



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica,
Cartográfica y Topográfica

Fotogrametría Aérea y Georreferenciación Precisa:
Desarrollo de un Modelo Tridimensional Avanzado del
Castillo de Gaibiel mediante RPAS

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Geomática y Topografía

AUTOR/A: Mayordomo Lujan, Jorge

Tutor/a: Martínez Llario, José Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Fotogrametría Aérea y Georreferenciación Precisa: Desarrollo de un Modelo Tridimensional Avanzado del Castillo de Gaibiel mediante RPAS

Autor: Jorge Mayordomo Luján

Tutor: José Carlos Martínez Llarios



Agradecimientos

Mi más profunda gratitud a la Universidad Politécnica de Valencia, y en especial a la facultad de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica, por brindarme una educación excepcional y los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto.

Quiero agradecer a mis compañeros y amigos por su apoyo, por los momentos compartidos y por todas las experiencias que hemos vivido juntos durante nuestra etapa universitaria.

Un reconocimiento especial a todos aquellos que, de alguna manera, han aportado su conocimiento y experiencia a este trabajo, enriqueciendo mi aprendizaje y motivación.

Y finalmente, un agradecimiento infinito a mi familia, por su amor, comprensión y apoyo incondicional en cada paso de este emocionante viaje académico y personal.

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"

RESUMENES

Fotogrametría Aérea y Georreferenciación Precisa: Desarrollo de un Modelo Tridimensional Avanzado del Castillo de Gaibiel mediante RPAS

Resumen:

Mediante el uso de técnicas avanzadas de fotogrametría, es posible crear modelos tridimensionales de lugares históricos y de interés patrimonial, asegurando su conservación y facilitando su acceso digital a futuras generaciones. La topografía, con su capacidad de mapeo preciso, juega un papel crucial en este proceso, permitiendo la creación de imágenes y modelos que reflejan con exactitud la majestuosidad de estos sitios.

El presente trabajo de investigación se centra en desarrollar un modelo fotogramétrico tridimensional del emblemático castillo de Gaibiel. Esta fortaleza, con su rica historia y arquitectura, merece ser preservada y compartida digitalmente. La finalidad de este proyecto es proporcionar al municipio de Gaibiel una representación 3D que pueda ser mostrada en su sitio web, sirviendo como recurso educativo y cultural, o incluso ser utilizada en futuras restauraciones del patrimonio.

La elaboración de este modelo se realiza con gran meticulosidad. Se emplea un dron para capturar imágenes aéreas del castillo desde diversos ángulos, garantizando un mapeo exhaustivo. Estas imágenes son luego procesadas mediante software especializado para crear el modelo tridimensional. La estación total se utiliza para asegurar que el modelo tenga la escala adecuada, y, finalmente, un sistema GNSS se incorpora para la georreferenciación precisa, asegurando su correcta ubicación en el mundo digital.

Palabras Clave:

Drones, Fotogrametría, Modelo 3D, Castillo, Gaibiel, Topografía, Georreferenciación, Conservación, Patrimonio, Mapeo.

Fotogrametria Aèria i Georeferenciació Precisa: Desenvolupament d'un Model Tridimensional Avançat del Castell de Gaibiel mitjançant RPAS

Resum:

Mitjançant l'ús de tècniques avançades de fotogrametria, és possible crear models tridimensionals de llocs històrics i d'interès patrimonial, assegurant la seua conservació i facilitant l'accés digital a futures generacions. La topografia, amb la seua capacitat de mapeig precís, juga un paper crucial en aquest procés, permetent la creació d'imatges i models que reflectixen amb exactitud la majestuositat d'aquests llocs.

Aquest treball de recerca es centra en desenvolupar un model fotogramètric tridimensional de l'emblemàtic castell de Gaibiel. Aquesta fortalesa, amb la seua rica història i arquitectura, mereix ser preservada i compartida digitalment. La finalitat d'aquest projecte és proporcionar al municipi de Gaibiel una representació 3D que puga ser mostrada en el seu lloc web, servint com a recurs educatiu i cultural, o fins i tot ser utilitzada en futures restauracions del patrimoni.

L'elaboració d'aquest model es realitza amb gran meticulositat. S'empra un dron per capturar imatges aèries del castell des de diversos angles, garantint un mapeig exhaustiu. Aquestes imatges són després processades mitjançant programari especialitzat per a crear el model tridimensional. L'estació total s'utilitza per assegurar que el model tinga l'escala adequada, i, finalment, un sistema GNSS s'incorpora per a la georeferenciació precisa, assegurant la seua ubicació correcta en el món digital.

Paraules Clau:

Drons, Fotogrametria, Model 3D, Castell, Gaibiel, Topografia, Georeferenciació, Conservació, Patrimoni, Mapeig.

Aerial Photogrammetry and Accurate Georeferencing: Development of an Advanced Three-Dimensional Model of Gaibiel Castle using RPAS

Summary:

Using advanced photogrammetry techniques, it is possible to create three-dimensional models of historical and heritage-rich sites, ensuring their preservation and facilitating digital access for future generations. Topography, with its precise mapping capability, plays a crucial role in this process, allowing the creation of images and models that accurately reflect the grandeur of these sites.

This research focuses on developing a three-dimensional photogrammetric model of the iconic Gaibiel Castle. This fortress, with its rich history and architecture, deserves to be digitally preserved and shared. The purpose of this project is to provide the municipality of Gaibiel with a 3D representation that can be displayed on its website, serving as an educational and cultural resource, or even used in future heritage restorations.

The creation of this model is carried out with great attention to detail. A drone is used to capture aerial images of the castle from various angles, ensuring comprehensive mapping. These images are then processed using specialized software to create the three-dimensional model. The total station is used to ensure the model has the appropriate scale, and, finally, a GNSS system is incorporated for precise georeferencing, ensuring its accurate location in the digital world.

Keywords:

Drones, Photogrammetry, 3D Model, Castle, Gaibiel, Topography, Georeferencing, Preservation, Heritage, Mapping.

Indices

Índice General

1.	INTRODUCCIÓN	11
2.	OBJETIVOS	13
2.1.	Objetivo general:	13
2.2.	Objetivos específicos:	13
3.	DATOS	14
3.1.	Dron	15
3.1.1.	Características de la Cámara Aérea	16
3.1.2.	Detalles Técnicos de la Aeronave	16
3.1.3.	Software de plan de vuelo	17
3.2.	Antena GNSS	20
3.2.1.	Toma de datos	21
3.3.	Estacion Total	22
3.3.1.	Toma de datos	23
3.3.2.	Características de la Estación Total Leica TS02	24
4.	METODOLOGÍA	26
4.1.	Marco Teórico	26
4.1.1.	Fundamentos de la Fotogrametría y su Aplicación	26
4.1.2.	Definición y Alcance del Fotograma en Fotogrametría Aérea	27
4.1.3.	Planificación del Vuelo Fotogramétrico	27
4.1.4.	Dinámica de la Fotogrametría Aérea Mediante Drones	28
4.1.5.	El Universo Tridimensional de las Nubes de Puntos	29
4.2.	Optimización y Georreferenciación con Agisoft Metashape	29
4.2.1.	Incorporación de Imágenes	31
4.2.2.	Proceso de Alineación de Imágenes	32
4.2.3.	Resultados de la Nube de Puntos de Paso	33
4.2.4.	Calibración y Ajuste de Marcadores	34
4.2.5.	Elaboración de la Malla en Modelado 3D	36
4.2.6.	Generación y Características del Mapa de Profundidad	37
4.2.7.	Proceso de Texturización en Modelado 3D	38
4.2.8.	Refinamiento del Modelo con Texturas Detalladas	39
4.2.9.	Potencial y Características de la Nube de Puntos Densa	40

4.2.10.	Potencial y Características del Teselado	41
4.2.11.	Construcción y Proyección del Ortomosaico.....	42
4.2.12.	Generación y Configuración del Modelo Digital de Superficies (MDS)	43
4.2.13.	Creación de Animación para el Modelo 3D en Metashape.....	44
5.	RESULTADOS	45
6.	PRESUPUESTO	50
7.	CONCLUSIONES	52
8.	BIBLIOGRAFIA	54
9.	CARTOGRAFIA.....	55
10.	ANEXOS	58

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Plano general Castillo de Gaibiel-Fuente: clubsenderismodevalencia.....	11
Ilustración 2: Foto entrada Castillo Gaibiel – Fuente: rutasparatodos.....	12
Ilustración 3: Esquema de flujo de toma de datos- Fuente: Elaboración propia	14
Ilustración 4: Phantom 4 pro - Fuente: SmartHouse.....	15
Ilustración 5: Vuelo patrón doble malla-Fuente: Pix4DCapturePro	17
Ilustración 6:Vuelo en Orbita altura media-Fuente: Pix4DCapturePro	18
Ilustración 7: Vuelo Orbita De Proximidad - Fuente:Pix4DCapturePro	19
Ilustración 8: Antena GNSS - Fuente: leica-geosystems	20
Ilustración 9: Zeno Tab 2- Fuente: Survey.crkennedy.....	20
Ilustración 10: Puntos de apoyo con GNSS.....	21
Ilustración 11: Leica TS02 - Fuente: califfsurveying.....	22
Ilustración 12: Puntos Apoyo con Estacion Total - Fuente: Elaboracion propia	23
Ilustración 13: Grafico Flujo de trabajo con Metashape - Fuente: Elaboración propia.....	30
Ilustración 14: Visualización de cámaras - Fuente: Elaboración propia	31
Ilustración 15: Parámetros de alineación de fotos - Fuente: Elaboración propia	32
Ilustración 16: Nube de puntos de paso - Fuente: Elaboración propia	33
Ilustración 17: Imágenes de posicionamiento de marcadores - Fuente: Elaboración propia	34
Ilustración 18: Errores en los marcadores - Fuente: Elaboración propia	35
Ilustración 19: Parámetros de la malla - Fuente: Elaboración propia	36
Ilustración 20: Mapa de Profundidad - Fuente: Elaboración propia	37
Ilustración 21: Parámetros del Texturizado - Fuente: Elaboración propia	38
Ilustración 22: Modelo 3D con Texturas - Fuente: Elaboración propia	39
Ilustración 23: Nube de puntos densa - Fuente: Elaboración propia	40
Ilustración 24: Modelo Teselado - Fuente: Elaboración propia.....	41
Ilustración 25: Ortomosaico – Fuente: Elaboración propia.....	42
Ilustración 26: Modelo Digital de Superficie - Fuente: Elaboración propia.....	43
Ilustración 27: Posicionamiento cámaras para animación - Fuente: Elaboración propia	44
Ilustración 28: Cantidad de redundancia del modelo - Fuente. Elaboración propia.....	45
Ilustración 29: Datos de calidad del modelo - Elaboración propia.....	45
Ilustración 30: Resolución y densidad del DEM - Fuente: Elaboración propia.....	46
Ilustración 31: Nube de puntos de paso - Fuente Elaboración propia	47
Ilustración 32: Modelo 3D Texturizado - Fuente: Elaboración propia.....	47
Ilustración 33: Error en puntos de apoyo - Fuente: Elaboración propia	48
Ilustración 34: Error total de precisión en marcadores - Fuente: Elaboración propia	48
Ilustración 35: Error de cada marcador - Fuente: Elaboración propia	49

