corregido. Las causas de este efecto son la configuración paralela de los ejes a la hora de la adquisición de imágenes, la ausencia de puntos de control o la estimación incorrecta de los parámetros de distorsión de la lente. Por tanto, la disminución del efecto se consigue considerando modelos de cámara fiables, utilizando imágenes oblicuas y convergentes o utilizando puntos de control.

En este estudio, se evalúa la calidad de los modelos generados al fusionar imágenes obtenidas mediante RPAS y la técnica SFM. Para ello se estudia el efecto domo desde diferentes perspectivas mostrando su comportamiento ante diversas estrategias que teóricamente mitigan el error. También se comparan dos herramientas SFM así como dos tipos diferentes de cámara.

**PALABRAS CLAVE:** Fotogrametría, SFM, reconstrucción 3D, RPA, efecto domo, distorsión, puntos de control

## ABSTRACT

---

Advances occurred in all matters relating to computing have positively affected the photogrammetry from a methodological point of view. Thus new forms of dealing the processes that occurring on the Earth's surface have emerged, so far only covered by traditional photogrammetry. New algorithms in structure from motion (SFM) and dense matching enable surface reconstruction from remotely controlled aerial vehicles images with high resolution.

However, the application of new techniques for three-dimensional reconstruction is not error-free. One of most important problems encountered is the dome effect, which can significantly alter the data unless some precautions had been taken. The reasons of this effect are the parallel-axes configuration of images acquisition, as well as a lack of ground control points or incorrect estimation of the parameters of lens distortion. Therefore mitigation of this effect is achieved considering reliable camera models, using oblique and converging images or using ground control points.

In this study, the quality of the models generated by combining images obtained from RPAS and SFM technique is evaluated. To that end, the dome effect is studied by different approaches showing their behavior under various strategies that theoretically mitigate the error. Also two SFM tools and two different types of camera are compared.

**KEY WORDS:** Photogrammetry, SFM, 3D reconstruction, RPA, dome effect, distortion, ground control points.

## ÍNDICE

---

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	OBJETIVOS .....	5
3.	ANTECEDENTES .....	6
3.1.	Visión estereoscópica .....	6
3.2.	Procesado de imágenes: Orientación de imágenes y correlación densa .....	11
4.	PROCEDIMIENTOS .....	18
4.1.	Área de Estudio .....	18
4.2.	Material utilizado .....	19
4.2.1.	<i>TLS Riegl LMS-Z390i</i> .....	19
4.2.2.	<i>RPA Phantom II Vision +</i> .....	20
4.2.3.	<i>RPA Phantom III Advanced</i> .....	21
4.2.4.	<i>Photomodeler Motion</i> .....	21
4.2.5.	<i>Pix4D</i> .....	22
4.2.6.	<i>Agisoft PhotoScan</i> .....	22
4.2.7.	<i>Cloud Compare</i> .....	23
4.3.	Metodología .....	24
4.3.1.	<i>Datos de referencia</i> .....	24
4.3.2.	<i>Calibración de la cámara</i> .....	26
4.3.3.	<i>Adquisición de los datos</i> .....	27
4.3.4.	<i>Procesamiento de los datos</i> .....	29
5.	RESULTADOS .....	43
5.1.	Caracterización del efecto domo .....	43
5.2.	Diferentes tipos de cámara .....	44
5.3.	Diferentes parámetros de calibración de cámara .....	46
5.4.	Utilización de imágenes oblicuas .....	47
5.5.	Utilización de puntos de control GCP .....	48
5.6.	Diferentes alturas y orientaciones de vuelo .....	49
5.7.	Diferentes softwares SFM: Pix4D Mapper Pro y Agisoft PhotoScan Profesional Edition .....	51
6.	CONCLUSIONES .....	53
7.	BIBLIOGRAFIA .....	55
	ANEXOS .....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1:</b> Secuencia lógica de la visión estereoscópica .....	7
<b>Figura 2:</b> Correspondencia de un sistema estéreo (Montalvo (2009)).....	8
<b>Figura 3:</b> Geometría de dos cámaras con ejes ópticos paralelos desde una perspectiva de alzado.....	10
<b>Figura 4:</b> Representación de los parámetros intrínsecos de la cámara (Rodríguez, 2011) 13	
<b>Figura 5:</b> Secuencia de generación de mapas dispersos .....	14
<b>Figura 6:</b> Principio de multi-proyección (Ruiz, 2013).....	15
<b>Figura 7:</b> Localización del estudio. Mieres del Camino (España) .....	18
<b>Figura 8:</b> Área de estudio localizada en la bocamina del Socavón Barredo de la Mina Mariana (Mieres).....	18
<b>Figura 9:</b> Modelo de RPA Phantom II Vision + .....	20
<b>Figura 10:</b> Modelo de RPA Phantom III Advanced .....	21
<b>Figura 11:</b> Herramientas utilizadas en el establecimiento de los puntos de control.....	24
<b>Figura 12:</b> Disposición de los reflectores cilíndricos colocados sobre los GCP.....	25
<b>Figura 13:</b> Problemática de las alturas en los GCP's al comparar resultados .....	25
<b>Figura 14:</b> Tablero de calibración del software Agisoft Lens.....	26
<b>Figura 15:</b> Opciones de calibración del software Photomodeler Motion .....	27
<b>Figura 16:</b> Ejemplo de configuración de vuelo .....	28
<b>Figura 17:</b> Lista de tiepoints en el sistema de referencia del proyecto (PRCS) con los residuos de la transformación entre sistemas realizada. ....	30
<b>Figura 18:</b> Lista de tiepoints de referencia (GCP's) en el sistema de referencia global (GLCS).....	31
<b>Figura 19:</b> Nube de puntos densa obtenida tras el tratamiento en Riscan Pro for RIEGL 3D Laser Scanner .....	32
<b>Figura 20:</b> Opciones de procesamiento en Photoscan .....	34
<b>Figura 21:</b> Panel de referencia en PhotoScan .....	35
<b>Figura 22:</b> Establecimiento de marcadores en PhotoScan.....	36
<b>Figura 23:</b> Nube de punto densa obtenida tras el tratamiento en Agisoft PhotoScan .....	36
<b>Figura 24:</b> Formulario de carga de imágenes con Pix4D.....	37
<b>Figura 25:</b> Establecimiento de GCP's en Pix4D.....	39
<b>Figura 26:</b> Nube de punto densa obtenida tras el tratamiento en Pix4D .....	40
<b>Figura 27:</b> Proceso de filtrado y selección de ROI con Cloud Compare .....	41
<b>Figura 28:</b> Rangos de visualización del campo escalar.....	42
<b>Figura 29:</b> Caracterización del efecto domo.....	44

<b>Figura 30:</b> Comparación del efecto domo ante diferentes tipos de cámara.....	45
<b>Figura 31:</b> Comparación del efecto domo ante diferentes parámetros de configuración de cámara.....	46
<b>Figura 32:</b> Bloque de imágenes oblicuas utilizado para el procesamiento. ....	47
<b>Figura 33:</b> Utilización de imágenes oblicuas. ....	48
<b>Figura 34:</b> Utilización de puntos de control en el procesamiento de imágenes.....	49
<b>Figura 35:</b> Bloque de imágenes utilizado para el procesamiento a diferentes alturas.....	50
<b>Figura 36:</b> Comparación del efecto domo ante diferentes alturas y orientaciones de vuelo.....	50
<b>Figura 37:</b> Comparativa entre diferentes softwares sin utilizar GCP`s. ....	52
<b>Figura 38:</b> Comparativa entre diferentes softwares utilizando GCP`s. ....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1:</b> Características generales del proyecto .....	4
<b>Tabla 2:</b> Parámetros de la matriz de transformación (parámetros extrínsecos).....	12
<b>Tabla 3:</b> Parámetros de la matriz K (parámetros intrínsecos).....	12
<b>Tabla 4:</b> Características principales del TLS Riegl LMS-Z390i.....	19
<b>Tabla 5:</b> Características principales del RPA Phantom II Vision +.....	20
<b>Tabla 6:</b> Características principales del RPA Phantom III Advanced.....	21
<b>Tabla 7:</b> Comparación entre herramientas de reconstrucción 3D basadas en imágenes..	23
<b>Tabla 8:</b> Configuraciones de vuelos de adquisición de imágenes.....	29
<b>Tabla 9:</b> Matriz de transformación POP.....	31
<b>Tabla 10:</b> Residuos de la transformación.....	32
<b>Tabla 11:</b> Etapas del procesamiento en Photoscan.....	33

## LISTA DE ACRÓNIMOS

---

SFM	Structure From Motion
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unmanned Aerial System
GPS	Global Positioning System
GCP	Ground Control Point
TLS	Terrestrial Laser Scanning
EXIF	Exchangeable Image File Format
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
BBA	Bundle Block Adjustment
PMVS	Patch-based Multi-View Stereo
CMVS	Cluster-based Multi-View Stereo
SGM	SemiGlobal Matching
FOV	Field Of View
MDS	Modelo Digital de Superficies
IGN	Instituto Geográfico nacional
SOCS	Scanner's Own Coordinate System
SOP	Sensor's Orientation and Position
PRCS	Project Coordinate System
GLCS	Global Coordinate System
POP	Project Orientation and Position
ROI	Region Of Interest

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Todo dato geográfico, ya sea medido o derivado, debe llevar asociado un valor cuantitativo que refleje su calidad, es decir, un parámetro que determine su incertidumbre. Existen una serie de términos relacionados con la incertidumbre de medida como son el error, la fiabilidad, la precisión o la exactitud, entre otros, que son especialmente relevantes en el campo de la geomática, pues son de aplicación directa en la captura, tratamiento y análisis de la información geoespacial. Por tanto, la calidad de los datos espaciales derivados puede ser definida como una función de la precisión, exactitud y fiabilidad con respecto a los errores aleatorios, sistemáticos y groseros respectivamente (Cross & Cooper, 1988).

Los avances acaecidos en todo lo concerniente a la informática han llevado a la disminución de la incertidumbre de medida en aquellos ámbitos relacionados con la computación; sin embargo, la erradicación del efecto de los errores sistemáticos es mucho más compleja de detectar y de eliminar que la de los errores aleatorios y groseros. La fotogrametría, en la cual tradicionalmente se ha hecho especial hincapié en la exactitud y la precisión, también se ha visto afectada positivamente por estos avances, tanto metrológicos como informáticos, dando lugar a nuevas formas de análisis sobre los procesos acontecidos sobre la superficie terrestre; técnicas de ajustes, modelos de cámaras, softwares y algoritmos, son algunos de los aspectos que han sufrido dichos avances.

En lo relacionado con los métodos de reconstrucción de superficies basados en imágenes, la técnica Structure From Motion (SFM) ha tomado especial relevancia con las mejoras habidas en la última década. En consonancia con la tecnología RPA<sup>1</sup> (Remotely Piloted Aircraft), la técnica SFM ha abierto nuevas perspectivas en la medida de superficies aumentando la flexibilidad en la adquisición, el tratamiento de los datos y la precisión de los mismos. El desarrollo de softwares SFM ofrece entornos de trabajo de procesamiento de imágenes significativamente más sencillos que las técnicas de fotogrametría aérea tradicional.

---

<sup>1</sup> RPA, Remotely Piloted Aircraft. Se trata de un concepto generalizado utilizado para nombrar a los aviones controlados de forma remota para uso civil. En el caso de que se incluya el aparato y el sistema de control la denominación sería RPAS. A diferencia de los UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o UAS (Unmanned Aerial System), éstos hacen mención explícita a la existencia de un piloto que controla el aparato a distancia.

Desde sus inicios hasta la actualidad, han surgido multitud de nuevas aplicaciones para los sistemas RPA. Este desarrollo puede ser explicado por su bajo coste al ser combinado con los sistemas GPS, necesarios para obtener altas precisiones en los productos (Eisenbeiss, 2004) y su portabilidad. Multitud de estudios han demostrado el potencial de estos sistemas, debido a su capacidad de vuelo cerca de los objetos o áreas de interés desde diferentes posiciones y su posibilidad de combinación con otros datos aéreos o terrestres. Sin embargo, los problemas causados por las vibraciones del RPA, la influencia del viento y el control manual retrasaron la aceptación de estos sistemas como plataformas de medición de fotogrametría hasta el punto de que hoy en día las principales compañías siguen centrando sus esfuerzos en mitigar estas posibles fuentes de error. Usualmente los RPAs llevan incorporadas cámaras ligeras de nivel usuario cuya geometría interna, generalmente inestable, no es la idónea para la reconstrucción de modelos digitales de elevaciones (MDSs); sin embargo tal y como muestra Wackrow et al. (2007) existe potencial en este tipo de sensores para mantener su estabilidad interna en términos de estabilidad temporal y consistencia de fabricación.

Unos de los mayores problemas que surgen al aplicar conjuntamente imágenes obtenidas mediante RPA y la técnica SFM es el denominado efecto domo (dome effect) discernible en los modelos digitales de elevaciones (MDSs). Se trata de un error sistemático que puede alterar los datos de manera significativa y conducir a conclusiones inadecuadas en los estudios realizados. Este efecto se hace visible tanto en las técnicas de fotogrametría tradicional como en las nuevas técnicas SFM; aunque es cierto que dicho error es más pronunciado en los MDSs basados en técnicas SFM. Varios autores señalan la configuración paralela de los ejes a la hora de la adquisición de los datos, un modelo de cámara insuficiente y la ausencia de puntos de control (GCP's<sup>2</sup>) como las causas de este efecto (Wackrow & Chandler, 2008; Rosnell & Honkavaara, 2012; James & Robson, 2014).

La magnitud del efecto domo muestra una relación lineal con el parámetro de distorsión radial de la lente de la cámara. La estimación ligeramente imprecisa de los parámetros de distorsión de la lente esta frecuentemente citada en la literatura afín como la principal causa de este efecto sistemático. Tal y como afirman James and Robson (2014), la atenuación de dicho error sistemático se alcanza considerando un

---

<sup>2</sup> GCP; siglas en ingles de Punto de control terrestre (Ground Control Point). Se utilizará al tratarse de un término significativo y ampliamente utilizado en la literatura afín.

modelo de cámara fiable, utilizando imágenes oblicuas y explotando la relación lineal entre el parámetro de distorsión radial  $k_1$  y la magnitud del efecto domo.

De los tres enfoques citados anteriormente que consiguen mitigar el efecto domo resultante de la utilización de la técnica SFM junto con imágenes obtenidas mediante RPAs, se ha desarrollado una metodología demostrada tanto en procesos de simulación, como en test de laboratorio y prácticos (Wackrow & Chandler, 2011) que erradica este error. Esta metodología consiste en la disposición de la colección de imágenes de manera oblicua y convergente, es decir, la adopción de una configuración no paralela de los ejes a la hora de la adquisición de los datos.

Por otra parte, las posibilidades de generación de MDEs se han multiplicado debido a la amplia variedad y disponibilidad de softwares SFM que ofrecen nuevos algoritmos de procesamiento de imágenes más sencillos y rápidos. En la actualidad existen multitud de programas de procesamiento de imágenes, tanto libres como comerciales, que integran modelos de cámara complejos, permiten estimaciones de parámetros de las cámaras, realizan ajustes e implementan algoritmos densos de comparación de imágenes.

En este contexto surge el presente trabajo fin de máster de la Universidad de Oviedo, “*Comparación de nubes de puntos obtenidas mediante Láser 3D y sistemas estereoscópicos ópticos*”, cuyo principal interés es realizar un aporte al conocimiento de la fotogrametría en general y la reconstrucción 3D a partir de imágenes en particular.

A continuación se muestra el cuadro en el que se puede observar de manera clara las principales características del proyecto.

## Características generales del proyecto

	Características
Estudio	Comparación de nubes de puntos obtenidas mediante Laser 3D y sistemas estereoscópicos ópticos
Lugar	Mieres del Camino (Asturias)
Fecha	Julio de 2016
Softwares de procesamiento de imágenes y nubes de puntos	Pix4D Mapper Pro Agisoft PhotoScan Professional Edition (v 1.2.4) Photomodeler Motion Riscan Pro for RIEGL 3D Laser Scanner CloudCompare
RPA's	Phantom II Vision + Phantom III Advanced
Tipos de cámaras	Phantom Vision FC200 (Phantom II) Phantom Vision FC300S (Phantom III)

**Tabla 1:** Características generales del proyecto

La memoria del presente proyecto está compuesta por siete apartados. Estos apartados, en los casos en los que ha sido necesario, están divididos en sub-apartados. En el primer apartado, **introducción**, se introduce al lector en el tema abordado. Además se describen las características generales del proyecto. En el segundo apartado, **objetivos**, se plantean los objetivos del presente trabajo. En el tercer apartado, **antecedentes** se muestran los principales conceptos teóricos que apuntalan el análisis. El cuarto apartado, **procedimiento**, se muestra de manera detallada el proceso llevado a cabo para la obtención de los resultados finales objeto del proyecto. El quinto apartado, **resultados**, corresponde a la presentación de los resultados. En el sexto apartado se plantean las principales **conclusiones** del trabajo relacionadas tanto con la metodología empleada como con los resultados. La **bibliografía** es el último apartado, en el cual se muestra la totalidad de las fuentes bibliográficas utilizadas. En las últimas hojas del documento se puede observar los anexos del proyecto.

## 2. OBJETIVOS

---

El principal objeto del presente trabajo es el estudio del error sistemático denominado efecto domo que surge al fusionar imágenes obtenidas mediante RPAS y la técnica SFM. Para ello se estudiará el mismo desde diferentes perspectivas, tratando de mostrar su comportamiento ante diversas estrategias que han sido presentadas como posibles técnicas de mitigación del efecto sistemático. Para lograr el análisis del efecto domo se han definido una serie de propósitos u objetivos secundarios:

- 1) Caracterización del efecto domo. Se llevará a cabo una comparación de los resultados obtenidos mediante Escáner Laser Terrestre (TLS<sup>3</sup>) y mediante la utilización conjunta de las técnicas SFM y RPAS.
- 2) Realización de una comparativa de los resultados obtenidos por dos cámaras diferentes: Phantom Vision FC200 y Phantom Vision FC300S, asociadas a los RPA Phantom II y Phantom III respectivamente.
- 3) Utilización de diferentes parámetros de calibración de cámara a la hora de llevar a cabo la reconstrucción. Se realizará la reconstrucción de la nube de puntos densa con la cámara Phantom Vision FC300S sin calibrar y tras la calibración de la lente de la cámara.
- 4) Análisis del comportamiento del efecto domo mediante la comparación de los resultados obtenidos entre una disposición nadiral de las imágenes y a una disposición oblicua.
- 5) Análisis del comportamiento del efecto ante un procesado de los datos en los que se utiliza los GCP's frente a un procesado ausente de puntos de control.
- 6) Análisis del comportamiento del efecto domo mediante la comparación de los resultados obtenidos tras realizar el vuelo de toma de datos a diferentes alturas y orientaciones. Se estudiará el tratamiento conjunto de imágenes a varias alturas y orientaciones frente a imágenes obtenidas solamente a una determinada altura y orientación.
- 7) Realización de una comparativa de los resultados y el funcionamiento de dos softwares SFM: Agisoft Photoscan y Pix4D.

---

<sup>3</sup> TLS; siglas en inglés de Laser Escáner Terrestre (Terrestrial Laser Scanning). Se utilizará al tratarse de un término significativo y ampliamente utilizado en la literatura afín.

### 3. ANTECEDENTES

---

Antes de detallar el procedimiento llevado a cabo para el análisis del efecto domo, conviene considerar una serie de conceptos, tales como el de visión estereoscópica y el de procesado de imágenes, que apuntalan el análisis.

