



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica,
Cartográfica y Topográfica

Levantamiento fotogramétrico y modelizado 3D del
acueducto Los Arcos de Alpuente mediante RPAS

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Geomática y Topografía

AUTOR/A: Alonso Pérez, Gonzalo

Tutor/a: Pons Crespo, Ramón

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

TRABAJO FIN DE GRADO

LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO Y MODELIZADO 3D DEL ACUEDUCTO LOS ARCOS DE ALPUENTE MEDIANTE RPAS

Grado en Ingeniería Geomática y Topografía

2022/2023

AUTOR: Gonzalo Alonso Pérez

TUTOR: Ramón Pons Crespo

AGRADECIMIENTOS

Antes de comenzar con el desarrollo del presente Trabajo Final de Grado, me gustaría hacer una serie de agradecimientos a las personas y entidades que han hecho posible su realización.

En primer lugar, agradecer a mi familia, a mi padre y a mi madre, por confiar siempre en mí y apoyarme y aconsejarme en cada una de mis decisiones desde el primer momento en el que decidí continuar mis estudios cursando este grado de Ingeniería en Geomática y Topografía.

Agradecer también a mi tutor, Ramón Pons Crespo, por guiarme en este camino y resolverme, gracias a sus conocimientos sobre sobre la materia, las dudas que me surgían durante el transcurso de este.

De la misma forma, gracias al personal del departamento de instrumentación de la escuela por prestarme el instrumental que necesitaba, tal como la antena GNSS con su respectivo jalón y tableta.

Por último, agradecer a todos los profesores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica que me han instruido a lo largo de carrera.



COMPROMISO

"El presente documento ha sido realizado completamente por el firmante; no ha sido entregado como otro trabajo académico previo y todo el material tomado de otras fuentes ha sido convenientemente entrecomillado y citado su origen en el texto, así como referenciado en la bibliografía"

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado es un proyecto que tiene como finalidad utilizar la tecnología de los drones para obtener información detallada y precisa del acueducto Los Arcos de Alpuente (Valencia). Los RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) ofrecen una herramienta eficiente y de bajo impacto para realizar este tipo de trabajos de mapeo y modelado 3D en áreas como en la que se encuentra el acueducto en las que el acceso con otro tipo de instrumental es complicado.

Mediante el uso de técnicas de fotogrametría, se capturan imágenes aéreas que luego serán procesadas por un software especializado para crear un modelo tridimensional del acueducto, el cual será georreferenciado y escalado gracias a la aplicación de puntos de control tomados sobre el terreno y la construcción, con una antena GNSS.

Este enfoque permitirá documentar y preservar de manera digital el estado actual de la estructura histórica facilitando así su estudio y conservación.

Palabras clave: Fotogrametría; Drones; RPAS; Modelado 3D; Levantamiento; Acueducto; Alpuente; Valencia; Imágenes aéreas; Georreferenciación; GNSS.

RESUM

Aquest treball de fi de grau és un projecte amb l'objectiu d'utilitzar la tecnologia dels drons per a obtenir informació detallada i precisa de l'aqüeducte dels Arcs d'Alpont (València). Els RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) ofereixen una eina eficient i de baix impacte per a realitzar aquest tipus de treballs de cartografia i modelatge 3D en àrees com la del mateix aqueducte, on l'accés amb un altre tipus d'instrumental és complicat.

Mitjançant l'ús de tècniques de fotogrametria, s'obtenen imatges aèries que posteriorment seran processades per un programari especialitzat per a crear un model tridimensional georeferenciat i escalat de l'aqüeducte, el qual serà referenciat geogràficament i dimensionat gràcies a l'ús de punts de control presos al terreny i la construcció amb una antena GNSS.

Aquest enfocament permetrà documentar i preservar de manera digital l'estat actual de l'estructura històrica, facilitant així el seu estudi i conservació.

Paraules clau: Fotogrametria; Drons; RPAS; Modelatge 3D; Aixecament; Aqüeducte; Alpuente; València; Imatges aèries; Georeferenciació; GNSS.

ABSTRACT

This final degree work is a project that aims to use drone technology to obtain detailed and accurate information of the Los Arcos de Alpuente aqueduct (Valencia). RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) offer an efficient and low impact tool to perform this type of mapping and 3D modeling work in areas such as the aqueduct where access with other types of instruments is complicated.

Using photogrammetry techniques, aerial images are captured and then processed by specialized software to create a three-dimensional model of the aqueduct, which will be georeferenced and scaled thanks to the application of control points taken on the ground and the construction with a GNSS antenna.

This approach will allow to digitally document and preserve the current state of the historic structure, thus facilitating its study and conservation.

Keywords: Photogrammetry; Drones; RPAS; 3D Modeling; Survey; Aqueduct; Alpuente; Valencia; Aerial imagery; Georeferencing; GNSS.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de Alpuente en la provincia de Valencia. Fuente: (Wikipedia-Alpuente)	13
Figura 2. Acueducto Los Arcos de Alpuente. Fuente: (elaboración propia).....	13
Figura 3. Pack antena GNSS. Fuente: (OMTools)	15
Figura 4. Diana. Fuente: (elaboración propia).....	16
Figura 5. Toma de puntos GPS en campo. Fuente: (elaboración propia).....	16
Figura 6. Mapa de restricciones para el vuelo de drones. Fuente: (Enaire drones).....	17
Figura 7. Esquema de las pasadas del vuelo. Fuente: (elaboración propia)	18
Figura 8. GSD. Fuente: (Vision aerial: What is Ground Sample Distance (GSD)?).....	21
Figura 9. Tipos de solape. Fuente: (DuarteJiménezKarenTatiana2018)	22
Figura 10. Flujo de trabajo de Metashape. Fuente: (elaboración propia).....	23
Figura 11. Visualización de las imágenes en Metashape. Fuente: (elaboración propia)	24
Figura 12. Compensación del rolling-shutter. Fuente: (elaboración propia).....	24
Figura 13. Configuración de la orientación de fotos. Fuente: (elaboración propia).....	25
Figura 14. Nube de puntos de paso. Fuente: (elaboración propia)	26
Figura 15. Nube de puntos de paso depurada. Fuente: (elaboración propia)	26
Figura 16. Importación de los puntos de control. Fuente: (elaboración propia)	27
Figura 17. Puntos de control sin corregir. Fuente: (elaboración propia).....	28
Figura 18. Corrección de la posición de los marcadores en las imágenes. Fuente: (elaboración propia).....	28
Figura 19. Puntos de control corregidos. Fuente: (elaboración propia)	29
Figura 20. Errores finales de los marcadores. Fuente: (elaboración propia).....	30
Figura 21. Comparativa de la nube de puntos de paso y la nube de puntos densa. Fuente: (elaboración propia).....	31
Figura 22. Configuración de la nube de puntos densa. Fuente: (elaboración propia)	32
Figura 23. Configuración de la malla. Fuente: (elaboración propia)	32
Figura 24. Detalle del modelo sólido de la malla. Fuente: (elaboración propia)	33
Figura 25. Detalle del modelo sombreado. Fuente: (elaboración propia)	33
Figura 26. Detalle del modelo texturizado. Fuente: (elaboración propia).....	34
Figura 27. Configuración de la textura. Fuente: (elaboración propia)	34
Figura 28. Configuración del modelo teselado. Fuente: (elaboración propia)	35
Figura 29. Detalle del modelo teselado. Fuente: (elaboración propia).....	36
Figura 30. Comparativa del detalle del modelo texturizado y del modelo teselado. Fuente: (elaboración propia).....	36
Figura 31. Configuración del Modelo Digital de Superficies. Fuente: (elaboración propia).....	37
Figura 32. Modelo Digital de Superficies visualizado en Google Earth. Fuente: (elaboración propia).....	38
Figura 33. Detalle del Modelo Digital de Superficies. Fuente: (elaboración propia)	38
Figura 34. Configuración de la ortofoto. Fuente: (elaboración propia).....	39
Figura 35. Ortofoto visualizada en Google Earth. Fuente: (elaboración propia)	40
Figura 36. Detalle de la ortofoto. Fuente: (elaboración propia)	40
Figura 37. Configuración de la ortofoto del alzado del acueducto. Fuente: (elaboración propia).....	41

Figura 38. Ortofoto del alzado del acueducto. Fuente: (elaboración propia)	42
Figura 39. Detalle de la ortofoto del alzado. Fuente: (elaboración propia).....	42
Figura 40. Medida de referencia en Metashape. Fuente: (elaboración propia)	43
Figura 41. Medida de referencia en AutoCad. Fuente: (elaboración propia)	43
Figura 42. Puntos de referencia para el escalado. Fuente: (elaboración propia)	44
Figura 43. Ortofoto escalada. Fuente: (elaboración propia).....	44
Figura 44. Detalle del resultado del delineado. Fuente: (elaboración propia).....	45
Figura 45. Errores de los puntos de control. Fuente: (elaboración propia)	46
Figura 46. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes. Fuente: (elaboración propia).....	47
Figura 47. Nivel de confianza del modelo. Fuente: (elaboración propia)	48
Figura 48. Distancia entre los puntos 1 y 2 medida sobre el modelo. Fuente: (elaboración propia).....	48
Figura 49. Distancia entre los puntos 11 y 12 medida sobre el modelo. Fuente: (elaboración propia).....	49
Figura 50. Código QR de la animación 3D. Fuente: (elaboración propia).....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Errores parciales por ejes (X,Y,Z) y totales de los puntos de control. Fuente: (elaboración propia).....	47
Tabla 2. Presupuesto. Fuente: (elaboración propia)	52
Tabla 3. Especificaciones técnicas de la antena "Leica FLX100". Fuente: (Leica-geosystems)	61
Tabla 4. Coordenadas de los puntos GPS. Fuente: (Elaboración propia).....	62
Tabla 5. Especificaciones de la aeronave. Fuente: (DJI).....	62
Tabla 6. Especificaciones de la cámara. Fuente: (DJI).....	63
Tabla 7. Tabla salarial 2023 del Convenio Colectivo de CONSTRUCCIÓN Y OBRAS PÚBLICAS de Valencia. Fuente: (UGT tablas salariales 2023 Valencia).....	64

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Localización.....	12
1.2. Acueducto Los Arcos de Alpuente	13
2. OBJETIVOS	14
3. DATOS	15
3.1. GNSS	15
3.2. Dron	17
3.2.1. Marco legal.....	17
3.2.2. Plan de vuelo	18
4. METODOLOGÍA	19
4.1. Antecedentes	19
4.2. Principios teóricos.....	20
4.3. Fotogrametría aérea	20
4.4. Metodología	22
4.4.1. Metashape.....	23
4.4.1.1. Añadir fotos.	23
4.4.1.3. Puntos de control.....	27
4.4.1.4. Crear nube de puntos densa.	30
4.4.1.5. Crear malla.	32
4.4.1.6. Crear textura.	34
4.4.1.7. Crear modelo de teselas.	35
4.4.1.8. Crear modelo digital de elevaciones.	37
4.4.1.9. Crear ortomosaico.....	39
4.4.2. AutoCad	41
5. RESULTADOS	46
6. PRESUPUESTO	50
6.1. Costes Directos	50
6.2. Costes indirectos	51
6.3. Beneficio industrial.....	51
6.4. Impuestos	52
6.5. Coste total	52
7. CONCLUSIONES	53
8. BIBLIOGRAFÍA	55



9. CARTOGRAFÍA	57
10. ANEXOS	61

1. INTRODUCCIÓN

Los acueductos son sistemas de conducción de agua que permiten abastecer a las ciudades y poblaciones de este recurso vital, siendo muestra del impresionante ingenio humano de las antiguas civilizaciones. Su origen se remonta a la antigüedad, en las civilizaciones del Próximo Oriente, Grecia, Egipto y Roma, donde se desarrolló dicha obra de ingeniería con el fin de captar el agua de fuentes naturales (ríos, manantiales o pozos) para transportarla hasta las poblaciones.

Sin embargo, a pesar de su importancia histórica y cultural, muchos acueductos han sufrido un deterioro considerable a lo largo de los siglos. Factores como el paso del tiempo, la exposición a los elementos atmosféricos, los desastres naturales y la falta de mantenimiento adecuado han contribuido al desgaste y la degradación de estas estructuras y de su funcionalidad. Por ello es esencial realizar estudios y trabajos de conservación y restauración que permitan preservar este patrimonio histórico.

En este sentido, la aplicación de técnicas de fotogrametría y modelado 3D a través de RPAS representa un avance significativo en la documentación y la conservación de estas construcciones.

Con relación a este proyecto, el modelo 3D obtenido del acueducto Los Arcos permitirá obtener información precisa sobre sus dimensiones, forma y estado de conservación en el momento de la toma de datos. Además, podrá ser utilizado para fines de investigación histórica y arqueológica, para la planificar y ejecutar tareas de conservación y restauración de la estructura o para la difusión cultural y turística del municipio de Alpuente.

1.1. Localización

El acueducto Los Arcos se encuentra situado en el municipio de Alpuente a 2,50 kilómetros al norte de la localidad.

Alpuente es un municipio perteneciente a la provincia de Valencia, en la comarca de Los Serranos. Se ubica a 97 kilómetros al noroeste de Valencia lindando con la provincia de Teruel.



Figura 1. Ubicación de Alpuente en la provincia de Valencia. Fuente: (Wikipedia-Alpuente)

1.2. Acueducto Los Arcos de Alpuente

Se trata de un monumento declarado bien de interés cultural de arquitectura civil con técnicas medievales que data de finales del siglo XVI y principios del siglo XVII.

Tiene una longitud de 256,50 metros, consta de trece arcos apuntados (ojivales) de trazado regular y alcanza en su máximo desnivel (lugar por donde discurre el río Reguero) los 10 metros de altura. El arco original que cubría el río desapareció en el año 1880 debido a una avenida de agua que lo arrastró.

La infraestructura se vio sometida a una restauración entre los años 1986 y 1988 dirigida por la Consellería de Cultura, Educación y Ciencia.



Figura 2. Acueducto Los Arcos de Alpuente. Fuente: (elaboración propia)

2. OBJETIVOS

El **objetivo principal** que se pretende alcanzar con la realización de este proyecto, como ya se ha comentado en los apartados anteriores, es realizar un **levantamiento fotogramétrico** del acueducto Los Arcos de Alpuente y generar un **modelo 3D** de éste haciendo uso de la fotogrametría a través de RPAS para ayudar en las labores de mantenimiento y restauración de la estructura, así como para servir de fuente propagandística para el turismo de la zona o como fuente de información para los historiadores que quieran estudiar el monumento.

Asimismo, con este trabajo también se espera alcanzar una serie de **objetivos específicos** que se enumeran a continuación:

- Analizar el uso de la fotogrametría en este tipo de trabajos.
- Diseñar un plan de vuelo de RPAS optimizado.
- Ejecutar el plan de vuelo del RPAS cumpliendo con la normativa vigente y realizar la captura de imágenes fotográficas.
- Procesar las imágenes fotográficas mediante un software específico para generar la nube de puntos densa.
- Georreferenciar las imágenes con los puntos tomados con una antena GNSS para obtener el modelo 3D final escalado.
- Valorar la precisión y calidad del resultado mediante comparaciones con medidas y referencias existentes.
- Presentar el modelo 3D en un formato adecuado para su difusión.

En cuanto a las **aplicaciones potenciales y los beneficios que aporta la realización de este trabajo**, se puede decir que el propósito del TFG se enfoca principalmente en los ámbitos del turismo y de la conservación del patrimonio.

Así pues, el modelo 3D del acueducto que se entrega como resultado puede ayudar a historiadores y arquitectos a estudiar en profundidad y de una forma más accesible cómo está construida la estructura y a diseñar diversas alternativas para posibles restauraciones;

además de servirle al ayuntamiento de Alpuente de atractivo turístico al incorporarlo a su página web con el fin de despertar el interés de los potenciales visitantes.

3. DATOS

Para llevar a cabo este proyecto se han utilizado dos tipos de datos: las fotografías aéreas tomadas con un RPAS y los puntos de control capturados con una antena GNSS. A continuación, se describe el instrumental utilizado en cada caso y los productos adquiridos con cada uno (ambos datos fueron tomados el mismo día 17 de junio de 2023).

3.1. GNSS

Para la toma de los puntos de control georreferenciados para el vuelo, la escuela nos facilitó el modelo de antena GNSS “Leica Zeno FLX100” del fabricante Leica, un dispositivo compacto y portable con unas especificaciones técnicas (2 cm de precisión horizontal y 3 cm de precisión altimétrica) que se adaptan a los requisitos del proyecto.

La antena se usó junto al jalón “GLS30” de Leica para estacionar sobre las dianas de manera nivelada, y junto a la tablet “Zeno Tab 2” (también de Leica) para la toma de datos, la cual se hizo por medio del software “TepGPS” previamente instalado en el dispositivo.



Figura 3. Pack antena GNSS. Fuente: (OMTools)

Se midieron un total de **15 puntos** repartidos homogéneamente a lo largo del acueducto (5 por cada lado y 5 arriba de la estructura) con una separación aproximada de 50 metros.

Con la finalidad de que dichos puntos de coordenadas conocidas fuesen fácilmente reconocibles en las fotografías tomadas con el dron se emplearon dianas fabricadas a mano, a base folios impresos a tamaño A4 con el dibujo de la diana pegados sobre recortes de cajas de cartón del mismo tamaño a fin de hacerlas más resistentes.