Índice de Tablas

Tabla 1: Características Estacion Total TS02 - Fuente: Elaboracion propia.....	25
Tabla 2: Presupuesto - Fuente: Elaboracion propia.....	51
Tabla 3: Puntos de apoyo - Fuente: Elaboración propia.....	69

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la evolución histórica, la humanidad ha dejado su huella imborrable a través de la construcción de estructuras que no solo sirven como testigos del pasado sino también como símbolos de identidad cultural. Entre estos, los castillos destacan por su arquitectura defensiva y su importancia estratégica. El análisis detallado de estas fortalezas medievales nos ofrece un espejo al pasado, revelando prácticas sociales, técnicas constructivas y el arte de la estrategia militar de sus constructores. En este sentido, el Castillo de Gaibiel no es la excepción. Emplazado en la comunidad Valenciana, este castillo se alza como un custodio de la historia, narrando a través de sus muros la crónica de un legado que necesita ser preservado.



Ilustración 1: Plano general Castillo de Gaibiel-Fuente: clubsenderismodevalencia

La conservación y restauración de tales monumentos es un deber ineludible para mantener vivo el patrimonio que define nuestra civilización. Desafortunadamente, el Castillo de Gaibiel, al igual que muchos monumentos históricos, se enfrenta a la erosión continua causada por agentes naturales y antrópicos, desde la inclemencia del clima hasta las secuelas de conflictos y el inexorable desgaste del tiempo. La restauración de esta fortificación implica un proceso meticuloso y riguroso que exige un conocimiento profundo de su estructura, sus materiales originales y las técnicas de construcción de la época.

Para llevar a cabo esta labor es esencial la recopilación de datos exhaustiva y la utilización de tecnologías avanzadas como el modelado digital en 3D, que proporcionan una visión integral del estado actual del castillo y facilitan la planificación de su rehabilitación. Estas herramientas modernas son fundamentales para la preservación de datos y para facilitar la comunicación y coordinación entre los diferentes expertos implicados en el proceso de conservación.

Es fundamental que historiadores, arqueólogos, arquitectos y otros especialistas colaboren estrechamente, no solo para recoger datos in situ, sino para interpretar correctamente la esencia del Castillo de Gaibiel, asegurando así su perpetuidad para las generaciones futuras. La documentación y el registro preciso de sus características no solo son clave para su conservación sino que también enriquecen su valor como atractivo turístico y educativo.



Ilustración 2: Foto entrada Castillo Gaibiel – Fuente: rutasparatodos

El Castillo de Gaibiel es una fortaleza que se erige en la provincia de Castellón, en la Comunidad Valenciana. Su origen se remonta al periodo de dominación musulmana, y a pesar de las remodelaciones y ampliaciones en tiempos posteriores, aún conserva la impronta de su época medieval. Su presencia es un testimonio de la historia local y un emblema de la herencia cultural que merece ser estudiado, protegido y valorado en su justa medida.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general:

Desarrollar un proyecto de documentación digital a través de un levantamiento fotogramétrico y la creación de un modelo tridimensional del Castillo de Gaibiel, utilizando tecnologías de teledetección y fotogrametría avanzada. Este proyecto tiene como propósito fundamental proporcionar datos precisos que sirvan de base para futuras restauraciones, trabajos de mantenimiento y promoción turística del sitio.

2.2. Objetivos específicos:

- Evaluar los beneficios y aplicaciones prácticas de la fotogrametría en la conservación del patrimonio.
- Seleccionar y examinar las herramientas tecnológicas más adecuadas para la generación de modelos tridimensionales.
- Implementar el uso de drones, sistemas de navegación por satélite (GNSS) y estaciones totales en la captura de datos geoespaciales.
- Investigar y determinar el software especializado para el procesamiento y análisis de datos fotogramétricos.
- Construir nubes de puntos detalladas utilizando conjuntos de imágenes aéreas.
- Asegurar la georreferenciación exacta de los datos GNSS para integrarlos en la construcción del modelo 3D.
- Elaborar subproductos digitales a partir del modelo 3D, como ortofotos y reconstrucciones virtuales.
- Examinar la precisión del modelo 3D resultante y validar la calidad de los datos.
- Evaluar el modelo final y explorar sus aplicaciones prácticas en distintos campos.

Potenciales aplicaciones y beneficios del proyecto:

Este proyecto pretende ser un recurso clave en la planificación de futuras intervenciones de conservación y restauración del Castillo de Gaibiel. Además, se busca la creación de un modelo de información de construcción (BIM) que cumpla con las normativas vigentes para proyectos financiados con fondos públicos. En el ámbito turístico, la difusión del modelo 3D a través de plataformas digitales del ayuntamiento y sitios especializados en patrimonio puede incrementar el interés y las visitas al castillo, potenciando así su valor cultural y económico.

3. DATOS

En el proceso de captura de datos para el modelado del Castillo de Gaibiel, se efectuó una cuidadosa elección del equipamiento técnico. Esta elección comprendió el uso de un dron "DJI PHANTOM 4 PRO", un sistema de posicionamiento global "Leica Zeno FLX100 Smart Antena", y un dispositivo de medición "Leica TS02". Para la georreferenciación, se utilizó la tablet "Zeno Tab 2" con la aplicación preinstalada "TcpGPS", proporcionada por la institución educativa.

La etapa de configuración del vuelo requirió un estudio detallado de la estructura y el terreno del Castillo de Gaibiel, utilizando la plataforma "Google Earth". Este análisis fue fundamental para establecer las trayectorias de vuelo más eficaces, garantizando una cobertura completa y detallada del área de interés.

El 14 de octubre, se ejecutaron los vuelos para la recolección de datos del castillo, una tarea que demandó precisión y atención durante toda la jornada. Los detalles sobre la metodología empleada y el procedimiento de recopilación de datos se describen en las secciones posteriores de este documento, incluyendo un esquema ilustrativo para mayor claridad.

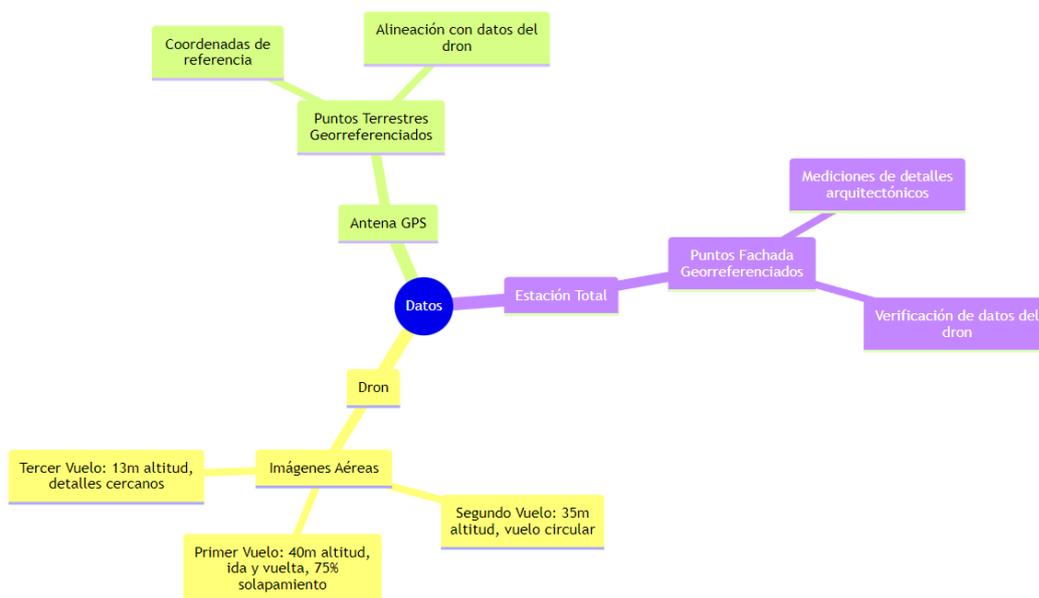


Ilustración 3: Esquema de flujo de toma de datos- Fuente: Elaboración propia

3.1. Dron

El dron seleccionado para el proyecto de modelado tridimensional fue el "PHANTOM 4 PRO" de DJI, una elección técnica fundamentada por sus capacidades fotográficas excepcionales y su adaptabilidad a proyectos de precisión fotogramétrica. Este modelo, reconocido por su robustez y fiabilidad, presenta un sensor que ofrece una resolución de 20 megapíxeles. Tal resolución es significativamente superior al estándar habitual de drones en el ámbito de la fotogrametría, donde se considera suficiente un sensor de 12 megapíxeles. Esta alta resolución es crucial, pues permite capturar una gran cantidad de detalles en cada imagen, facilitando la reconstrucción detallada y precisa del modelo 3D del castillo.

Con un peso de operación de 1.388 gramos, el "PHANTOM 4 PRO" supera la categoría de drones ligeros, lo que implica la necesidad de cumplir con regulaciones aeronáuticas específicas. La normativa de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) exige la adquisición de un certificado de vuelo del tipo A1/A3 para este rango de peso, garantizando que la operación del dron se realice dentro del marco legal y con las medidas de seguridad apropiadas.



Ilustración 4: Phantom 4 pro - Fuente: SmartHouse

La planificación de la misión de vuelo se llevó a cabo con especial atención en la selección del espacio aéreo. La elección se basó en evitar zonas con restricciones de vuelo que requieren certificaciones adicionales. Al no contar con los certificados SPT1 y SPT2, que autorizan vuelos más allá del rango de visión directa y en áreas restringidas, la operación se limitó a una zona abierta y accesible, lo que resultó ser suficiente para los requerimientos del levantamiento fotogramétrico.