#### 3.1. Visión estereoscópica

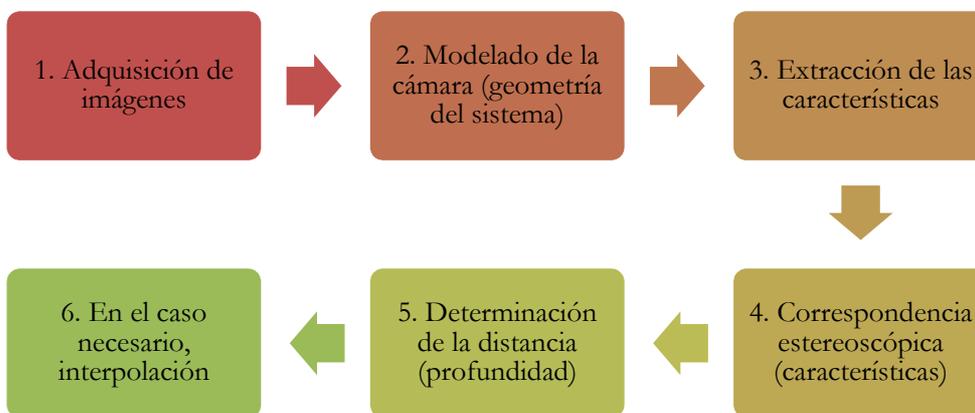
Para llevar a cabo una reconstrucción 3D a partir de imágenes es necesario que todas las áreas de la superficie a ser modelada sean fotografiadas desde dos o más posiciones diferentes. Partiendo de este requisito indispensable, se identifican rasgos o características comunes en múltiples fotografías y se distingue el modelo de cámara matemática, que junto con información sobre la posición y la orientación de la cámara, se utilizan para determinar las coordenadas 3D de los puntos a partir de coordenadas 2D (James & Robson, 2014). Nos encontramos por tanto ante un método de visión estereoscópica.

Es evidente que la superficie a ser modelada es tridimensional mientras que las imágenes son bidimensionales, lo que significa que al pasar de la realidad a la imagen se pierde la denominada tercera dimensión. La visión estereoscópica constituye un procedimiento más para la obtención de dicha tercera dimensión, y por consiguiente, la obtención de la forma de los objetos en la realidad (Montalvo, 2009).

Para ejemplificar mejor el método estereoscópico hay que atender al sistema visual del ser humano. El hombre tiene la capacidad de integrar la imagen que ve cada ojo en una sola, permitiendo percibir en tres dimensiones de manera estereoscópica. Los sistemas estereoscópicos artificiales se basan en el sistema visual humano con el fin de conseguir el mismo resultado; es por ello por lo que se utilizan al menos dos imágenes distintas de la misma escena para la reconstrucción tridimensional. La forma de conocer la distancia entre cada punto en la realidad y la posición de la cámara es mediante el cálculo de la disparidad entre imágenes, dicho de otra forma, mediante el cálculo del mapa de disparidad, que no es otra cosa que una representación de las diferentes profundidades a las que se encuentran los objetos en relación a las posiciones de las cámaras. Posteriormente, conocidos una serie de parámetros de la cámara como la distancia entre los centros ópticos de las cámaras y las distancias focales de las mismas, mediante una relación de triángulos semejantes es posible la

determinación de dichas distancias buscadas. Por tanto, tal y como afirma Montalvo (2009), para la obtención del mapa de disparidad se requiere realmente la identificación del mismo punto u objeto en las dos imágenes, representativo de la misma entidad física en la realidad tridimensional. Al proceso por el cual se llega a identificar en ambas imágenes esa misma entidad tridimensional se le conoce como correspondencia estereoscópica.

La correspondencia estereoscópica estaría involucrada dentro del proceso completo de visión estereoscópica descrito por Barnard y Fischler (1982), que contempla seis pasos principales cuya secuencia natural se muestra en la Figura 1.

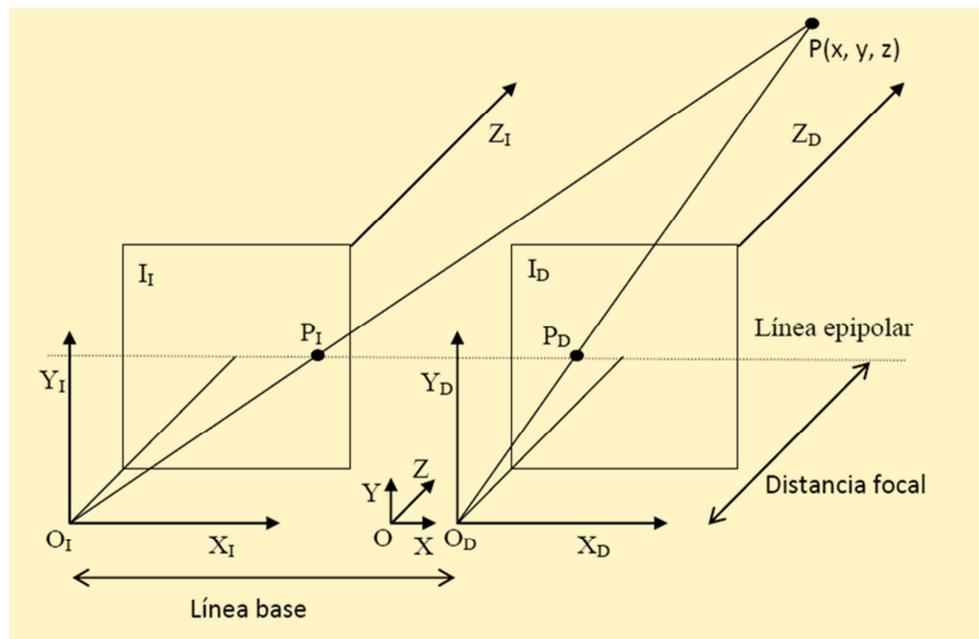


**Figura 1:** Secuencia lógica de la visión estereoscópica

La adquisición de las imágenes dependerá de la finalidad de la aplicación para la que se requiera la estructura tridimensional pues ésta puede realizarse de múltiples maneras; de manera simultánea o a intervalos de tiempo, desde la misma localización o desde localizaciones distintas, con una configuración de los ejes de la cámara idéntica o diferente...etc. En este proceso de adquisición de imágenes, en la mayoría de los casos, se introducen deformaciones en las imágenes que provocan una disminución en la precisión de los resultados, a menos que sean corregidas mediante un proceso previo de calibración de las cámaras. La distorsión radial y la distorsión tangencial son las mayores deformaciones introducidas en este proceso.

Por otra parte, los atributos físicos y geométricos de las cámaras utilizadas para la reconstrucción 3D proporcionan el modelo de cámara, objeto del segundo paso. Es habitual hablar de modelos de cámara en el que los ejes ópticos son paralelos entre sí y

perpendiculares a la línea base, y cuyas líneas epipolares<sup>4</sup> son también paralelas a dicha línea base de tal forma que las proyecciones de los puntos que estén contenidos en una misma línea epipolar en una imagen, tengan su homólogo en la misma línea epipolar de la otra imagen. Sin embargo, este modelo de cámara se da en contadas ocasiones. Por tanto, para conseguir la correspondencia entre puntos de las imágenes es necesaria la orientación de las cámaras, es decir, establecer el paralelismo entre los ejes ópticos de las cámaras del que se hablaba anteriormente y hacer coincidir los ejes de abscisas (eje X) de los sistemas relativos a las cámaras como sucede en la figura 2. Al conseguir esta distribución y orientación de las cámaras, las líneas epipolares que definen el plano epipolar son coincidentes, simplificando de esta manera la búsqueda de correspondencias (Montalvo, 2009).



**Figura 2:** Correspondencia de un sistema estéreo (Montalvo (2009))

En la figura 2 se puede observar como el punto  $P(x,y,z)$  en la realidad tridimensional se proyecta en las imágenes como  $P_I$  y  $P_D$ . Para obtener la proyección de un punto en una imagen es necesario pasar un rayo por su centro óptico y por el propio punto; en la intersección de este rayo con el plano imagen se formará la

<sup>4</sup> Las líneas epipolares son líneas que unen la imagen izquierda y la imagen derecha de un mismo punto. Cualquier punto de la realidad tridimensional unido a los centros proyectivos de las cámaras define un plano, llamado plano epipolar. La intersección de dicho plano con el plano de proyección de una cámara define la línea epipolar.

proyección del punto. Los rayos de proyección POI y POD definen el plano de proyección del punto P, (el plano epipolar).

Una vez orientadas las cámaras, mediante el proceso de extracción de características se obtienen los elementos identificativos y determinados atributos de la imagen que serán utilizados en el siguiente paso de correspondencia estereoscópica. La extracción de un tipo de características u otras dependerá de la técnica de correspondencia entre imágenes. En las técnicas basadas en el área se utilizan la intensidad de los píxeles como característica primordial mientras que en las técnicas basadas en las características se busca correlación entre representaciones simbólicas como zonas de la imagen delimitadas por bordes.

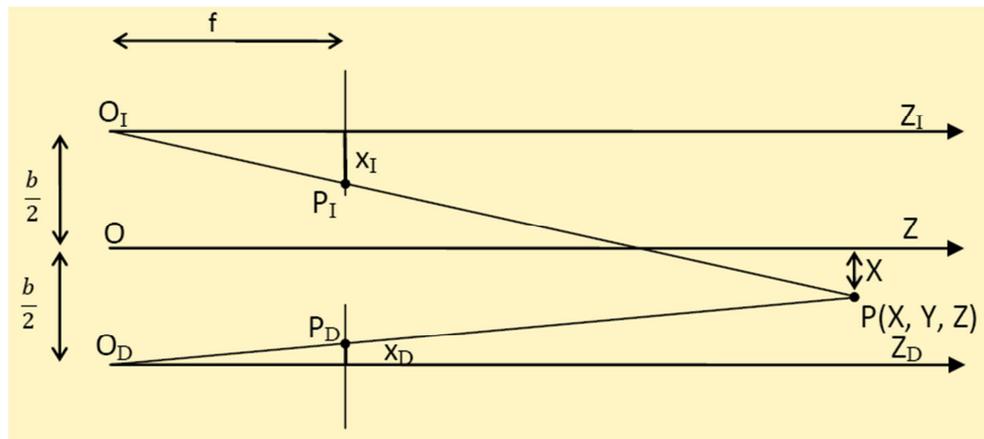
En el paso de correspondencia estereoscópica se determina la proyección en cada imagen del par estereoscópico de cada punto del espacio tridimensional con características similares. Esto se consigue mediante una correspondencia local entre características y un posterior proceso de correspondencia de naturaleza global.

Por último, tras hacer corresponder los elementos que aparecen en las dos imágenes se halla la distancia a la que se encuentran los objetos que aparecen en la realidad por medio de una triangulación. De esta forma, para cada característica en la que se haya encontrado su correspondencia en la otra imagen del par estereoscópico, se tendrá un valor de disparidad, que es el desplazamiento horizontal en los sistemas de referencia relativos a la cámaras entre las proyecciones de las imágenes; almacenados en una matriz, estos valores dan lugar al mapa de disparidad.

La profundidad se obtiene considerando una relación geométrica de semejanza de triángulos. Observando la figura 3 y a partir de las siguientes ecuaciones (1) se puede obtener la profundidad Z del punto P(x, y, z):

$$\begin{aligned} \text{Imagen Izquierda: } \frac{b/2+X}{z} &= \frac{X_I}{f} \rightarrow X_I = \frac{f}{z} \left( X + \frac{b}{2} \right) \\ \text{Imagen Derecha: } \frac{b/2-X}{z} &= \frac{X_D}{f} \rightarrow X_D = \frac{f}{z} \left( X - \frac{b}{2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$d = X_I - X_D = \frac{f \cdot b}{z} \rightarrow z = \frac{f \cdot b}{d}$$



**Figura 3:** Geometría de dos cámaras con ejes ópticos paralelos desde una perspectiva de alzado donde  $b$  es el valor de la línea base y  $f$  es la distancia focal de las dos cámaras.  $P$  es un punto de la realidad con coordenadas  $x, y, z$ , y  $P_I$  y  $P_D$  son sus proyecciones en las imágenes, izquierda y derecha respectivamente (Montalvo (2009))

Cabe destacar que existe un sexto paso, que aunque no se realiza en todos los procedimientos de visión estereoscópica, es frecuente su uso; este paso es la interpolación. Se da cuando los mapas de profundidad resultantes no son lo suficientemente densos para la aplicación a tratar. Se habla de un mapa de profundidad poco denso cuando no hay mucha información sobre las distancias a las que se encuentran los elementos de la realidad por unidad de superficie. Existen varios métodos de interpolación, y aunque no se profundizará en ellos pues no son objeto del trabajo, todos consiguen transformar un mapa de profundidad disperso en un mapa de profundidad denso.

Realizando un apunte al tema de las técnicas de correspondencia entre imágenes, los métodos basados en características suelen obtener mapas de disparidad dispersos mientras que los métodos basados en el área son más apropiados si lo que se pretende conseguir son mapas de profundidades densos. Obviamente, si un mapa es o no poco denso dependerá de la finalidad de la aplicación, aunque bien es cierto que la mayoría de aplicaciones requieren mapas de profundidad densos.

### 3.2. Procesado de imágenes: Orientación de imágenes y correlación densa

Existen multitud de herramientas que permiten modelar el entorno 3D mediante la utilización de imágenes y la implementación de una serie de algoritmos de reconstrucción tridimensional. Al conjunto de algoritmos que permiten dicha reconstrucción se les denomina como Structure from Motion (SFM). El modo de funcionamiento de las herramientas SFM es similar en todas ellas pudiéndose dividir en etapas, alguna de las cuales son coincidentes con las etapas del proceso de visión estereoscópica descrito por Barnard y Fischler (1982); no se olvide que una herramienta SFM no es otra cosa que un sistema estereoscópico artificial que permite la reconstrucción 3D.

Simplificando, un algoritmo SFM trata de establecer correspondencias entre las diferentes imágenes con el objetivo de obtener esas coordenadas 3D mediante una serie de algoritmos de triangulación (Ruiz, 2013).

Normalmente, el proceso de reconstrucción 3D a través de herramientas SFM se divide en dos etapas, aunque esto difiere según el software que se maneje. Por un lado, se genera un mapa 3D disperso de la escena fotografiada y posteriormente, en base a dicho mapa disperso y utilizando técnicas de correlación y procesado de nubes de puntos 3D, se genera un mapa denso de la escena.

Desde el punto de vista de los softwares SFM, es necesario que las imágenes vayan acompañadas de cierta información relativa a la posición de la cámara, así como de los parámetros de calibración de la misma. Estos parámetros son comúnmente conocidos como parámetros extrínsecos e intrínsecos respectivamente y están almacenados en los datos EXIF<sup>5</sup> de las cámaras.

Los parámetros extrínsecos definen la posición de la cámara a lo largo del tiempo en un sistema de referencia global. La posición y orientación de las cámaras en su propio sistema de referencia viene definida generalmente por 6 parámetros (3 para la posición y 3 para la rotación), o bien, por una matriz de transformación. La matriz está formada por 9 parámetros que reflejan la rotación ( $r_{11}$  a  $r_{33}$ ) y tres parámetros para la traslación ( $t_1$  a  $t_3$ ). El vector de traslación es la posición de la cámara y los vectores

---

<sup>5</sup> EXIF, siglas en inglés de Exchangeable Image File Format. Se trata de un estándar creado para almacenar los metadatos de las imágenes digitales; contiene información relativa a la propia imagen y a cómo ha sido tomada.

columnas ( $r_{1i}$   $r_{2i}$   $r_{3i}$ ) expresan las direcciones de los ejes en el sistema de referencia propio de la cámara.

$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{12}$	$t_1$
$r_{21}$	$r_{22}$	$r_{23}$	$t_2$
$r_{31}$	$r_{32}$	$r_{33}$	$t_3$
0	0	0	1

**Tabla 2:** Parámetros de la matriz de transformación (parámetros extrínsecos)

Esta información se puede obtener de diferentes formas. Si se cuenta con un GPS y una unidad de medición inercial (IMU<sup>6</sup>) asociados a la cámara es posible conocer la posición exacta de la cámara a la hora de la captura así como su orientación. Por el contrario, en el caso de que no se disponga de lo anterior, es posible obtener los parámetros extrínsecos utilizando GCP's, de tal manera que éstos sean comunes entre imágenes.

Los parámetros intrínsecos, por su parte, sirven para efectuar la transformación de un punto en 3D en el sistema de referencia de la cámara a un punto en 2D en el sistema de coordenadas de la imagen (Ruiz, 2013). Estos parámetros son generalmente dados en una matriz  $K$  definida generalmente por 5 parámetros, tal que:

$f_x$	$s$	$x_0$
0	$f_y$	$y_0$
0	0	1

**Tabla 3:** Parámetros de la matriz  $K$  (parámetros intrínsecos)

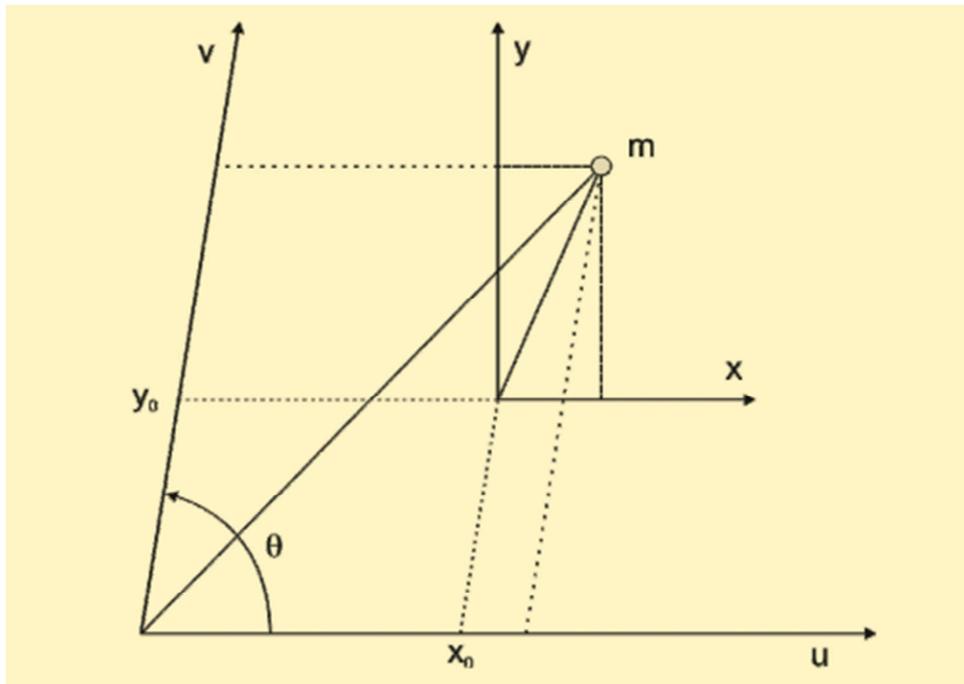
Siendo,

$f_x$ ,  $f_y$ , factores de escala que relacionan el sistema de coordenadas de la cámara con el sistema de coordenadas de la imagen. Se mide en pixeles; normalmente los pixeles son cuadrados y  $f_x = f_y$ .

$x_0$ ,  $y_0$ , la traslación del punto principal. Permiten la coincidencia del origen de coordenadas del sistema de fotocoordenadas con la intersección del eje óptico con el plano del sensor.

$s$ , el factor de Skew ( $\theta$ ), que se relaciona con la falta de ortogonalidad de los ejes en el espacio imagen.

<sup>6</sup> IMU, siglas en ingles de Inertial Measurement Unit. Dispositivo electrónico que mide la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato utilizando de manera combinada acelerómetros y giróscopos.



**Figura 4:** Representación de los parámetros intrínsecos de la cámara (Rodríguez, 2011)

Existen una serie de parámetros intrínsecos no lineales como las distorsiones asociadas a la lente que no son contempladas en este tipo de cámara; aunque es cierto que la mayoría de herramientas implementan un modelo de cámara en el que sí se tiene en cuenta las distorsiones de la lente. Por tanto el modelo de cámara, y en consecuencia, los parámetros intrínsecos difieren de una herramienta a otra, siendo las distorsiones radiales (coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ) y las distorsiones tangenciales (coeficientes  $p_1$ ,  $p_2$ ) los coeficientes que pueden llegar a ser implementados en los modelos de cámara.

La distorsión radial desplaza los puntos de la imagen radialmente a partir del centro, mientras que la tangencial los desplaza perpendicularmente a la línea radial. La causa de la primera es el incorrecto pulido de la lente, mientras que de la segunda es la falta de alineación entre los componentes ópticos (Sanchez et al., 2004).

Como se ha expuesto anteriormente, el proceso de reconstrucción 3D a través de herramientas SFM se divide generalmente en dos etapas. La primera de ellas es la generación de un mapa 3D disperso de la zona. En esta primera etapa se reconstruye la escena a partir del establecimiento de correspondencias entre imágenes. Es

denominado mapa 3D disperso debido a que los detectores de características detectan pocos puntos en común. Esta etapa se podría dividir a su vez en varias subetapas.