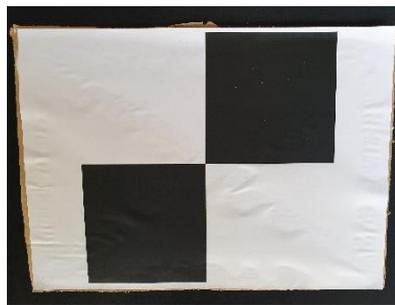


Figura 4. Diana. Fuente: (elaboración propia)

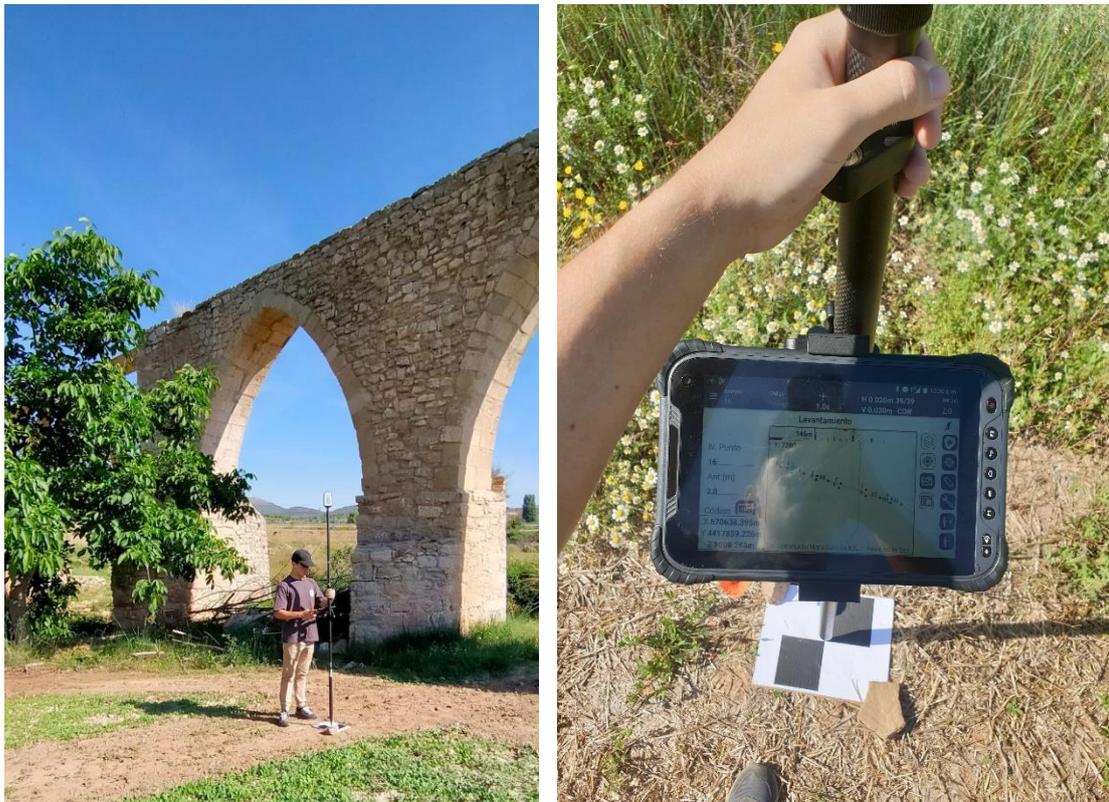


Figura 5. Toma de puntos GPS en campo. Fuente: (elaboración propia)

3.2. Dron

En cuanto al instrumental para capturar las fotografías aéreas se eligió el modelo de dron “DJI Air 2s”.

Dicha aeronave lleva incorporada una cámara con un sensor CMOS de 1” (1 pulgada) y es capaz de tomar fotografías de 20 megapíxeles, lo que equivale a un tamaño de píxel de 2,4 μm . Estas características, junto con su excelente portabilidad y manejabilidad, lo hacen un dron completo y apropiado para este trabajo.

3.2.1. Marco legal

El acueducto está situado en una zona sin restricciones aéreas que requieran la solicitud de permisos para operar el vuelo.

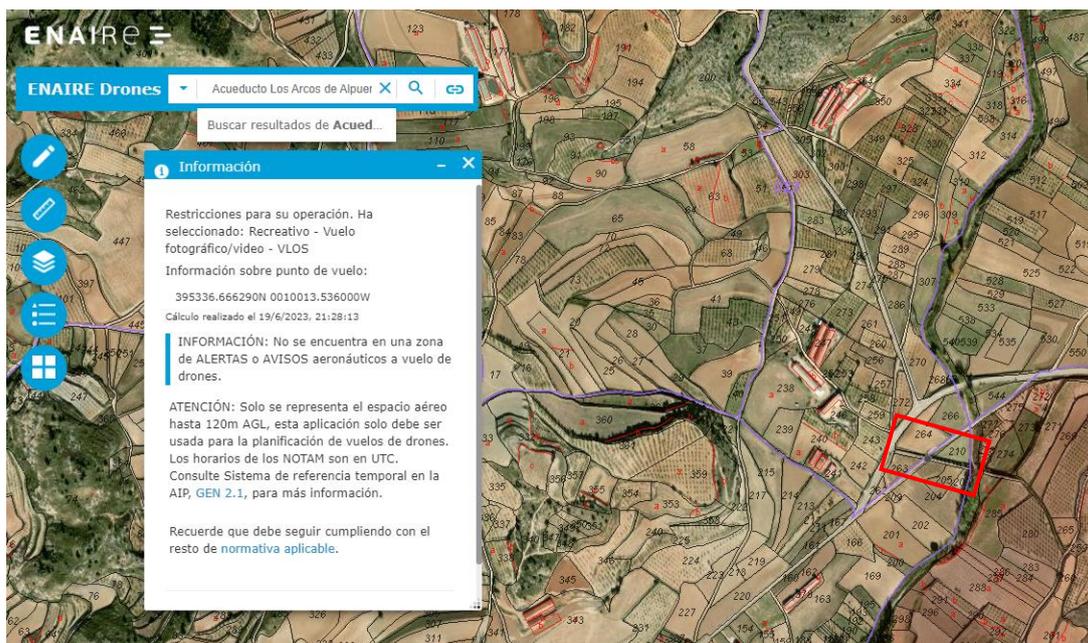


Figura 6. Mapa de restricciones para el vuelo de drones. Fuente: (Enaire drones)

Al mismo tiempo, dadas las características físicas, técnicas y operacionales del modelo del dron, el DJI Air 2s se engloba en la **categoría C1** según la nueva normativa europea de EASA (Agencia Europea de Seguridad Aérea). Por lo tanto, para volarlo legalmente se necesita el título de piloto de dron de la **subcategoría A1** reconocido por AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea), así como estar registrado como operador de drones en AESA.

3.2.2. Plan de vuelo

Tras acudir a la zona de estudio e inspeccionarla se optó por llevar a cabo el vuelo de forma manual, ya que la orografía y elementos como árboles o tendidos eléctricos dificultaban ejecutar un plan de vuelo automático.

Para ello se configuró el modo del dron en captura de imágenes con temporizador, estableciendo un tiempo de 2 segundos, y se mantuvo una velocidad lo más constante posible para conseguir un **solape mínimo del 80%** entre fotografías.

Se realizaron un total de 5 pasadas a lo largo del acueducto, dos de ellas por cada lado apuntando al acueducto a diferentes alturas y con distinta inclinación de cámara (una a unos 14 metros con la cámara a 30° y otra a unos 20 metros con la cámara a 70°) y una cenital (cámara a 90°) por el eje del acueducto a la misma altura que las pasadas laterales más altas (20 metros aprox.). Por otra parte, al haber un tramo con árboles muy altos y pegados a la estructura, las imágenes de esa zona se tomaron con el dron estático en el aire solo con el movimiento de “guiñada”.

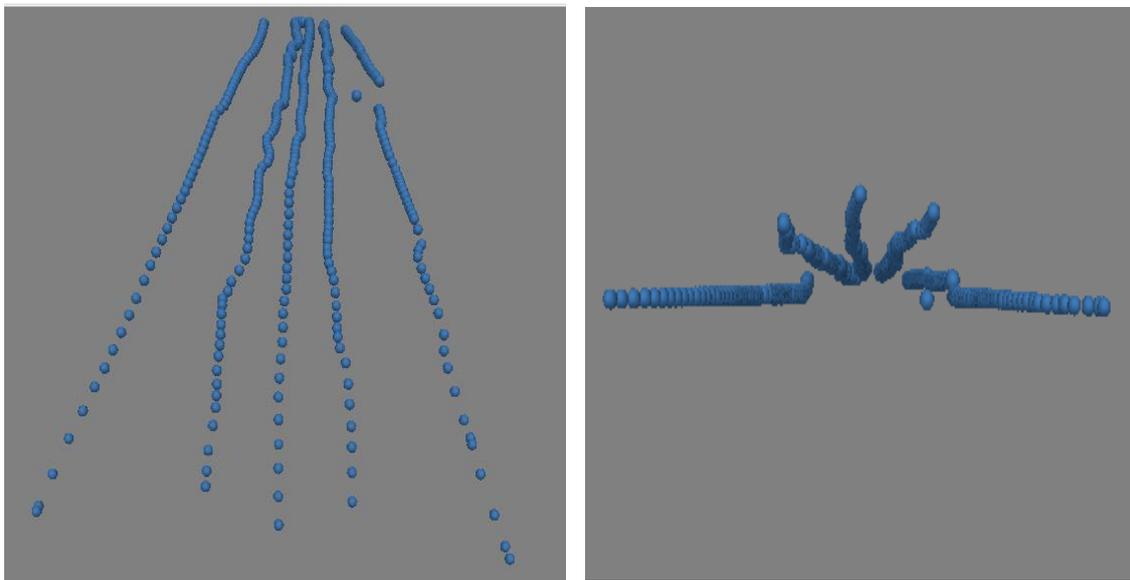


Figura 7. Esquema de las pasadas del vuelo. Fuente: (elaboración propia)

De esta forma, en total se capturaron **460 imágenes**, requiriendo el uso de 2 baterías cargadas al 100% (unos 25 minutos de autonomía cada una).

4. METODOLOGÍA

4.1. Antecedentes

La fotogrametría es un campo que ha revolucionado la cartografía y la topografía al permitir extraer información 3D precisa de imágenes 2D. A lo largo de la historia, este método ha ido evolucionando y adaptándose a los avances tecnológicos, proporcionando infinidad de aplicaciones en campos tan diversos como la arqueología, la ingeniería, la arquitectura, la agricultura y muchos otros.

Los orígenes de la fotogrametría se remontan al siglo XVIII, cuando el suizo Moritz Anton Kappeler utilizó perspectivas para cartografiar el monte Pilatus con un método similar al de las intersecciones de la topografía.

No obstante, a pesar de los avances de Moritz, no fue hasta el siglo XIX que verdaderamente nació lo que conocemos hoy en día como fotogrametría. Entonces se empezaron a explorar las posibilidades de utilizar imágenes para obtener mediciones precisas.

Uno de los primeros pasos importantes fue dado por el coronel francés Aimé Laussedat, quien en 1858 logró elaborar algunos planos aplicando diferentes perspectivas partiendo de las fotografías. Él junto a Albrecht Meydenbauer (arquitecto alemán que empleó el método de “intersecciones a partir de fotografías” para documentar obras arquitectónicas) son los considerados padres de la fotogrametría moderna.

Posteriormente, gracias a la aparición de las cámaras (en especial las digitales) la fotogrametría terrestre se volvió más accesible, lo que fomentó un gran desarrollo de esta técnica.

Hoy en día la fotogrametría se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, siendo una herramienta fundamental para la obtención de información tridimensional de los objetos y del entorno que nos rodean que se encuentra en constante evolución.

4.2. Principios teóricos

La fotogrametría se fundamenta en el principio de la **triangulación**. Este principio consiste en determinar las coordenadas en tres dimensiones de un punto mediante sus proyecciones obtenidas a partir de dos o más fotografías capturadas desde posiciones distintas. Para lograr un buen resultado es necesario saber tanto la orientación y posición como las características de las cámaras en el momento de la toma.

Otro principio importante de la fotogrametría es el de la **visión estereoscópica**, que es la capacidad de percibir información tridimensional (profundidad, forma, relieve...) de los objetos a partir de dos imágenes ligeramente diferentes del mismo lugar captadas desde dos puntos de vista separados (imágenes estereoscópicas). Este es el mismo principio que utiliza el ser humano para lograr formar una sola imagen usando la información que recibe de los dos ojos.

El **paralaje** se conoce como la diferencia entre las posiciones de un mismo punto, observado desde puntos de vista diferentes. En fotogrametría, los puntos de vista son imágenes tomadas en posiciones diferentes con cierto solapamiento entre ellas. Combina los dos principios anteriores (triangulación y visión estereoscópica) para obtener información espacial de los objetos tomando como punto de partida el desplazamiento aparente entre las posiciones del punto.

4.3. Fotogrametría aérea

La fotogrametría aérea es una variante de la fotogrametría. A diferencia de la terrestre, en la fotogrametría aérea las imágenes son tomadas desde una posición elevada, ya sea desde aeronaves tripuladas (aviones) como no tripuladas (RPAS).

La fotogrametría aérea se basa en los mismos principios teóricos que la fotogrametría. No obstante, existen varios parámetros y variables que se deben tener en cuenta a la hora de llevar a cabo el vuelo. Algunos de estos son:

- Altitud de vuelo: Influye en la resolución espacial de las imágenes y en la cobertura del área. Una altitud más baja permite una mayor resolución, pero

cubre un área más pequeña, mientras que una altitud más alta proporciona una mayor cobertura, pero con una menor resolución.

- **GSD:** o *Ground Sample Distance*, indica la distancia del terreno representada por un píxel de la imagen, es decir, la resolución espacial. Se expresa en unidades de longitud por píxel (m/px o cm/px) y depende de la altura de vuelo y de la distancia focal de la cámara utilizada; parámetros a los que es directamente proporcional, ya que, si estos aumentan, el GSD aumentará, y si disminuyen, el GSD hará lo mismo.

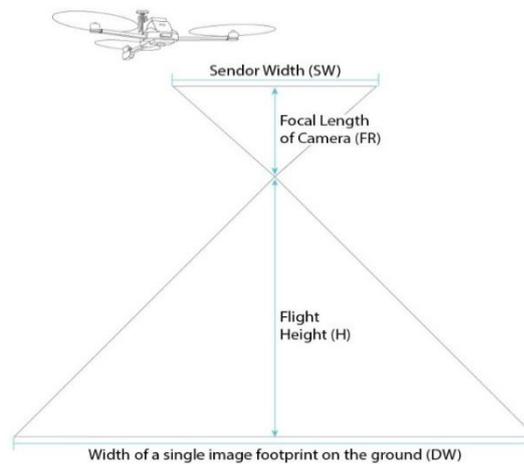


Figura 8. GSD. Fuente: (Vision aerea: What is Ground Sample Distance (GSD)?)

Un valor de GSD pequeño ofrecerá una resolución espacial mayor con el inconveniente de requerir la toma de una mayor cantidad de imágenes. Por el contrario, con un GSD más grande se captarán menos detalles del terreno, pero aportará una visión más amplia del terreno.

A continuación, se muestra la fórmula para calcular el GSD (en cm/px):

$$GSD = \frac{\text{ancho del sensor (mm)} * H \text{ de vuelo (m)} * 100}{\text{dist focal (mm)} * \text{ancho imagen (px)}} \quad (1)$$

- **Superposición:** Indica el nivel de solapamiento entre imágenes contiguas. Existen **dos tipos: transversal** (solapamiento perpendicular al vuelo) y **longitudinal** (solapamiento en la dirección del vuelo). Cuanto mayor sea, más

fácil será encontrar puntos homólogos para un correcto emparejamiento de la imágenes, pero más largo será el vuelo y más fotografías se tomarán. Para una mejor precisión y calidad de los resultados se recomienda aplicar valores mínimos de un 70% de superposición en ambos tipos.

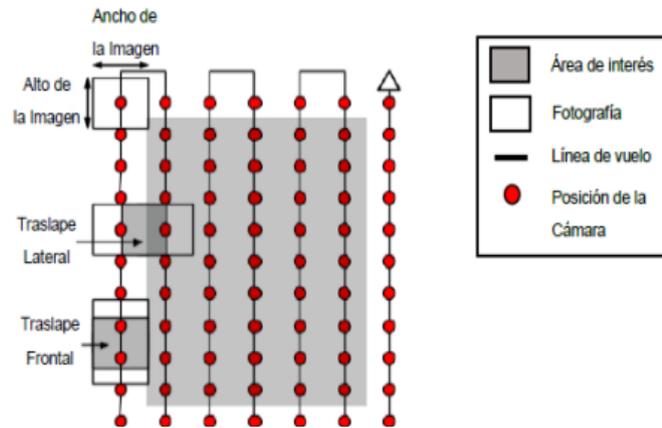


Figura 9. Tipos de solape. Fuente: (DuarteJiménezKarenTatiana2018)

- Resolución de la cámara: Influye en el nivel de detalle de los resultados. Cuanto mayor sea la resolución de la cámara, mayor será la cantidad de detalles capturados en las imágenes, lo que resultará en una mayor precisión y calidad de los productos generados.

4.4. Metodología

Una vez recabados todos los datos necesarios para la realización del proyecto (fotografías del dron y puntos GPS) se procede a procesarlos con el programa **Metashape** (en su versión 1.8.2), a través del cual se generará la nube de puntos a la que se le dotará de coordenadas y escala para formar el modelo 3D final.

La elección de este software se hizo en base a la experiencia adquirida durante su utilización en aquellas asignaturas impartidas a lo largo del grado en las que se empleó y a que, además de tratarse de un programa de fácil manejo y en el que poseo experiencia, es capaz de ofrecer una serie de opciones y resultados a la altura de las exigencias demandadas en proyectos como este.

Posteriormente, la ortofoto del alzado del acueducto generada en Metashape se exportará al programa de diseño **AutoCad** para crear un plano a escala de una sección del mismo.

4.4.1. Metashape

Dentro de **Metashape**, el **flujo de trabajo** seguido ha estado guiado por la serie de opciones que aparecen en la pestaña “Flujo de trabajo”, en el orden que se muestra en la *Figura 10*.

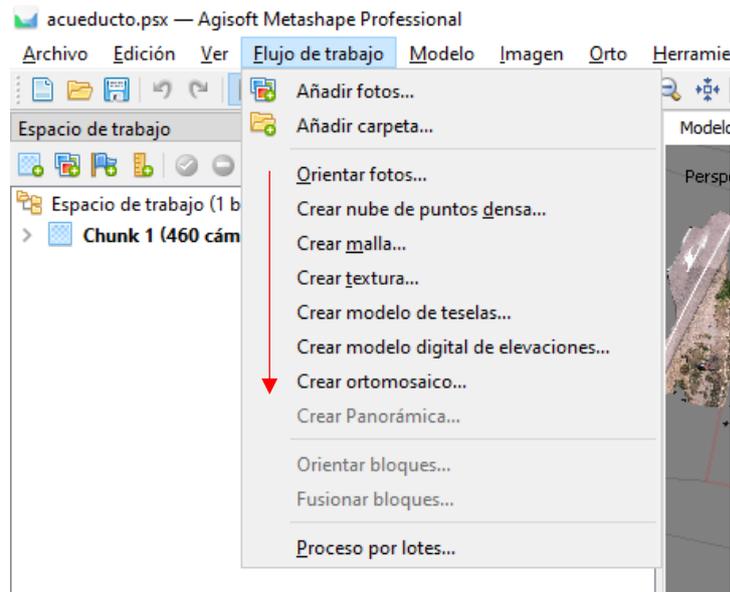


Figura 10. Flujo de trabajo de Metashape. Fuente: (elaboración propia)

A continuación, se detalla la explicación de cada uno de los pasos anteriores, así como los productos que se generan al ejecutarlos. Cabe decir que en todos los pasos se han aplicado las calidades máximas permitidas por mi ordenador intentando conseguir el mejor resultado sin que se demorase mucho el tiempo de procesamiento.