El sistema de navegación del dron, que comprende tanto GPS como Glonass, inicialmente ofrece una localización con un margen de error que puede llegar hasta un metro y medio. Esta precisión es más que adecuada para una primera aproximación al sitio de interés. No obstante, es en la fase de procesamiento de imágenes donde se refina la exactitud geoespacial. Mediante técnicas especializadas de corrección fotogramétrica, se ajustan los datos para lograr una precisión centimétrica en la ubicación de cada elemento del modelo 3D. Este nivel de detalle es fundamental para que el modelo resultante no solo sirva como una representación visual, sino también como una herramienta analítica valiosa para estudios de conservación, planificación arquitectónica y presentaciones educativas.

Este enfoque meticuloso en la selección y operación del equipo aéreo asegura que la base de datos recopilada sea de la más alta fidelidad, lo que a su vez se traduce en un modelo 3D de gran precisión y utilidad para el proyecto.

3.1.1. Características de la Cámara Aérea

- **Sensor:** CMOS de 1 pulgada
- **Resolución:** 20 Megapíxeles efectivos
- **Óptica:** Campo de visión (FOV) de 84°; lente de 8.8 mm equivalente a 24 mm en formato de 35 mm
- **Apertura:** Rango de f/2.8 a f/11
- **Enfoque:** Ajustable desde 1 metro hasta infinito

3.1.2. Detalles Técnicos de la Aeronave

- **Peso Total:** 1.388 gramos (incluyendo batería y hélices)
- **Autonomía de Vuelo:** Hasta 30 minutos
- **Sistemas de Navegación:** GPS y GLONASS integrados
- **Precisión de Vuelo Estacionario Vertical:**
 - ± 0.1 m con posicionamiento visual
 - ± 0.5 m con posicionamiento por GPS
- **Precisión de Vuelo Estacionario Horizontal:**
 - ± 0.3 m con posicionamiento visual
 - ± 1.5 m con posicionamiento por GPS

3.1.3. Software de plan de vuelo

Para la captura y planificación de los vuelos del proyecto, se seleccionó el software "Pix4D Capture". La elección de esta herramienta se fundamentó en su flexibilidad y capacidad para adaptarse a las exigencias específicas del proyecto, permitiendo la configuración precisa tanto de trayectorias orbitales alrededor del castillo como de patrones cenitales sobre el mismo.

La estrategia de vuelo se diseñó meticulosamente para alinearse con la disponibilidad de recursos, específicamente las tres baterías con una duración operativa de 30 minutos cada una. Este recurso definió la ventana temporal disponible para completar la misión, garantizando una gestión eficiente del tiempo y la energía para la recopilación de datos.

Vuelo 1: Patrón de Doble Malla

- **Estrategia de Vuelo:** Configuración de malla doble para una cobertura exhaustiva.
- **Altura Operativa:** Sostenida a 45 metros, optimizando la vista general.
- **Solapamiento Óptimo:** Mantenido al 80%, tanto frontal como lateral, para una integración precisa de imágenes.
- **Duración del Vuelo:** Cronometrado a 11 minutos y 1 segundo, balance entre eficiencia y cobertura.
- **Inclinación de la Cámara:** Ajustada a un ángulo de 70 grados, favoreciendo la captura de detalles del terreno.
- **Volumen de Imágenes:** Total de 65 capturas, cada una esencial para el mapeo detallado.

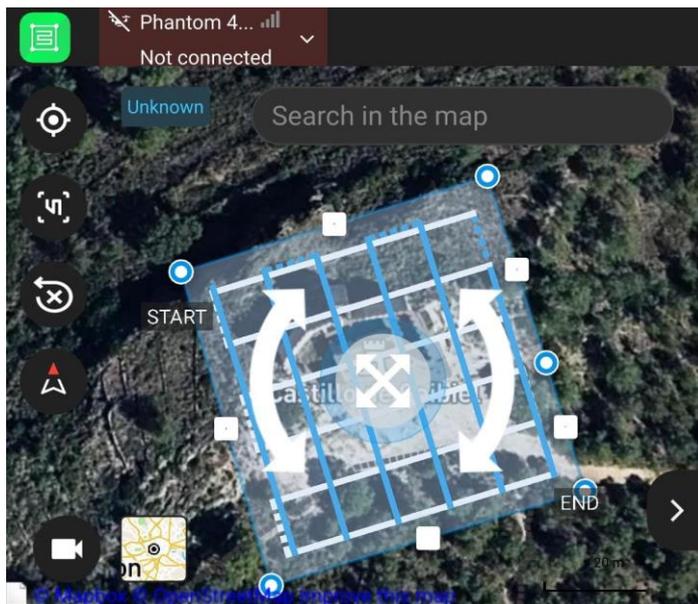


Ilustración 5: Vuelo patrón doble malla-Fuente: Pix4DCapturePro

Vuelo 2: Órbita de Altura Media

- **Estrategia de Vuelo:** Órbita centrada en el objetivo para capturas envolventes.
- **Altura Operativa:** A una altitud de 35 metros, equilibrio entre detalle y perspectiva.
- **Duración del Vuelo:** 4 minutos dedicados, enfocados en la eficacia de la ruta.
- **Inclinación de la Cámara:** Orientación de 40 grados, ideal para estructuras y elevaciones.
- **Volumen de Imágenes:** Conjunto de 55 fotografías, cubriendo ángulos clave alrededor del objetivo.

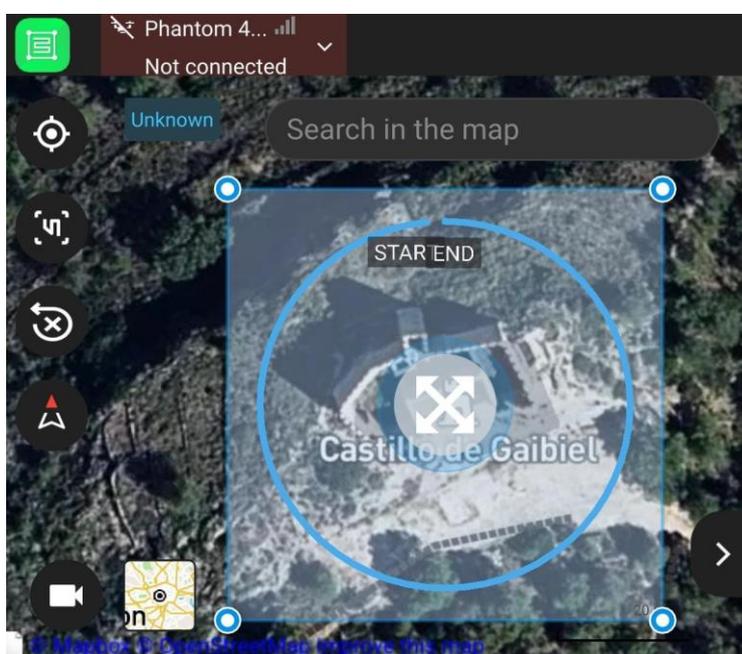


Ilustración 6: Vuelo en Órbita alta media-Fuente: Pix4DCapturePro

Vuelo 3: Órbita de Proximidad

- **Estrategia de Vuelo:** Vuelo orbital a baja altura para máxima definición.
- **Altura Operativa:** Descenso a 13 metros, capturando detalles de la superficie.
- **Duración del Vuelo:** 4 minutos de operación precisa y controlada.
- **Inclinación de la Cámara:** Ajuste a 0 grados para tomas perpendiculares y topográficas.
- **Volumen de Imágenes:** Un total de 55 imágenes, enfocadas en la captura minuciosa de la textura y la estructura del suelo, ideal para análisis detallados y mapeo preciso de la superficie.

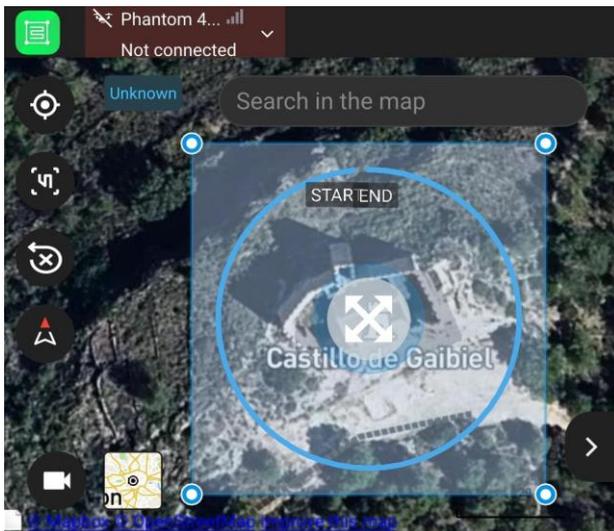


Ilustración 7: Vuelo Orbits De Proximidad - Fuente:Pix4DCapturePro

Cada vuelo ha sido meticulosamente planificado y ejecutado para complementar los otros, con el fin de construir un conjunto de datos tridimensionales integrales. La combinación de altitudes y ángulos ha sido seleccionada para garantizar la calidad y la completitud del modelo final, asegurando que cada detalle del área de estudio sea capturado y representado con la mayor precisión posible.

3.2. Antena GNSS

Para la recopilación de datos geospaciales se empleó la antena GNSS "Leica Zeno FLX100 Smart Antena", un equipo proporcionado por la institución educativa para el desarrollo del proyecto. La funcionalidad y especificaciones de este dispositivo coincidían con las demandas técnicas del levantamiento del Castillo de Gaibiel.



Ilustración 8: Antena GNSS - Fuente: leica-geosystems

El equipo "Leica Zeno FLX100" ofrece una precisión de localización hasta los 2 centímetros de error, una característica particularmente adecuada para la alta precisión requerida en el proyecto. Su operatividad se destaca por la facilidad de uso y la interfaz intuitiva a través de la tableta "Zeno Tab 2" que se sincroniza con la antena.



Ilustración 9: Zeno Tab 2- Fuente: Survey.crkennedy

La antena es notablemente práctica debido a su tamaño compacto y ligereza, lo que facilita su transporte y manejo en campo. Durante la recopilación de datos, fue posible aprovechar las correcciones de la red ERVA, lo que eliminó la necesidad de emplear un dispositivo GNSS adicional en modo base.

3.2.1. Toma de datos

En términos de datos recogidos, se georreferenciaron un total de 3 puntos estratégicos. Estos puntos fueron seleccionados cuidadosamente tanto por su relevancia en la estructura del castillo como por su visibilidad para las etapas de correlación de puntos en la fase de modelado tridimensional. Tres puntos se situaron en la base del castillo, cerca del mismo, permitiendo la colocación precisa de la estación total, mientras que el restante se colocó en el borde de la escalera de acceso, asegurando una cobertura amplia y facilitando su identificación durante la producción del modelo.