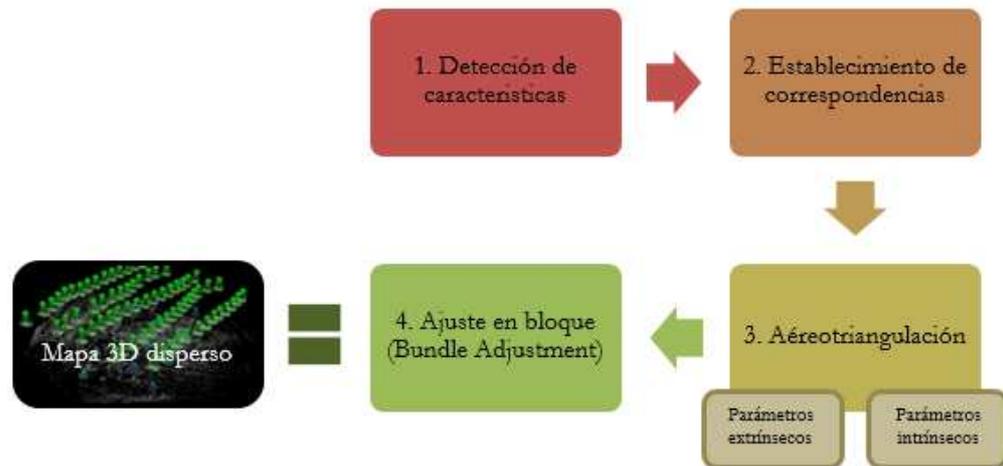


Figura 5: Secuencia de generación de mapas dispersos

En el primer paso, detección de características, hace referencia a los métodos que calculan puntos característicos de una imagen para resolver cierto problema. Estas características pueden ser puntos aislados, curvas o regiones conectadas.

En este paso se examina cada pixel en busca de un determinado patrón. Existen muchos algoritmos detectores de características, como el de SURF o el de BRIEF. Sin embargo, para la generación de un modelo 3D disperso, se necesita la mayor cantidad de características posibles además de que el detector sea capaz de identificar características ante cambios de escala y rotación, pues se procesan imágenes desde diferentes ángulos. El algoritmo detector de características más utilizado por los software SFM es el operador SIFT<sup>7</sup> (Scale-Invariant Feature Transform) (Lowe, 1999). Este algoritmo extrae los puntos característicos (keypoints) mediante el análisis de los cambios de intensidad significativos. La diferencia de este algoritmo respecto de otros es que extrae características de la imagen que son invariantes a escala de imagen, traslación y rotación, y parcialmente invariantes a cambios en la iluminación y el punto de vista de la cámara 3D. Basándose en el modelo de comportamiento de las neuronas a la hora del reconocimiento de objetos, el algoritmo detecta eficientemente las

<sup>7</sup> SIFT, siglas en ingles de Scale-Invariant Feature Transform. Para una explicación más detallada y técnica véase el artículo *Object Recognition from Local Scale-Invariant Features* (Lowe, 1999).

características a través de un enfoque de filtrado por etapas dando lugar a vectores de características, parcialmente invariantes a nivel local, que describen regiones locales de la imagen. Estos vectores son denominados llaves SIFT (SIFT keys) y son generados aproximadamente en un orden de 1000 vectores por imagen. Las llaves SIFT derivadas de la imagen son agrupadas con un enfoque del vecino más cercano para identificar modelos de objetos característicos candidatos. La estimación de los parámetros del ajuste que da lugar a las características objeto se realiza mediante mínimos cuadrados. La extracción de características se consigue cuando al menos tres SIFT keys satisfacen el modelo con un residual bajo.

La correspondencia entre los puntos característicos (keypoints) de cada imagen se lleva a cabo en el segundo paso, establecimiento de correspondencias. En este paso se emparejan los keypoints homólogos de cada imagen. Dichos puntos emparejados se utilizan para estimar los valores iniciales de los parámetros de orientación y posición de las cámaras necesarias para la tercera etapa del proceso, la aéreotriangulación. Ruiz (2013) define la aéreotriangulación como el proceso por el cual se determina la posición de un punto en el espacio físico, a partir de al menos dos imágenes distintas en las que se pueda ver el punto, y el conocimiento de la posición de las cámaras para cada una de las imágenes tal como se muestra en la figura 6.

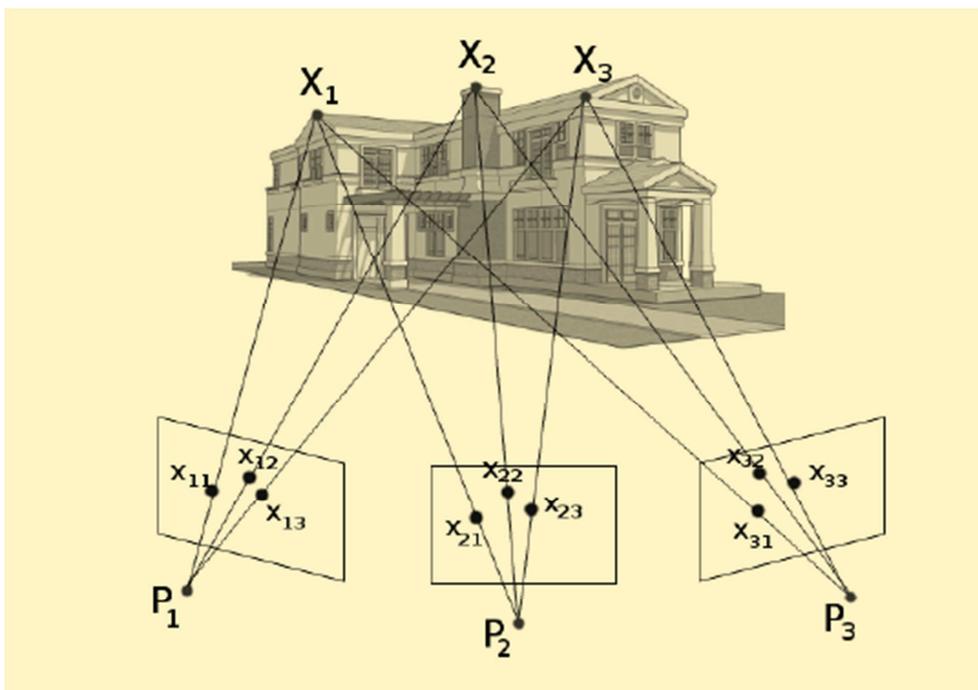


Figura 6: Principio de multi-proyección (Ruiz, 2013)

Los valores iniciales de orientación y posición de la cámara son estimados a partir de los puntos característicos, principalmente por la implementación del paradigma RANSAC (Fischler & Bolles, 1981) en el proceso de orientación externa, con el que se eliminan los posibles errores groseros a la hora del emparejamiento de los puntos de manera sólida y rápida.

Después de calcular los valores estimados de los parámetros, se realiza el procedimiento de ajuste en bloque (Bundle Block Adjustment (BBA)) para refinar dichos parámetros externos e internos de las cámaras. Por tanto para realizar este ajuste son necesarios los siguientes datos iniciales:

- Parámetros de orientación interna de la cámara ( $f_x$ ,  $f_y$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $s$  y si fuera necesario, los parámetros de distorsión)
- Los parámetros de orientación externa de la cámara (parámetros de rotación ( $r_{11}$  a  $r_{33}$ ) y parámetros de traslación ( $t_1$  a  $t_3$ )).
- Las coordenadas imagen de los GCP's ( $x'$ ,  $y'$ ) y de los keypoints.
- Las coordenadas terreno de los GCP's ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). y de los keypoints.

Es preciso señalar que no todas las herramientas SFM integran modelos de cámaras complejos ni consideran los GCP's en el ajuste; por tanto los datos iniciales varían de una herramienta a otra.

El resultado es un mapa 3D disperso de la escena fotografiada. En base a este mapa disperso es posible realizar una densificación de la escena; que es la segunda etapa que se comentaba anteriormente del proceso de reconstrucción 3D a través de herramientas SFM.

Hasta el momento, el proceso seguido para la reconstrucción tridimensional ha sido el de localizar puntos característicos en las imágenes disponibles y mediante técnicas de triangulación calcular su coordenada 3D. El proceso de densificación de la nube de puntos tiene la finalidad de expandir las regiones de correspondencia haciendo uso de algoritmos, tanto locales como globales, que difieren de la herramienta de reconstrucción 3D utilizada. Los algoritmos de correspondencia locales (como por ejemplo, el PMVS (Furukawa & Ponce, 2010) o CMVS (Furukawa et al., 2010)) consideran restricciones aplicadas a pequeños núcleos que rodean el pixel de interés (Eltner & Schneider, 2015); sin embargo, son propensos a ambigüedades. Por el contrario, los algoritmos globales (como por ejemplo el algoritmo MICMAC desarrollado por el IGN francés (Pierrot- Deseilligny & Paparoditis, 2006)) utilizan

restricciones asignadas a la totalidad de la imagen. Por su parte, este tipo de algoritmos son computacionalmente costosos. (Eltner & Schneider, 2015). A su vez, existe otro tipo de algoritmos que combinan características locales con características globales; son los denominados Semiglobal Matching (SGM), que realizan uniones acertadas de píxeles de manera precisa y minimizando el coste computacional (Hirschmüller, 2005).

Una vez se dispone del mapa 3D densificado, es posible eliminar los puntos que no interesan o aquellos erróneos creados en el proceso de reconstrucción tridimensional.

Por último, sin entrar en detalles, existe la posibilidad de procesar la nube de puntos con el fin de obtener MDS y ortomosaicos como resultados. En vistas a crear un modelo continuo, se genera una malla de triángulos a partir de la nube de puntos mediante un algoritmo de triangulación como el de Delaunay<sup>8</sup> y se texturiza re proyectando los puntos 3D en las imágenes originales para obtener el color correspondiente realizando un promedio entre los diferentes valores RGB de dichos puntos en las distintas imágenes que aparece.

---

<sup>8</sup> Método de Triangulación de Delaunay cumple la condición de que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no contiene ningún vértice de otro triángulo

## 4. PROCEDIMIENTOS

### 4.1. Área de Estudio

El estudio se ha llevado a cabo en la localidad de Mieres del Camino, capital del concejo de Mieres, perteneciente a la comunidad autónoma del Principado de Asturias (España). La localización elegida para el estudio fue la plaza ubicada enfrente de la emblemática Bocamina del Socavón Barredo de la Mina Mariana (Mieres).



**Figura 7:** Localización del estudio. Mieres del Camino (España)

Para un estudio óptimo del efecto domo, el terreno elegido ha de ser lo más plano posible y con una extensión lo suficientemente grande como para que dicho efecto sea notorio. El área de terreno utilizada para el trabajo tiene una extensión aproximada de 25m x 20m y está compuesta por hormigón en su totalidad.



**Figura 8:** Área de estudio localizada en la bocamina del Socavón Barredo de la Mina Mariana (Mieres)

## 4.2. Material utilizado

El material utilizado para la realización del análisis consta de una serie de herramientas tanto de software como de hardware. En primer lugar se ha requerido de un Láser Escáner Terrestre (TLS) para realizar la caracterización del efecto domo, concretamente el modelo utilizado ha sido el TLS Riegl LMS-Z390i. El tratamiento de los datos obtenidos mediante TLS se ha realizado utilizando el software Riscan Pro for RIEGL 3D Laser Scanners. A su vez se ha comparado los resultados proporcionados por el TLS con los obtenidos mediante dos RPA (Phantom II Vision + y Phantom III Advanced) cuyas cámaras incorporadas son Phantom Vision FC200 y Phantom Vision FC300S respectivamente. El procesamiento de dichas imágenes obtenidas mediante los RPA se ha llevado a cabo mediante dos software SFM: Pix4D Mapper Pro y Agisoft PhotoScan. La comparación de las nubes de puntos se ha realizado mediante el software Cloud Compare y el proceso de calibración de las cámaras con el software Photomodeler Motion. A continuación se presenta de manera más detallada el material utilizado para la ejecución del análisis:

### 4.2.1. *TLS Riegl LMS-Z390i*

El TLS utilizado para el escaneado de la zona de estudio ha sido el Riegl LMS-Z390i. Se trata de un láser escáner terrestre rápido y de alta precisión que proporciona resultados altamente definidos. Opcionalmente, puede llevar asociadas una serie de cámaras con las que proporcionar imágenes en color de alta resolución. Las principales características del TLS son las siguientes:

---

Alcanza distancias de hasta 400 m
Repetibilidad hasta 2 mm
Tasas de mediación de hasta 11000 ptos/seg
Campo de visión de hasta 80° x 360°
Permite transmisión inalámbrica de datos.
Portable, resistente y robusto.

---

**Tabla 4:** Características principales del TLS Riegl LMS-Z390i

El procesamiento de los datos obtenidos por el escáner se ha realizado con el paquete de software asociado al mismo, Riscan Pro for RIEGL 3D Laser Scanner. Con este software se ha procesado la nube de puntos escaneada con el fin de dotarla del sistema de referencia deseado.

#### 4.2.2. RPA Phantom II Vision +

Uno de los sistemas aéreos no tripulados elegidos para realizar el vuelo de toma de datos ha sido el que se muestra en la figura 9. Denominado Phantom II Vision +, fue el primer aparato de la empresa DJI en llevar incorporado un sistema giroestabilizador de cámara de tres ejes.



Figura 9: Modelo de RPA Phantom II Vision +

La cámara asociada al Phantom II es la Phantom Vision FC200 cuyas especificaciones más importantes se pueden ver en la siguiente tabla:

Características	Descripción
Sensor	1/ 2.3" 14 megapíxeles
Lente	FOV 140° ; f/2.8
Resolución	4384×3288 píxeles

Tabla 5: Características principales del RPA Phantom II Vision +

#### 4.2.3. RPA Phantom III Advanced



**Figura 10:** Modelo de RPA Phantom III Advanced

El otro de los RPA utilizados ha sido el Phantom III Advanced. La cámara asociada a este aparato es la Phantom Vision FC300S, que mejora a la Phantom II en términos de calidad y ruido en la imagen. También lleva asociado un gimbal giroestabilizador de tres ejes que permite estabilizar la cámara y sus características principales se pueden ver en la tabla XX.

Características	Descripción
Sensor	1/ 2.3" 12.4 megapíxeles
Lente	FOV 94° f/2.8
Resolución	4384×3288 píxeles

**Tabla 6:** Características principales del RPA Phantom III Advanced

#### 4.2.4. Photomodeler Motion

Se trata del producto avanzado de Photomodeler, ya que integra las capacidades de Photomodeler y Photomodeler escáner. Photomodeler integra un conjunto de softwares diseñados para la creación de modelos 3D precisos a partir de imágenes.

Photomodeler es el producto base; Photomodeler Escáner posee las capacidades del producto base y agrega el escaneo y el modelado de superficies densas, y por último, Photomodeler Motion, contiene todo lo anterior e implementa la cuarta dimensión en la creación de los modelos, es decir, extrae puntos y superficies 3D de escenas variantes en el tiempo.

Entre la multitud de herramientas y utilidades que incorpora Photomodeler Motion, se encuentra el calibrador de cámara, con el que es posible la medición precisa de los parámetros internos de la cámara. Con este software se ha realizado la calibración de la cámara. El hecho de elegir este software para la calibración de la cámara en lugar de otros softwares es la solución que ofrece en cuanto a parámetros estimados, ya que este programa proporciona entre sus resultados el modelo de cámara deseable.

#### 4.2.5. *Pix4D*

El procesamiento de las imágenes obtenidas mediante RPA se ha desarrollado con el software Pix4D Mapper Pro. Se trata de uno de los productos ofertados por la compañía suiza Pix 4D; concretamente, este paquete de software permite la reconstrucción de mapas 3D a partir de la combinación de imágenes aéreas tomadas por vehículos aéreos no tripulados u otro tipo de aeronaves convencionales, aunque también ofrece otro tipo de resultados como la generación de ortomosaicos DEM legibles por cualquier otro paquete de SIG profesional. A pesar de estar diseñado para producir cartografía basada en imágenes tomadas con cámaras convencionales de bajo peso, también funciona con sensores más grandes y precisos. El software está disponible tanto en la nube (point cloud) como en versión de escritorio.

#### 4.2.6. *Agisoft PhotoScan*

El otro software utilizado para el procesamiento de imágenes obtenidas por RPA es el software Agisoft Photoscan, desarrollado por la empresa Rusa Agisoft LCC. Al igual que el anterior, su objetivo es realizar la reconstrucción 3D basada en imágenes y la correspondencia densa basándose en diferentes algoritmos y parámetros incorporados. De hecho, los flujos de trabajo en ambos software son parecidos. A continuación puede verse una tabla comparativa de ambos software de reconstrucción 3D basados en imágenes.

Software	Pix4D	PhotoScan
Modelo de cámara	Distancia principal; Punto Principal; 3 Parámetros de distorsión radiales; 2 Parámetros de distorsión tangencial; Un modelo para todas las imágenes.	Distancia principal; Punto Principal; 4 Parámetros de distorsión radiales; 4 Parámetros de distorsión tangencial; Un modelo para todas las imágenes.
Refinamiento de los parámetros de la cámara	BBA con integración de los valores iniciales de la cámara	BBA
Correspondencia densa	Algoritmo propio	Algoritmo propio
Georreferenciación	GCP's integrados en el BBA	GCP's integrados en el BBA
Licencia	Comercial (6000 € aprox.)	Comercial (3000 € aprox.)

**Tabla 7:** Comparación entre herramientas de reconstrucción 3D basadas en imágenes

#### 4.2.7. *Cloud Compare*

CloudCompare es un software de edición y procesamiento de nubes de puntos tridimensionales capaz de manipular millones de puntos simultáneamente. Integra no solo herramientas de comparación directa sino también algoritmos de registro, remuestreo, gestión de campos escalares, estadísticas de cálculo y herramientas de mejora de la visualización. Este software se ha utilizado para realizar la comparación de las nubes de puntos obtenidas tanto por técnicas RPA como por TLS.

### 4.3. Metodología

#### 4.3.1. Datos de referencia

Se establecieron una serie de puntos de control, o GCP's, distribuidos de manera uniforme por la totalidad del área de estudio. Estos puntos de control tienen la finalidad de registrar los datos tanto del TLS como de los RPA. Se implantaron un total de 11 GCP's materializados en el terreno mediante clavos topográficos. Estos puntos fueron medidos con estación total mediante radiación; con la ayuda de un miniprisma se mejoró la precisión de la posición de los puntos (Fig. 11). Como no se disponían de las coordenadas de la estación, se decidió dar coordenadas relativas a los puntos en un sistema de referencia arbitrario. El hecho de trabajar con coordenadas absolutas o coordenadas relativas no altera el resultado del análisis. Por tanto, se decidió que el análisis se realizaría en su totalidad en coordenadas relativas; afirmación a tener en cuenta a la hora de trabajar con los software de procesamiento de imágenes, como se verá más adelante. Una vez radiados todos los puntos se obtienen las coordenadas de los GCP's del proyecto en un sistema de referencia arbitrario. Ver en el anexo 1 las coordenadas de los GCP's utilizados en el proyecto.



**Figura 11:** Herramientas utilizadas en el establecimiento de los puntos de control. La imagen izquierda muestra el clavo de uno de los puntos de control; la imagen central, la estación total en el punto de estacionamiento y la imagen derecha muestra el miniprisma utilizado, modelo GMP111

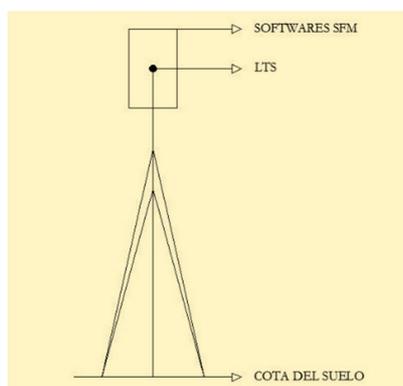
Por otra parte, dado que los GCP sirven para registrar también los datos del TLS, se colocaron reflectores cilíndricos sobre cada uno de los puntos de control. Estos reflectores cilíndricos fueron colocados sobre jalones que a su vez estaban sujetos por trípodes. De esta manera se conseguía que los reflectores fuesen escaneados para así

poder orientar la nube de puntos obtenida mediante laser al sistema de referencia arbitrario creado al establecer los GCP.