4.4.1.1. Añadir fotos.

Lo primero que hay que hacer una vez creado el proyecto es añadir las fotos capturadas durante el vuelo con el RPAS.

Desde la pestaña “Flujo de trabajo” se pueden añadir directamente todas las fotos, o bien la carpeta donde se encuentran guardadas. En este caso se ha optado por importar las fotografías directamente.

Para este proyecto se han utilizado un total de 460 imágenes (representadas por los rectángulos azules en la *Figura 11*), las cuales se pueden visualizar por separado en el apartado “imágenes” de Metashape (*Figura 11*).

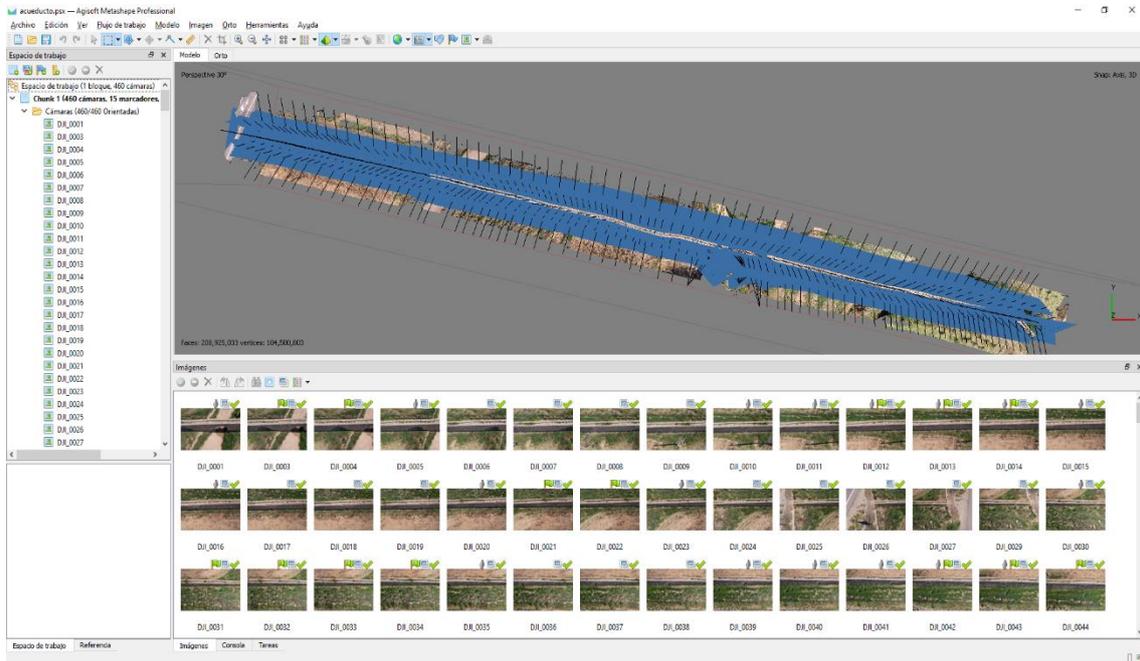


Figura 11. Visualización de las imágenes en Metashape. Fuente: (elaboración propia)

Antes de continuar con el siguiente paso, dentro del apartado “Herramientas” / “Calibración de cámara”, hay que activar la pestaña de “compensación del rolling-shutter” debido a que el modelo del dron utilizado sufre dicha distorsión en las fotografías.

El “rolling-shutter” (también conocido como “efecto persiana”) es un efecto óptico que está ligado con los métodos de captura de las cámaras con sensor CMOS cuando están en movimiento. Esto provoca una pequeña distorsión en las imágenes que tiene que ser corregida antes de procesarlas.

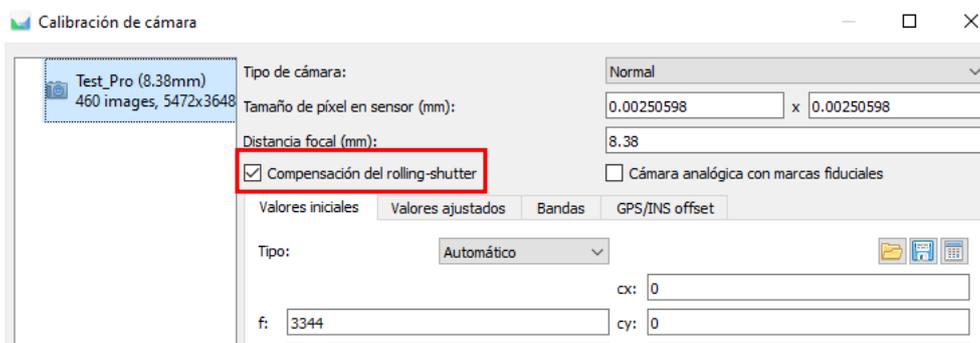


Figura 12. Compensación del rolling-shutter. Fuente: (elaboración propia)

4.4.1.2. Orientar fotos.

Con el “rolling-shutter” compensado, el siguiente paso es orientar las fotos.

Lo que hace este proceso es buscar puntos comunes en distintas imágenes que puedan utilizarse como puntos de referencia para emparejarlas.

En lo que respecta a las opciones configurables de este paso (*Figura 13*) únicamente se ha cambiado la precisión a “Alta” y se ha desmarcado la casilla de “Emparejamiento guiado”, el cual se hace manualmente más adelante en el proyecto. Los valores del resto de las variables se han dejado como aparecían por defecto ya que cumplían las exigencias deseadas.

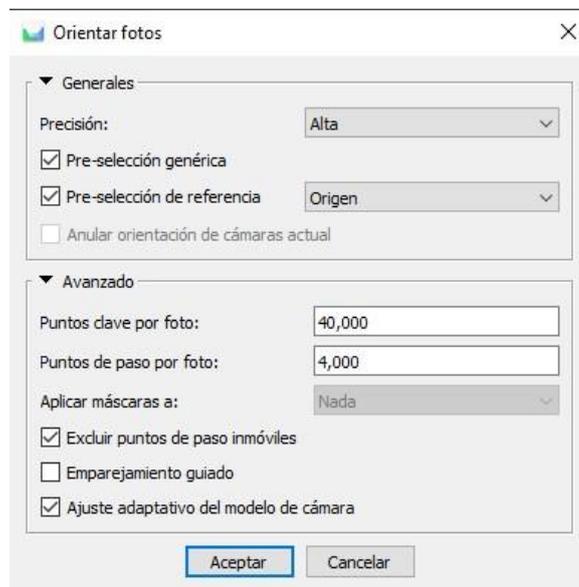


Figura 13. Configuración de la orientación de fotos. Fuente: (elaboración propia)

El producto que produce este proceso es una **nube de puntos de paso** compuesta por 506.608 puntos, tardando en total (con los parámetros de la *Figura 13*) 18 minutos y ocupando 42 MB.

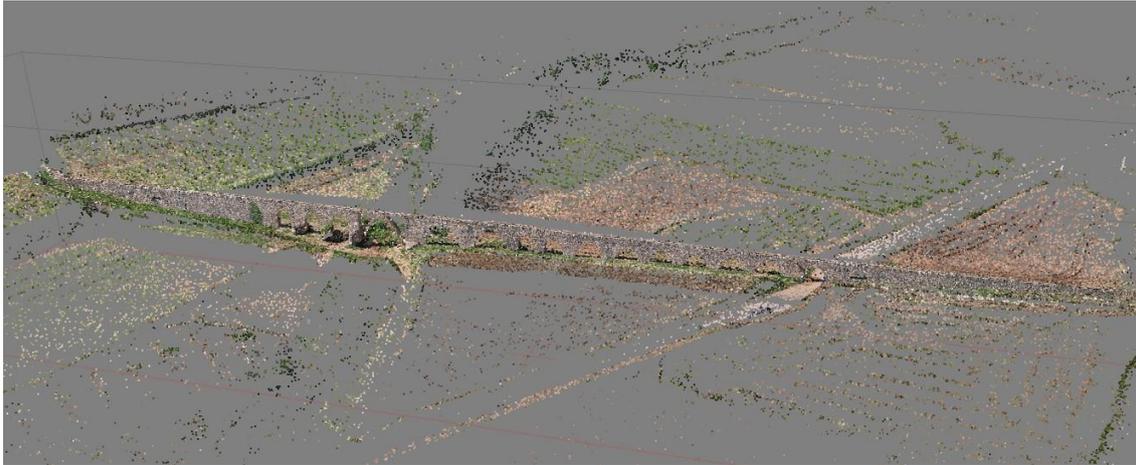


Figura 14. Nube de puntos de paso. Fuente: (elaboración propia)

Con la nube de puntos de paso terminada, hay que borrar los puntos que se han generado en las zonas lejanas al acueducto con la finalidad de agilizar el procesado en los siguientes pasos y de disminuir el tamaño del archivo del proyecto; quedándose así solo la porción de la nube de la *Figura 14* que se quiere estudiar (véase la *Figura 15*).

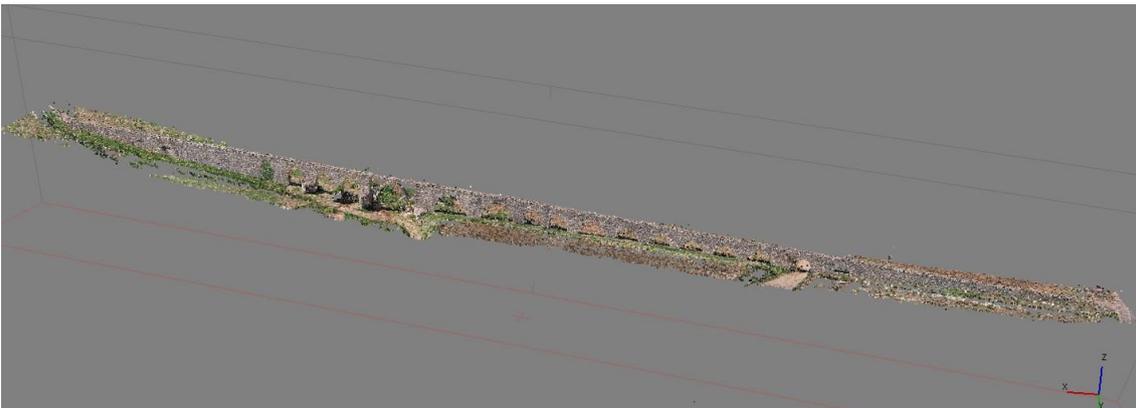


Figura 15. Nube de puntos de paso depurada. Fuente: (elaboración propia)

De esta forma, el número de puntos de paso disminuye de los **506.608 puntos** que había antes de depurar la nube a los **450.937 puntos**.

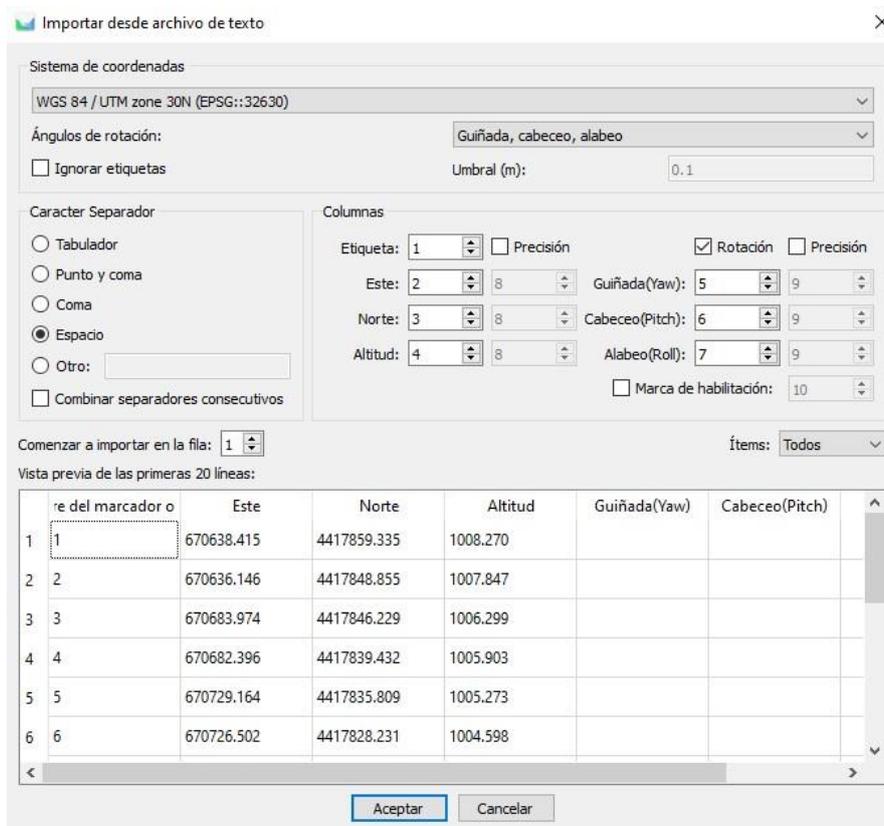
4.4.1.3. Puntos de control.

A continuación, se importa el fichero que contiene los datos recabados en campo de los puntos tomados con la antena GNSS.

Para ello, en primer lugar, hay que configurar el sistema de coordenadas del proyecto para que coincida con el utilizado en campo en la toma de los puntos GPS. En este caso se ha trabajado con el sistema “**WGS 84 / UTM zone 30N (EPSG:32630)**”.

Una vez establecido correctamente el sistema de coordenadas del proyecto, para añadir automáticamente todos los puntos con sus correspondientes coordenadas, se importa el archivo generado por el software “TcpGPS” (*archivo/importar/importar referencias*). Al hacerlo se tiene que indicar el sistema de coordenadas, así como, al tratarse de un archivo de texto, el carácter separador utilizado entre los distintos datos.

Al importarse se crea un marcador por cada punto, los cuales se representan en la ventana de visualización por medio de unos pines con forma de bandera (*Figura 17*).



Importar desde archivo de texto

Sistema de coordenadas: WGS 84 / UTM zone 30N (EPSG:32630)

Ángulos de rotación: Guiñada, cabeceo, alabeo

Ignorar etiquetas Umbral (m): 0.1

Carácter Separador: Tabulador Punto y coma Coma Espacio Otro:

Combinar separadores consecutivos

Columnas: Etiqueta: 1 Precisión Rotación Precisión

Este: 2 8 Guiñada(Yaw): 5 9

Norte: 3 8 Cabeceo(Pitch): 6 9

Altitud: 4 8 Alabeo(Roll): 7 9

Marca de habilitación: 10

Comenzar a importar en la fila: 1 Ítems: Todos

Vista previa de las primeras 20 líneas:

	re del marcador o	Este	Norte	Altitud	Guiñada(Yaw)	Cabeceo(Pitch)
1	1	670638.415	4417859.335	1008.270		
2	2	670636.146	4417848.855	1007.847		
3	3	670683.974	4417846.229	1006.299		
4	4	670682.396	4417839.432	1005.903		
5	5	670729.164	4417835.809	1005.273		
6	6	670726.502	4417828.231	1004.598		

Aceptar Cancelar

Figura 16. Importación de los puntos de control. Fuente: (elaboración propia)

Como se puede apreciar en la siguiente imagen (*Figura 17*), los puntos no se importan sobre sus marcas en la nube de puntos. Esto se debe a que la nube ha sido generada con las coordenadas de las fotografías, cuya precisión es bastante peor que la ofrecida por la antena GNSS (+-0.5 m en vertical y +- 1.5m en horizontal. *Fuente: DJI Air2s - Especificaciones*).

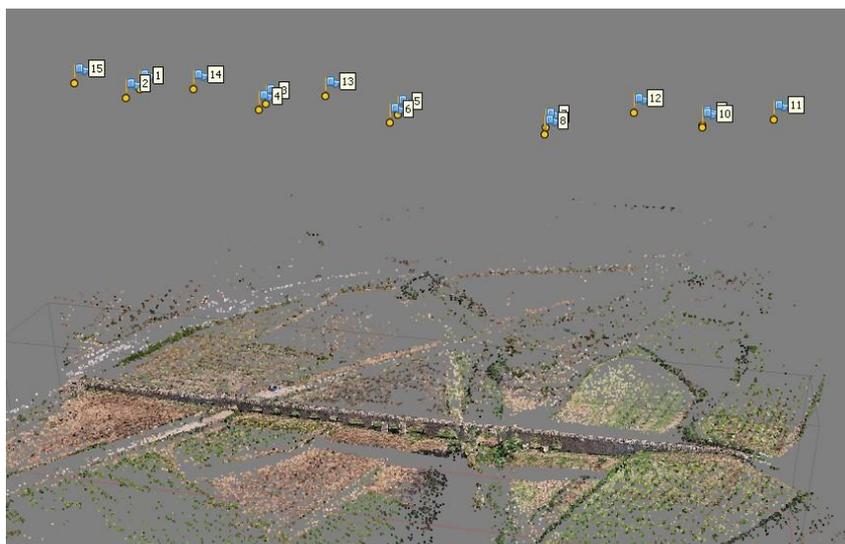


Figura 17. Puntos de control sin corregir. Fuente: (elaboración propia)

Con el objetivo de corregir esa desviación de la posición de la nube de puntos, cada marcador se coloca manualmente, en las imágenes que aparezca, sobre su marca del terreno en el centro de esta (*Figura 18*). No obstante, no es necesario (ni recomendable) poner los marcadores en todas las fotos que salgan ya que, de lo contrario, podría aumentar el error final.