Ilustración 10: Puntos de apoyo con GNSS

La precisión centimétrica del GNSS se manifiesta en un dispositivo ultraportátil capaz de seguimiento multifrecuencia, proporcionando una precisión horizontal (2D) menor a 2 cm y una precisión altimétrica en Tiempo Real RTK (multifrecuencia) de 3 cm + 1 ppm.

El software "TcgGPS" se seleccionó por su capacidad para capturar y transmitir datos de geoposicionamiento de forma precisa mediante el protocolo TCP/IP. Este software se complementa perfectamente con el dispositivo "Leica Zeno FLX100 Smart Antena", brindando una experiencia de usuario simplificada y eficaz. La aplicación muestra las coordenadas en tiempo real, facilitando la tarea de georreferenciación y permitiendo, en la fase de postprocesamiento, saber con exactitud la ubicación de cada punto medido.

3.3. Estacion Total

Para la verificación y complemento de la información obtenida por el sistema GNSS y la fotogrametría, se incorporó la estación total "TS02" en la metodología de campo. Este instrumento se situó en un emplazamiento preciso, delimitado por coordenadas conocidas y corroboradas mediante el GNSS.

Con la estación total estacionada en un punto conocido se orienta a otro punto tomados con el GNSS, se inició la captura de puntos de control sobre la fachada del Castillo. El objetivo de estos puntos era proporcionar datos de referencia que permitieran un cotejo detallado con las mediciones del modelo tridimensional.

Optamos por una fachada plana, lo que nos facilitaba el cálculo de distancias entre los puntos registrados y su posterior comparación con las distancias generadas por el modelo 3D. Esta comparativa es esencial para evaluar la precisión del modelo en su conjunto.



Ilustración 11: Leica TS02 - Fuente: califfsurveying

3.3.1. Toma de datos

La disposición de los puntos capturados con la estación total sobre la fachada del Castillo está meticulosamente planeada para cubrir áreas fundamentales que garantizan una reconstrucción tridimensional precisa. Los puntos se distribuyen de forma que abarcan tanto los elementos verticales como horizontales de la estructura, proporcionando un marco exhaustivo para la calibración del modelo 3D.



Ilustración 12: Puntos Apoyo con Estacion Total - Fuente: Elaboracion propia

En la imagen proporcionada, los puntos se han colocado estratégicamente para abarcar características distintivas y bordes definitorios de la arquitectura. Por ejemplo, los puntos A1 y A7 se sitúan en los extremos superiores, lo que permite delinear la longitud total de la fachada. Los puntos A4 y A5, ubicados en la base y el techo de una abertura en la fachada, ayudan a medir y validar las dimensiones verticales del modelo.

La disposición diagonal de los puntos, como se observa entre A1, A4, y A6, es intencional para evaluar la integridad de las dimensiones en múltiples ejes. Esto es especialmente útil para detectar cualquier distorsión angular o desviación en el modelo 3D.

La elección de los puntos sobre las superficies planas y en los cambios de textura, como los bordes de la mampostería y las transiciones a otros materiales, asegura que el modelo refleje con precisión la complejidad y el detalle de la estructura real. Esta atención al detalle en la selección de los puntos es un paso crítico que subraya la precisión y la calidad del proceso de levantamiento y modelado.

3.3.2. Características de la Estación Total Leica TS02

Medición Avanzada sin Necesidad de Prisma:

- **Capacidad de Alcance Extendido:** Más de 500 metros en medición estándar y capacidad de exceder los 1000 metros en mediciones a larga distancia.

Exactitud Superior en Medición de Distancias:

- **Precisión Milimétrica:** 2 mm + 2 ppm, asegurando resultados de alta fidelidad.
- **Tecnología de Puntero Láser Refinado:** Con un alcance de 500 metros sin prisma y un puntero láser coaxial.

Plomada Láser para un Centrado Exacto:

- **Precisión de Centrado:** 1.5 mm a 1.5 metros, facilitando un ajuste preciso y detallado de la estación.

Diseño Práctico y Duradero:

- **Peso:** 5.1 kg, combinando robustez y portabilidad.
- **Funcionamiento Sencillo:** Ideal para usuarios ocasionales con un menor número de elementos operativos y una pantalla de alta resolución.

Visión y Precisión Óptica:

- **Potencia de Aumento:** 30x, permitiendo una observación detallada de los puntos de interés.
- **Resolución Angular:** 3 segundos de arco para una distinción clara de los elementos.
- **Rango de Enfoque:** Desde 1.7 metros hasta el infinito.
- **Campo de Visión:** 1° 30' (1.66 gon), con una cobertura de área de 2.7 metros a 100 metros.

Best-in-Class EDM (Electronic Distance Measurement):

- **Rápida y Fiable:** Medición en 2 segundos, ideal para proyectos que demandan velocidad y exactitud.

Característica	Detalle
Medición Avanzada sin Prisma	
Capacidad de Alcance Extendido	Más de 500 metros en medición estándar, excediendo 1000 metros en mediciones a larga distancia.
Exactitud en Medición de Distancias	
Precisión Milimétrica	2 mm + 2 ppm
Tecnología de Puntero Láser Refinado	Alcance de 500 metros sin prisma, puntero láser coaxial
Plomada Láser para Centrado Exacto	
Precisión de Centrado	1.5 mm a 1.5 metros
Diseño Práctico y Duradero	
Peso	5.1 kg
Funcionamiento Sencillo	Ideal para usuarios ocasionales, pantalla de alta resolución
Visión y Precisión Óptica	
Potencia de Aumento	30x
Resolución Angular	3 segundos de arco
Rango de Enfoque	De 1.7 metros hasta el infinito
Campo de Visión	1° 30' (1.66 gon), área de 2.7 m a 100 m
Medición Electrónica de Distancia (EDM)	
Rápida y Fiable	Medición en 2 segundos

Tabla 1: Características Estacion Total TS02 - Fuente: Elaboración propia

4. METODOLOGÍA

4.1. Marco Teórico

4.1.1. Fundamentos de la Fotogrametría y su Aplicación

La fotogrametría, sustentada en la estereoscopía, explora la habilidad natural del cerebro para percibir la profundidad, aprovechando la paridad con la visión humana que ofrece dos perspectivas ligeramente distintas. Esta técnica captura pares de imágenes desde ángulos divergentes, cuya fusión en post-procesamiento materializa la dimensión espacial del sujeto fotografiado, otorgando una ilusión de profundidad y volumen.

El paralaje, un cambio perceptible en la posición de un objeto al observarlo desde dos puntos de vista distintos, es instrumental en la fotogrametría para inferir la altura de los objetos. Al comparar las diferencias en la ubicación aparente de un objeto entre imágenes estereoscópicas, es posible calcular su altura real en relación con la cámara.

La convergencia es otro principio vital, donde la intersección de las trayectorias visuales de la cámara hacia el objeto en las imágenes estereoscópicas define su ubicación en el plano horizontal. Este punto de convergencia es crucial para mapear la posición exacta del objeto dentro del espacio cartografiado.

El último elemento es la elevación, que se refiere a la altitud de la cámara respecto al suelo. Este aspecto es determinante para calcular la escala de las imágenes y la altura de los objetos contenidos. A medida que la cámara se eleva, la escala de las imágenes aumenta, reduciendo proporcionalmente la altura aparente de los objetos, lo que ofrece una perspectiva más abarcadora del terreno fotografiado. Estos principios se aplican meticulosamente para obtener mediciones y reconstrucciones precisas en proyectos de fotogrametría como el realizado en el Castillo de Gaibiel.

4.1.2. Definición y Alcance del Fotograma en Fotogrametría Aérea

El término "fotograma" se refiere a una imagen aérea específica del terreno capturada a través de la fotogrametría aérea, una técnica que emplea cámaras montadas en plataformas voladoras, como aviones o drones. Estas imágenes no son meras fotografías; son registros técnicos que capturan una porción del terreno con precisión geoespacial.

Un fotograma va más allá de la simple visualización; incorpora un conjunto diverso de metadatos cruciales para su interpretación en fotogrametría. Entre estos datos se incluyen la distancia focal de la cámara, que debe ser conocida con una exactitud hasta la centésima de milímetro, y otros parámetros como las coordenadas XYZ del punto de captura, la marca temporal específica y la secuencia numérica de la toma.

Las cámaras empleadas en este proceso son específicamente métricas, diseñadas para proporcionar mediciones exactas. La proyección de la distancia focal en el fotograma, conocida como el punto principal, es un componente esencial para las mediciones y análisis subsiguientes. El fotograma resultante es una representación rica en datos del espacio físico, que sirve como un recurso fundamental para una variedad de aplicaciones analíticas y de modelado.

4.1.3. Planificación del Vuelo Fotogramétrico

La ejecución efectiva de un vuelo fotogramétrico sobre un área determinada implica la ejecución de pasadas aéreas paralelas a una altitud uniforme. Este enfoque asegura que el eje central de cada pasada coincida con la línea que conecta los puntos centrales de los fotogramas individuales. Para lograr una percepción estereoscópica adecuada, es crucial mantener un solapamiento tanto longitudinal como transversal entre las fotografías consecutivas.

Este solapamiento garantiza la correcta alineación y ensamblaje de las imágenes durante el proceso de postprocesamiento, donde se identifican y emparejan los puntos correspondientes en diferentes fotografías mediante algoritmos especializados en software fotogramétrico.

Para el presente proyecto, se ha optado por una estrategia que supera el solapamiento estándar del 60% recomendado, buscando una redundancia mayor. Esta decisión incrementa la cantidad de datos disponibles para el análisis, mejorando la fiabilidad de la reconstrucción y minimizando las posibles áreas sin cubrir, lo que resulta en una representación más detallada y precisa del terreno.

4.1.4. Dinámica de la Fotogrametría Aérea Mediante Drones

La fotogrametría aérea a través del uso de drones representa una evolución significativa en la captura de datos topográficos. Estos dispositivos voladores autónomos están equipados con cámaras avanzadas capaces de realizar sobrevuelos y obtener imágenes aéreas con un nivel de detalle y en perspectivas que son inaccesibles para las cámaras terrestres tradicionales.

La accesibilidad de los drones a zonas remotas o de complicado acceso les confiere una ventaja distintiva en la fotogrametría. Además, su capacidad para operar a variadas altitudes y ángulos otorga una flexibilidad sin precedentes en la captura de imágenes.