**Figura 12:** Disposición de los reflectores cilíndricos colocados sobre los GCP

Es importante destacar el tema de las alturas de los GCP's. En las coordenadas planimétricas no hay problema ya que la posición XY a la hora de trabajar tanto con las imágenes aéreas como con los datos LTS va a ser la misma. Sin embargo, no ocurre lo mismo para la componente altimétrica; mientras que las coordenadas de los GCP's están referidas al suelo, el LTS registra los reflectores a una determinada altura respecto del suelo, concretamente a la altura en la que se ubica el centro geométrico del cilindro reflector. Lo mismo ocurre a la hora de trabajar con los softwares SFM, en los que la posición del GCP queda marcada en la parte superior del cilindro. Por tanto, hay que modificar la componente altimétrica para poder comparar los datos, es decir, hay que sumar la altura a la que se encuentra el centro geométrico del cilindro reflector a la hora de trabajar con el LTS y la altura de la parte superior del cilindro a la hora de trabajar con los software SFM a la componente Z del GCP's. En la figura 10 se puede observar de manera visual la problemática de las alturas en los GCP's.



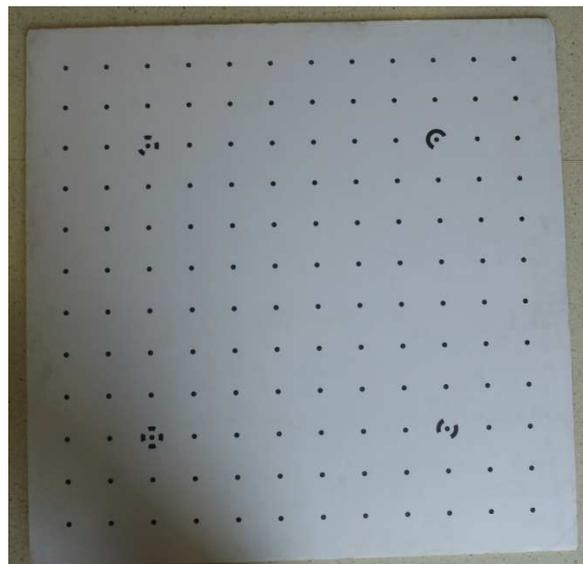
**Figura 13:** Problemática de las alturas en los GCP's al comparar resultados

#### 4.3.2. Calibración de la cámara

En este estudio se utilizaron dos cámaras diferentes para la adquisición de las imágenes con el fin de observar el comportamiento del efecto domo ante diferentes tipos de cámara. Las cámaras utilizadas son las integradas en los modelos de RPA Phantom II Vision + y Phantom III Advanced, denominadas Phantom Vision FC200 y Phantom Vision FC300S respectivamente.

Con el objeto de dar respuesta a uno de los objetivos del análisis, el de reconstruir la escena teniendo en cuenta diferentes modelos de cámara, una de las cámaras (Phantom Vision FC300S) fue calibrada inmediatamente después de la captura del terreno con el fin de obtener parámetros de cámara estables. Se estimaron el punto principal, distancia focal y los parámetros de distorsión radial y tangencial ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $p_1$  y  $p_2$ ) de la lente.

Aunque existen metodologías de calibración mediante observaciones en campo, la técnica de calibración utilizada fue realizada en el laboratorio de fotogrametría mediante la utilización del software Photomodeler Motion. El proceso consiste en realizar fotografías a una malla de calibración cuyas posiciones relativas son conocidas con exactitud (Fig. 14). Los parámetros internos son determinados mediante mediciones precisas del tablero, y comparando sus posiciones con las posiciones que habrían ocupado si la cámara hubiese producido una proyección central perfecta. El software permite asignar los parámetros de calibración que se deseen.



**Figura 14:** Tablero de calibración del software Agisoft Lens

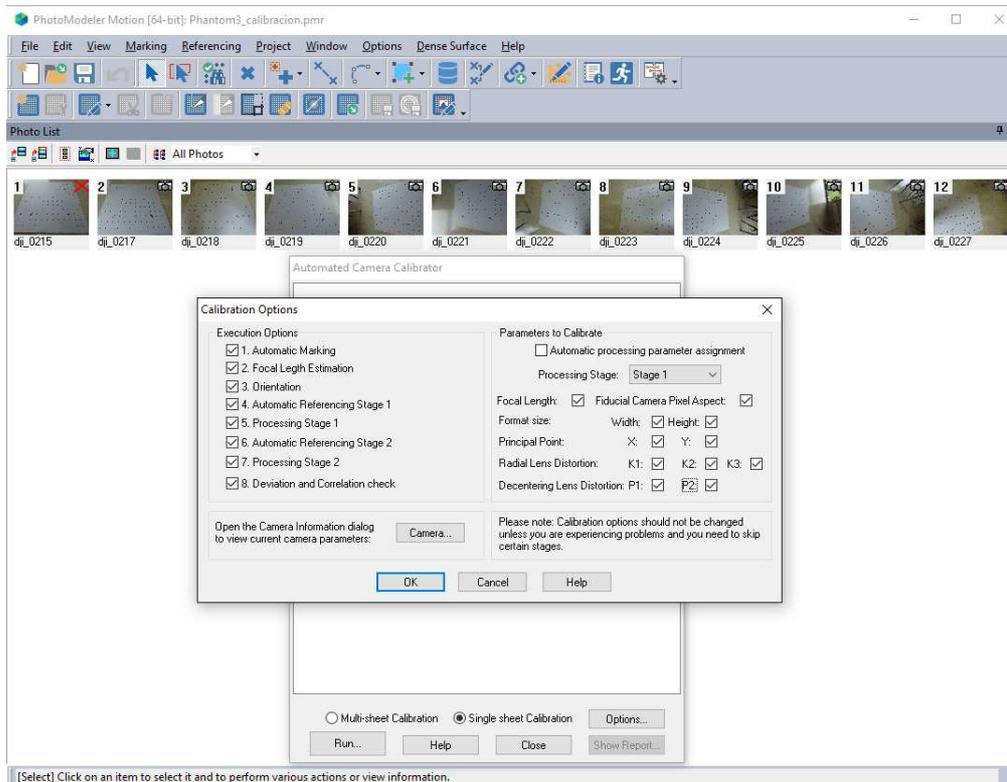


Figura 15: Opciones de calibración del software Photomodeler Motion

El resultado del proceso es un informe de calibración en el que se muestran los resultados de la calibración de la cámara (Ver Anexo 2).

#### 4.3.3. Adquisición de los datos

Con el fin de caracterizar el efecto domo, se realizó en primer lugar un escaneado de la zona; para ello se utilizó el TLS Riegl LMS-Z390i, que proporciona una exactitud de 6 mm en valor absoluto y 3 mm en relativo, según sus especificaciones técnicas. El hecho de contar con la nube de puntos proporcionada por el TLS permite poder comparar dichos datos, asumidos como datos de referencia, con los obtenidos mediante utilización conjunta de las técnicas SFM y RPAS.

El dispositivo se situó fuera de la zona de estudio para así evitar zonas de sombra. La forma de medición del escáner es de tipo tiempo de vuelo y durante el escaneado se realizó un primer panorama previo, un escaneado fino de los reflectores

y un escaneado de alta densidad, junto con una captura fotográfica realizada simultáneamente. Tras el escaneado, la consiguiente nube de puntos fue procesada con el Software Riscan Pro for RIEGL 3D Laser Scanner para dotarla del sistema de referencia local del proyecto, obteniendo como resultado una nube de puntos densa con una densidad media de punto de aproximadamente un punto por cada 14 cm.

En el caso de los datos adquiridos con el RPA, éstos fueron capturados en función de los objetivos marcados. Existen varios factores a tener en cuenta a la hora de la adquisición de imágenes como la altura de vuelo, el recubrimiento o la configuración de los ejes de la cámara.

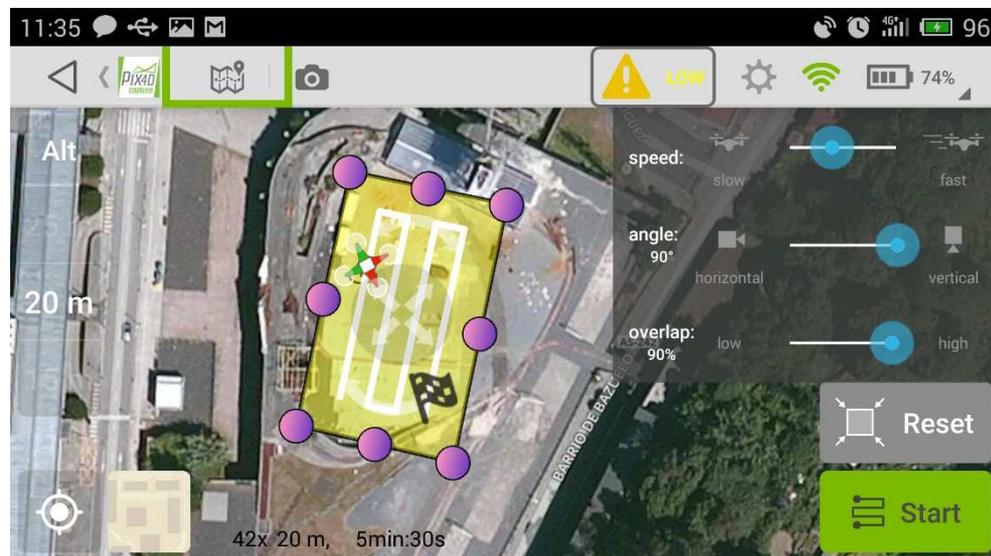


Figura 16: Ejemplo de configuración de vuelo

En la siguiente tabla pueden verse las diferentes configuraciones de vuelos realizadas:

RPA	Vuelo	Altura(m)	Configuración de los ejes	Recubrimiento	Dirección
Phantom II	1	20	Paralela	90%	N/S
	2	20	Paralela	90%	E/O
	3	30	Paralela	70%	N/S
	4	20	Paralela	90%	N/S
	5	Vuelo libre configuración No paralela (60°)			
Phantom III	6	20	Paralela	90%	E/O
	7	20	Paralela	90%	N/S
	8	20	No Paralela (60°)	90%	N/S
	9	30	Paralela	75%	E/O
	10	30	Paralela	80%	E/O
	11	20	No Paralela (60°)	85%	N/S

**Tabla 8:** Configuraciones de vuelos de adquisición de imágenes

#### 4.3.4. *Procesamiento de los datos*

En este apartado se diferenciará el trabajo realizado con los datos obtenidos mediante LTS y los obtenidos mediante RPA. Aunque la finalidad de ambos trabajos es conseguir una nube de puntos densificada para su comparación, los softwares utilizados y la metodología son diferentes. A su vez se describirá el tratamiento de las nubes de puntos resultantes de los trabajos anteriores a la hora de la comparación entre ellos.

##### a) *Riscan Pro for RIEGL 3D Laser Scanner*

En el caso de los datos adquiridos con TLS, se trató la información del escaneado con el software con Riscan Pro for RIEGL 3D Laser Scanner. Se parte de una nube de puntos escaneada desde el punto de estación. Esta estación lleva asociada a ella un sistema de referencia propio del escáner (SOCS), es decir, la posición y

orientación de la estación escáner en su propio sistema de referencia. La matriz que establece el software RiscanPro para describir la posición y orientación de un escaneado es una matriz de 4 x 4 denominada SOP (Sensor's Orientation and Position) y está formada por 9 parámetros que reflejan la rotación (r11 a r33) y tres parámetros para la translación (t1 a t3) (Ver tab. 2).

A su vez, durante el escaneado quedan establecidos los denominados tiepoints (puntos de paso) que son los centros de los reflectores cilíndricos dispuestos en la zona de estudio. Al disponer de una sola estación de escaneado, el sistema de referencia propio del escáner (SOCS), es definido como sistema de proyecto (PRCS); por consiguiente los tiepoints son referidos a dicho sistema de proyecto. Estos puntos sirven para registrar un escaneado en un determinado sistema de referencia, es decir, para georreferenciar el proyecto a un sistema de referencia global (GLCS) al cual asociar la nube de puntos. El sistema de referencia al que asociar la nube de puntos es el sistema de referencia arbitrario marcado por los GCP's, por lo que se deben importar; siempre teniendo en cuenta la altura adecuada.

The screenshot shows the RISCAN PRO v1.6.3 software interface. The main window displays a list of tiepoints under the 'TPL PRCS (own cs)' tab. The list includes columns for Name, Link, Ref., RefType, Size, X, Y, Z, Height, Δ X, Δ Y, and Δ Z. The data is as follows:

Name	Link	Ref.	RefType	Size	X	Y	Z	Height	Δ X	Δ Y	Δ Z
10	10	0		0.00	-13.888	28.886	-1.595	0.000	0.021	0.001	0.047
7	7	0		0.00	-10.346	16.745	-2.776	0.000	0.004	0.011	-0.005
m	11	0		0.00	-27.897	26.532	-1.570	0.000	0.000	0.025	0.007
9	9	0		0.00	-20.950	19.507	-2.607	0.000	-0.003	0.022	-0.005
8	8	0		0.00	-26.444	13.989	-2.213	0.000	0.000	0.002	0.000
6	6	0		0.00	-18.961	8.078	-2.282	0.000	-0.006	-0.019	0.006
4	4	0		0.00	-8.789	2.509	-0.962	0.000	0.001	-0.011	0.005
5	5	0		0.00	-24.963	-0.170	-1.648	0.000	0.003	0.001	0.006
3	3	0		0.00	-16.250	-8.914	-1.659	0.000	0.000	-0.001	-0.002
2	2	0		0.00	-23.416	-14.165	-0.948	0.000	0.002	-0.006	-0.005
1	1	0		0.00	-7.294	-12.173	-1.674	0.000	0.000	-0.027	-0.018

Summary statistics shown in the window:

- Corresponding tiepoints: 11
- Std. deviation X [m]: 0.0057
- Std. deviation Y [m]: 0.0082
- Std. deviation Z [m]: 0.0122
- Std. deviation φ [deg]: 0.0160
- Std. deviation α [deg]: 0.0162
- Std. deviation ψ [deg]: 0.0383
- Standard deviation [m]: 0.0146

Figura 17: Lista de tiepoints en el sistema de referencia del proyecto (PRCS) con los residuos de la transformación entre sistemas realizada.

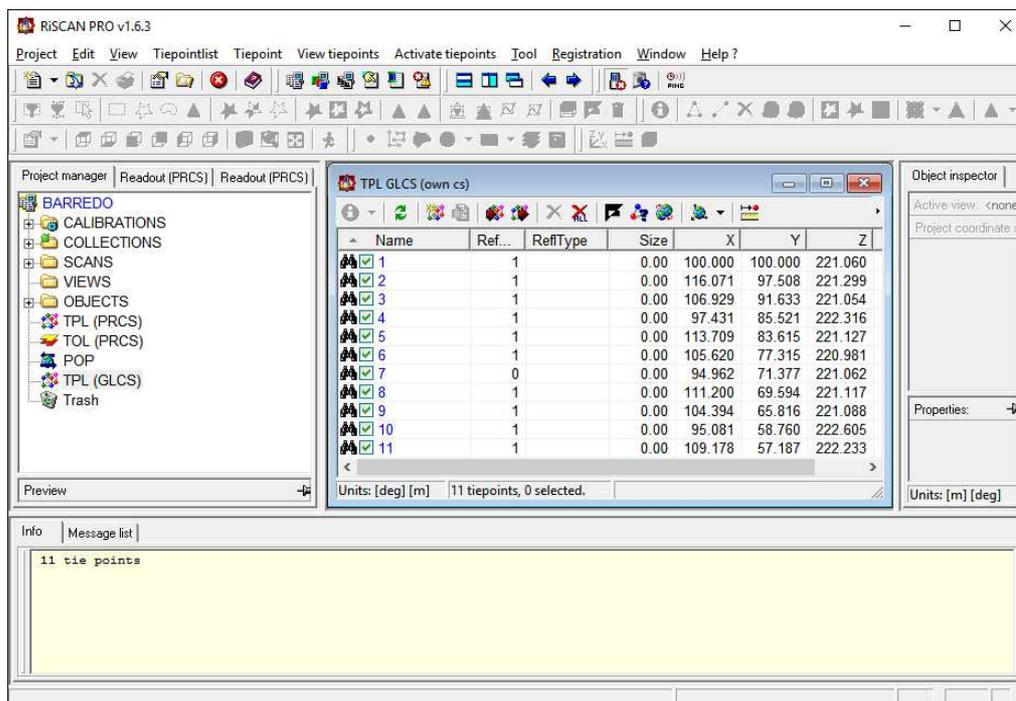


Figura 18: Lista de tiepoints de referencia (GCP's) en el sistema de referencia global (GLCS)

Llegados a este punto se disponen de una serie de tiepoints en el sistema de referencia del Proyecto (PRCS) y una serie de GCP's en el sistema de referencia global (GLCS). Ambos puntos son correspondientes, pero se encuentran en distintos sistemas de referencia. La forma de georreferenciar los tiepoints y por consiguiente la nube de puntos es calculando la matriz de transformación (rotación y translación) denominada por el software como POP (Project Orientation and Position). Esta matriz debe calcularse de manera que se minimice el error en la transformación; esto se consigue eliminando los tiepoints que generan mayores residuos. A continuación puede verse la matriz de transformación POP obtenida.

-0.960875711	-0.274808410	0.034615101	89.711167749
0.275921127	-0.960615111	0.032956657	90.398977415
0.024195023	0.041218289	0.998857174	223.390760839
0	0	0	1

Tabla 9: Matriz de transformación POP

Al registrar las estaciones, el software además de mostrarte el número de puntos (tiepoints) correspondientes entre ambos sistemas, muestra la desviación estándar

(StdDev) producida entre los tiepoints que queremos registrar y los tiepoints tomados como referencia (GCP's), a la hora de calcular las matrices de transformación.

		Std. Deviation X[m]	0,0057
Std. Deviation(m)	0.0146	Std. Deviation Y[m]	0,0062
		Std. Deviation Z[m]	0,0122

Tabla 10: Residuos de la transformación

El resultado del proceso es una nube de puntos de la zona, georreferenciada al sistema de referencia local creado. La nube de puntos, es posible exportarla tanto en el sistema PRCS como en el sistema GLCS con las coordenadas X, Y, Z de cada punto en el sistema de referencia deseado y su correspondiente color RGB para su posterior tratamiento en el software Cloud Compare.

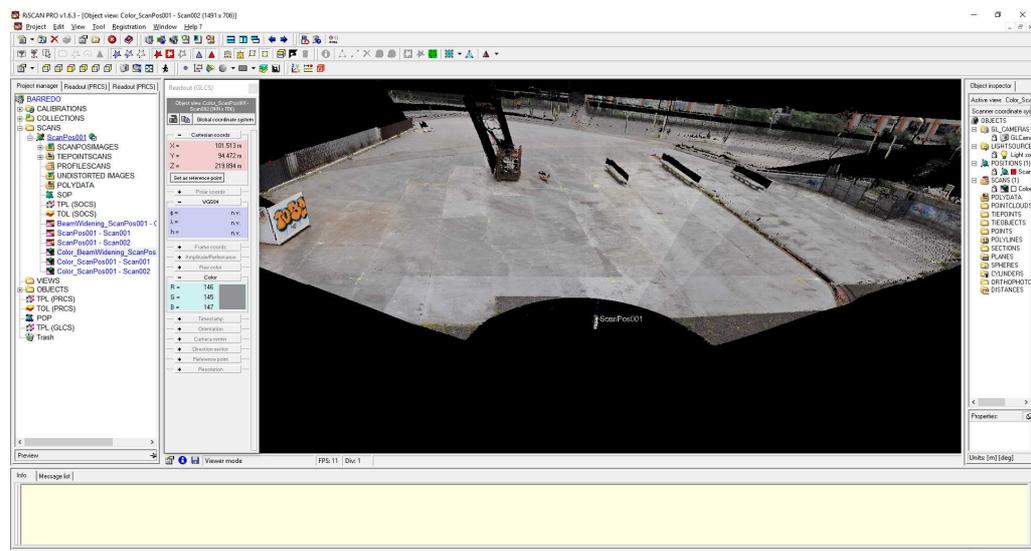


Figura 19: Nube de puntos densa obtenida tras el tratamiento en Riscan Pro for RIEGL 3D Laser Scanner

### b) Agisoft Photoscan

Uno de los softwares utilizados para el tratamiento de los datos obtenidos mediante RPA, ha sido el programa Agisoft Photoscan Professional Edition. En este caso se parte de un conjunto de imágenes de la zona de interés que pueden estar

geoetiquetadas, es decir, pueden contener coordenadas asociadas (longitud, latitud y altura) del punto en el que se ha tomado la imagen, o sin geoetiquetar. Las imágenes obtenidas con los RPA estaban geoetiquetadas pero dado que no era de interés en el análisis llevar geolocalizado el proyecto, se decidió borrar las coordenadas y no geolocalizar el procesado de los datos.