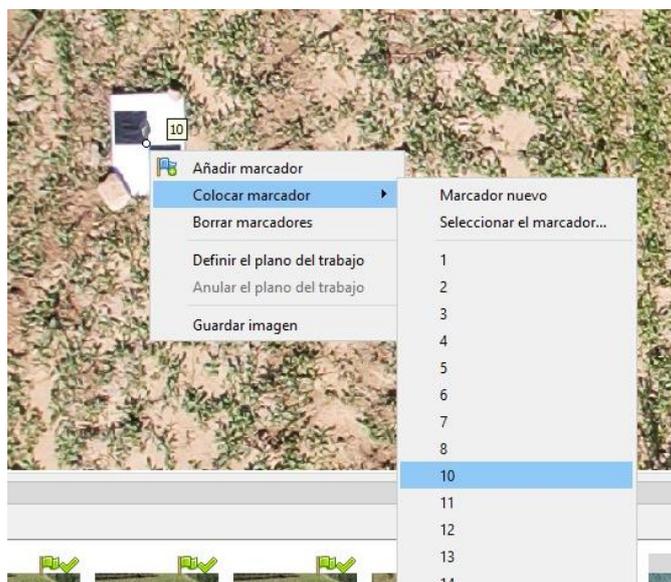


Figura 18. Corrección de la posición de los marcadores en las imágenes. Fuente: (elaboración propia)

En la *Figura 19* se puede ver el resultado de corregir cada uno de los marcadores una vez actualizado el proyecto.



Figura 19. Puntos de control corregidos. Fuente: (elaboración propia)

Tras este proceso, cada marcador adquiere un error asociado y se establece un error total medio de los errores de todos los marcadores. A priori se debería obtener un valor cercano a la precisión que ofrece la antena “Leica Zeno FLX100”, es decir, unos 2cm de error.

En la siguiente imagen (*Figura 20*) están plasmados los errores de cada marcador, así como el error total logrado tras la calibración pertinente de las cámaras del proyecto (*Herramientas/Optimizar cámaras*). Esta calibración ajusta algunos parámetros internos de la cámara como la focal o los coeficientes de distorsión, y también los parámetros externos como lo son la orientación y la posición de la cámara en los tres ejes X, Y, Z con el fin de mejorar la precisión del resultado.

Marcadores	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0.016237
<input checked="" type="checkbox"/> 2	0.019926
<input type="checkbox"/> 3	0.058948
<input checked="" type="checkbox"/> 4	0.010454
<input type="checkbox"/> 5	0.068069
<input type="checkbox"/> 6	0.060996
<input checked="" type="checkbox"/> 7	0.030335
<input checked="" type="checkbox"/> 8	0.011284
<input checked="" type="checkbox"/> 9	0.009922
<input checked="" type="checkbox"/> 10	0.014795
<input checked="" type="checkbox"/> 11	0.016346
<input checked="" type="checkbox"/> 12	0.020217
<input checked="" type="checkbox"/> 13	0.014533
<input checked="" type="checkbox"/> 14	0.013845
<input checked="" type="checkbox"/> 15	0.019917
Error total	
Puntos de apoyo	0.017345

Figura 20. Errores finales de los marcadores. Fuente: (elaboración)

La mayoría de los marcadores tienen errores inferiores a los esperados. Sin embargo, también encontramos valores ligeramente superiores o incluso de varios centímetros de más de diferencia. Estos últimos puede deberse a fallos en la toma de las coordenadas en campo, ya sea una mala colocación de la antena sobre la diana o el desplazamiento involuntario de la diana una vez finalizada la captura de dichos puntos.

Por último, el error total también sale por debajo de los 2 centímetros que se esperaban a priori, una señal de que la georreferenciación del modelo se ha realizado correctamente.

Cabe decir que para calcular el error total se despreciaron los tres marcadores que se encuentran desmarcados en la *Figura 20* debido a su elevado error y a que se disponía de una cantidad suficiente de marcadores.

4.4.1.4. Crear nube de puntos densa.

Antes de crear la malla del modelo 3D es necesario formar la base sobre la cual se pueda desarrollar. Dicha base es la nube de puntos densa.

Esta nube toma como origen la nube de puntos de paso formada anteriormente (*Figura 15*) y la desarrolla de tal forma que, como bien indica su nombre, incrementa la densidad de puntos basándose en las imágenes para conseguir que se distingan mejor los objetos representados.



Figura 21. Comparativa de la nube de puntos de paso y la nube de puntos densa. Fuente: (elaboración propia)

Como se puede ver en la *Figura 21*, en la nube de puntos de paso (arriba) apenas se llega a distinguir el acueducto. En cambio, con la nube de puntos densa (abajo) se reconoce a la perfección la estructura, lográndose apreciar incluso algunos detalles de esta y del terreno.

La **nube de puntos densa** generada tiene un tamaño de 10.31 GB y se compone de **746.270.299 puntos**, una cantidad considerablemente superior a los 450.937 puntos que formaban la nube de puntos de paso. Para ello se utilizaron las opciones que se muestran en la *Figura 22*, siendo estas las más elevadas permitidas.

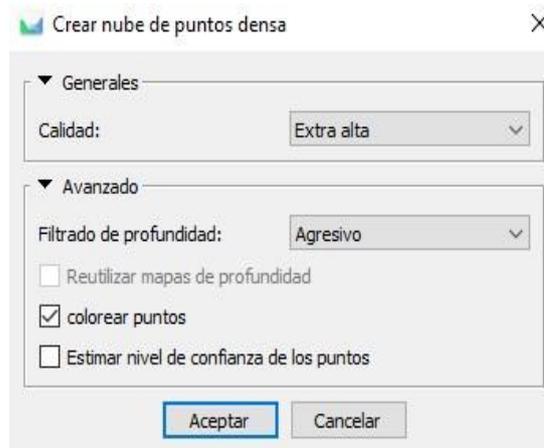


Figura 22. Configuración de la nube de puntos densa. Fuente: (elaboración propia)

En este paso también se crean los **mapas de profundidad**, un subproducto muy importante en el desarrollo del proyecto ya que servirán como fuente de datos para la creación de los próximos productos.

La duración total del proceso, tanto de los mapas de profundidad cómo de la nube de puntos densa, fue de **18 horas y 15 minutos**.

4.4.1.5. Crear malla.

La creación de la malla es uno de los pasos más importantes. Junto a los mapas de profundidad, será la fuente de datos de los productos restantes. Por ello es importante configurar bien los parámetros para conseguir un buen resultado.

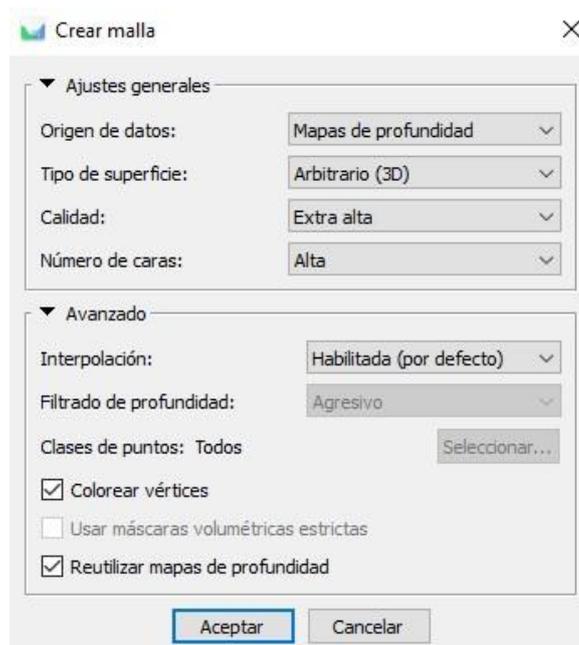


Figura 23. Configuración de la malla. Fuente: (elaboración propia)

Tras comparar los resultados obtenidos con los diferentes orígenes de datos (puntos de paso, mapas de profundidad o la nube de puntos densa) se optó por crear la malla a partir de los mapas de profundidad debido a que con ellos se obtuvo un modelo más detallado y preciso que con el resto.

En cuanto al resto de opciones configurables cabe decir que se escogieron las más altas, destacando el tipo de superficie, que se puso como “Arbitrario 3D” por tratarse de una construcción. El tiempo de procesado fue de **3 horas y 27 minutos** dando el siguiente resultado:

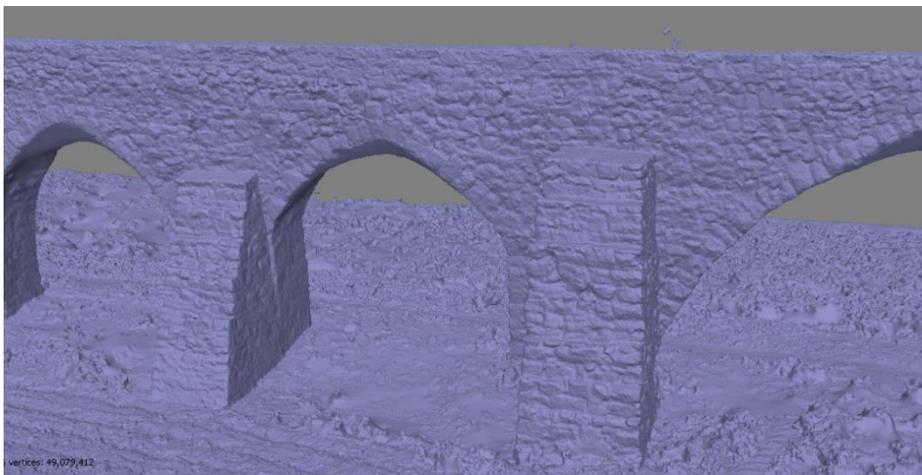


Figura 24. Detalle del modelo sólido de la malla. Fuente: (elaboración propia)

Puesto que a la hora de configurar los parámetros de procesado de la malla se marcó la casilla de “colorear vértices” (Figura 23), la creación de la malla también devuelve el subproducto de la Figura 24 coloreado, asignando los colores extraídos de las propias fotografías a sus correspondientes píxeles:



Figura 25. Detalle del modelo sombreado. Fuente: (elaboración propia)

Sin embargo, el nivel de detalle y realismo que ofrece este modelo no es comparable al conseguido en el modelo de teselas o incluso en el modelo texturizado como se verá más adelante.

4.4.1.6. *Crear textura.*

A diferencia de colorear los píxeles en la creación de la malla, al crear el modelo texturizado el programa genera una textura independiente al modelo 3D que se aplica sobre la superficie de este una vez terminada la fase de reconstrucción, aportando una apariencia más realista al modelo.



Figura 26. Detalle del modelo texturizado. Fuente: (elaboración propia)

La duración de este proceso con la configuración de la *Figura 27* fue de poco más de 2 horas (**2 horas y 8 minutos**).

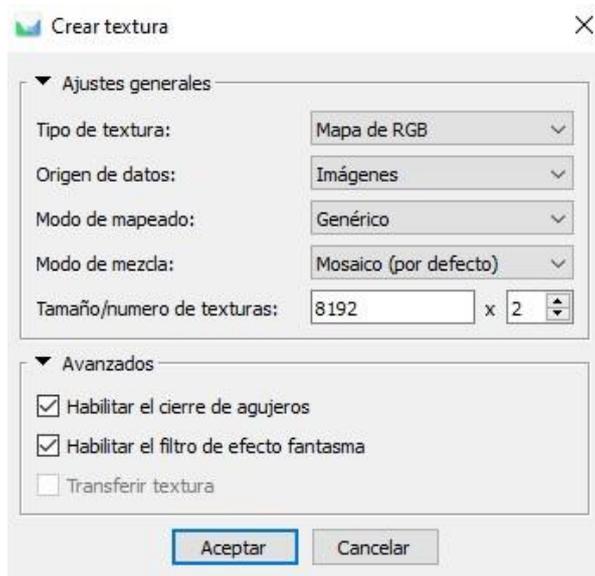


Figura 27. Configuración de la textura. Fuente: (elaboración propia)

El “**tamaño/número de texturas**” se escogió en base a las necesidades del proyecto y a los recursos de mi ordenador, buscando una buena resolución y calidad de la textura dentro de las posibilidades que me podía ofrecer el sistema. Finalmente se escogió una resolución 8k.

Por otra parte, marcando la casilla “**habilitar el cierre de agujeros**” el programa rellena los huecos vacíos que quedaron al crear la malla en zonas que no se captaron del todo en las imágenes, como por ejemplo la parte interior de los arcos del acueducto.

Además, también se habilitó el “**filtro de efecto fantasma**”. Este corrige las posibles imperfecciones provocadas por el movimiento de la cámara a la hora de tomar las imágenes.

El tamaño del archivo que contiene la malla (modelo sólido y sombreado) y la textura es de **4.28 GB**.

4.4.1.7. Crear modelo de teselas.

El modelo de teselas, o modelo teselado, consiste en un modelo 3D que se ha formado a partir de la división del objeto a representar en una serie de pequeños triángulos que recubren la totalidad de su superficie. Cuanto más pequeños sean dichos triángulos o, lo que es lo mismo, cuanta más cantidad de estos haya mejor será la resolución del modelo 3D y más detalles tendrá.

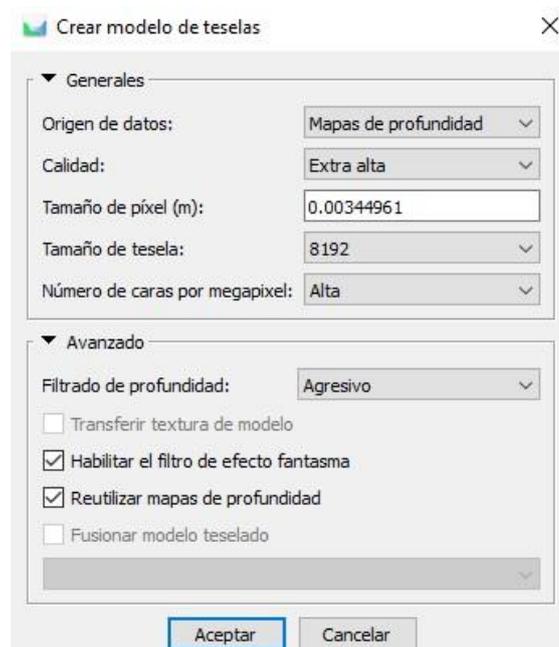


Figura 28. Configuración del modelo teselado. Fuente: (elaboración)

En este caso, el modelo teselado del acueducto se ha formado a partir de los mapas de profundidad con una calidad “extra alta”, lo que resulta en un **tamaño de píxel de 3.45 mm**, es decir, un nivel de detalle bastante alto.

Respecto al **tamaño de las teselas**, se hizo varias pruebas y con el que se obtuvo una mejor apariencia fue con **8192**, sin mucha variación en el tiempo de procesado.



Figura 29. Detalle del modelo teselado. Fuente: (elaboración propia)

Aparentemente, el modelo teselado y el modelo texturizado son muy similares a simple vista. Donde realmente destaca el modelo teselado es a la hora de hacer *zoom* para ver mejor los detalles, donde tarda en perder nitidez. Por el contrario, la superficie del acueducto del modelo texturizado se difumina al poco de ampliarla (véase la comparativa en la *Figura 30*: a la izquierda el modelo texturizado y a la derecha el modelo teselado).



Figura 30. Comparativa del detalle del modelo texturizado y del modelo teselado. Fuente: (elaboración propia)

Este proceso fue uno de los que más tiempo de cálculo requirió. Con un tamaño de **2.13 GB**, la reconstrucción duró **8 horas y 44 minutos**.

4.4.1.8. Crear modelo digital de elevaciones.

Antes de continuar, hay que aclarar que este es un **producto secundario** que se ha llevado a cabo de manera complementaria al proyecto ya que, como se verá en el paso siguiente, se trata de una posible fuente de datos para crear el ortomosaico. Además, aunque el programa hable de modelo digital de elevaciones, en este caso hablaremos de un **Modelo Digital de Superficies (MDS)** porque, a diferencia del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que se centra solo en la elevación del terreno, este contempla también la elevación de elementos como árboles o estructuras humanas (como es el caso del acueducto).

Así pues, para crear el Modelo Digital de Superficies hay que configurar en las opciones la proyección geográfica en la que se quiere que esté referido el resultado. En este caso la proyección escogida ha sido la **WGS 84 / UTM zone 30N (EPSG:32630)**, la misma en la que fueron tomados los puntos de control y a la que está referido todo el proyecto.

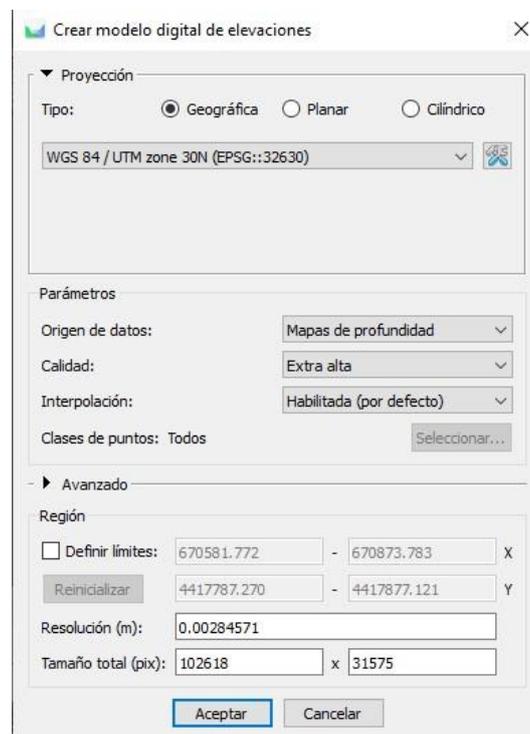


Figura 31. Configuración del Modelo Digital de Superficies. Fuente: (elaboración propia)

Con los mapas de profundidad como origen de datos y con la calidad establecida en “extra alta”, la resolución del MDE llega a los **2.87 mm/pix**.

Para visualizar el resultado sobre su localización, el archivo se puede exportar con el formato **.kzm** y visualizarla en **Google Earth**.