En el ámbito profesional, la fotogrametría requiere drones y cámaras que cumplan con estándares específicos para asegurar que los datos capturados sean de alta calidad y precisión:

Resolución de Cámara Elevada: Es primordial que las cámaras tengan una resolución suficiente para discernir detalles finos del terreno. Las cámaras con una resolución de 20 megapíxeles, apoyadas por sensores CMOS de una pulgada, son consideradas óptimas para este propósito.

Gestión de Exposición: La capacidad de controlar con precisión la exposición es vital para mantener la consistencia en la calidad de las imágenes, garantizando así la uniformidad en términos de iluminación y claridad a lo largo de toda la serie fotográfica.

Estabilización de Imagen: Para evitar la borrosidad y las distorsiones en las imágenes, la estabilización efectiva de la cámara es un requisito indispensable, permitiendo obtener fotografías claras incluso en condiciones de vuelo variables.

Geolocalización Exacta: Un sistema de posicionamiento global (GPS) de alta precisión es esencial en el dron para asociar cada imagen con su localización geográfica exacta, lo que es crucial para el posterior análisis y modelado tridimensional.

La combinación de estas características técnicas en drones y cámaras establece las bases para una fotogrametría aérea eficiente, abriendo posibilidades amplias para la cartografía, la planificación urbana y la gestión del territorio.

4.1.5. El Universo Tridimensional de las Nubes de Puntos

Una nube de puntos 3D se erige como el resultado inicial y más inmediato de un levantamiento realizado mediante tecnologías de escaneo láser o fotogrametría digital. Este conglomerado de innumerables puntos tridimensionales constituye una representación digital de la superficie de un objeto o terreno en el espacio físico. Cada punto en esta nube es un depósito de datos, detallando no solo las dimensiones métricas de la superficie que representa, sino también capturando los tonos y la reflectividad inherentes a los materiales del objeto escaneado.

Las nubes de puntos son fundamentales en la modelación tridimensional. Son los cimientos sobre los cuales se edifican reconstrucciones digitales detalladas, permitiendo el procesamiento acelerado de datos para producir modelos 3D de calidad y fidelidad notables. Con su riqueza en detalles y su capacidad para reflejar con precisión la realidad física, las nubes de puntos se han convertido en una herramienta indispensable en una variedad de disciplinas, desde la arqueología y la arquitectura hasta la ingeniería y la gestión de activos urbanos.

4.2. Optimización y Georreferenciación con Agisoft Metashape

Para la elaboración y afinamiento de nubes de puntos y modelos tridimensionales, se seleccionó el software Agisoft Metashape tras una cuidadosa evaluación de alternativas como Alicevision y Regard 3D. Metashape destacó por su versatilidad y la amplitud de herramientas especializadas que ofrece, facilitando una manipulación más precisa de los datos en cada fase del proceso fotogramétrico.

Una de las capacidades más notables de Metashape es su potencial para afinar la nube de puntos mediante un conjunto exhaustivo de opciones de configuración, lo que permite una depuración y ajuste detallados de los datos en tránsito hacia el modelo final. Además, Metashape sobresale por su funcionalidad integrada de georreferenciación, eliminando la necesidad de recurrir a aplicaciones complementarias para anclar el modelo 3D en coordenadas reales.

Agisoft Metashape, en su versión Professional 2.0.0, provee herramientas avanzadas y configuraciones adicionales que resultan esenciales para los requisitos específicos del proyecto en cuestión. Su interfaz está inteligentemente dividida en dos áreas principales: el espacio de trabajo y la sección de referencia.

El espacio de trabajo es el núcleo operativo donde se visualizan imágenes, puntos de control, marcadores y diversos productos derivados del proceso fotogramétrico. La sección de referencia, distintiva de Metashape, es donde se ejecuta la georreferenciación precisa del modelo 3D. Esta se realiza introduciendo coordenadas conocidas, usualmente puntos GPS recogidos en el sitio del proyecto, lo que garantiza una ubicación exacta y proporciona escala al modelo tridimensional.

Dentro de la sección de referencia, el apartado de cámaras documenta cada imagen importada con sus respectivas coordenadas y altitudes. El segmento de marcadores, por otro lado, es crítico para la georreferenciación precisa, ya que vincula coordenadas exactas a cada foto, basadas en mediciones GPS realizadas en el campo con un margen de error máximo de 2 centímetros. Esta precisión es vital, pues confiere al modelo 3D una precisión dimensional y una escala fidedigna, elementos clave para una representación realista y aplicaciones prácticas subsecuentes.

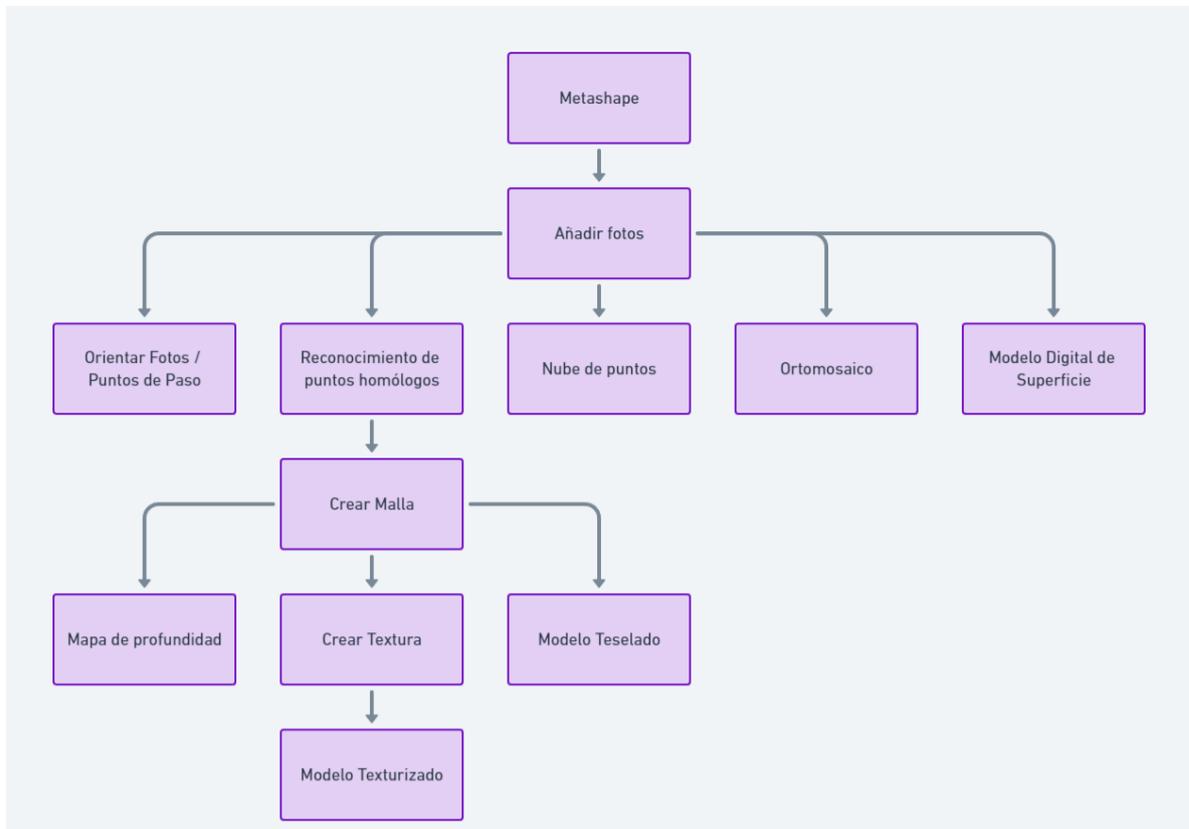


Ilustración 13: Gráfico Flujo de trabajo con Metashape - Fuente: Elaboración propia

4.2.1. Incorporación de Imágenes

El proceso de reconstrucción 3D inicia con la carga de imágenes al software de fotogrametría, un paso fundamental que constituye la base del flujo de trabajo. Esta acción es indispensable para activar las funcionalidades subsiguientes del software.

La flexibilidad del programa permite tanto la adición directa de imágenes individuales como la importación de una carpeta completa que las contenga, facilitando así la organización y el manejo de grandes volúmenes de datos visuales. Una vez cargadas, las imágenes se visualizan en el área de trabajo del software, listas para su procesamiento.

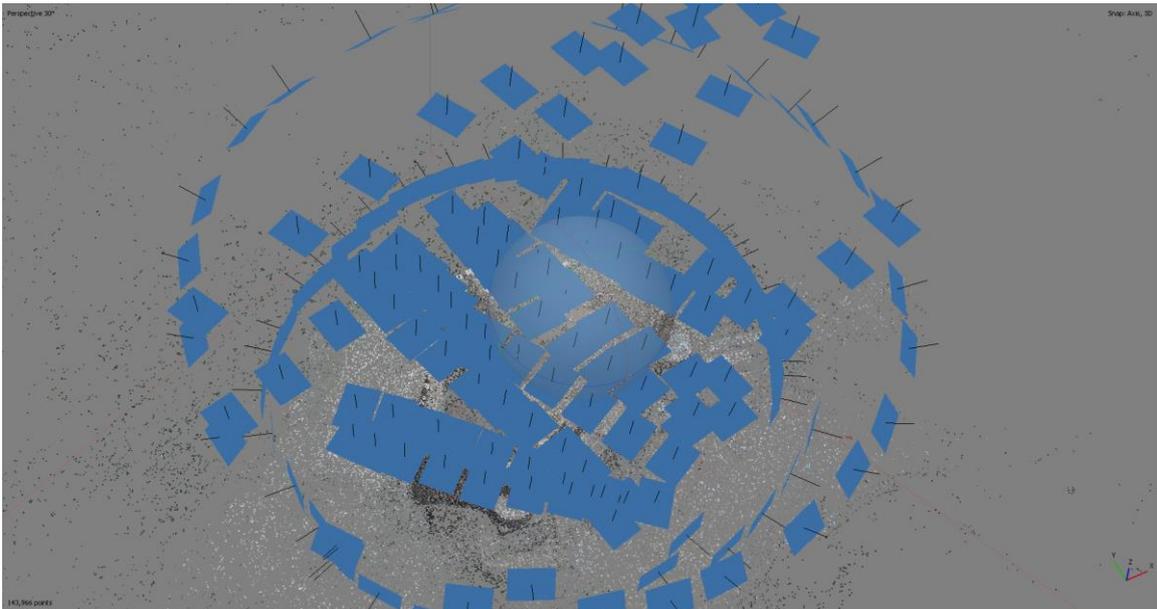


Ilustración 14: Visualización de cámaras - Fuente: Elaboración propia

Para este proyecto, se han seleccionado cuidadosamente 175 fotografías que representan de manera integral el área de estudio. Estas imágenes provienen de tres vuelos meticulosamente planificados: dos de ellos ejecutando trayectorias circulares alrededor del objetivo y un tercer vuelo en patrón de zigzag, cubriendo el área desde una perspectiva superior. La combinación de estos vuelos asegura una cobertura completa y una multiplicidad de ángulos, fundamentales para la creación de un modelo 3D coherente y detallado.