Una vez cargadas las imágenes, aparecerán seguidas de un indicador NC, en el caso de que no estén calibradas, es decir, en el caso en que las imágenes no dispongan de la suficiente información (EXIF data) para calcular la distancia focal; o bien seguidas del indicador NA, que indica que los parámetros de orientación externos de la cámara no han sido estimados.

Por tanto el primer paso a ejecutar por el Software Photoscan es la alineación de las fotos, es decir, buscar las posiciones y orientaciones de la cámara para construir una nube de puntos dispersa. Para ello se recurre al menú *Flujo de Trabajo* seleccionando la opción *Orientar fotos*; se estimarán los parámetros de orientación externa de la cámara.

El procesado de imágenes con Photoscan tiene cuatro pasos principales. Una vez realizado el primero, la orientación de las imágenes, los siguientes pasos son: *Crear nube densa de puntos*, *crear malla* y *crear textura*.

1	Alineación de fotos
2	Construcción de nube de puntos densa
3	Construcción de malla (modelo 3D polinomial)
4	Generación de textura

**Tabla 11:** Etapas del procesamiento en Photoscan

Estas opciones, al igual que la de *Orientar fotos* están disponibles en el menú *Flujo de Trabajo*. Han de ejecutarse siguiendo el orden descrito, de otra forma el software no permitiría procesar los datos. Los cuatro pasos necesarios para el desarrollo del modelo disponen de una serie de parámetros, los cuales dependiendo de su elección se obtiene un modelo más o menos preciso, más o menos rápido y con mayor o menor calidad. Para la realización del análisis tan solo ha sido necesario realizar los dos primeros pasos hasta obtener la nube densa de puntos; siempre bajo la premisa de

realizar el proceso con la mayor precisión y calidad posible a sabiendas de que el tiempo empleado en el procesado sería mayor.

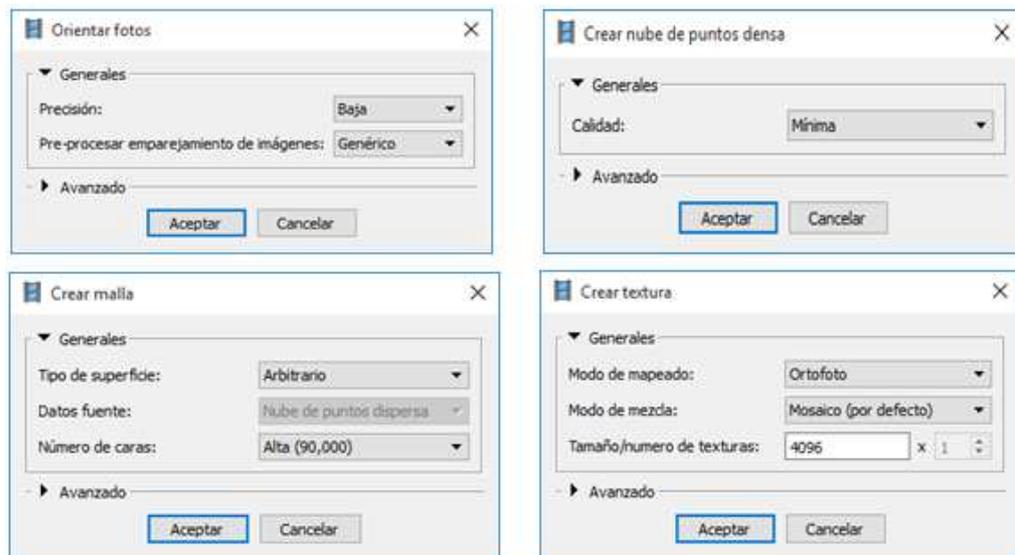


Figura 20: Opciones de procesamiento en Photoscan

El proyecto se puede procesar tanto de manera georreferenciada como no georreferenciada. El resultado será un proyecto en unas coordenadas locales definidas por el programa o en coordenadas del sistema de referencia establecido. En el caso de querer establecer un sistema de referencia al proyecto, Agisoft Photoscan permite instaurar el sistema de coordenadas del proyecto basándose o bien en los puntos de coordenadas terreno conocidos (GCP's), o bien en las coordenadas del punto en el que se ha tomado las imágenes con la cámara. Tanto los GCP's como las coordenadas de la cámara pueden ser introducidos de forma manual o bien mediante archivos en el *panel de referencia* del proyecto. Dado que se cuenta con GCP's en el sistema de referencia local del proyecto, una vez orientadas las imágenes, se ha introducido el archivo con las coordenadas.

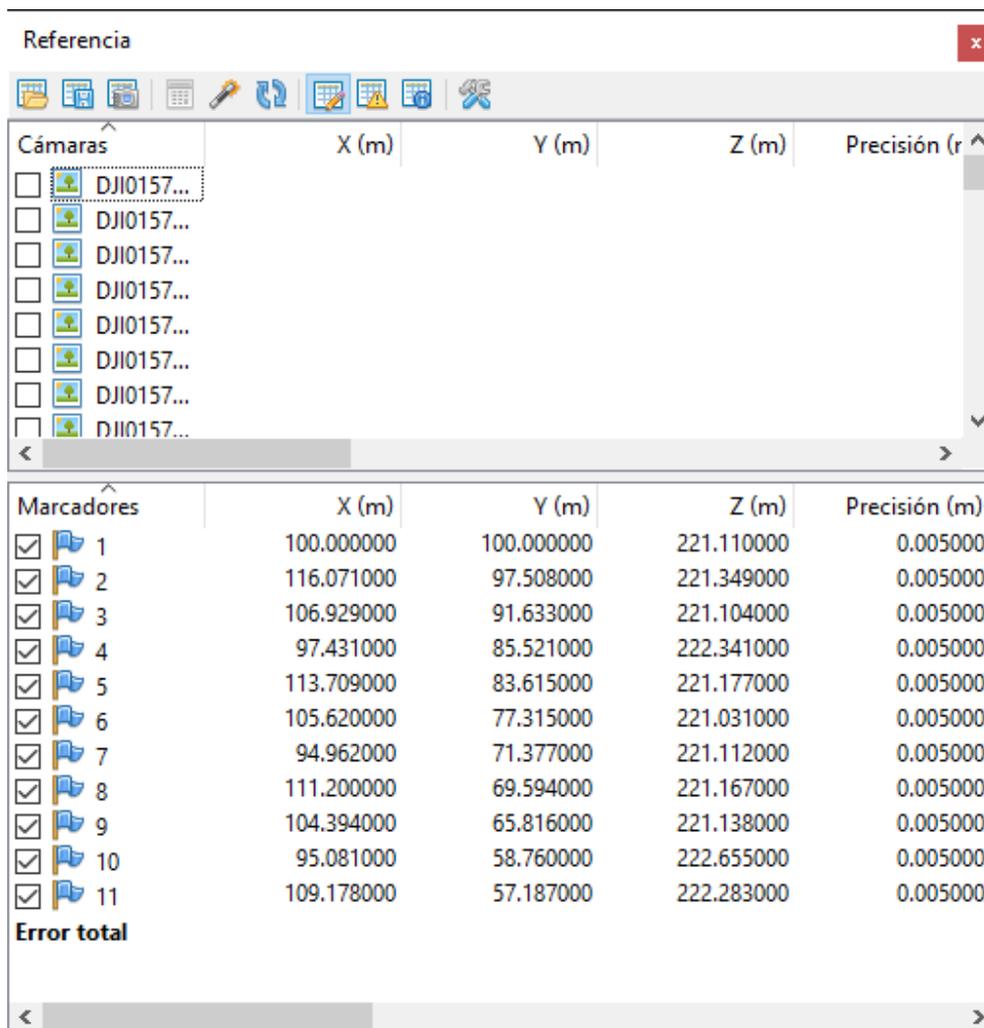


Figura 21: Panel de referencia en PhotoScan

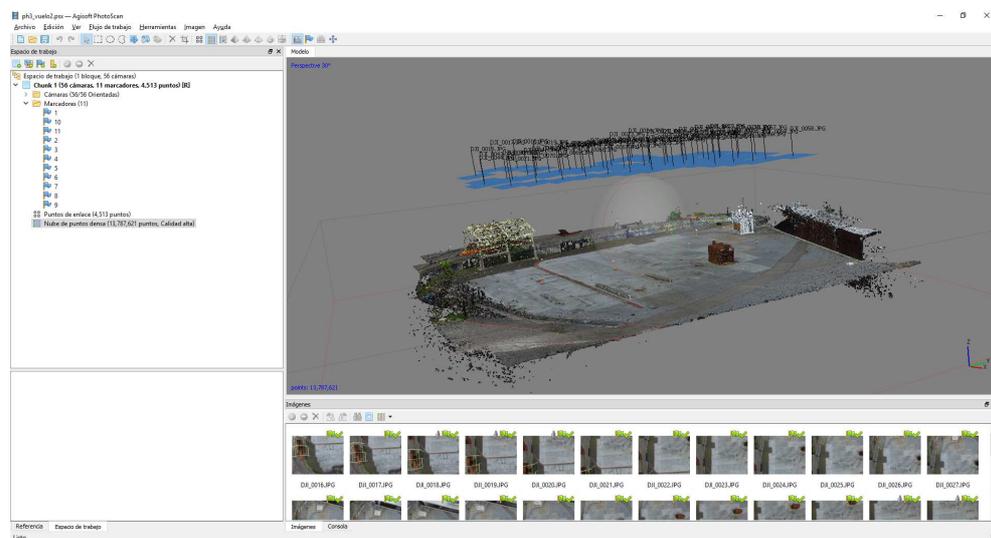
Para el establecimiento de los GCP's es necesaria la utilización de lo que PhotoScan denomina marcadores. Para llevar a cabo esta tarea se debe situar los marcadores en las imágenes en las que sean visibles. Con el establecimiento de un marcador en al menos dos imágenes PhotoScan ya coloca dicho marcador en las imágenes correspondientes. Una vez terminada la colocación, se puede modificar su ubicación para buscar una mayor exactitud.



**Figura 22:** Establecimiento de marcadores en PhotoScan

Tras el establecimiento de los GCP's, se ha de ejecutar el segundo paso. De esta manera, se consigue una nube de punto densificada. El programa muestra los errores entre la realidad y el modelo.

El resultado de todo el proceso, al igual que con el software Riscan Pro for RIEGL 3D Laser Scanner, es una nube de puntos de la zona, georreferenciada o no al sistema de referencia global del proyecto creado. La nube de puntos puede ser exportada con las coordenadas X, Y, Z de cada punto en el sistema requerido junto con su correspondiente color RGB para su posterior tratamiento en el software Cloud Compare.



**Figura 23:** Nube de punto densa obtenida tras el tratamiento en Agisoft PhotoScan

c) Pix4D Mapper Pro

El otro software utilizado para el tratamiento de los datos obtenidos mediante RPA ha sido PIX4D Mapper Pro. Al abrir un nuevo proyecto con este programa lo primero que se requiere es cargar las imágenes de la zona a reconstruir en forma tridimensional. Una vez introducidas las imágenes el siguiente paso del formulario de carga de imágenes nos muestra la geolocalización de las imágenes. Como se ha expuesto anteriormente, se limpia la geolocalización de las imágenes para trabajar en coordenadas locales.

Nuevo proyecto

Propiedades de imagen

Geolocalización de imágenes

Sistema de coordenadas

Datum: World Geodetic System 1984; Sistema de Coordenadas: WGS 84 (egm96) Editar...

Geolocalización y orientación

Imágenes geolocalizadas: 57 de 57 Limpiar De EXIF De fichero... A fichero...

Precisión de geolocalización:  Estándar  Baja  Personalizado

Modelo de cámara seleccionado

FC300S\_3.6\_4000x3000 (RGB) Editar...

Activada	Imagen	Grupo	Latitude [degree]	Longitud [degree]	Altitud [m]	Precisión Horz [m]	Pre Ve
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0072.JPG	group1	43.24240578	-5.77517036	207.386	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0073.JPG	group1	43.24243322	-5.77515969	207.486	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0074.JPG	group1	43.24246503	-5.77514919	207.386	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0075.JPG	group1	43.24248722	-5.77513844	207.286	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0076.JPG	group1	43.24252022	-5.77512178	207.286	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0077.JPG	group1	43.24254061	-5.77511397	207.286	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0078.JPG	group1	43.24257361	-5.77509800	207.186	5.000	10.000

Ayuda Atrás Next Cancelar

Figura 24: Formulario de carga de imágenes con Pix4D

Pix4D incluye varias plantillas de opciones de procesamiento. Dependiendo de la finalidad del trabajo se ha de escoger una u otra. Para el objeto del análisis interesa la plantilla de procesamiento denominada Mapas 3D. Existe también una plantilla llamada Mapas 3D Rapido/baja Res; ésta procesa las imágenes con menor precisión y

con resultados de salida de menor resolución, es decir, en el procesamiento inicial utiliza 16 veces menos keypoints que la plantilla Modelos3D; su nube de puntos cuenta con 16 veces menos puntos y la malla 3D cuenta con 10 veces menos triángulos. Dependiendo de la precisión, resolución que se requiera se debe elegir una u otra.

Al igual que Agisoft PhotoScan, este software dispone de una serie de pasos que permiten el procesamiento de las imágenes cargadas. La configuración del proceso se lleva a cabo desde el apartado denominado *Opciones de procesamiento*. Esta sección está dividida en tres subsecciones. En primer lugar está el procesamiento inicial, que permite extraer automáticamente los keypoints o puntos de paso de las imágenes para calcular la verdadera localización de las cámaras y los parámetros de las imágenes utilizando triangulación aérea automática y ajuste de bloques. En este paso se genera una nube de puntos dispersa además de un informe de calidad. En segundo lugar PIX4D permite crear una nube de puntos densa y generar una malla de triángulos y por último, el tercer apartado del procesamiento permite generar un Modelo Digital de Superficies, un ortomosaico y un mapa de reflectancia.

Existe la posibilidad de ejecutar el proceso conjuntamente o por separado tan solo verificando la casilla de cada subsección. Por tanto, como solo es necesaria la obtención de la nube de puntos densa, no ha sido conveniente la ejecución del tercer paso del procesamiento. Para generar la nube de puntos tan solo hay que iniciar el proceso una vez se tenga la configuración realizada y el software automáticamente te da los resultados. La duración de este proceso depende del nivel de calidad configurado.

En el caso de querer introducir GCP's, se ha de hacer anteriormente al inicio del procesado de las imágenes. Para ello se debe acceder al *gestor de puntos de apoyo/puntos de paso*. Este gestor permite importar los puntos de apoyo de ficheros \*.txt o \*.csv, o bien añadirlos manualmente. Es preciso señalar que para calcular la posición 3D de un punto de apoyo, este debe ser marcado en al menos dos imágenes y para tener en cuenta dicho punto en la georreferenciación del proyecto se debe marcar en al menos tres de ellas.

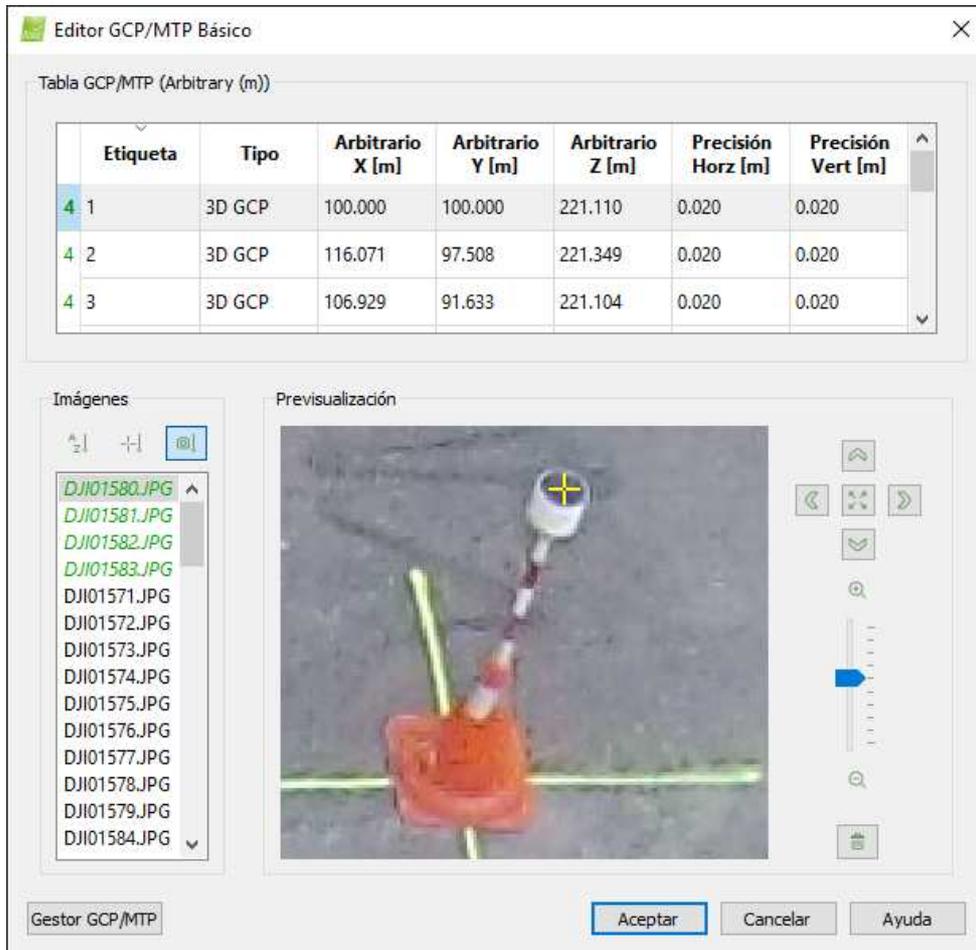


Figura 25: Establecimiento de GCP's en Pix4D

El resultado del trabajo con el software Pix4D es también una nube de puntos de la zona, georreferenciada en el caso de la introducción de los GCP's al sistema de referencia local creado. En las opciones de procesamiento da la opción de exportarlo en diferentes formatos con el fin de su posterior tratamiento con el software Cloud Compare. También es posible obtener un informe de calidad del procesamiento. Véase en el anexo 3 un ejemplo de dicho informe.

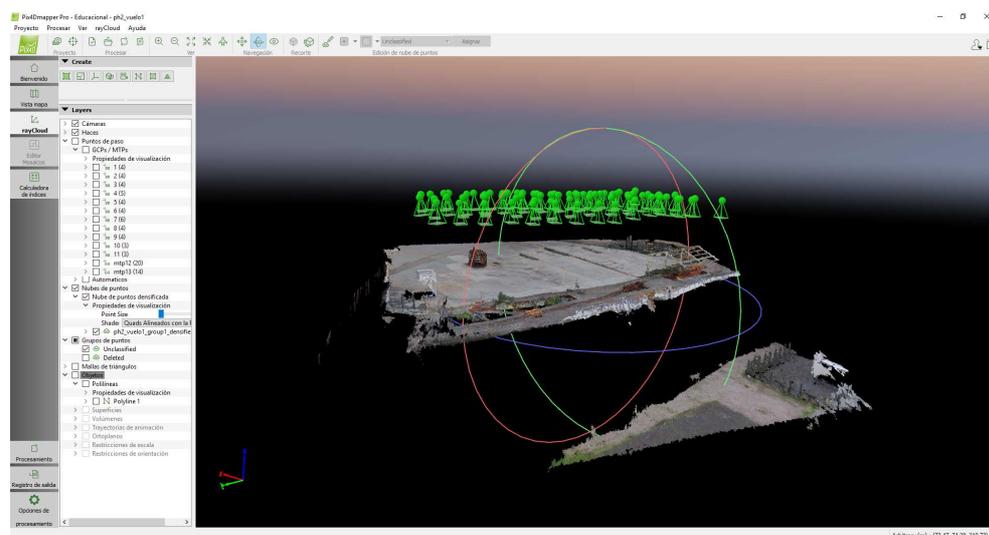


Figura 26: Nube de punto densa obtenida tras el tratamiento en Pix4D

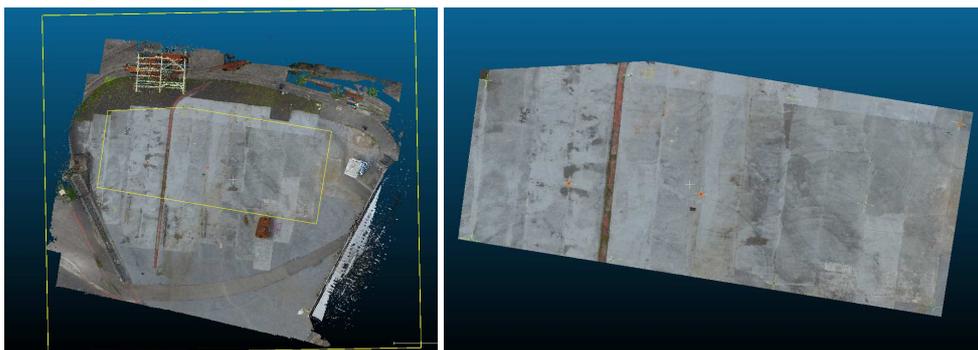
#### d) *Cloud Compare*

Las comparativas que van a dar lugar a los resultados del análisis se han realizado con el software Cloud Compare. Para ello, se ha comprobado en primer lugar que las nubes de puntos procesadas con GCP's mediante diferentes softwares estuviesen en el mismo sistema de referencia local. En los casos en los que no se ha utilizado GCP's y por lo tanto no se encontraban en el mismo sistema de referencia ha sido necesario realizar el registro de las nubes de puntos marcando tres puntos comunes en cada una de las nubes de puntos. Una vez verificado que todas las nubes de puntos a comparar encajan a la perfección en el mismo sistema de referencia, se ha realizado el proceso de filtrado y selección de las regiones de interés (ROI<sup>9</sup>) delimitando la zona exacta en la que se ha realizado el análisis. Por último, se han procesado los datos con el objetivo de establecer comparaciones entre nubes de puntos que den lugar a resultados que satisfagan el análisis.