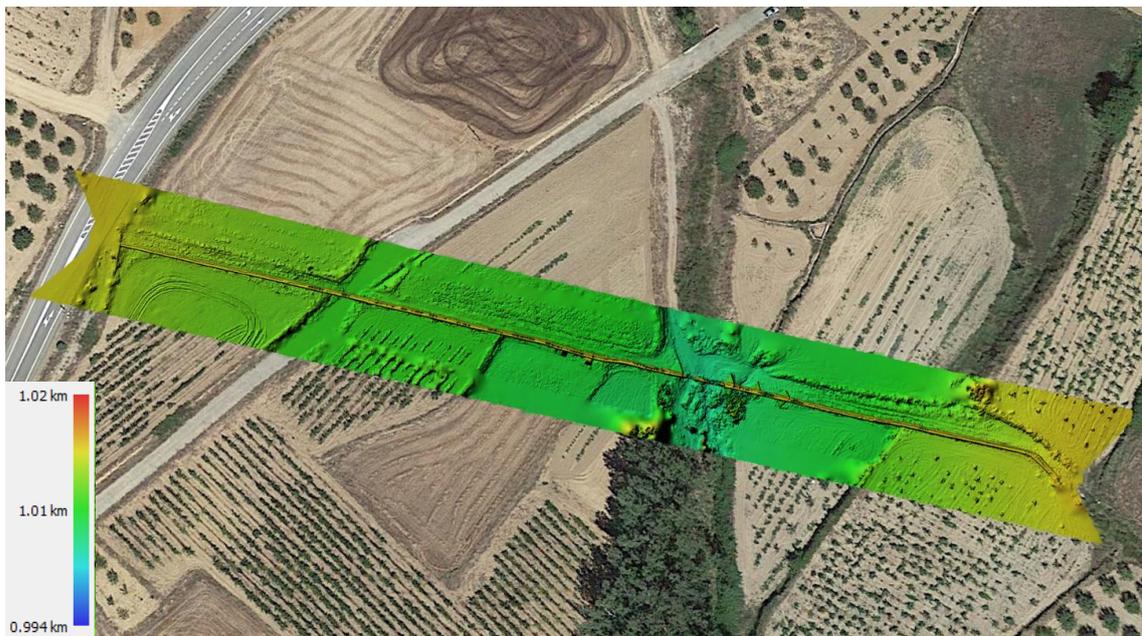


Figura 32. Modelo Digital de Superficies visualizado en Google Earth. Fuente: (elaboración propia)

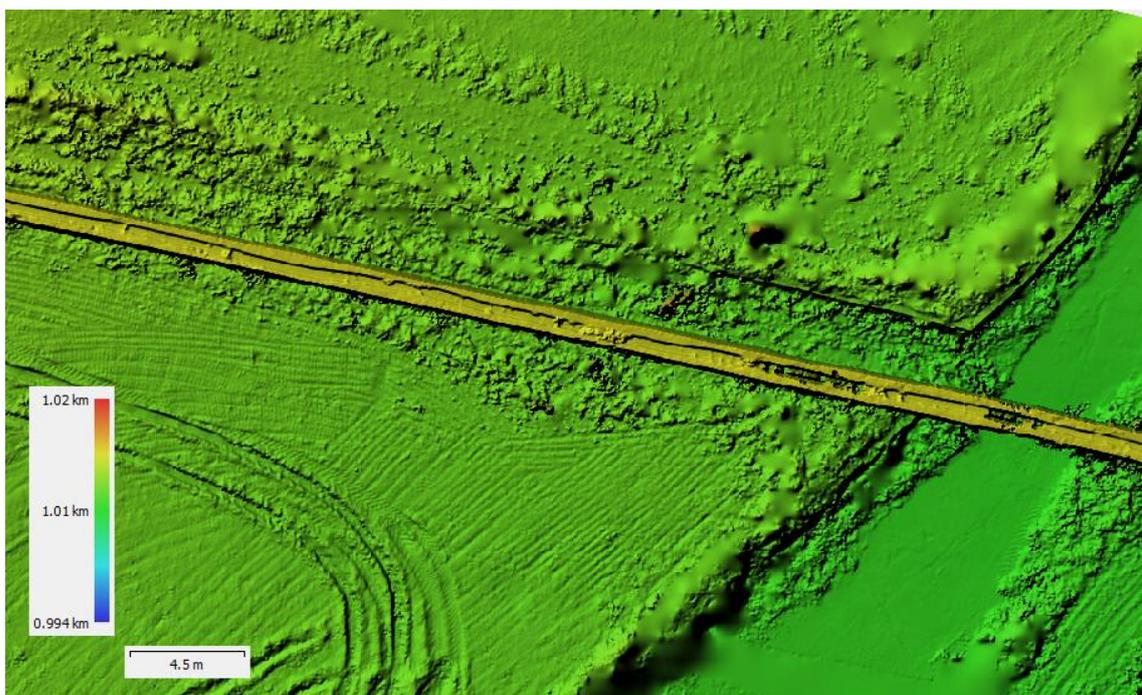


Figura 33. Detalle del Modelo Digital de Superficies. Fuente: (elaboración propia)

Este fue el producto que más tardó en hacerse, alcanzando las **18 horas y 43 minutos**; mientras que el tamaño del archivo es de **3.33 GB**.

4.4.1.9. Crear ortomosaico.

Al igual que pasaba con el Modelo Digital de Superficies, para crear el ortomosaico también es necesario indicar el tipo y la proyección que tendrá. Sin embargo, ahora hay una peculiaridad:

Al elegir en los parámetros el tipo de superficie (malla o MDE), si se selecciona el MDE, al estar ya creado, el programa aplicará la misma proyección que tenga este. En cambio, si se elige la malla, si dejará configurar la proyección.

Para este proyecto, la creación del ortomosaico se ha llevado a cabo en base a la superficie de la **malla** con la proyección **WGS 84 / UTM zone 30N (EPSG:32630)**. A su vez se le ha permitido al programa que cierre posibles agujeros en el modelo y que refine las líneas de costura, siendo estas las áreas de unión de las imágenes al formar el mosaico.

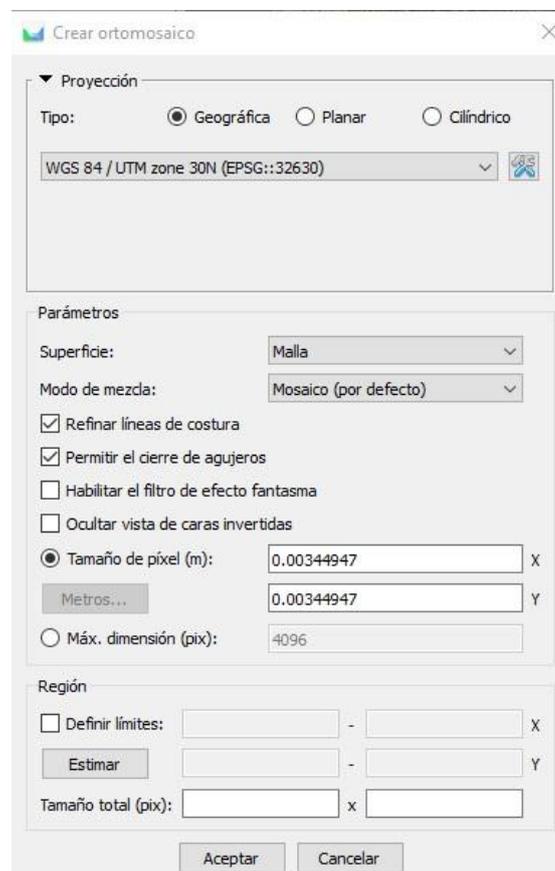


Figura 34. Configuración de la ortofoto. Fuente: (elaboración propia)

Como resultado, el ortomosaico tiene una resolución de **3.45 mm/pix** y ocupa **12.39 GB** de memoria en el disco duro.

Como pasaba con el MDS, para visualizar el resultado sobre su localización, la ortofoto se puede exportar con el formato **.kzm** y visualizarla en **Google Earth**.



Figura 35. Ortofoto visualizada en Google Earth. Fuente: (elaboración propia)



Figura 36. Detalle de la ortofoto. Fuente: (elaboración propia)

El tiempo de procesamiento fue de **2 horas y 49 minutos**.

4.4.2. AutoCad

Con el modelo 3D del acueducto finalizado, lo que prosigue es llevar a cabo el plano del levantamiento del mismo. Esta tarea consiste en delinear el contorno de la construcción y algunos de detalles con la ayuda de un software especializado como lo es **AutoCad**.

En este proyecto se ha hecho el levantamiento del alzado del acueducto. Para ello se ha necesitado la ortofoto del acueducto desde la vista de su alzado. En **Metashape** se puede crear desde de la misma opción en la que se ha hecho en pasos anteriores la ortofoto en vista cenital, solamente modificando el tipo de proyección.

Para este tipo de ortofoto se tiene que configurar la **proyección** en “**planar**” y establecer el **plano de proyección** en aquel en el que se muestre el alzado de la estructura, dependiendo de cómo tenga el programa dispuestos los ejes de coordenadas (en mi caso es el plano “**Detrás XZ**”).

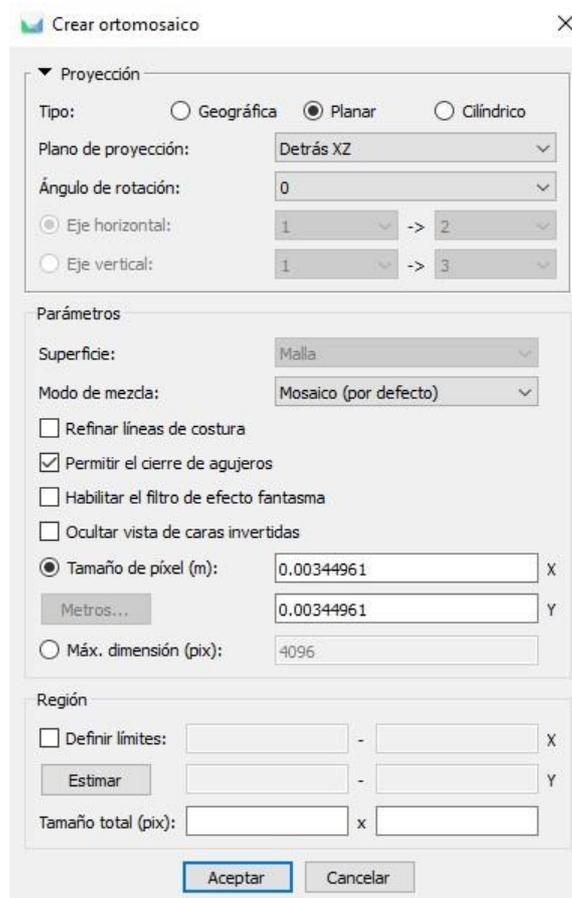


Figura 37. Configuración de la ortofoto del alzado del acueducto. Fuente: (elaboración)

El resultado de la ortofoto se muestra en la siguiente ilustración (*Figura 38*). A consecuencia del tamaño de píxel tan pequeño utilizado (3mm) el archivo ocupa **205 MB**. En cambio, gracias a dicho tamaño de píxel, el nivel de detalle conseguido es muy alto (*Figura 39*), factor que será importante al llevar a cabo el delineado del levantamiento en AutoCad.



Figura 38. Ortofoto del alzado del acueducto. Fuente: (elaboración propia)

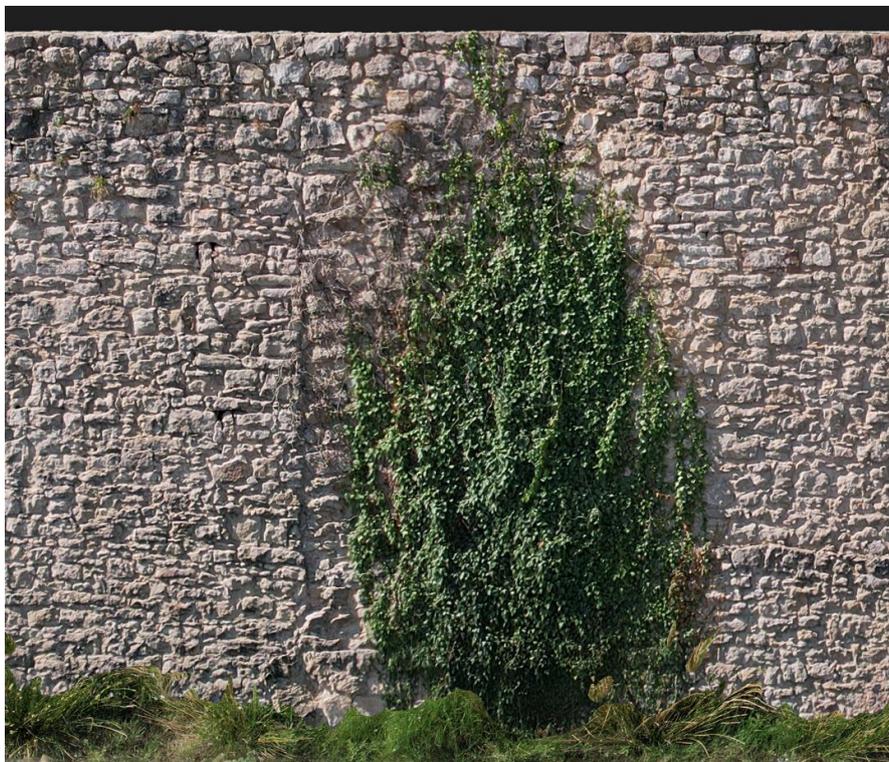


Figura 39. Detalle de la ortofoto del alzado. Fuente: (elaboración propia)

Ahora ya se procede a realizar el levantamiento, importando la imagen en AutoCad y escalándola para que tenga sus dimensiones reales. Para esto último, primero se toman algunas medidas de referencia sobre el modelo de Metashape y se introducen en AutoCad.



Figura 40. Medida de referencia en Metashape. Fuente: (elaboración propia)

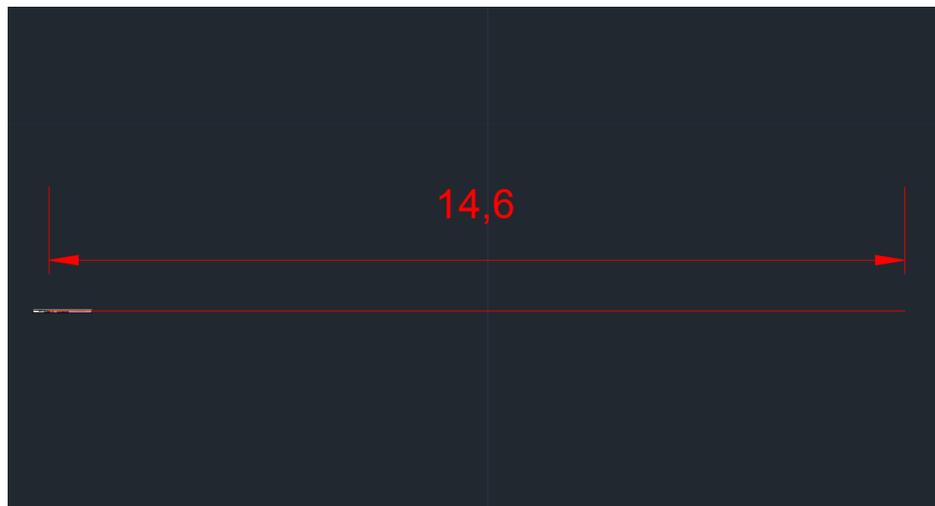


Figura 41. Medida de referencia en AutoCad. Fuente: (elaboración propia)

Posteriormente, sobre la imagen se marcan los dos extremos de la medición de la *Figura 40* que servirán como puntos de anclaje a la hora de escalarla.

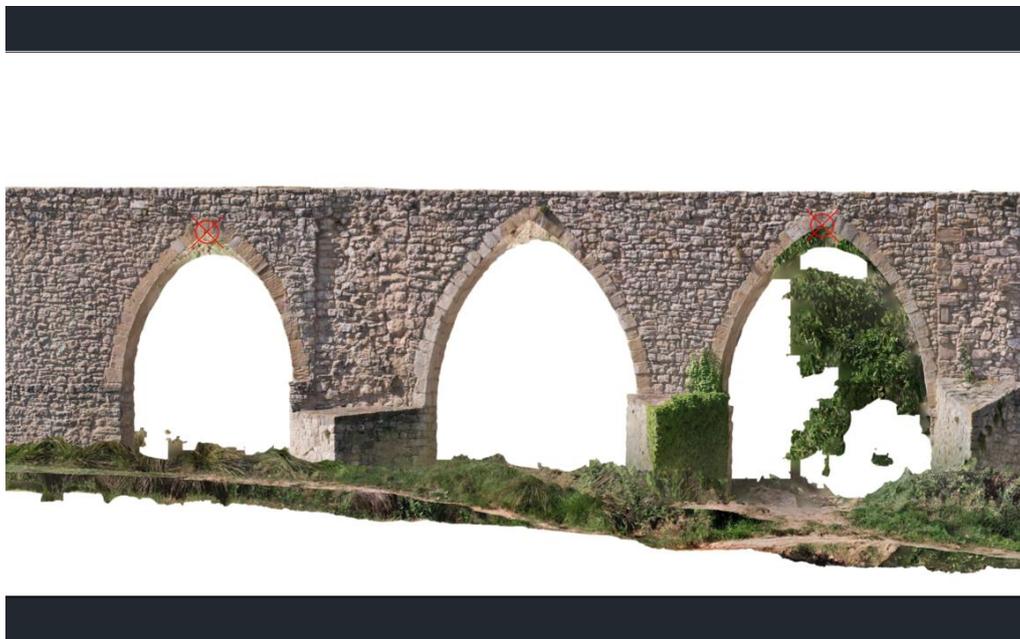


Figura 42. Puntos de referencia para el escalado. Fuente: (elaboración propia)

Finalmente, con la herramienta “*Escala*” se indica la distancia de referencia, y se desplaza uno de los puntos mostrados en la *Figura 42* a su posición real en dicha distancia (el correspondiente extremo de la *Figura 41*); dándole así la escala real a la ortofoto:

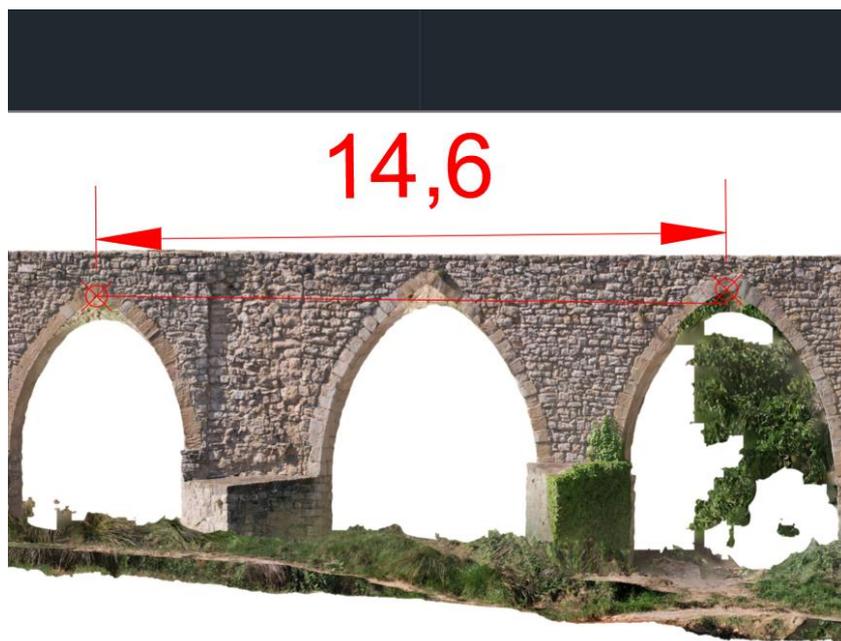


Figura 43. Ortofoto escalada. Fuente: (elaboración propia)

Con la imagen escalada, lo único que queda es delinear el contorno y los detalles de la estructura.