4.2.2. Proceso de Alineación de Imágenes

Tras la integración exitosa de las imágenes en el proyecto fotogramétrico, el siguiente paso esencial es la orientación de estas. Este proceso crítico implica la identificación y alineación de puntos clave y puntos de paso que se repiten a través de las distintas fotografías, estableciéndolos como anclas para los procedimientos de reconstrucción subsecuentes.

Para garantizar la máxima calidad y precisión en el modelado final, se ha optado por configurar el software para operar en su más alta calidad de procesamiento. Este nivel de detalle es viable gracias a la disponibilidad de tiempo dedicado al proyecto y la búsqueda de resultados superlativos.

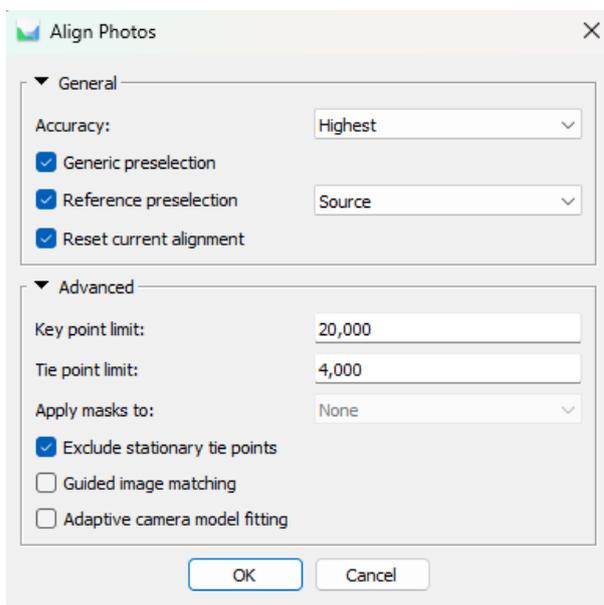


Ilustración 15: Parámetros de alineación de fotos - Fuente: Elaboración propia

La elección de la preselección genérica de "referencia origen" es deliberada para este conjunto de datos. A pesar del incremento en tiempo de procesamiento que esto podría implicar, la precisión se antepone, especialmente considerando el estado desorganizado inicial de las imágenes. Esta configuración es una medida proactiva para minimizar discrepancias y errores en fases posteriores.

Los parámetros para los puntos clave y de paso por foto se mantuvieron en sus valores predeterminados, ya que se ajustaban adecuadamente a las necesidades del proyecto. Además, la orientación actual de la cámara ya ha sido establecida gracias al procesamiento previo. El emparejamiento fino y el ajuste del modelo de cámara se llevarán a cabo de forma manual en etapas posteriores, permitiendo una calibración detallada y un control exhaustivo sobre la conformación del modelo tridimensional.

4.2.3. Resultados de la Nube de Puntos de Paso

Al sumergirnos en el análisis de la nube de puntos de paso generada para este proyecto, encontramos que la colección consta de 143,966 puntos bien definidos, cada uno representando un fragmento del espacio tridimensional con precisión. Estos puntos están detalladamente coloreados en tres bandas distintas, permitiendo una representación visual rica y una interpretación detallada de la superficie escaneada.

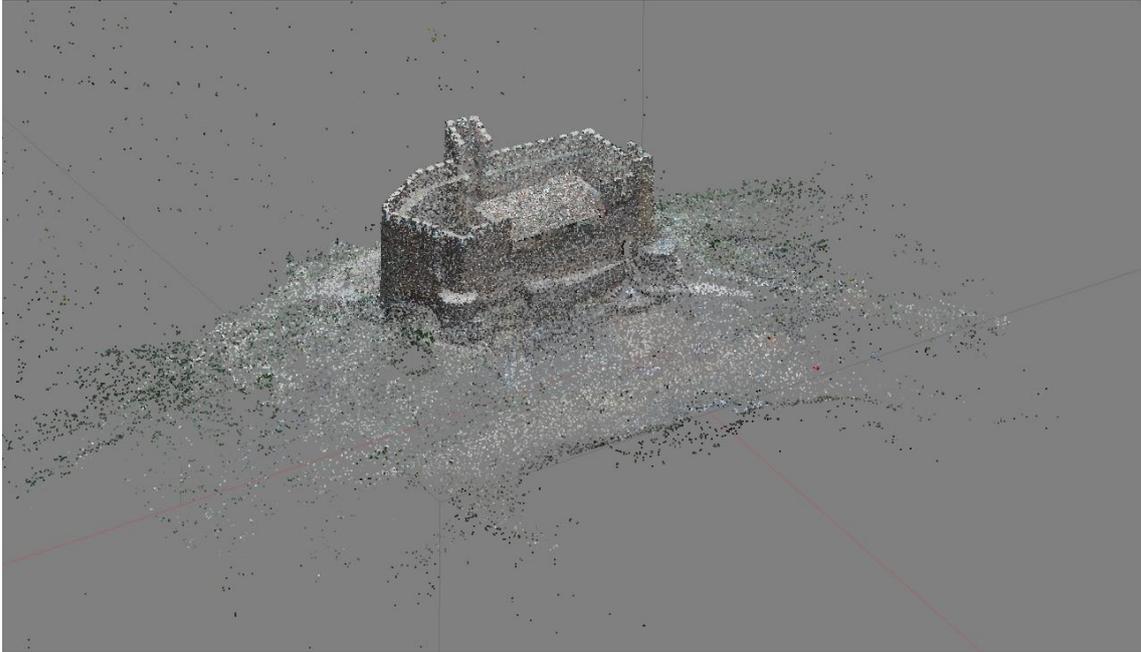


Ilustración 16: Nube de puntos de paso - Fuente: Elaboración propia

La nube refleja una multiplicidad media de punto de paso de 4.38711, lo que indica que cada punto se ha capturado, en promedio, en más de cuatro imágenes diferentes. Este nivel de redundancia visual es crítico para la robustez y la integridad de los datos, asegurando que la información sea fiable y consistente a través del modelo.

Desde el punto de vista del procesamiento, la alineación de imágenes ha consumido 1 minuto y 3 segundos, un testimonio de la eficiencia y rapidez del software fotogramétrico utilizado. El tamaño del archivo de la nube de puntos es de 14.76 MB, evidenciando un manejo eficiente de datos que no compromete la capacidad de almacenamiento ni la velocidad de procesamiento.

La alineación se ha ajustado con la máxima precisión posible, reflejada en la configuración de la resolución de puntos clave por foto y puntos de paso por foto, siguiendo los parámetros óptimos preestablecidos. La orientación de la cámara y la calibración del modelo se realizarán con un enfoque detallado más adelante, lo cual permitirá refinar aún más la precisión del modelo final.

4.2.4. Calibración y Ajuste de Marcadores

Dentro del módulo de referenciación, es esencial cargar tanto las imágenes aéreas como los marcadores georreferenciados recopilados a través de la tecnología GPS. Se debe prestar atención al sistema de coordenadas utilizado durante la recopilación de datos, que en este caso es "ETRS89/UTM zona 30N".

Incorporando todos estos elementos y activando la visualización de marcadores, observamos su posición inicial sobre la nube de puntos de paso. Es común encontrar una discrepancia inicial en la colocación de estos marcadores debido a la precisión limitada de la geolocalización del dron, que, sin el modo RTK, puede desviarse hasta cinco metros. La corrección de esta nube es entonces esencial para reducir el error a unos pocos metros.

El proceso se lleva a cabo imagen por imagen, posicionando manualmente los marcadores en los puntos conocidos. A medida que se ajustan, se recomienda actualizar periódicamente el proyecto, lo que permite que el software ajuste la posición del modelo en relación con los marcadores georreferenciados, facilitando la alineación precisa de los marcadores en su ubicación óptima.

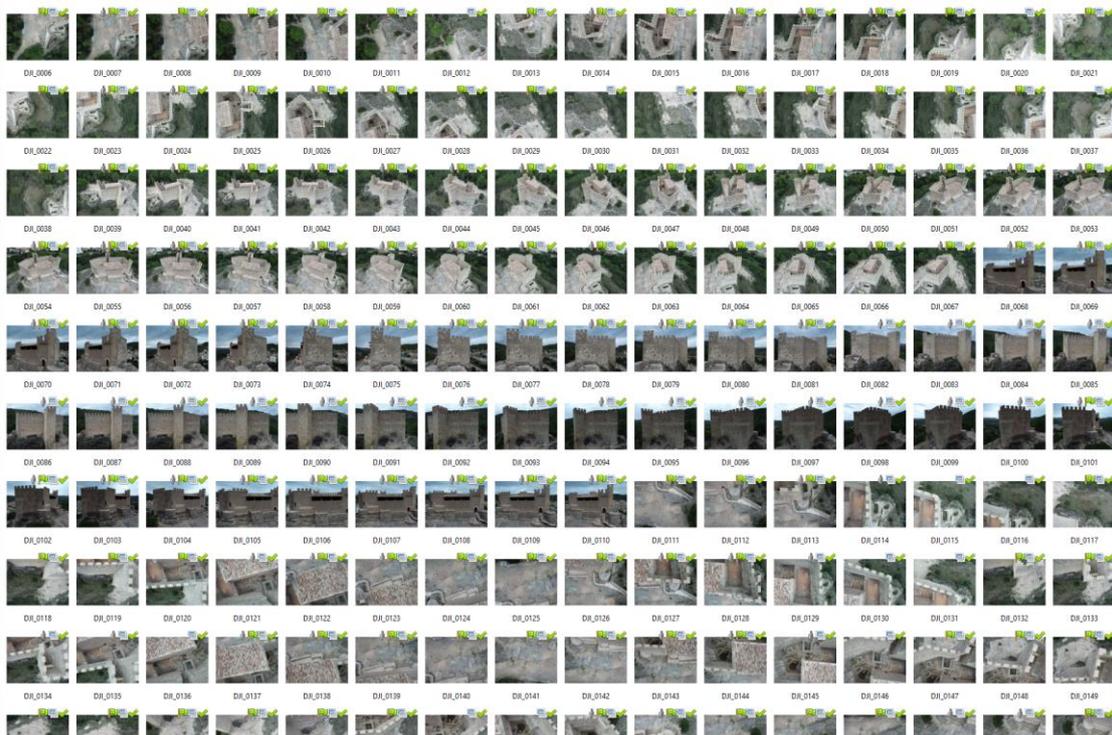


Ilustración 17: Imágenes de posicionamiento de marcadores - Fuente: Elaboración propia

Tras finalizar la referenciación de los marcadores en las 175 imágenes seleccionadas para este proyecto, se determina el error asociado a cada marcador y al proyecto en su conjunto. Este error puede manifestarse en varios centímetros, reflejando las limitaciones iniciales de la

calibración de la cámara y la aproximación de los parámetros focales. La rectificación de estos y otros parámetros es crucial para perfeccionar el proyecto y minimizar el error.