Tras obtener las nubes de puntos registradas, se realiza el proceso de filtrado. Este proceso se basa en recortar las zonas lejanas a la ROI y eliminar el ruido, que puede ser provocado por el ángulo de inclinación, el tamaño de la huella del punto, la reflectividad o las condiciones atmosféricas, teniendo muy presente eliminar la

<sup>9</sup> ROI; siglas en ingles de Región de Interés (Region Of Interest). Se utilizará al tratarse de un término significativo y ampliamente utilizado en la literatura afín.

vegetación o cualquier punto que pueda perturbar la comparativa. La zona exacta ha sido delimitada por un polígono que abarca la totalidad de los puntos de control establecidos en el terreno y tiene unas dimensiones de aproximadamente de 25m x 20m. El proceso de filtrado y selección de las ROI ha de hacerse para cada nube de puntos adquirida.



**Figura 27:** Proceso de filtrado y selección de ROI con Cloud Compare

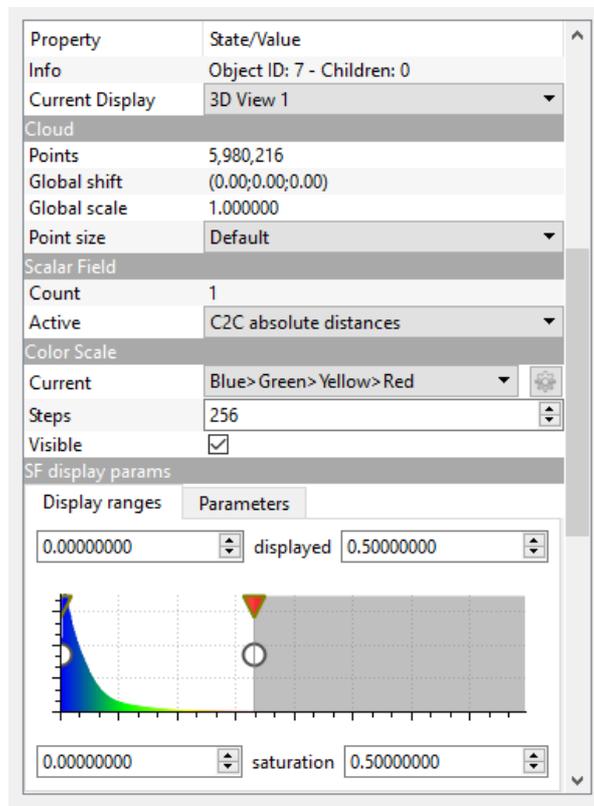
En cuanto al procesado de las nubes de puntos, señalar que la comparación de los datos se ha llevado a cabo mediante el cálculo de distancias entre dos entidades. CloudCompare diferencia éste cálculo atendiendo al tipo de entidad. Por tanto se pueden dar dos tipos de cálculo de distancias; el cálculo de distancias entre dos nubes de puntos (Cloud-Cloud Distances) y el cálculo de distancias entre una nube de puntos y una malla (Cloud-Mesh Distances). Éste último es el método utilizado para la realización del análisis.

Para ello, y puesto que los datos están dispuestos en nubes de puntos, es preciso la creación de la malla. CloudCompare realiza una triangulación entre los puntos de la nube de puntos mediante el Método de Triangulación de Delaunay. La nube de puntos es proyectada en 2D en el plano XY, se triangulan correspondientemente todos los puntos, y posteriormente se aplica la estructura de la malla a los puntos 3D. Una vez obtenida la malla de triángulos, es posible realizar el cálculo de distancias.

En este método, para cada punto de la nube de puntos comparada se calcula la distancia al triángulo más cercano de la malla de puntos. Por defecto, el software determina la malla como entidad de referencia y la nube de puntos como entidad comparada en la cual se calculan las distancias relativas a la malla de referencia.

El resultado del proceso, es un valor escalar para cada punto de la nube que indica la distancia euclidiana entre dicho punto y el triángulo más cercano de la malla.

Una vez realizado el cálculo de las distancias, es posible visualizar el resultado mediante una escala de colores que permita diferenciar el campo escalar resultante. Existe la posibilidad de modificar los rangos de visualización, tales como máximos y mínimos de valores escalares visualizados o máximos y mínimos de valores de saturación, así como otros parámetros para conseguir el resultado óptimo.



**Figura 28:** Rangos de visualización del campo escalar

## 5. RESULTADOS

---

Los resultados que se exponen a continuación han sido obtenidos con el software Cloud Compare. Como se ha expuesto en el apartado anterior, se ha calculado las distancias entre una nube de puntos y una malla. En todos los casos se ha creado la malla sobre la nube de puntos del LTS; por tanto la referencia son los datos obtenidos por TLS y en base a ellos se han calculado las distancias euclidianas. Se presentan los resultados de las distancias euclidianas visualizadas mediante una escala de colores que va desde el rojo al azul, perteneciendo el rojo a las distancias positivas y el azul a las negativas. Valores positivos en las distancias visualizadas indican que la malla de referencia está por debajo de la nube de puntos mientras que valores negativos indican lo contrario.

### 5.1. Caracterización del efecto domo

Para la caracterización del efecto domo se ha realizado la comparación entre la nube de puntos obtenida mediante LTS y una de las nubes obtenidas por uno de los RPA bajo la siguiente configuración de vuelo, considerada como estándar: altura de vuelo de 20 metros, configuración de los ejes paralela, recubrimiento entre imágenes del 90% y dirección de vuelo N-S. La ejemplificación de la determinación del efecto domo se ha llevado a cabo con las imágenes obtenidas por el Phantom III Advanced junto con el procesamiento del software PIX4D, sin la utilización de GCP's para no perturbar los resultados. El registro de una nube con otra se ha realizado mediante el software Cloud Compare marcando tres puntos comunes en las nubes de puntos.

La comparación realizada hace visible el error sistemático Efecto domo. Se observa un efecto ondulado y redondeado en forma de cúpula en el resultado tras el procesamiento de las imágenes que provoca distancias negativas en los extremos de la zona de estudio y distancias positivas en la zona central en relación a los datos de referencia.

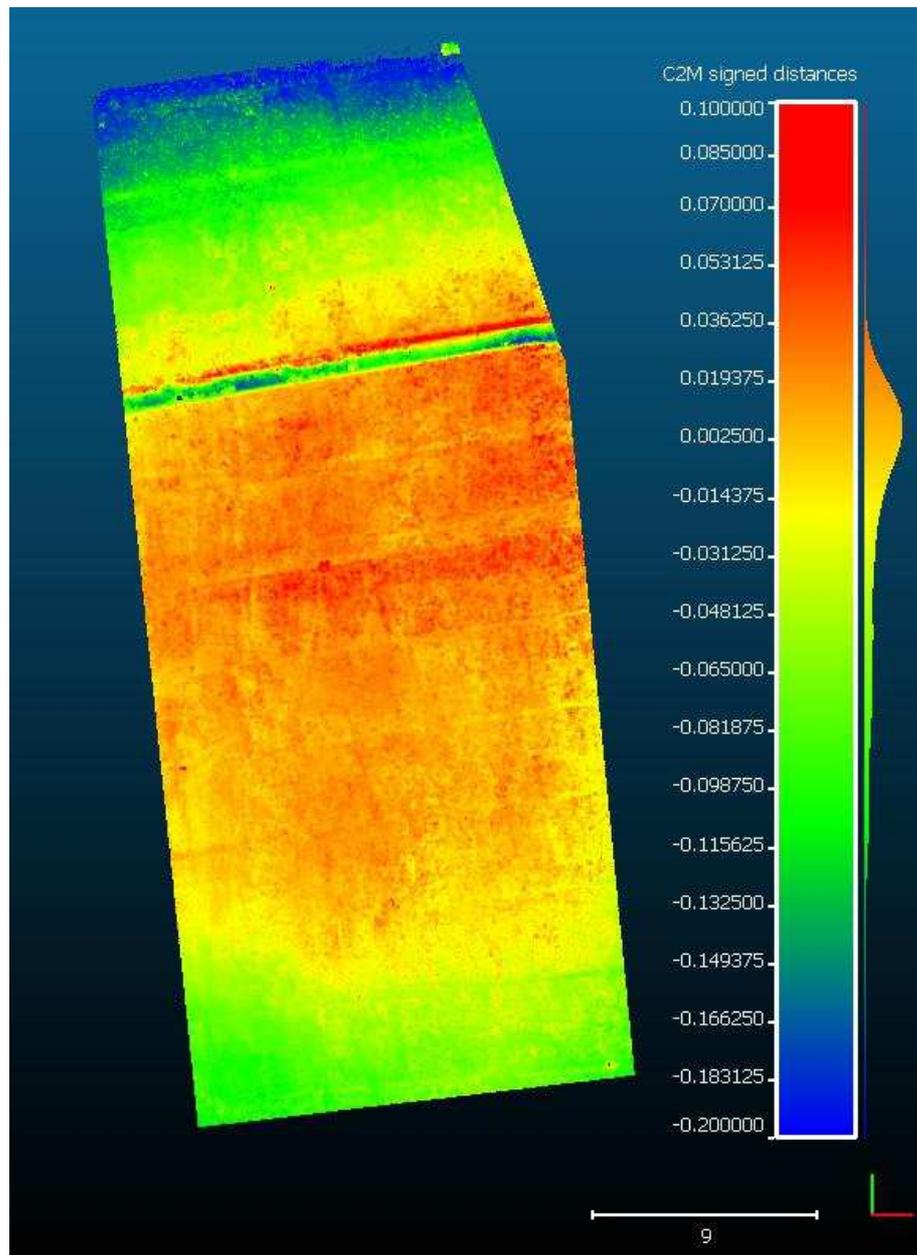


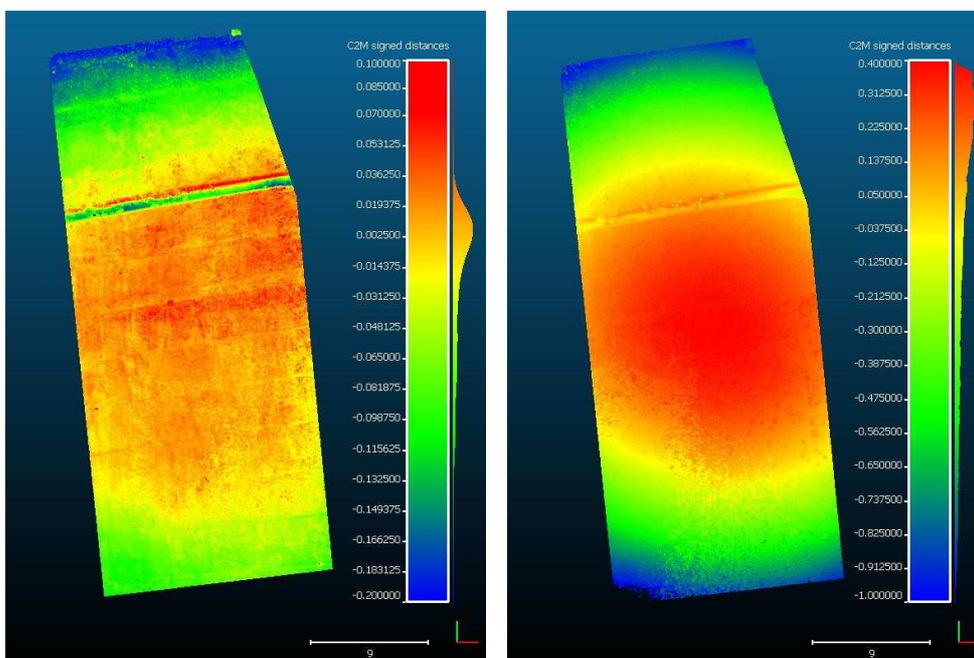
Figura 29: Caracterización del efecto domo

## 5.2. Diferentes tipos de cámara

A la hora de analizar la respuesta del efecto domo ante diferentes tipos de cámara, se ha realizado la comparación entre la nube de puntos obtenida mediante LTS y las nubes de puntos obtenidas por los dos RPA bajo las mismas configuraciones de vuelo. En este caso, el procesamiento se ha realizado con el

software PIX4D sin utilizar GCP's para no alterar los resultados. El registro de una nube con otra se ha realizado mediante el software Cloud Compare marcando tres puntos comunes en las nubes de puntos.

La comparación realizada hace visible el error sistemático Efecto domo en ambas nubes. Como se puede apreciar en las comparaciones de la figura 30, la distancia calculada en ambas imágenes en la parte central de la zona de estudio es positiva mientras que en los extremos es negativa, indicando el efecto producido por el error sistemático domo. La imagen derecha (Phantom II Vision +), muestra valores más extremos que la imagen izquierda (Phantom III Advanced) llegando aproximadamente al metro en los extremos de la zona de estudio y en torno a los 40 cm en la parte central. Por su parte la imagen izquierda contiene valores que van desde los 30 cm negativos en las zonas extremas hasta los 10 cm en la zona central. El factor que influye en estos resultados es la cámara utilizada por los RPA. Las cámaras con mayor distorsión radial representan mayores magnitudes del efecto domo. La cámara del Phantom II Vision + tiene una distorsión radial mayor al tener un ángulo de campo de visión mayor y por lo tanto revela una desviación mayor en relación a los datos de referencia. La cámara del Phantom III advanced, que posee una menor distorsión radial, exhibe un menor error.

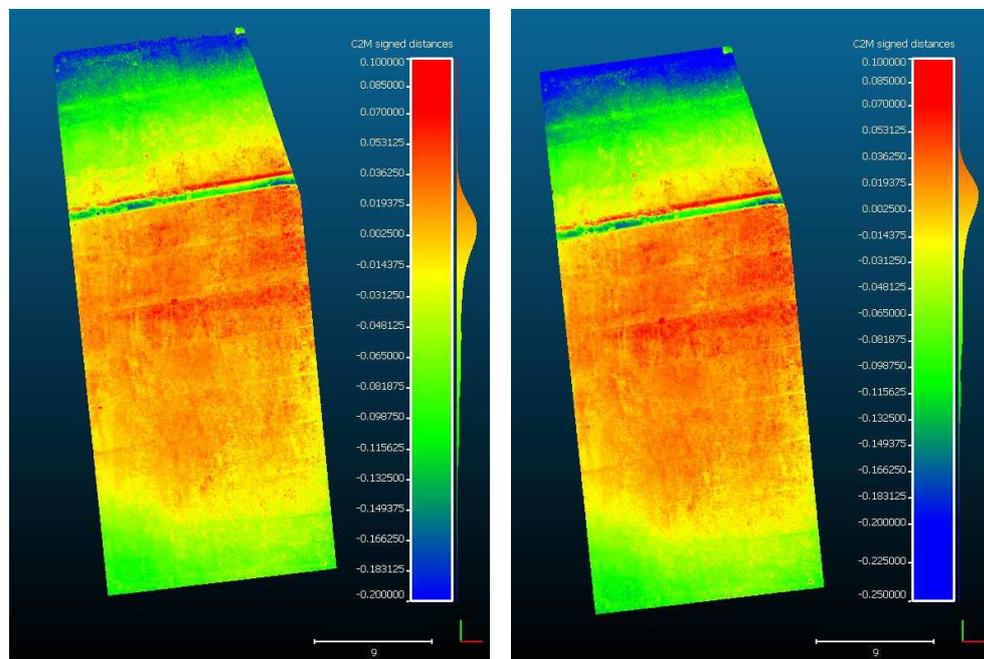


**Figura 30:** Comparación del efecto domo ante diferentes tipos de cámara. En la imagen izquierda se puede apreciar el efecto domo producido en la toma de datos con el Phantom II Vision +, mientras que en la imagen derecha se aprecia el efecto producido por el Phantom III Advanced

### 5.3. Diferentes parámetros de calibración de cámara

Para realizar la comparación entre diferentes parámetros de configuración de cámara se ha realizado por una parte, el procesamiento de los datos con los parámetros estimados a partir de los datos EXIF de las imágenes, y por otro lado con parámetros proporcionados por el software Photomodeler Motion tras la calibración de cámara (Ver Anexo 2). En el caso de realizar el procesamiento con los parámetros estimados a partir del EXIF, el propio software realiza un refinamiento de los parámetros en el ajuste, mientras que cuando se trabaja con modelos editados, dichos parámetros permanecen fijos durante el procesado. El vuelo para la adquisición de las imágenes se ha realizado con el Phantom III Advanced bajo la siguiente configuración: altura de 20 metros, configuración de los ejes paralela, recubrimiento del 90% y dirección de vuelo N-S.

El procesamiento se ha realizado con el software PIX4D sin utilizar y el registro de las nubes de puntos con el Cloud Compare. El resultado en ambos casos es similar, tal y como se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 31:** Comparación del efecto domo ante diferentes parámetros de configuración de cámara. En la imagen izquierda se pueden ver los resultados tras el procesamiento con los parámetros estimados a partir del EXIF y en la imagen derecha tras el procesamiento con los parámetros de Photomodeler Motion

La comparación realizada demuestra que el ajuste de bloques (BBA) realizado por Pix4D para refinar los parámetros externos e internos de las cámaras es preciso ya que proporciona parámetros que muestran unos resultados similares a los obtenidos tras una calibración. La principal ventaja de Pix4D con otros softwares SFM es el hecho de introducir en el BBA los valores iniciales estimados de los parámetros; hecho que proporciona mejores resultados.

#### 5.4. Utilización de imágenes oblicuas

El comportamiento del efecto domo ante una disposición oblicua de las imágenes también se ha estudiado. En este caso se ha comparado la nube de puntos obtenida mediante LTS y las nubes de puntos obtenidas por un mismo RPA en las que las configuraciones de vuelo difieren en la configuración de los ejes; es decir, se han comparado los resultados obtenidos ante una configuración de los ejes paralela y no paralela ( $60^\circ$ ) a la hora de la toma de datos. Los demás parámetros del vuelo coinciden en la comparación siendo los siguientes: altura de 20 metros, recubrimiento del 90% y dirección N-S.

El procesamiento se ha realizado con el software PIX4D sin utilizar GCP's para no alterar los resultados. El registro, al igual que los casos anteriores se ha realizado marcando tres puntos comunes en las nubes de puntos con el software Cloud Compare. El RPA utilizado ha sido el Phantom III Advanced.