Para el contorno y los detalles de los arcos se utilizó la herramienta de dibujo “*Línea*”; mientras que el resto de la fachada (los detalles de las piedras) se hizo con la herramienta de “*Sombreado*”, con un relleno de patrón que simulase las piedras.

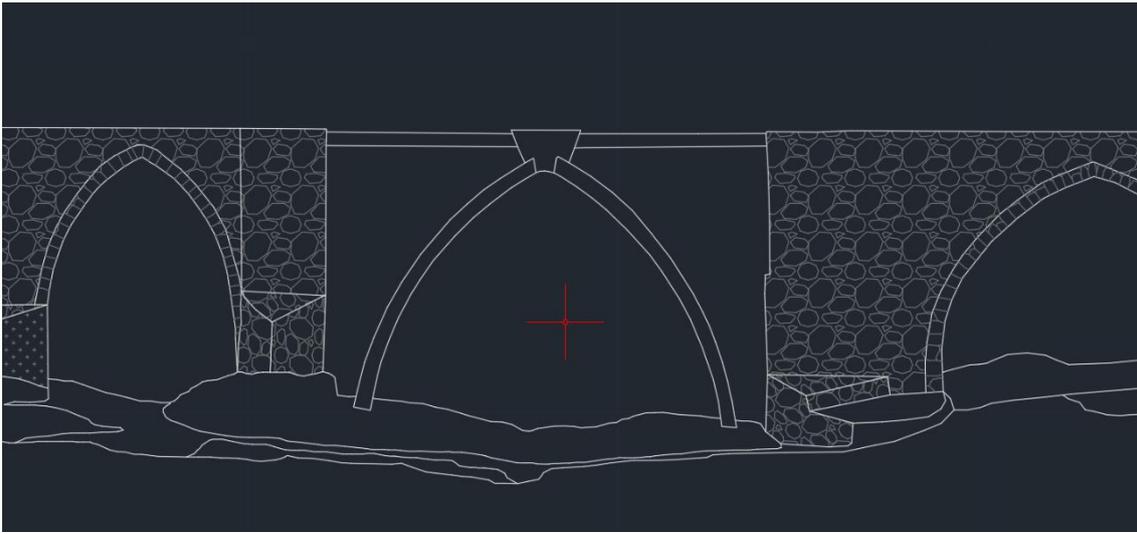


Figura 44. Detalle del resultado del delineado. Fuente: (elaboración propia)

La confección de este producto (importación y escalado de la imagen, dibujo del levantamiento y realización del plano correspondiente) conllevó una duración de aproximadamente **2 horas**.

5. RESULTADOS

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos en el estudio, analizando la toma de datos (tanto de las imágenes como de los puntos de control) y viendo cómo se refleja en el resultado final.

Empezando por los puntos de control, como se puede ver en la siguiente ilustración (*Figura 45*), de los 15 puntos que se tomaron coordenadas hay tres (3, 5 y 6) que destacan del resto en cuanto a los errores que presentan. Este hecho ya se había comentado anteriormente en el apartado 4.4.1.3., llegando a la conclusión de que los errores de estos puntos se podían deber a una mala captura puntual de los mismos.



Figura 45. Errores de los puntos de control. Fuente: (elaboración propia)

Respecto al resto de los puntos, todos los utilizados para georreferenciar y escalar el modelo tienen errores dentro de los valores de precisión a priori ofrecidos por el modelo de antena GNSS utilizado (2 cm en XY y 3cm en Z); de tal forma que el error total del modelo 3D es inferior a los 2 cm.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)
1	-0.18644	1.40382	-0.794298	1.62369
2	0.324784	-0.491505	1.90352	1.9926
4	0.94083	0.0782446	0.449058	1.04544
7	0.252406	-0.348875	3.0028	3.03351
8	-0.181386	0.338691	-1.06096	1.12838
9	0.478495	-0.783422	-0.376619	0.992245
10	0.230855	-1.46133	-0.0067938	1.47947
11	-0.340554	0.14144	-1.5925	1.63464
12	-0.913612	1.79826	0.137566	2.02172
13	0.829577	0.845465	-0.841998	1.45326
14	-1.08017	-0.0820204	-0.86221	1.38452
15	-0.356941	-1.42611	-1.34368	1.99165
Total	0.601201	0.966659	1.30872	1.73454

Tabla 1. Errores parciales por ejes (X,Y,Z) y totales de los puntos de control. Fuente: (elaboración propia)

Analizando los valores de la *Tabla 1* se puede afirmar que la georreferenciación del modelo 3D del acueducto se ha llevado a cabo de forma correcta, **mejorando** incluso **los valores** esperados **a priori**.

Por otro lado, cada marcador de los puntos de control aparece en un total de entre 22 y 48 imágenes, confirmando así un elevado solapamiento de las imágenes

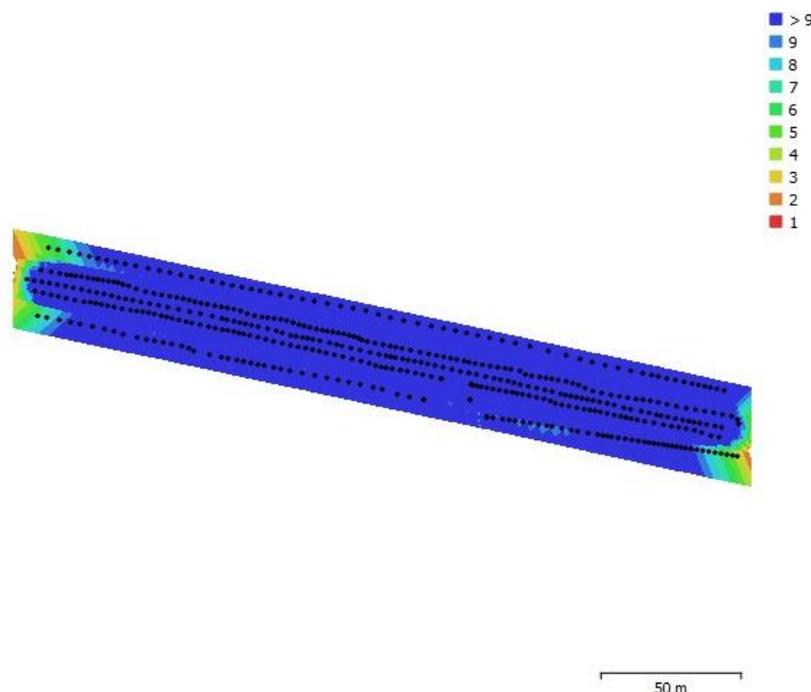


Figura 46. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes. Fuente: (elaboración propia)

De esta forma se demuestra que la estrategia seguida a la hora de planificar el número de pasadas y el porcentaje de solapamiento ha cumplido su función, y se ha conseguido una elevada redundancia de datos que aporta al modelo un buen nivel de confianza.

En la siguiente imagen (*Figura 47*) se ve que, aunque haya zonas donde el nivel de confianza sea bajo, en lo que es la propia estructura del acueducto el nivel de confianza tiene los valores más altos.

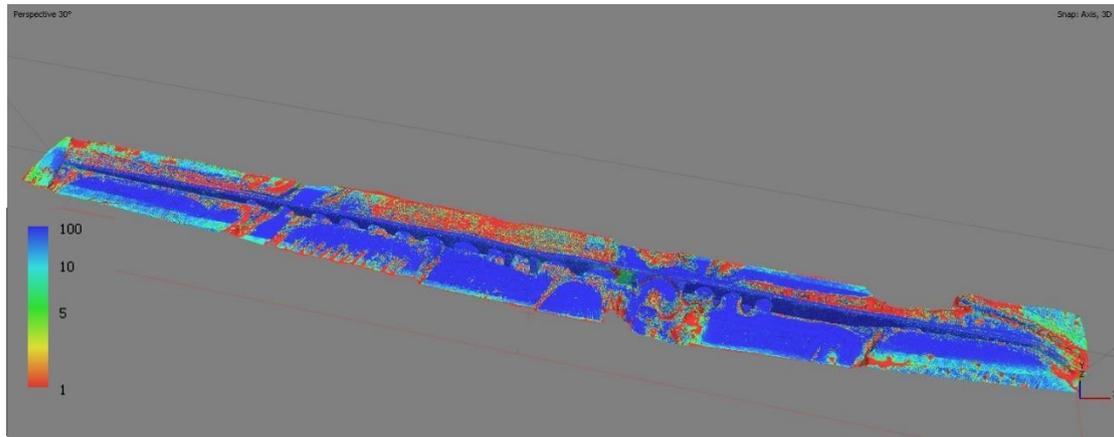


Figura 47. Nivel de confianza del modelo. Fuente: (elaboración propia)

Finalmente, para comprobar la calidad del escalado del modelo 3D se han medido sobre este las distancias entre varios puntos de control para, posteriormente, compararlas con el valor obtenido tras hacer la diferencia de coordenadas ($d = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}$) de dichos puntos.

Los puntos elegidos para este procedimiento han sido aquellos con los errores más pequeños (*Tabla 1*):

- Distancia 1-2 (modelo) = 10.7 m

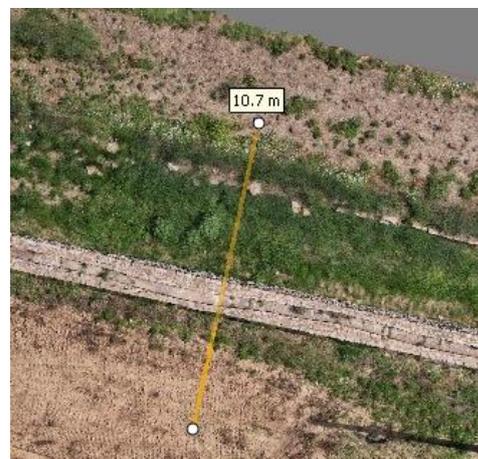


Figura 48. Distancia entre los puntos 1 y 2 medida sobre el modelo. Fuente: (elaboración propia)

- Distancia 11-12 (modelo) = 42.4 m



Figura 49. Distancia entre los puntos 11 y 12 medida sobre el modelo. Fuente: (elaboración propia)

Haciendo la diferencia de las coordenadas de cada par de puntos, los valores resultantes son:

- Distancia 1-2 (coordenadas) = 10.72 m
- Distancia 11-12 (coordenadas) = 42.39 m

A la vista de los resultados está que el modelo se encuentra bien escalado.

Para finalizar el apartado de resultados, y con el fin de poder apreciar de una manera más visual el modelo 3D final del acueducto, se ha hecho una video con la herramienta “Animación” de Metashape en el que se muestra el acueducto en tres dimensiones.

Al video se puede acceder desde el siguiente enlace: <https://youtu.be/ight1sp8Z5U> o escaneando el código QR que aparece a continuación:



Figura 50. Código QR de la animación 3D. Fuente: (elaboración propia)

6. PRESUPUESTO

A continuación, se desglosa el presupuesto estimado según la metodología seguida.

Se diferencia entre dos tipos de costes: los **directos**, como son los recursos humanos (personal) y materiales utilizados; y los **indirectos** (combustible, luz, impuestos...).

6.1. Costes Directos

- Recursos humanos (RR.HH)
 - Ingeniero en Geomática y Topografía: Titulado Superior (Nivel II)
 - Salario base mensual = 1.499,89 €
 - Complemento actividad = 548,67 €
 - Salario bruto anual (14 pagas) = 28.679,84 €
 - Coste que le supone a la empresa (S. Social 32,8%) = 9.406,99 €
 - Al año = 38.086,83 €
 - Por hora trabajada = 21,16 €
 - Ayudante técnico (Nivel IV)
 - Salario base mensual = 1.120,77 €
 - Complemento actividad = 422,25 €
 - Salario bruto anual (14 pagas) = 21.602,28 €
 - Coste que le supone a la empresa (S. Social 30,9%) = 7.085,55 €
 - Al año = 28.687,83 €
 - Por hora trabajada = 15,94 €

- Materiales
 - Antena GNSS: 90 €/día → total (1 día) = 90 €
 - Dron: 60 €/día → total (1 día) = 60 €
 - Diana: 0,50 €/Ud. → total (15 Uds.) = 7,5 €

- Duración (campo + gabinete)
 - Campo = 5h (3 horas para desplazamiento entre ida y vuelta + 2 horas de trabajo en campo)
 - Gabinete = 7 días laborales (6 días de Metashape (considerando que se deja el ordenador trabajando fuera del horario laboral) + 1 día de levantamiento y planos)

- Dietas y desplazamientos
 - Desplazamientos = 58,74€/día (a 89 kilómetros de la oficina a un precio de 0,33€ el kilometraje).
 - Dietas = 11€/día/persona

6.2. Costes indirectos

Los costes indirectos ascienden a un valor de **1700€** al mes. En este tipo de coste se incluyen gastos como la luz, el agua, el alquiler de la oficina, equipos de oficina (ordenador), etc.

6.3. Beneficio industrial

El beneficio industrial corresponde con el porcentaje de ganancias que se quiere sacar con la ejecución del proyecto. En este caso se ha optado por aplicar un beneficio industrial del **25%**.

6.4. Impuestos

En este apartado intervienen tanto el IVA (21%) como el IRPF (15%).

En primer lugar, el IVA se le aplica a la suma de los costes directos con los costes indirectos y el beneficio industrial (lo que se conoce como base imponible). Posteriormente, a la base imponible se le aplica el IRPF.

6.5. Coste total

El valor del coste total se saca restando al valor obtenido tras aplicar el IVA el resultado obtenido con la aplicación del IRPF. En la siguiente tabla (*Tabla 1*) se muestran de forma separada los valores totales de cada tipo de coste y el valor del coste total.

Costes Directos	1.586,84 €	
Costes Indirectos	453,33 €	
Beneficio Industrial	510,04 €	25% Beneficio
Base Imponible	2.550,22 €	
IVA	535,55 €	
IRPF	382,53 €	
TOTAL	2.703,23 €	

Tabla 2. Presupuesto. Fuente: (elaboración propia)

7. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se desarrollan en los siguientes párrafos se han sacado tras la finalización del proyecto.

En primer lugar, los objetivos formulados al inicio del trabajo se han cumplido casi en su totalidad, ya que al final no se ha conseguido presentar el modelo 3D en un formato adecuado para su difusión. Se buscaron varias opciones para lograrlo, entre las cuales se encontraban páginas web que permiten subir tus propios modelos 3D. Estas solo dejan subir de manera gratuita modelos de menos de 100 Mb, lo que se traduce en un modelo con las texturas en muy baja calidad; por lo que se valoraron las diferentes opciones y finalmente se optó por no hacerlo de esta manera ya que no vale la pena crear un modelo nuevo desde cero para presentarlo a tan baja calidad.

Como solución, y para mostrar visualmente el resultado 3D del acueducto, se hizo un video en Metashape (*Figura 50*) en el que, mediante la trayectoria definida por la cámara, se puede ver en tres dimensiones como ha quedado el producto final.

Respecto a la precisión del resultado, cabe decir que se han mejorado los valores estimados por el fabricante (± 2 cm en el caso de la antena GNSS “Leica Zeno FLX100”), consiguiendo un error total de **1.73 cm**.

La elección del dron, gracias a sus características y al tamaño del sensor de la cámara, también ha ayudado a conseguir tan buenos resultados.

Por contrapartida, hay algunos aspectos del desarrollo del proyecto que tienen capacidad de mejora. Es el caso de la duración de algunos procesos de Metashape. Aplicando una resoluciones no tan detalladas como las utilizadas en el MDE, en el modelo de teselas o en las ortofotos (por ejemplo, en torno al centímetro), o utilizando un equipo informático con unos componentes de gama más alta, el tiempo de procesado se reduciría considerablemente y provocaría un abaratamiento del precio total del presupuesto.

Gracias a este proyecto he podido comprobar por mí mismo lo útil que puede llegar a ser la técnica de la fotogrametría aplicada con drones en el campo de la arquitectura, sirviendo de gran apoyo a los historiadores para estudiar, conservar y restaurar monumentos como el acueducto Los Arcos de Alpuente.

No obstante, dicha técnica también puede aportar grandes beneficios en sectores como el forestal, facilitando la creación de inventarios forestales y la evaluación de daños provocados por los incendios; o como el turístico, utilizando los modelos 3D en campañas de promoción turística con el fin de mostrar de una manera más atractiva los lugares o monumentos de interés para aumentar el interés de los potenciales visitantes.

Acabará diciendo que este trabajo ha superado con creces mis expectativas acerca de las posibles utilidades de la fotogrametría y los drones y lo que se puede conseguir con ellos, y me ha despertado nuevas inquietudes que hacen que quiera seguir aprendiendo e indagando sobre este ámbito profesional.

8. BIBLIOGRAFÍA

WIKIPEDIA. *Acueducto*.

<<https://es.wikipedia.org/wiki/Acueducto>> [Consulta: 30 de mayo de 2023]

WIKIPEDIA. *Alpuente*.

<<https://es.wikipedia.org/wiki/Alpuente>> [Consulta: 30 de mayo de 2023]

DJI. *DJI Air 2S – Especificaciones*.