Al concluir el proceso, el error total medido para el proyecto es de aproximadamente 2.7 centímetros, lo que sorprendentemente está por debajo del margen de error del GPS utilizado para la georreferenciación. Este indicador favorable sugiere que el proyecto va por buen camino, con una precisión que supera las expectativas iniciales. Este nivel de exactitud augura un análisis prometedor con los datos de la estación total, que se explorará en secciones subsiguientes del informe.

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections
<input checked="" type="checkbox"/> 2	714061.912000	4422279.617000	545.178000	0.02/0.03	0.059338	30
<input checked="" type="checkbox"/> 4	714073.547000	4422295.408000	549.459000	0.02/0.03	0.037513	44
<input checked="" type="checkbox"/> 7	714049.323000	4422317.713000	543.156000	0.02/0.03	0.026090	44
<input checked="" type="checkbox"/> A1	714050.179000	4422292.051000	560.976000	0.005000	0.020660	56
<input checked="" type="checkbox"/> A2	714055.862000	4422294.274000	561.823000	0.005000	0.002222	58
<input checked="" type="checkbox"/> A4	714055.902000	4422294.286900	557.365100	0.005000	0.033635	34
<input checked="" type="checkbox"/> A5	714066.725800	4422298.425800	562.209800	0.005000	0.000992	55
<input checked="" type="checkbox"/> A6	714072.422600	4422300.747700	563.935000	0.005000	0.001928	57
<input checked="" type="checkbox"/> A7	714066.748700	4422298.411000	557.445200	0.005000	0.008849	34
Total Error						
Control points					0.028392	
Check points						

Ilustración 18: Errores en los marcadores - Fuente: Elaboración propia

4.2.5. Elaboración de la Malla en Modelado 3D

La generación de la malla constituye el núcleo del proceso fotogramétrico y es decisiva para la construcción del modelo tridimensional. En esta etapa, el modelo 3D toma forma partiendo de una base de datos detallada, que puede ser la nube de puntos de paso o los mapas de profundidad - estos últimos, aunque no se generaron en este caso, son reconocidos por aportar una calidad superior en los modelos resultantes.

Durante la construcción de la malla, se optó por seleccionar parámetros que priorizan la calidad sobre la velocidad de procesamiento. Por lo tanto, se estableció la opción de superficie 3D y se ajustó la calidad a "Extra alta", complementándola con un número de caras "Alto". Estas configuraciones están diseñadas para maximizar la fidelidad del modelo, aunque implican un tiempo de procesamiento más prolongado.

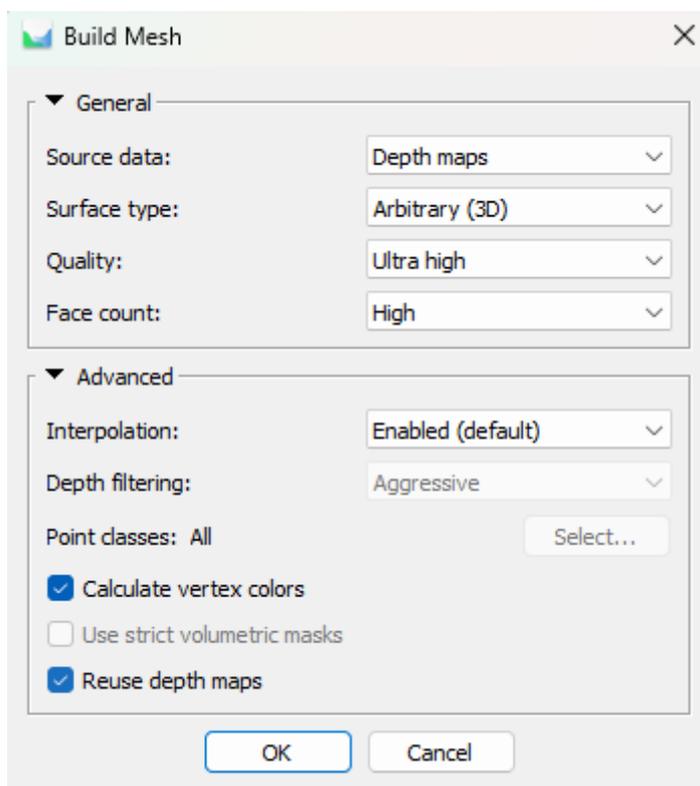


Ilustración 19: Parámetros de la malla - Fuente: Elaboración propia

El paso de interpolación se ha activado con un filtro de profundidad configurado en modo agresivo. Esta elección es estratégica, ya que tiene como finalidad la eliminación de anomalías y la obtención de superficies más uniformes y pulidas. La aplicación de este filtro debe ser calibrada cuidadosamente para cada proyecto, considerando las características específicas del objeto modelado y los requerimientos de precisión de la superficie. La adecuada selección de estos parámetros es esencial para lograr una representación precisa y visualmente coherente del modelo en cuestión.

4.2.6. Generación y Características del Mapa de Profundidad

La confección del mapa de profundidad emerge como un componente crucial en la fase de modelado 3D, sirviendo como precursor directo de la malla final. Este mapa, generado con una meticulosa atención al detalle, se ha procesado con una calidad "extra alta" y un enfoque de filtrado intenso para afinar la textura de la superficie.

La inversión de tiempo en este proceso fue significativa, extendiéndose a 25 minutos, lo que refleja la complejidad y la minuciosidad de la tarea. El archivo resultante, de una magnitud considerable de 3.84 GB, encapsula la extensa información recopilada durante este procedimiento.

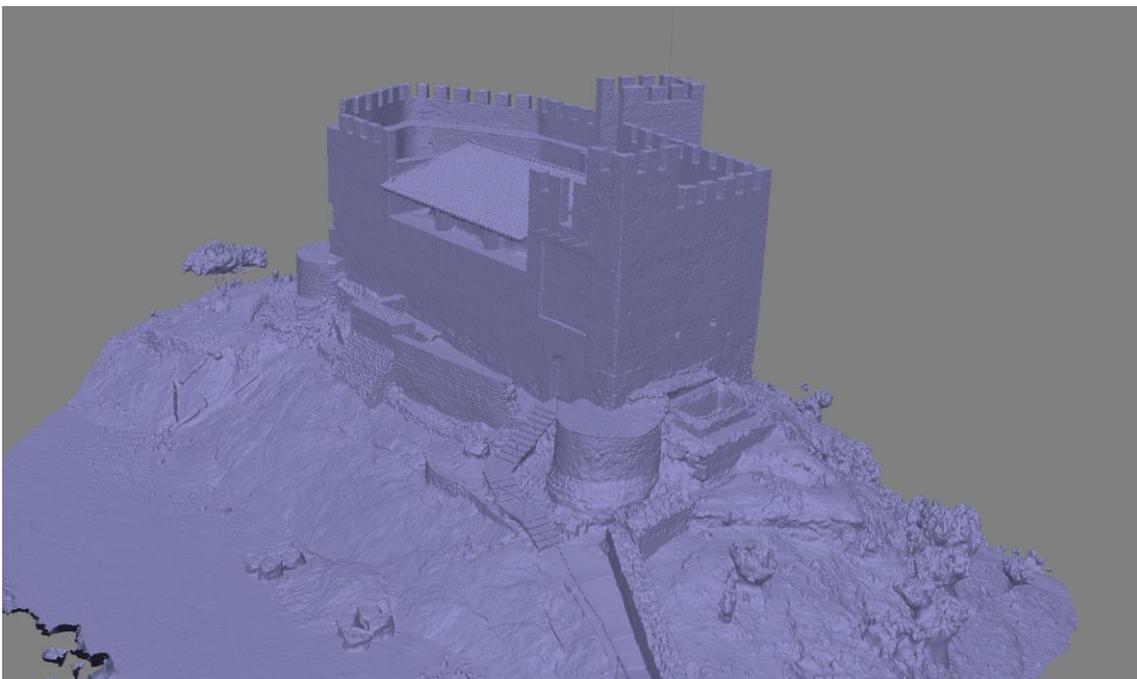


Ilustración 20: Mapa de Profundidad - Fuente: Elaboración propia

Aunque el mapa de profundidad por sí solo ofrece la posibilidad de visualizar las caras con color, es importante reconocer que su nivel de detalle no alcanza la riqueza que se logra posteriormente al aplicar texturas al modelo. La texturización añade una capa de realismo y definición que transforma la representación de profundidad en una réplica más vívida y tangible del objeto o terreno modelado.

4.2.7. Proceso de Texturización en Modelado 3D

Tras la generación exitosa de la malla a partir del mapa de profundidad, el siguiente hito en la creación del modelo 3D es la aplicación de texturas. Este paso es esencial para aportar realismo y detalle visual al modelo.

Para la texturización, se ha optado por la utilización del formato RGB, que impregna al modelo con colores fieles a la realidad observada. Los archivos de imagen originales, con su alta calidad intrínseca y sin modificaciones previas, han sido los seleccionados como fuente para la texturización, ya que proporcionan una riqueza de detalle mucho mayor que la derivada exclusivamente de los mapas de profundidad.