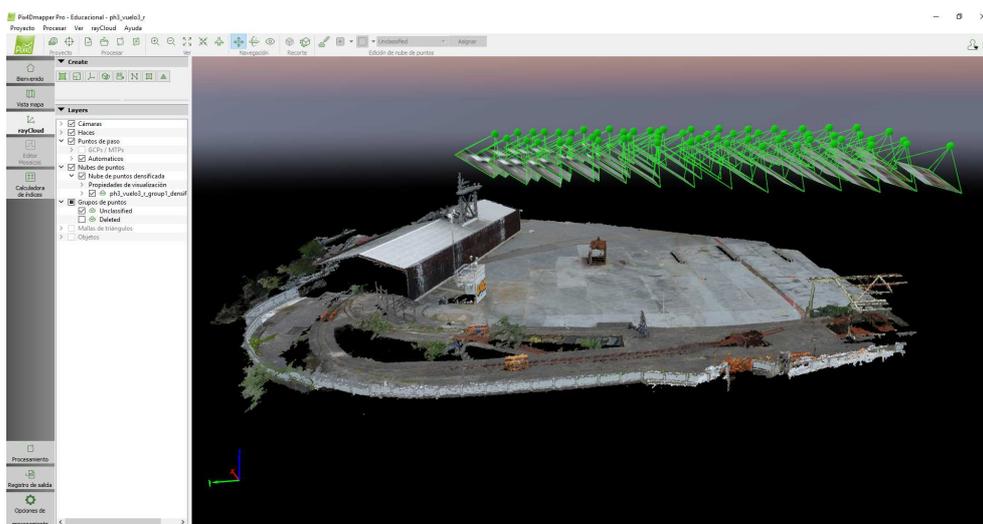
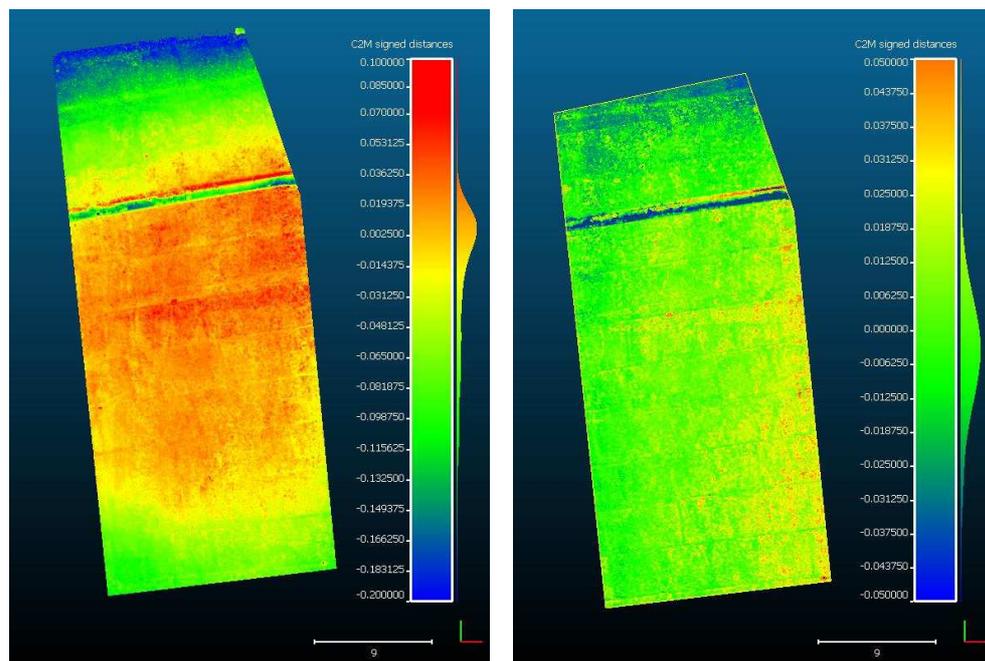


Figura 32: Bloque de imágenes oblicuas utilizado para el procesamiento.

La comparación permite observar la disminución del error sistemático al utilizar una configuración no paralela de los ejes de la cámara. Los rangos de distancias en la imagen derecha, en la que se han utilizado las imágenes oblicuas, son menores que en los de la imagen izquierda. Aunque se sigue apreciando cierta desviación en relación a los datos de referencia, el resultado es menos pronunciado con la utilización de una configuración no paralela de los ejes, predominando los tonos verdosos que indican una variación cercana al 0.

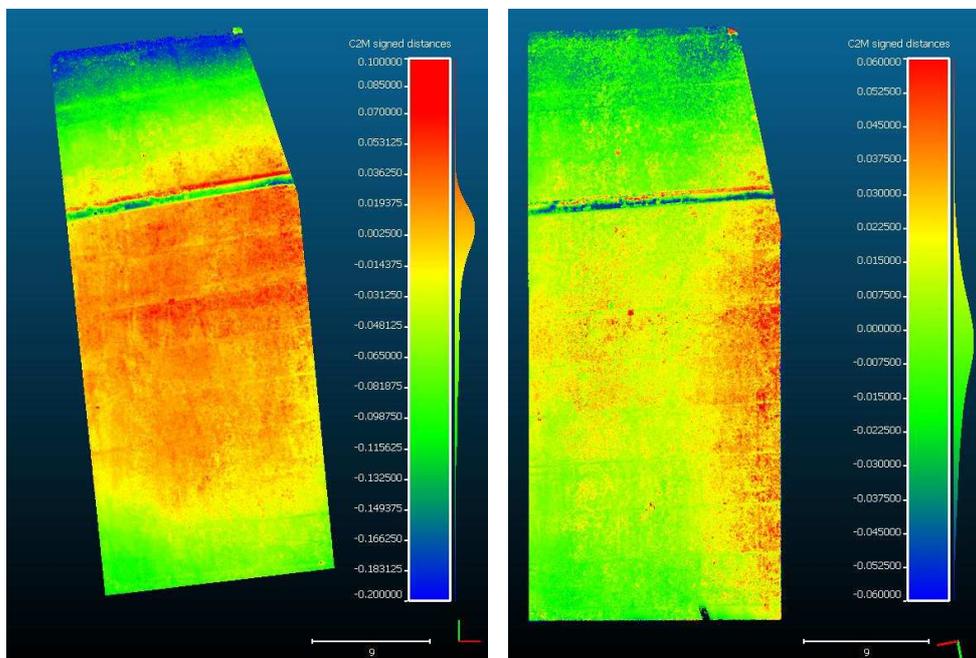


**Figura 33:** Utilización de imágenes oblicuas. En la imagen izquierda se puede apreciar el resultado de disposición nadiral de las imágenes. En la imagen derecha se puede ver el resultado obtenido ante una disposición oblicua de las imágenes (60°)

### 5.5. Utilización de puntos de control GCP

Una de las estrategias más citadas en la bibliografía afín como posible técnica de mitigación del efecto Domo es la integración de puntos de control en tierra (GCP's) en el proceso de ajuste de imágenes. Tras la realización de la comparativa entre la nube de puntos obtenida mediante LTS y las nubes de puntos adquiridas por un mismo RPA, con las mismas configuraciones de vuelo y la única variación del método de procesamiento, se observa la mitigación del error tal y como exponen anteriores estudios. En este caso, un conjunto de datos se ha procesado teniendo en cuenta los GCP's en el ajuste mientras que el otro no. La configuración de vuelo del Phanthom

III Advanced ha sido la siguiente: altura de 20 metros, configuración de los ejes paralela, recubrimiento del 90% y dirección N-S. El procesamiento se ha realizado con el software Pix4D.



**Figura 34:** Utilización de puntos de control en el procesamiento de imágenes. En la imagen izquierda se puede apreciar el resultado tras no utilizar GCP's en el procesamiento. En la imagen derecha se puede observar el resultado obtenido ante un procesamiento de imágenes en el que se tiene en cuenta los GCP's

Se puede observar en la comparación, que en la imagen derecha, que es la solución a un procesamiento teniendo en cuenta los GCP's, los valores extremos son menores; se sigue observando valores positivos en la zona central y negativos en los extremos. Sin embargo, el efecto es menos acentuado que en la imagen izquierda. Esto se debe a la utilización de GCP's.

## 5.6. Diferentes alturas y orientaciones de vuelo

A la hora de analizar la respuesta del efecto domo ante diferentes alturas y orientaciones de vuelo, se han comparado los resultados obtenidos tras el procesado de las imágenes obtenidas por un RPA a una altura de 20 metros, configuración de los ejes paralela, recubrimiento del 90% y dirección N-S y los resultados obtenidos combinando imágenes en el procesado de 20 y 30 metros, un recubrimiento del 90% y del 75%, direcciones N-S y E-O y una configuración paralela de los ejes (ver Fig. 35).

La comparación se ha llevado a cabo con las imágenes obtenidas por el Phantom III Advanced junto con el procesamiento del software PIX4D sin la utilización de GCP's para no perturbar los resultados. A su vez, el registro de una nube con otra se ha realizado mediante el software Cloud Compare marcando tres puntos comunes en las nubes de puntos.

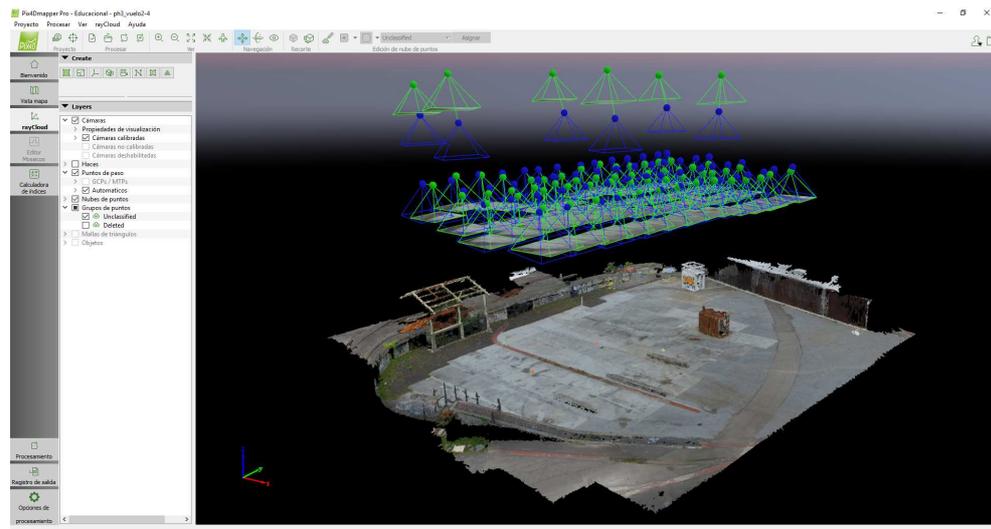


Figura 35: Bloque de imágenes utilizado para el procesamiento a diferentes alturas.

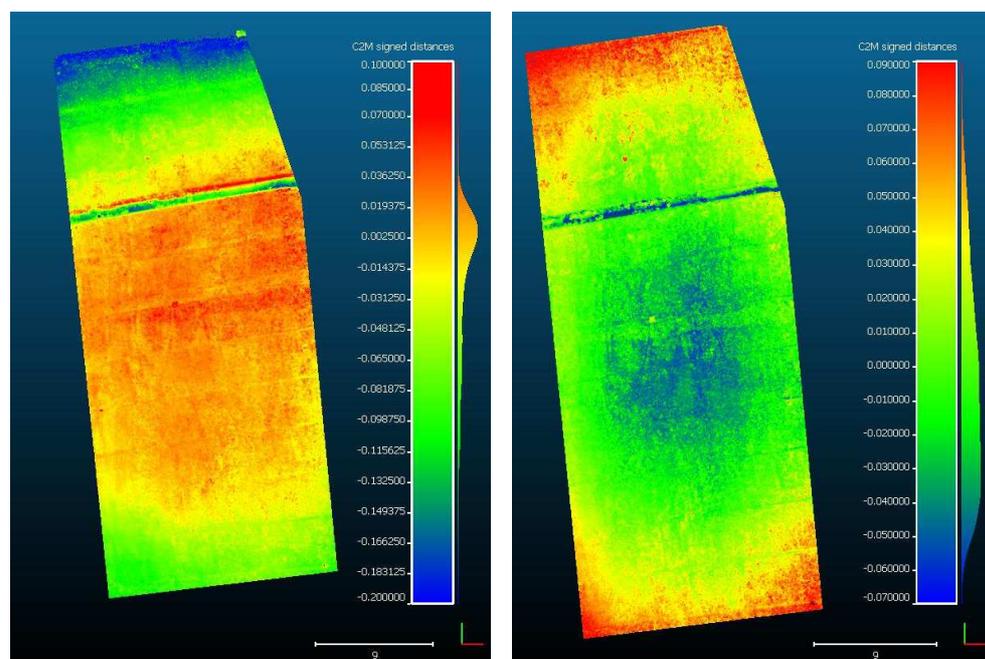


Figura 36: Comparación del efecto domo ante diferentes alturas y orientaciones de vuelo. En la imagen izquierda se pueden ver los resultados tras el procesado de imágenes a 20 metros y orientación N-S y en la imagen derecha tras el procesamiento combinado de imágenes a diferentes alturas y orientaciones.

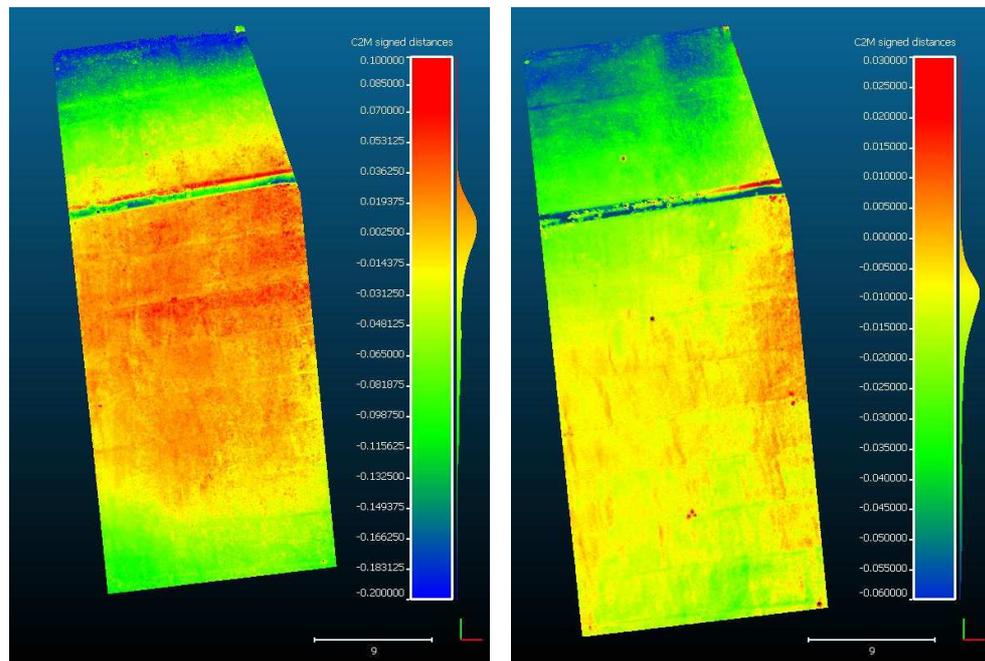
La comparación realizada ofrece un resultado sorprendente. Tras realizar varios procesados de datos a diferentes alturas y orientaciones, todos los resultados tienen en común la inversión del efecto domo. En este caso, el efecto domo aparece en sentido contrario, mostrando distancias positivas en los extremos y distancias negativas en la zona central de la zona de estudio. Sin embargo, los errores están mucho más repartidos en un intervalo más centrado con extremos de menor magnitud y en gran medida contenidos entre -2 cm y +4 cm, tal y como se puede ver en la escala de valores. Por tanto, los resultados parecen de menor magnitud que los resultados obtenidos al volar en una determinada altura.

#### 5.7. Diferentes softwares SFM: Pix4D Mapper Pro y Agisoft PhotoScan Professional Edition

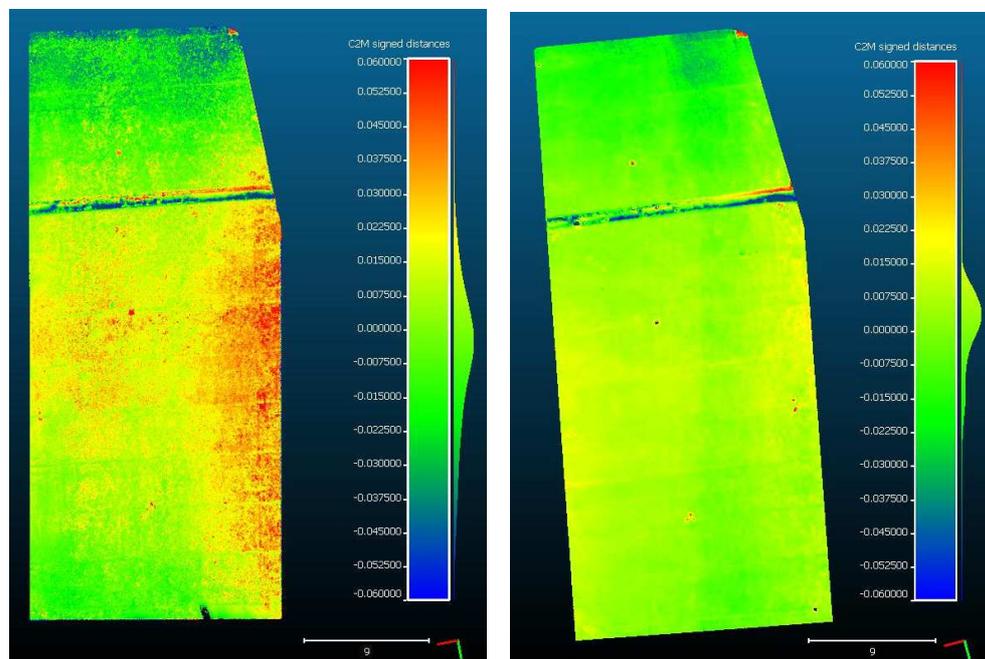
En cuanto a la comparativa de los resultados obtenidos por diferentes softwares de procesamiento de imágenes, se ha realizado una comparación entre la nube de puntos obtenida mediante LTS y las nubes de puntos obtenidas por un mismo RPA, bajo las mismas configuraciones de vuelo. La diferencia estriba en el software de procesamiento.

Por tanto la configuración de vuelo llevada a cabo para la comparativa con el Phantom III Advanced es de 20 metros de altura, configuración de los ejes paralela, recubrimiento del 90% y dirección N-S.

Se ha realizado el procesamiento de las imágenes tanto teniendo en cuenta los GCP's como no teniéndolos en cuenta en el ajuste. Los resultados muestran una mejora de los resultados al procesar los datos con el software Agisoft Photoscan. En ambos casos, los rangos de distancias entre la malla de puntos de referencia y las nubes de puntos obtenidas mediante RPA son menores al procesar los datos con Agisoft PhotoScan que con Pix4D.



**Figura 37:** Comparativa entre diferentes softwares. En la imagen izquierda se puede ver la comparativa resultante de procesar los datos sin utilizar GCP's con el software Pix4D mientras que en la imagen derecha la comparativa resultante del procesamiento de datos con Agisoft Photoscan.



**Figura 38:** Comparativa entre diferentes softwares. En la imagen izquierda se observa la comparativa resultante de procesar los datos utilizando GCP's en el ajuste con el software Pix4D mientras que en la imagen derecha la comparativa resultante del procesamiento de datos con Agisoft Photoscan.

## 6. CONCLUSIONES

---

Las herramientas de reconstrucción de superficies basadas en imágenes pueden mostrar grandes variaciones en sus resultados si no se consideran adecuadamente los factores que intervienen en el proceso; desde la adquisición de los datos hasta las opciones de procesamiento del software, pasando por el número de parámetros implementados en el ajuste de bloques o la consideración de puntos de control, deben ser tenidos en cuenta para lograr unos resultados óptimos.

Lo mismo ocurre con la elección del software de procesamiento; aunque aparentemente los flujos de trabajo son parecidos, por no decir idénticos en muchos de ellos, estos programas difieren unos de otros en aspectos tan importantes en la reconstrucción tridimensional como los algoritmos de reconstrucción o el modelo de cámara integrado. Se puede hablar por tanto de herramientas SFM básicas o herramientas SFM más complejas, que dependiendo de su elección se obtendrá unos resultados u otros.

Los dos paquetes de software que han sido considerados en el estudio entrarían dentro de las herramientas SFM complejas. Ambos programas resuelven un gran número de parámetros intrínsecos en el ajuste de bloque; estiman la distancia principal, la distancia focal, tres parámetros de distorsión radial y dos parámetros de distorsión tangencial. Además, a diferencia de otros softwares de procesamiento de datos, esta estimación la hacen para el conjunto entero de fotos; lo cual ha resultado adecuado para este estudio debido a que no se han procesado conjuntamente imágenes obtenidas por diferentes cámaras.