<<https://www.dji.com/es/air-2s/specs>> [19 de junio de 2023]

AEROCÁMARAS. *Tipos de drones según la nueva normativa europea de EASA 2021*.

<[Tipos de drones según la nueva normativa europea EASA | Aerocamaras Especialistas en Drones](#)> [Consulta: 19 de junio de 2023]

WIKIPEDIA. *Fotogrametría*.

<<https://es.wikipedia.org/wiki/Fotogrametría>> [Consulta: 6 de junio de 2023]

GLOBAL MEDITERRANEA. *Fotogrametría, evolución y uso*.

<<https://www.globalmediterranea.es/fotogrametria-evolucion-uso/>> [Consulta: 6 de junio de 2023]

IBEROPTICS. *Fundamentos Básicos de Fotogrametría 3D*.

<https://www.iberoptics.com/es/content/fundamentos-basicos-de-fotogrametria-3d_18> [Consulta: 11 de junio de 2023]

CIRO ISRAEL BRAULIO VITE (2005). *Principios básicos de la fotogrametría actual*. Trabajo Final de Grado. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/1458/1/156_2005_ESIA-ZAC_SUPERIOR_braulio_vite.pdf> [Consulta: 11 de junio de 2023]

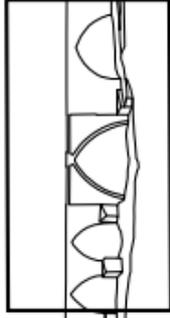
UGT FICA País Valencià. *Tablas salariales 2023 del Convenio Colectivo de CONSTRUCCIÓN Y OBRAS PÚBLICAS de Valencia*.

<<http://ugt-ficapv.org/ver/3061136/.html>> [Consulta: 8 de junio de 2023]



9. CARTOGRAFÍA

DETALLE 1



DETALLE 1. E: 1/150

11,89

7,01

0 2 5 10 m



Título del proyecto:
Levantamiento fotogramétrico y modelizado 3D
del acueducto Los Arcos de Alpuente mediante RPAS

Título del plano:
Levantamiento del alzado del acueducto

Escala: 1/1000
Fecha: Julio 2023

Firmado: Gonzalo Alonso Pérez
Tutor: Ramón Pons Crespo



+

+

+

+

+

— 4417900



+

+

+

+

+

— 4417800

— 670600

— 670650

— 670700

— 670750

— 670800

0 10 20 30 40 50 m



Título del proyecto:

Levantamiento fotogramétrico y modelizado 3D del acueducto Los Arcos de Alpuente mediante RPAS

Título del plano:

Ortomosaico

Sistema de referencia y proyección:

WGS 84 / UTM zone 30N

Escala: 1/1000

Fecha: Julio 2023

Firmado:

Gonzalo Alonso Pérez

Tutor:

Ramón Pons Crespo



+

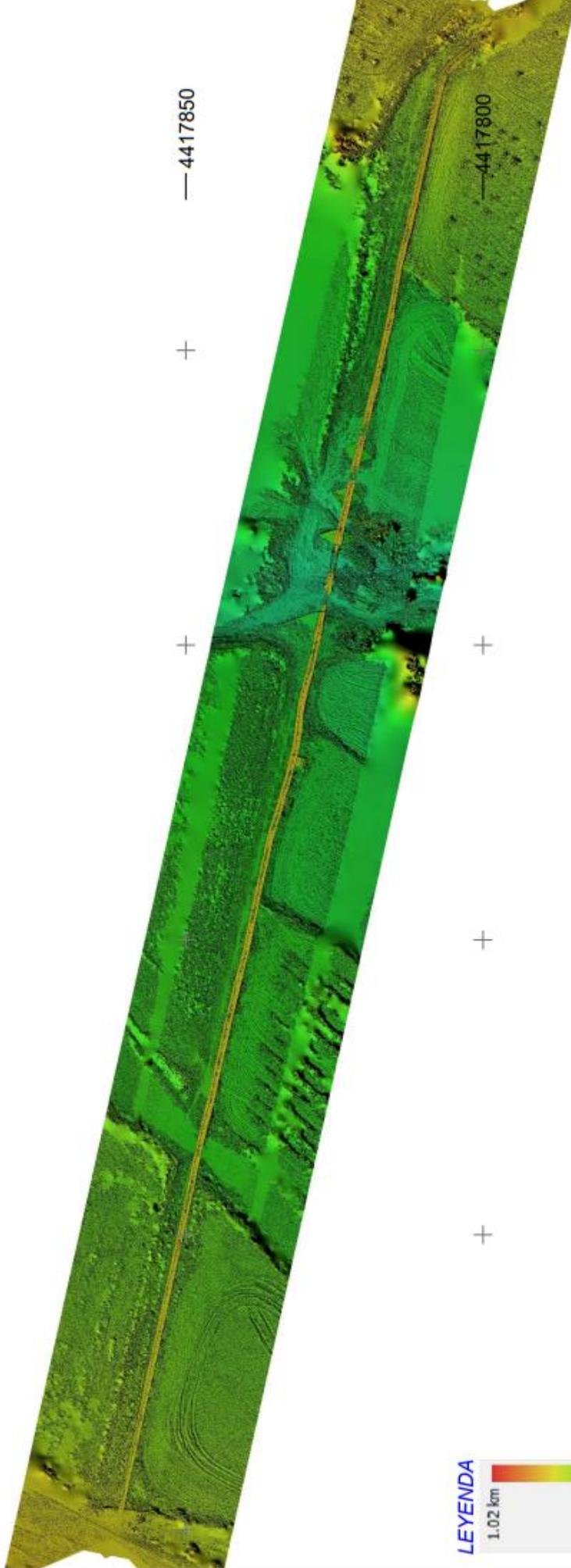
+

+

+

+

— 4417900



— 4417850

+

+

+

+

+

LEYENDA



670650 —

— 670700

— 670750

— 670800

0 10 20 30 40 50 m



Título del proyecto:
Levantamiento fotogramétrico y modelizado 3D
del acueducto Los Arcos de Alpuente mediante RPAS

Título del plano:
Modelo Digital
de Superficies

Sistema de referencia y proyección:
WGS 84 / UTM zone 30N

Escala: 1/1000
Fecha: Julio 2023

Firmado: Gonzalo Alonso Pérez
Tutor: Ramón Pons Crespo

10. ANEXOS

Especificaciones técnicas de la antena GNSS

Leica Zeno FLX100 Smart Antenna

TECNOLOGÍA GNSS

Precisión horizontal en tiempo real	RTK (multifrecuencia): 2 cm + 1 ppm*
Precisión altimétrica en Tiempo Real	RTK (multifrecuencia): 3 cm + 1 ppm*
Precisión en modo estático en postproceso	Horizontal: 2 cm + 1 ppm* Vertical: 3 cm + 1 ppm*
Señales de satélites seguidas	<ul style="list-style-type: none"> ■ GPS (L1 C/A, L2C) ■ Glonass (L1OF, L2OF) ■ BeiDou (B1I, B2I) ■ Galileo (E1B/C, E5b) ■ QZSS (L1C/A, L2C) ■ SBAS: se proporcionará a través de una futura actualización de firmware
Número de Canales	184 canales
Tasa de actualización	Hasta 10 Hz (0,10 s)
Sistemas operativos compatibles	<ul style="list-style-type: none"> ■ Android ■ Windows
Protocolos en Tiempo Real	RTCM 3.0, RTCM 3.1, RTCM 3.2, RTCM 3.3, RTCM MSM
Inicialización GNSS	<ul style="list-style-type: none"> ■ Encendido en frío: 24 s ■ Readquisición: 2 s
Interfaz de usuario	Botón de encendido y apagado con indicador LED de estado: rastreo de satélites, comunicación Bluetooth® y alimentación por batería
Puerto de comunicaciones	Bluetooth® LE 4.2

ALIMENTACIÓN

Batería	Interna (3,8 V / 6120 mAh)
Tiempo de carga	4 horas para carga completa
Alimentación	DC 5 V / 2 A
Tiempo de operación	>20 horas

ESPECIFICACIONES FÍSICAS

Peso y dimensiones	313 g, 136 mm x 78 mm x 30,5 mm
Protegido contra agua, arena y polvo	IP67
Intervalo de temperatura de funcionamiento/almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> ■ Funcionamiento: De -40 a 65°C ■ Almacenamiento: De -40 a 80°C
Humedad	Condensación ocasional y ligera ISO 9022-12-04 (+65 °C, 92 %, 62 h)
Caidas	1,2m
Vibraciones	Soporta fuertes vibraciones. ISO 9022-36-05 (10-55 Hz / ±0,15 mm / 5 ciclos)

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la antena "Leica FLX100". Fuente: (Leica-geosystems)

Puntos GPS

N. Punto	X	Y	Z
1	670638,415	4417859,335	1008,270
2	670636,146	4417848,855	1007,847
3	670683,974	4417846,229	1006,299
4	670682,396	4417839,432	1005,903
5	670729,164	4417835,809	1005,273
6	670726,502	4417828,231	1004,598
7	670777,414	4417827,608	1003,112
8	670776,044	4417817,316	1003,591
9	670825,489	4417815,139	1007,242
10	670823,699	4417807,930	1008,385
11	670845,036	4417806,765	1011,416
12	670803,554	4417815,539	1011,217
13	670705,032	4417838,721	1010,963
14	670659,390	4417849,152	1010,825
15	670616,278	4417858,347	1010,791

Tabla 4. Coordenadas de los puntos GPS. Fuente: (Elaboración propia)

Ficha técnica del dron

Aeronave

Peso de despegue	595 g
Dimensiones	Plegada: 180 × 97 × 77 mm (largo × ancho × alto) Desplegada: 183 × 253 × 77 mm (largo × ancho × alto)
Longitud diagonal	302 mm
GNSS	GPS + GLONASS + GALILEO
Rango de precisión en vuelo estacionario	Vertical: ±0.1 m (con posicionamiento visual) ±0.5 m (con posicionamiento por GNSS) Horizontal: ±0.1 m (con posicionamiento visual) ±1.5 m (con posicionamiento por GNSS)

Tabla 5. Especificaciones de la aeronave. Fuente: (DJI)

Cámara

Sensor	1" CMOS Píxeles efectivos: 20 MP; Tamaño de píxel de 2.4 μm
Objetivo	FOV: 88° Formato equivalente: 22 mm Apertura: f/2.8 Distancia de enfoque: 0.6 m a ∞
Tamaño de fotografía	20 MP 5472×3648 (3:2) 5472×3078 (16:9)

Tabla 6. Especificaciones de la cámara. Fuente: (DJI)

Tabla salarial



UGT

Tablas salariales 2023

CONSTRUCCIÓN Y OBRAS PÚBLICAS

provincia Valencia



FICA

2.1.- Retribuciones salariales

NIVEL	SALARIO BASE	COMPLEMENTO ACTIVIDAD	GRATIFICACIONES EXTRAORDINARIAS Y VACACIONES (por cada una)
RETRIBUCION MENSUAL			
II	1.499,89	548,67	2.600,39
III	1.164,38	432,36	2.021,88
IV	1.120,77	422,25	1.951,60
V	1.052,53	392,09	1.825,54
RETRIBUCION DIARIA			
VI	33,05	19,93	1.781,13
VII	32,43	19,18	1.734,20
VIII	31,52	18,84	1.690,77
IX	30,46	17,64	1.618,71
X, XI	30,31	16,49	1.581,85
XII	30,26	16,36	1.577,04
XIII	22,47	12,94	1.183,50

2.2.- Horas extraordinarias

Categoría	Días Laborables	Domingos, festivos y nocturnas
II	20,07	33,05
III	15,64	25,73
IV	15,11	24,88
V	14,15	23,28
VI	13,75	22,63
VII	13,41	22,07
VIII	13,07	21,59
IX	12,52	20,63
X, XI	12,24	20,14
XII	12,20	20,03

2.3.- Pluses extrasalariales.

CONCEPTO	IMPORTE
Plus Transporte	108,00
Dieta	52,00
Media Dieta	11,75
Gastos kilometraje	0,33

Síguenos en nuestras redes sociales

UGT FICA PV



VALÈNCIA
C/ Arquitecto Mora, 7-4º
46010 València
T. 96 388 41 10
fica@ficapv.ugt.org

CASTELLÓ
Plaza de las Aulas, 5 - 5º
12001 Castelló
T. 96 423 98 82

ALICANTE / ALACANT
C/ Pablo Iglesias, 23 - 2º
03004 Alicante / Alacant
T. 96 514 87 34

SEDES




Tabla 7. Tabla salarial 2023 del Convenio Colectivo de CONSTRUCCIÓN Y OBRAS PÚBLICAS de Valencia. Fuente: (UGT tablas salariales 2023 Valencia)

Acueducto Los Arcos de Alpuente

Informe de procesamiento

09 August 2023



Datos del levantamiento

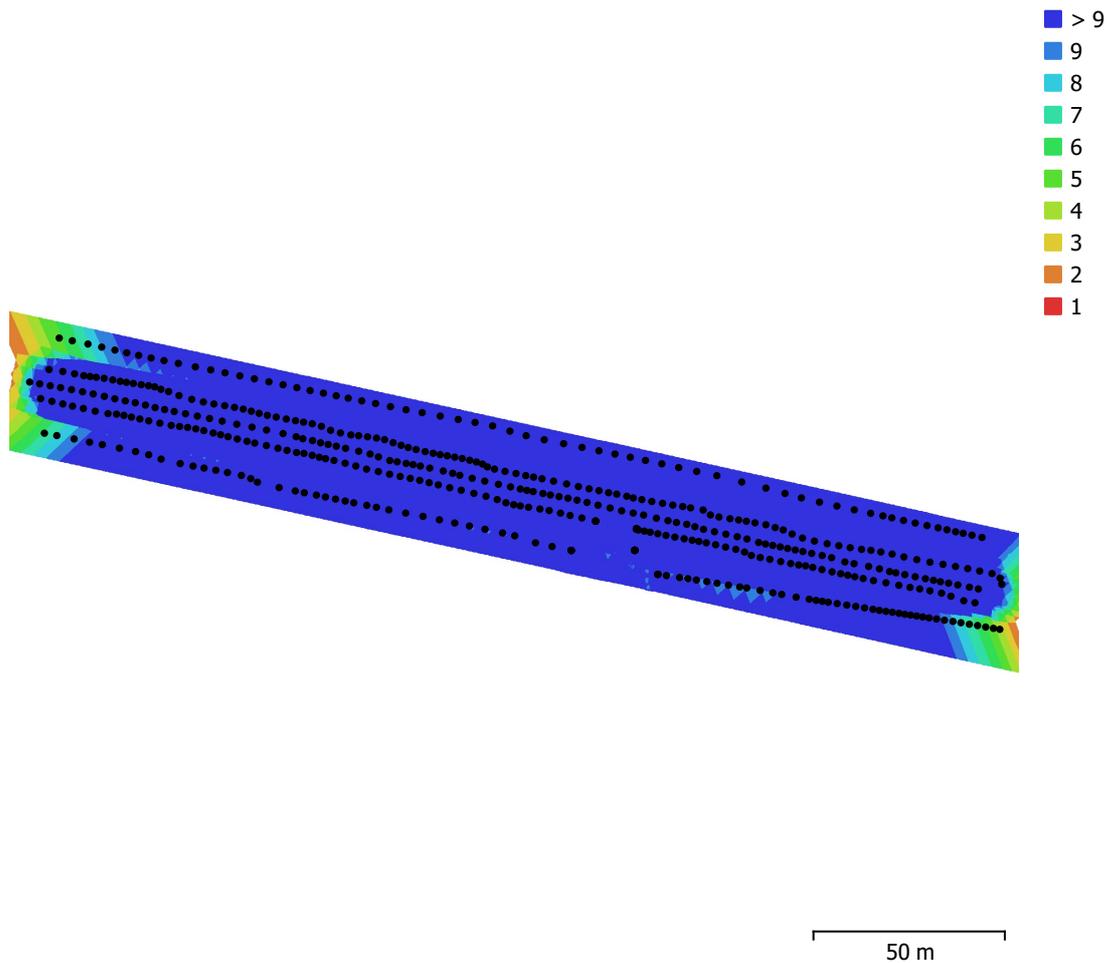


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes:	460	Imágenes alineadas:	460
Altitud media de vuelo:	9.9 m	Puntos de paso:	450,937
Resolución en terreno:	3.45 mm/pix	Proyecciones:	1,461,029
Área cubierta:	9.69e+03 m ²	Error de reproyección:	0.528 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
Test_Pro (8.38mm)	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

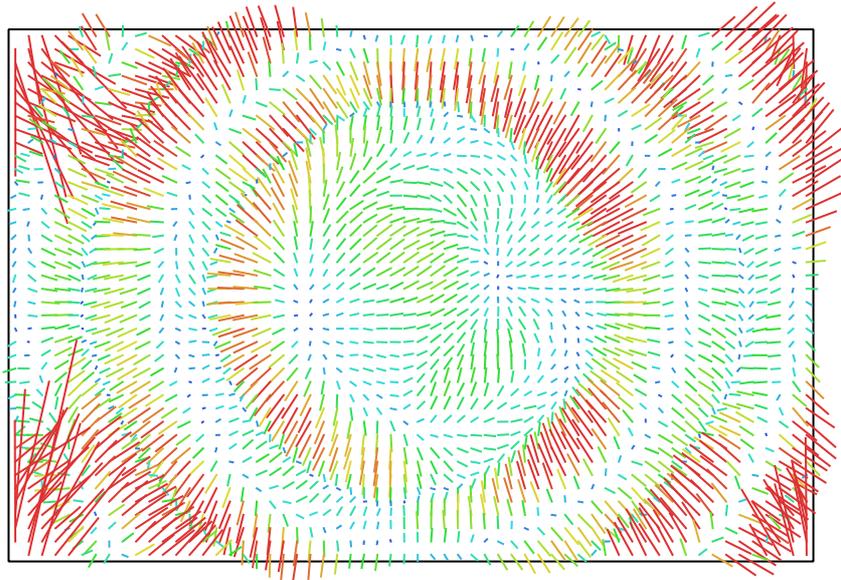


Fig. 2. Gráfico de residuales para Test_Pro (8.38mm).

Test_Pro (8.38mm)

460 imágenes, rolling-shutter

Tipo	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel
Cuadro	5472 x 3648	8.38 mm	2.51 x 2.51 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3477.23	0.039	1.00	0.00	-0.42	0.14	-0.07	-0.30	0.23	-0.17	0.12	0.03	-0.07
Cx	27.0254	0.02		1.00	0.05	0.10	-0.01	0.00	0.01	-0.01	0.02	0.88	-0.02
Cy	-11.9204	0.018			1.00	-0.19	0.17	0.04	-0.02	-0.01	0.02	0.03	0.44
B1	0.773609	0.0063				1.00	-0.05	0.02	-0.03	0.03	-0.03	0.06	0.03
B2	2.75595	0.0053					1.00	0.01	-0.00	-0.00	0.00	-0.05	-0.02
K1	-0.0184934	4.6e-05						1.00	-0.97	0.92	-0.87	-0.00	0.07
K2	-0.214205	0.00022							1.00	-0.99	0.96	0.01	-0.06
K3	0.513251	0.00042								1.00	-0.99	-0.02	0.05
K4	-0.306246	0.00027									1.00	0.02	-0.04
P1	0.000360091	2.1e-06										1.00	0.01
P2	0.000117037	1.2e-06											1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Posiciones de cámaras

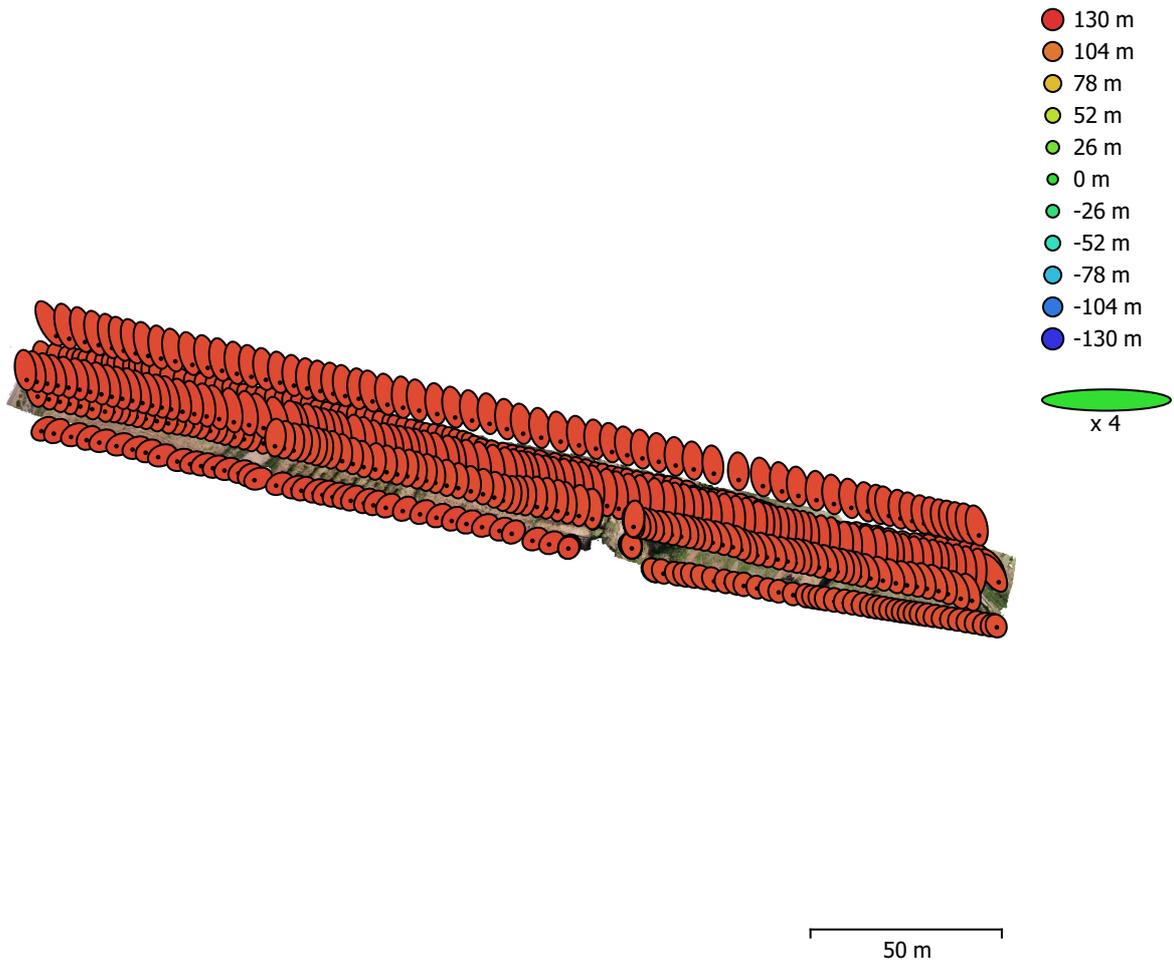


Fig. 3. Posiciones de cámaras y estimadores de error.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.
Posiciones estimadas de las cámaras se indican con los puntos negros.

Error en X (m)	Error en Y (m)	Error en Z (m)	Error en XY (m)	Error combinado (m)
0.352718	1.21013	120.536	1.26049	120.543

Tabla 3. Errores medios de las posiciones de cámaras.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Puntos de control terrestre

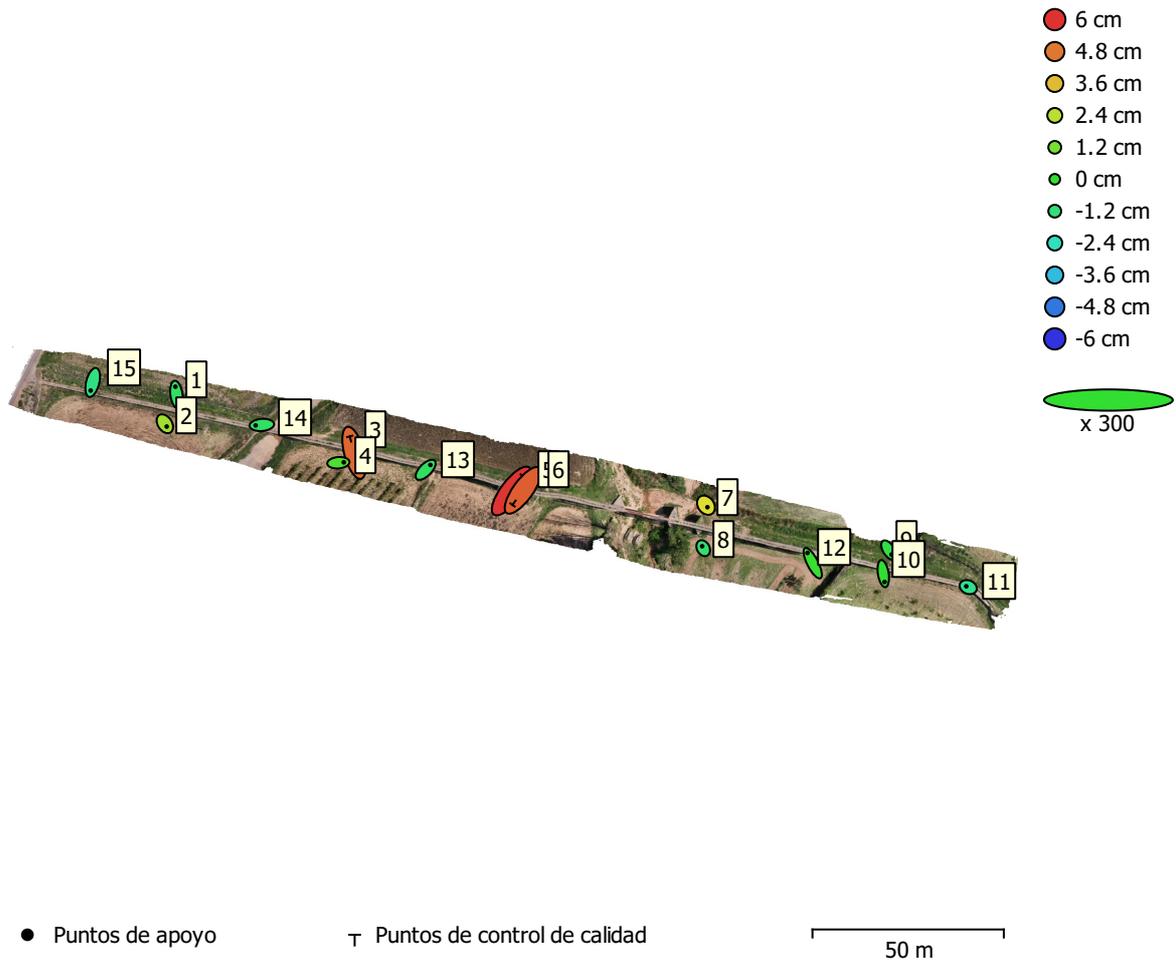


Fig. 4. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY. Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
12	0.601201	0.966659	1.30872	1.13836	1.73454

Tabla 4. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
3	1.61556	2.69774	5.43524	3.1445	6.2793

Tabla 5. ECM de puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
1	-0.18644	1.40382	-0.794298	1.62369	0.559 (9)
2	0.324784	-0.491505	1.90352	1.9926	0.497 (10)
4	0.94083	0.0782446	0.449058	1.04544	0.705 (10)
7	0.252406	-0.348875	3.0028	3.03351	0.735 (9)
8	-0.181386	0.338691	-1.06096	1.12838	0.536 (8)
9	0.478495	-0.783422	-0.376619	0.992245	0.800 (10)
10	0.230855	-1.46133	-0.0067938	1.47947	0.698 (9)
11	-0.340554	0.14144	-1.5925	1.63464	0.492 (11)
12	-0.913612	1.79826	0.137566	2.02172	0.772 (10)
13	0.829577	0.845465	-0.841998	1.45326	0.488 (11)
14	-1.08017	-0.0820204	-0.86221	1.38452	0.654 (11)
15	-0.356941	-1.42611	-1.34368	1.99165	0.702 (12)
Total	0.601201	0.966659	1.30872	1.73454	0.646

Tabla 6. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
3	-0.766129	2.88475	5.08333	5.89482	0.915 (7)
5	1.97643	2.64373	5.95306	6.80694	0.761 (4)
6	-1.82671	-2.55389	5.22937	6.09963	0.580 (4)
Total	1.61556	2.69774	5.43524	6.2793	0.797

Tabla 7. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

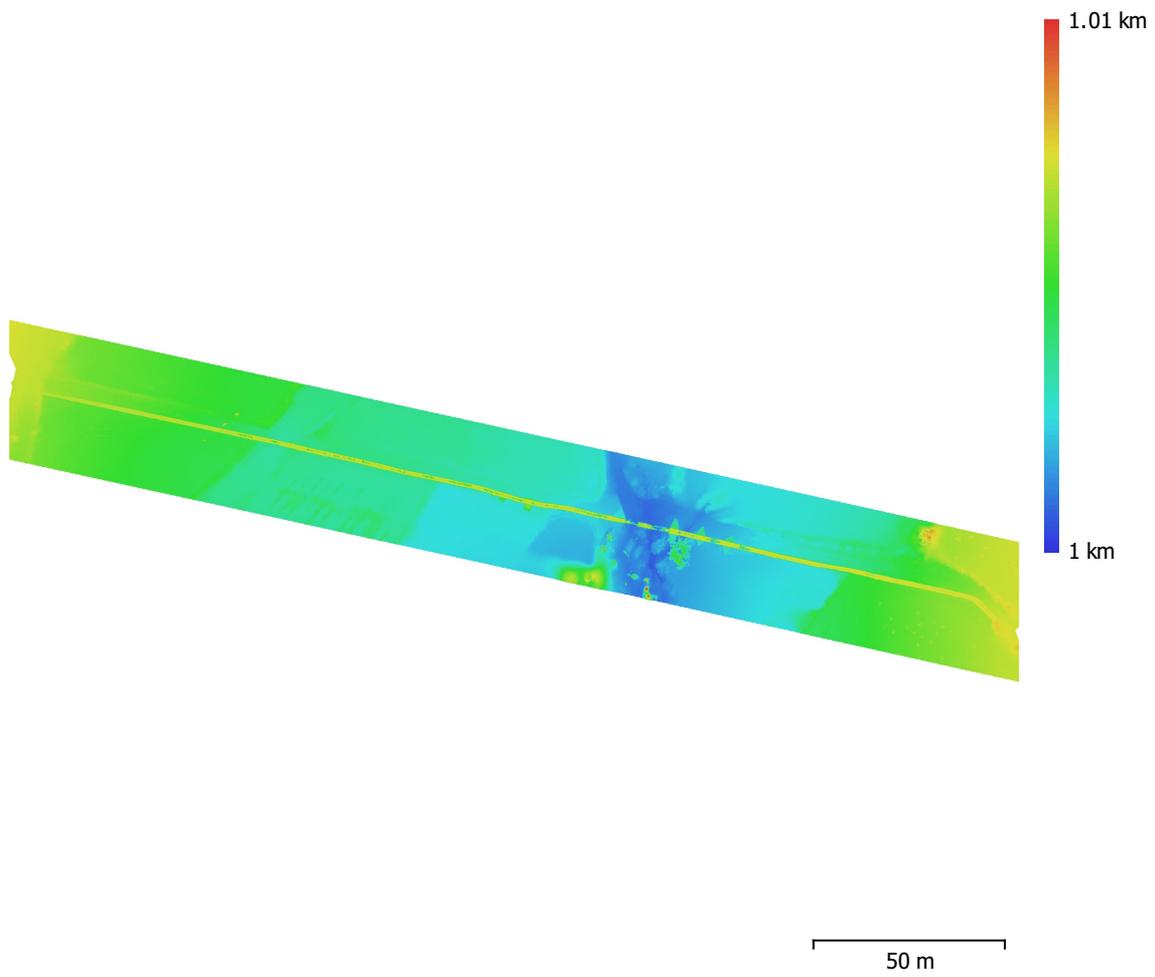


Fig. 5. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 2.87 mm/pix
Densidad de puntos: 12.1 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	460
Cámaras orientadas	460
Marcadores	15
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 30N (EPSG::32630)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	450,937 de 561,528
RMS error de reproyección	0.244295 (0.527808 pix)
Error de reproyección máximo	3.60508 (37.086 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.11702 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	3.35587

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Límite de puntos clave por megapixel	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Excluir puntos de paso inmóviles	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de emparejamientos	7 minutos 19 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	529.23 MB
Tiempo de orientación	11 minutos 29 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	350.99 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	Sí
Tiempo de optimización	14 segundos
Fecha de creación	2023:06:26 11:48:54
Versión del programa	1.8.2.0
Tamaño de archivo	40.74 MB

Mapas de profundidad

Número	460
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Leve
Límite máximo de redundancia	16
Tiempo de procesamiento	6 horas 5 minutos
Uso de memoria	11.59 GB
Fecha de creación	2023:07:18 19:48:53
Versión del programa	1.8.2.0
Tamaño de archivo	11.11 GB

Nube de puntos densa

Puntos	746,270,299
Colores de puntos	3 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
---------	------------

Nivel de filtrado	Agresivo
Límite máximo de redundancia	16
Tiempo de procesamiento	2 horas 10 minutos
Uso de memoria	10.68 GB

Parámetros de generación de la nube densa

Tiempo de procesamiento	16 horas 5 minutos
Uso de memoria	14.27 GB
Fecha de creación	2023:06:27 13:54:10
Versión del programa	1.8.2.0
Tamaño de archivo	10.31 GB

Modelo

Caras	98,125,786
Vértices	49,079,412
Colores de vértices	3 bandas, uint8
Textura	8,192 x 8,192 x 2, 4 bandas, uint8

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Límite máximo de redundancia	16
Tiempo de procesamiento	2 horas 10 minutos
Uso de memoria	10.68 GB

Parámetros de reconstrucción

Tipo de superficie	Arbitrario
Origen de datos	Mapas de profundidad
Interpolación	Habilitada
Máscaras volumétricas estrictas	No
Tiempo de procesamiento	3 horas 27 minutos
Uso de memoria	8.84 GB

Parámetros de texturizado

Modo de mapeado	Genérico
Modo de mezcla	Mosaico
Tamaño de textura	8,192
Habilitar el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	Sí
Tiempo de mapeado en UV	5 minutos 52 segundos
uso de memoria para mapa UV	11.66 GB
Tiempo de mezcla	2 horas 3 minutos
Uso de memoria durante la mezcla	20.67 GB
Fecha de creación	2023:07:09 19:39:49
Versión del programa	1.8.2.0
Tamaño de archivo	4.28 GB

Modelo de teselas

Textura	3 bandas, uint8
---------	-----------------

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Leve
Límite máximo de redundancia	16
Tiempo de procesamiento	6 horas 5 minutos
Uso de memoria	11.59 GB

Parámetros de reconstrucción

Origen de datos	Mapas de profundidad
Tamaño de tesela	8192
Número de caras	Alta
Habilitar el filtro de efecto fantasma	Sí
Tiempo de procesamiento	8 horas 44 minutos
Uso de memoria	20.16 GB
Fecha de creación	2023:07:19 04:33:42

Versión del programa 1.8.2.0
Tamaño de archivo 2.13 GB

MDE

Tamaño 102,022 x 34,821
Sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zone 30N (EPSG::32630)

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad Extra alta
Nivel de filtrado Agresivo
Límite máximo de redundancia 16
Tiempo de procesamiento 2 horas 10 minutos
Uso de memoria 10.68 GB

Parámetros de reconstrucción

Origen de datos Mapas de profundidad
Interpolación Habilitada
Tiempo de procesamiento 18 horas 43 minutos
Uso de memoria 15.52 GB
Fecha de creación 2023:07:09 12:37:25
Versión del programa 1.8.2.0
Tamaño de archivo 3.33 GB

Ortomosaico

Tamaño 76,399 x 21,547
Sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zone 30N (EPSG::32630)
Colores 3 bandas, uint8

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla Mosaico
Superficie Malla
Permitir el cierre de agujeros Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma No
Tiempo de procesamiento 2 horas 49 minutos
Uso de memoria 5.76 GB
Fecha de creación 2023:07:25 15:08:29
Versión del programa 1.8.2.0
Tamaño de archivo 12.39 GB

Sistema

Nombre del programa Agisoft Metashape Professional
Versión del programa 1.8.2 build 14075
OS Windows 64 bit
RAM 31.95 GB
CPU AMD Ryzen 5 2600 Six-Core Processor
GPU(s) Radeon RX 580 Series (Elesmere)