Atendiendo a los resultados obtenidos en el procesado de imágenes, el software Agisoft Photoscan presenta unos mejores resultados en relación a la atenuación del efecto domo que el software Pix4D.

En relación al efecto domo, discernible en los modelos digitales de elevaciones resultantes de procesos de reconstrucción tridimensional basados en imágenes, se puede concluir lo siguiente:

Aplicando dos tipos de cámaras diferentes, en este caso las asociadas a los RPA utilizados, Phantom Vision FC200 y Phantom Vision FC300S, los resultados muestran que el efecto domo aumenta en magnitud con el incremento de la distorsión radial. La

cámara Phantom Vision FC200 cuya distorsión radial es mayor obtiene una desviación mayor en relación a los datos de referencia.

Queda comprobado que la implementación de GCP's en el BBA obtiene mejores resultados que la realización del ajuste no contemplando los puntos de control. En este caso, las dos herramientas utilizadas permiten considerar GCP's en el proceso de orientación de imagen, minimizando el error sistemático; este hecho permite una gran ventaja respecto a otras herramientas que no los consideran.

El comportamiento del efecto domo ante una disposición oblicua de las imágenes, tal y como muestra los resultados, se mitiga en comparación a una configuración de los ejes paralela. Además, el grado de superposición de las imágenes es otro factor que puede llegar a influir en la magnitud del efecto domo. En este estudio se han realizado configuraciones de vuelo en su totalidad con un alto grado de solapamiento para descartar este factor como posible fuente de error.

## 7. BIBLIOGRAFIA

---

- BARNARD, S. & FISHLER, M., 1982. Computational Stereo. *ACM Computing Surveys*, 14: 553-572.
- COOPER, M.A.R. & CROSS, P.A., 1988. Statistical concepts and their application in photogrammetry and surveying. *Photogrammetric Record*, 12 (71): 637-663.
- EISENBEISS, H., 2004. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. *International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information System*, 36 - 5(W1). 7 páginas.
- ELTNER, A. & SCHNEIDER, D., 2015. Analysis of different methods for 3D reconstruction of natural surfaces from parallel-axes UAV images. *Photogrammetric Record*, 30(151): 279-299.
- FISCHLER, M. A. & BOLLES R.C., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, 24(6): 381-395.
- FURUKAWA, Y. & PONCE, J., 2010. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Patterns Analysis and Machine Intelligence*, 32(8): 1362-1376.
- FURUKAWA, Y., CURLESS, B., SEITZ, S. M. & SZELIKI, R., 2010. Towards Internet-scale multi-view stereo. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Francisco, California, USA. 1434-1441.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2005. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Diego, California, USA, 2: 807-814.
- JAMES, M. & ROBSON, S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10): 1413-1420.
- KÚNG, O., STRECHA, C., BEYELER, A., ZUFFEREY, J.-C., FLOREANO, D., FUA, P. & GERVAIX, F., 2011. The Accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38-1(C22):125-130.
- LOWE D. G., 1999. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. *7<sup>th</sup> IEEE International Conference on Computer Vision*, Kcrkyra, Greece, 2:1150-1157.
- MONTALVO, M., 2009. Técnicas de visión estereoscópica para determinar la estructura tridimensional de la escena. *Proyecto Fin de Master en Ingeniería Informática para la Industria. Universidad Complutense de Madrid*.

- PIERROT-DESEILLIGNY, M. & PAPANODITIS, N., 2006. A multiresolution and optimization-based image matching approach: an application to surface reconstruction from SPOT5-hrs stereo imagery. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36-1(W41) 5 pages.
- RODRIGUEZ, P., 2011. Automatización en el procesamiento de datos adquiridos mediante láser escáner3D. *Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca*.
- ROSNELL, T & HONKAVAARA, E., 2012. Point Cloud Generation from Aerial Image Data Acquired by a Quadcopter Type Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Digital Still Camera. *Sensors*, 12(1): 453-480.
- RUIZ, J., 2013. Generación de mapas 3D a partir de imágenes aéreas. *Proyecto Fin de Carrera en Ingeniería de telecomunicaciones. Universidad de Sevilla*.
- SANCHEZ, N., ARIAS, B., GONZÁLEZ, D. & GOMEZ, J., 2004. Análisis aplicado de métodos de calibración de cámaras para usos fotogramétricos. *VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía TOPCART 2004*, Madrid.
- VERHOEVEN, G., 2011. Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan. *Archaeological Prospection*, 18(1): 67-73.
- WACKROW, R., CHANDLER, J. H. and BRYAN, P., 2007. Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement. *Photogrammetric Record*, 22(118): 121-134.
- WACKROW, R & CHANDLER, J.H., 2008. A convergent image configuration for DEM extraction that minimises the systematic effects caused by an inaccurate lens model. *Photogrammetric Record*, 23(121): 6-18.
- WACKROW, R & CHANDLER, J.H., 2011. Minimising systematic error surfaces in digital elevation models using oblique convergent imagery. *Photogrammetric Record*, 26(133): 16-31.

# ANEXOS

---

## ANEXO 1: COORDENADAS GCP's

---

Nº de punto	Coordenada X (m)	Coordenada Y(m)	Coordenada Z(m)
1	100	100	219.97
2	116.071	97.508	220.139
3	106.929	91.633	219.964
4	97.431	85.521	219.741
5	113.709	83.615	219.977
6	105.62	77.315	219.891
7	94.962	71.377	219.902
8	111.2	69.594	220.027
9	104.394	65.816	219.998
10	95.081	58.76	220.005
11	109.178	57.187	220.153

## ANEXO 2: INFORME DE CALIBRACIÓN

### Status Report Tree

Project Name: \*\*\* Project has not yet been saved \*\*\*

Problems and Suggestions (1)

Project Problems (1)

Problem: A large percentage of your points are sub-pixel marked so it is assumed you are striving for a high accuracy result. The largest residual (Point208 - 1.35) is greater than 1.00 pixels.

Suggestion: In high accuracy projects, strive to get all point residuals under 1.00 pixels. If you have just a few high residual points, study them on each photo to ensure they are marked and referenced correctly. If many of your points have high residuals then make sure the camera stations are solving correctly. Ensure that you are using the best calibrated camera possible. Remove points that have been manually marked unless you need them.

Problems related to most recent processing (0)

Information from most recent processing

Last Processing Attempt: Wed May 25 12:43:31 2016

Version: PhotoModeler Motion 2016.0.8.1825 (64-bit)

Status: successful

Processing Options

Orientation: off

Global Optimization: on

Calibration: on (full calibration)

Constraints: off

Total Error

Number of Processing Iterations: 2

Number of Processing Stages: 2

First Error: 3.458

Last Error: 3.458

Precisions / Standard Deviations

Camera Calibration Standard Deviations

Camera: Phantom3 FC300S [3.61]

Focal Length

Value: 3.762641 mm

Deviation: Focal: 4.7e-004 mm

Xp - principal point x

Value: 3.258559 mm

Deviation: Xp: 4.2e-004 mm

Yp - principal point y

Value: 2.428877 mm

Deviation: Yp: 5.4e-004 mm

Fw - format width

Value: 6.501527 mm

Deviation: Fw: 2.7e-004 mm

Fh - format height

Value: 4.873500 mm

K1 - radial distortion 1

Value: 1.031e-003

Deviation: K1: 1.6e-005

K2 - radial distortion 2

Value: -6.223e-005

Deviation: K2: 9.5e-007

K3 - radial distortion 3

Value: 0.000e+000

P1 - decentering distortion 1

Value: -1.832e-005

Deviation: P1: 9.3e-006

P2 - decentering distortion 2

Value: -7.335e-005

Deviation: P2: 1.1e-005

Photograph Standard Deviations

Photo 2: dji\_0217.jpg

Omega

Value: -27.788915 deg

Deviation: Omega: 0.008 deg

Phi

Value: 1.167471 deg

Deviation: Phi: 0.007 deg  
 Kappa  
 Value: 179.734640 deg  
 Deviation: Kappa: 0.002 deg  
 Xc  
 Value: 0.449797  
 Deviation: X: 1.2e-004  
 Yc  
 Value: 1.340047  
 Deviation: Y: 1.4e-004  
 Zc  
 Value: 1.148751  
 Deviation: Z: 1.8e-004  
 Photo 3: dji\_0218.jpg  
 Omega  
 Value: 1.057194 deg  
 Deviation: Omega: 0.008 deg  
 Phi  
 Value: 28.592724 deg  
 Deviation: Phi: 0.008 deg  
 Kappa  
 Value: 90.305753 deg  
 Deviation: Kappa: 0.004 deg  
 Xc  
 Value: 1.338230  
 Deviation: X: 1.3e-004  
 Yc  
 Value: 0.494177  
 Deviation: Y: 1.0e-004  
 Zc  
 Value: 1.061188  
 Deviation: Z: 1.7e-004  
 Photo 4: dji\_0219.jpg  
 Omega  
 Value: 27.993994 deg  
 Deviation: Omega: 0.008 deg  
 Phi  
 Value: -2.032979 deg  
 Deviation: Phi: 0.007 deg  
 Kappa  
 Value: -3.698931 deg  
 Deviation: Kappa: 0.002 deg  
 Xc  
 Value: 0.507489  
 Deviation: X: 1.1e-004  
 Yc  
 Value: -0.205529  
 Deviation: Y: 1.3e-004  
 Zc  
 Value: 1.077176  
 Deviation: Z: 1.7e-004  
 Photo 5: dji\_0220.jpg  
 Omega  
 Value: 28.168290 deg  
 Deviation: Omega: 0.008 deg  
 Phi  
 Value: 0.198655 deg  
 Deviation: Phi: 0.008 deg  
 Kappa  
 Value: -94.093962 deg  
 Deviation: Kappa: 0.003 deg  
 Xc  
 Value: 0.601203  
 Deviation: X: 1.9e-004  
 Yc  
 Value: -0.081051  
 Deviation: Y: 2.3e-004  
 Zc  
 Value: 1.506846  
 Deviation: Z: 2.2e-004  
 Photo 6: dji\_0221.jpg  
 Omega

```

    Value: 0.264580 deg
    Deviation: Omega: 0.009 deg
Phi
    Value: -24.091974 deg
    Deviation: Phi: 0.008 deg
Kappa
    Value: 179.069036 deg
    Deviation: Kappa: 0.003 deg
Xc
    Value: 0.015368
    Deviation: X: 2.2e-004
Yc
    Value: 0.632613
    Deviation: Y: 2.0e-004
Zc
    Value: 1.478124
    Deviation: Z: 2.1e-004
Photo 7: dji_0222.jpg
Omega
    Value: -25.659701 deg
    Deviation: Omega: 0.009 deg
Phi
    Value: -1.060567 deg
    Deviation: Phi: 0.008 deg
Kappa
    Value: 94.996421 deg
    Deviation: Kappa: 0.003 deg
Xc
    Value: 0.579190
    Deviation: X: 2.0e-004
Yc
    Value: 0.929183
    Deviation: Y: 2.2e-004
Zc
    Value: 1.463588
    Deviation: Z: 2.2e-004
Photo 8: dji_0223.jpg
Omega
    Value: 6.321532 deg
    Deviation: Omega: 0.009 deg
Phi
    Value: 24.996969 deg
    Deviation: Phi: 0.008 deg
Kappa
    Value: 1.556081 deg
    Deviation: Kappa: 0.004 deg
Xc
    Value: 1.001425
    Deviation: X: 2.0e-004
Yc
    Value: 0.461864
    Deviation: Y: 1.8e-004
Zc
    Value: 1.435551
    Deviation: Z: 2.2e-004
Photo 9: dji_0224.jpg
Omega
    Value: 33.804311 deg
    Deviation: Omega: 0.010 deg
Phi
    Value: 5.322526 deg
    Deviation: Phi: 0.009 deg
Kappa
    Value: 85.873995 deg
    Deviation: Kappa: 0.004 deg
Xc
    Value: 0.541833
    Deviation: X: 2.6e-004
Yc
    Value: -0.148320
    Deviation: Y: 2.9e-004
Zc
  
```

```

    Value: 1.709463
    Deviation: Z: 2.5e-004
Photo 10: dji_0225.jpg
  Omega
    Value: 3.728443 deg
    Deviation: Omega: 0.012 deg
  Phi
    Value: -40.403899 deg
    Deviation: Phi: 0.009 deg
  Kappa
    Value: -4.373224 deg
    Deviation: Kappa: 0.006 deg
  Xc
    Value: -0.332816
    Deviation: X: 2.7e-004
  Yc
    Value: 0.305611
    Deviation: Y: 2.5e-004
  Zc
    Value: 1.721951
    Deviation: Z: 2.4e-004
Photo 11: dji_0226.jpg
  Omega
    Value: -38.311700 deg
    Deviation: Omega: 0.009 deg
  Phi
    Value: -6.063221 deg
    Deviation: Phi: 0.009 deg
  Kappa
    Value: -99.010635 deg
    Deviation: Kappa: 0.004 deg
  Xc
    Value: 0.423195
    Deviation: X: 2.4e-004
  Yc
    Value: 1.239767
    Deviation: Y: 2.6e-004
  Zc
    Value: 1.649101
    Deviation: Z: 2.4e-004
Photo 12: dji_0227.jpg
  Omega
    Value: -8.688934 deg
    Deviation: Omega: 0.011 deg
  Phi
    Value: 35.241590 deg
    Deviation: Phi: 0.009 deg
  Kappa
    Value: 176.542024 deg
    Deviation: Kappa: 0.005 deg
  Xc
    Value: 1.259475
    Deviation: X: 2.4e-004
  Yc
    Value: 0.542413
    Deviation: Y: 2.3e-004
  Zc
    Value: 1.609753
    Deviation: Z: 2.4e-004

```

Quality

Photographs

```

  Total Number: 12
    Bad Photos: 1
    Weak Photos: 0
    OK Photos: 11
  Number Oriented: 11
  Number with inverse camera flags set: 0

```

Cameras

```

  Cameral: Phantom3 FC300S [3.61]
  Calibration: yes
  Number of photos using camera: 12
  Average Photo Point Coverage: 97%

```

Photo Coverage

Referenced points outside of the camera's calibrated coverage region:

Point Marking Residuals

Overall RMS: 0.446 pixels

Maximum: 1.352 pixels

Point 208 on Photo 12

Minimum: 0.424 pixels

Point 29 on Photo 6

Maximum RMS: 0.652 pixels

Point 225

Minimum RMS: 0.240 pixels

Point 29

Point Tightness

Maximum: 0.0014

Point 68

Minimum: 0.00044

Point 212

Point Precisions

Overall RMS Vector Length: 0.000187

Maximum Vector Length: 0.000241

Point 38

Minimum Vector Length: 0.000179

Point 220

Maximum X: 0.000114

Maximum Y: 0.000116

Maximum Z: 0.000178

Minimum X: 6.73e-005

Minimum Y: 6.65e-005

Minimum Z: 0.000146

Point Angles

Maximum: 69.81 degrees

Point 146

Minimum: 48.1 degrees

Point 34

Average: 60.73 degrees

### ANEXO 3: INFORME DE PROCESAMIENTO EN PIX4D

## Quality Report

Generated with Pro version 2.1.57

**!** Important: Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

**💡** Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

#### Summary i

Project	ph2_vuelo1
Processed	2016-07-07 13:38:37
Average Ground Sampling Distance (GSD)	undefined
Area Covered	undefined
Time for Initial Processing (without report)	17m:45s

#### Quality Check i

<b>?</b> Images	median of 21950 keypoints per image	✔
<b>?</b> Dataset	71 out of 71 images calibrated (100%), all images enabled	✔
<b>?</b> Camera Optimization	37.04% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	⚠
<b>?</b> Matching	median of 3688.61 matches per calibrated image	✔
<b>?</b> Georeferencing	no, no 3D GCP	⚠

#### **?** Preview i

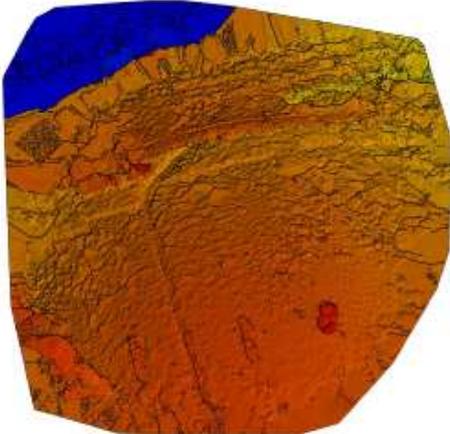



Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

#### Calibration Details i

Number of Calibrated Images	71 out of 71
-----------------------------	--------------

Number of Geolocated Images
0 out of 71

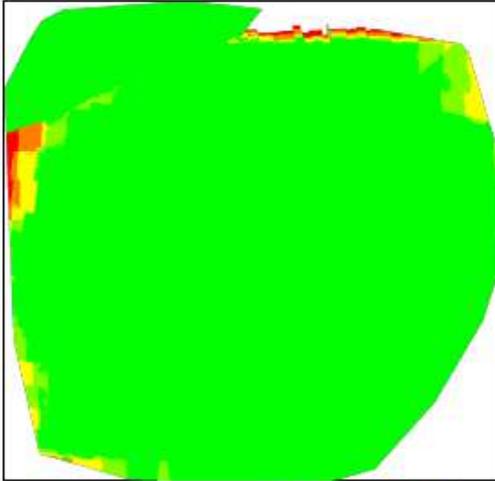
**Initial Image Positions** ?

The preview is not generated for images without geolocation.

**Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions** ?

The preview is not generated for images without geolocation.

**Overlap** ?



Number of overlapping images: 1 2 3 4 5+

Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

## Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	280940
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	117971
Mean Reprojection Error [pixels]	0.196052

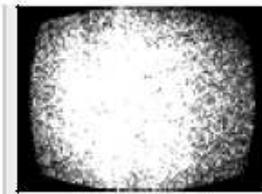
**Internal Camera Parameters**

**PHANTOM VISIONFC200\_5.0\_4608x3456 (RGB). Sensor Dimensions: 6.250 [mm] x 4.688 [mm]**

EXIF ID: PHANTOMVISIONFC200\_5.0\_4608x3456

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3686.391 [pixel] 5.000 [mm]	2303.995 [pixel] 3.125 [mm]	1727.996 [pixel] 2.344 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	2320.718 [pixel] 3.148 [mm]	2331.241 [pixel] 3.162 [mm]	1721.090 [pixel] 2.334 [mm]	-0.261	0.083	-0.013	-0.000	-0.000

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model



is color coded between black and white. White indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

### 2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	21950	3689
Min	20142	1140
Max	31883	7445
Mean	22656	3957

### 3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	92772
In 3 Images	15432
In 4 Images	5081
In 5 Images	2278
In 6 Images	1111
In 7 Images	607
In 8 Images	296
In 9 Images	165
In 10 Images	97
In 11 Images	49
In 12 Images	38
In 13 Images	16
In 14 Images	9
In 15 Images	12
In 16 Images	4
In 17 Images	1
In 18 Images	1
In 19 Images	1
In 21 Images	1

### 2D Keypoint Matches

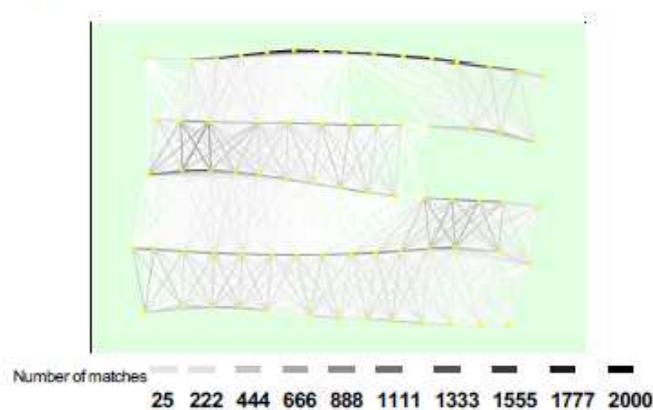


Figure 5: Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual fix points or more images.

### Processing Options i

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-4770 CPU @ 3.40GHz RAM: 16GB GPU: NVIDIA GeForce GTX 980 (Driver: 10.18.13.6519)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit
Camera Model Name	PHANTOMVISIONFC200_5.0_4608x3456 (RGB)
Output Coordinate System	Arbitrary (m)
Detected template:	No template available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: Auto yes

### Point Cloud Densification details i

#### Processing Options i

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	no
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Densification	32m:59s
Time for 3D Textured Mesh Generation	NA

#### Results i

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	7973654
Average Density (per m <sup>3</sup> )	84.37