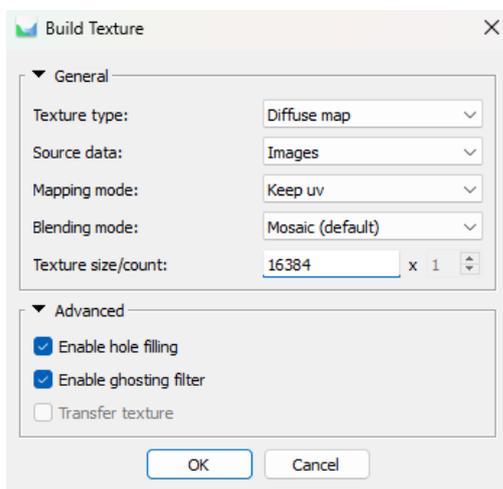


Ilustración 21: Parámetros del Texturizado - Fuente: Elaboración propia

El tamaño de textura seleccionado ha sido notablemente elevado, estableciéndose en 16284x2, lo que representa un gran avance respecto al tamaño estándar de 4096. Esta decisión se basa en pruebas meticulosas que han demostrado que la calidad del modelo mejora de manera significativa con el incremento de la resolución de la textura.

En lo referente a la configuración de mezclado y mapeado, así como la conservación del mapa de UV y el modo de mezcla en mosaico, se han mantenido los ajustes predeterminados, que han demostrado ser los más efectivos. La activación de la función de cierre de agujeros ha resultado ser particularmente beneficiosa, especialmente para abordar los vacíos que típicamente aparecen en zonas complejas como la vegetación circundante. Este proceso automatizado simplifica enormemente la fase de postprocesamiento sin comprometer la integridad del aspecto más crítico del proyecto: la representación del castillo.

La texturización en alta resolución, junto con la optimización de estos parámetros, culmina en un modelo 3D de aspecto refinado y con una apariencia muy cercana a la realidad, listo para

ser utilizado en aplicaciones que van desde la visualización arquitectónica hasta la simulación de entornos virtuales.

4.2.8. Refinamiento del Modelo con Texturas Detalladas

El modelo texturizado emerge como una evolución visualmente superior al modelo crudo derivado del mapa de profundidad. Esta fase de texturización, completada tras 34 minutos de procesamiento meticuloso, culmina en un archivo de 951 MB que encapsula una gama de detalles y matices visuales.



Ilustración 22: Modelo 3D con Texturas - Fuente: Elaboración propia

Este incremento en el nivel de detalle con la textura aplicada es notoriamente superior, ofreciendo una representación más rica y viva del modelo 3D. La textura añade una capa de realismo tangible, realzando los contornos, las sombras y la paleta de colores del objeto, lo cual es esencial para una interpretación más fiel del sujeto real. La diferencia es especialmente palpable cuando se compara con la versión inicial que, aunque coloreada, carecía de la profundidad y la definición que las texturas proporcionan. Este enriquecimiento detallado es crucial para las aplicaciones donde la precisión visual y la autenticidad son primordiales.

4.2.9. Potencial y Características de la Nube de Puntos Densa

La nube de puntos densa constituye una fase posterior en la fotogrametría que, aunque no esencial para la finalización del modelo 3D, presenta un valor incalculable para una variedad de aplicaciones complementarias. Generada a partir de los mapas de profundidad, esta nube de puntos sirve como un conjunto de datos rico y multifacético que puede adaptarse a diferentes propósitos.

Con una configuración que no escatima en calidad, se ha optado por los ajustes de "extra alta" calidad y un filtrado "agresivo" para maximizar la definición y la utilidad de la nube. Estos parámetros reflejan la consistencia en la búsqueda de excelencia a lo largo de todo el proyecto.

En términos de volumen de datos, la nube de puntos densa es significativamente más detallada que la nube de puntos de paso generada durante la alineación de las cámaras, pasando de 143,966 puntos a una impresionante cantidad de 138,907,085 puntos. Este incremento en densidad permite una representación detallada del terreno o el objeto estudiado, ofreciendo una alternativa ligera al modelo 3D completo para análisis o trabajos en otros softwares especializados.



Ilustración 23: Nube de puntos densa - Fuente: Elaboración propia

A pesar de su gran cantidad de información, es importante destacar que la nube de puntos densa no alcanza el nivel de detalle que proporciona la textura en un modelo 3D, y mucho menos se compara con la riqueza visual de un modelo texturizado. No obstante, su valor reside en la capacidad de proporcionar una visión precisa y manipulable de la geometría del objeto, siendo una herramienta versátil para evaluaciones espaciales o estudios preliminares en contextos donde el peso del archivo y la agilidad de procesamiento son factores críticos.

4.2.10. Potencial y Características del Teselado

Para crear un modelo teselado del Castillo de Gaibiel, se ha partido de la base de datos de alta resolución obtenida de los mapas de profundidad. Se aplicó un nivel de detalle extraordinario con un tamaño de tesela de 8192, que maximiza la calidad visual de las texturas. Este proceso resultó en un modelo con una gran densidad de detalles geométricos y una resolución de píxeles de 1,3 cm, lo que mejora la percepción de los elementos más finos del castillo.

Este modelo teselado, al ser más detallado, posee una mayor carga en cuanto a recursos de procesamiento. Si bien el incremento en la fidelidad geométrica es sutil a distancias donde también el modelo texturizado ofrece resultados de alta calidad, su utilidad se hace notar en aplicaciones de visualización avanzada donde se requiere la máxima definición, como en simulaciones de realidad virtual o animaciones de alta calidad.



Ilustración 24: Modelo Teselado - Fuente: Elaboración propia

El proceso de generación de este modelo teselado requirió de una hora y media de cómputo, finalizando con un archivo de aproximadamente 546.45 MB que garantiza una representación de alta fidelidad del Castillo de Gaibiel, ideal para aplicaciones que demandan un alto nivel de detalle y realismo.

4.2.11. Construcción y Proyección del Ortomosaico

El ortomosaico es un compendio de imágenes aéreas unificadas que forman un mapa único y detallado. Este producto se genera superponiendo la malla tridimensional sobre una base cartográfica, que en este proyecto proviene del servicio "OpenStreetMaps".

Para la proyección correcta y precisa del ortomosaico, se ha seleccionado el sistema de referencia espacial "ETRS89/UTM zona 30N", que está alineado con las coordenadas y la escala del proyecto. La integración con el mapa satelital de "OpenStreetMaps" proporciona un contexto geográfico claro y un punto de referencia visual para la ubicación y orientación del proyecto, asegurando que el ortomosaico resultante sea no solo visualmente coherente sino también espacialmente exacto y utilizable para aplicaciones que van desde la planificación urbana hasta la gestión del territorio.



Ilustración 25: Ortomosaico – Fuente: Elaboración propia

4.2.12. Generación y Configuración del Modelo Digital de Superficies (MDS)

El Modelo Digital de Superficies (MDS) es accesible a través de la sección "Orto" del programa Metashape y representa una capa clave del proyecto fotogramétrico. Este modelo es una representación digital que captura las elevaciones de la superficie, incluyendo todas las características sobresalientes como edificaciones, vegetación y otras estructuras.

Para la creación de este MDS, se utilizó la herramienta de modelado digital de elevaciones de Metashape. Dada la presencia de elementos verticales significativos, como los edificios, el resultado va más allá de un simple modelo de elevaciones; en efecto, es un MDS que detalla el relieve y las características superficiales del área estudiada.

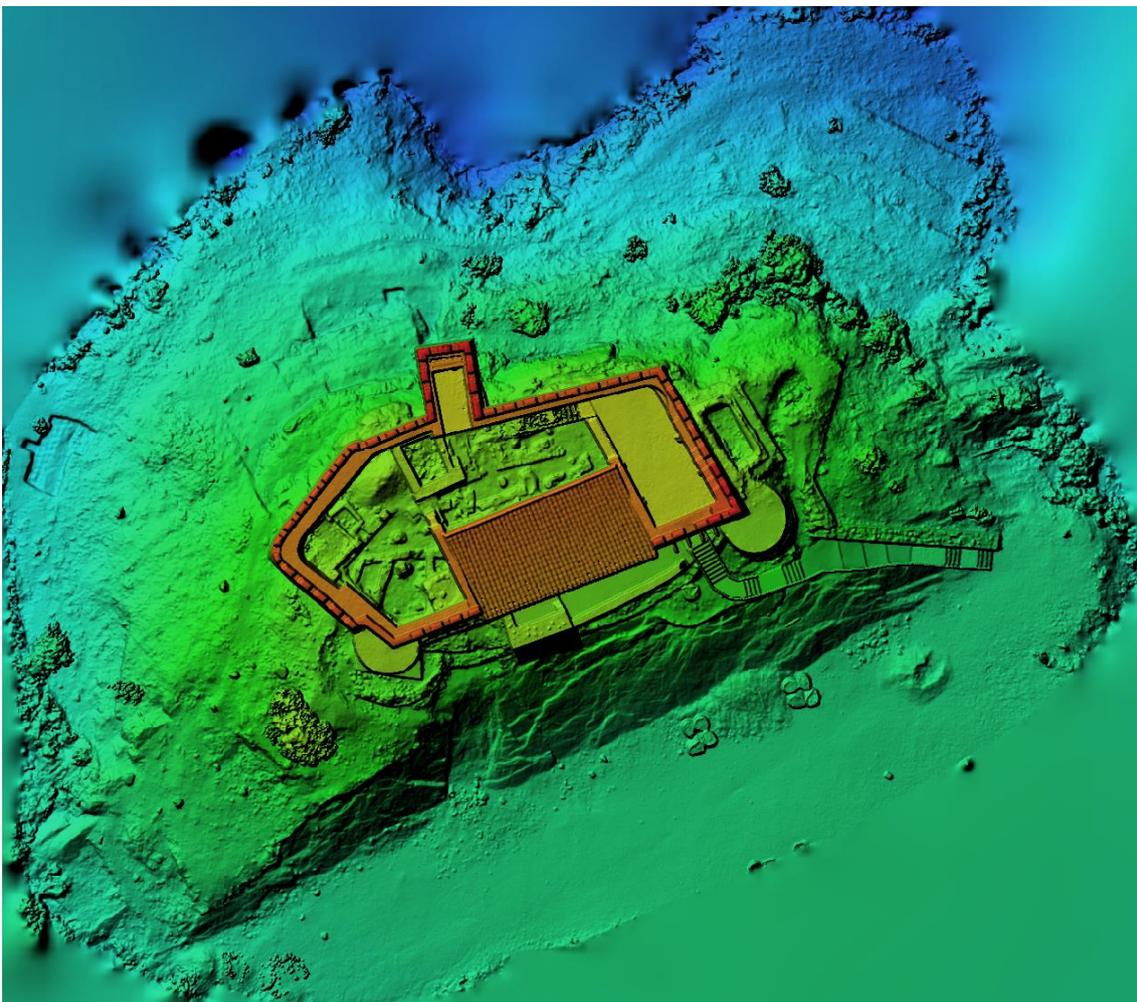
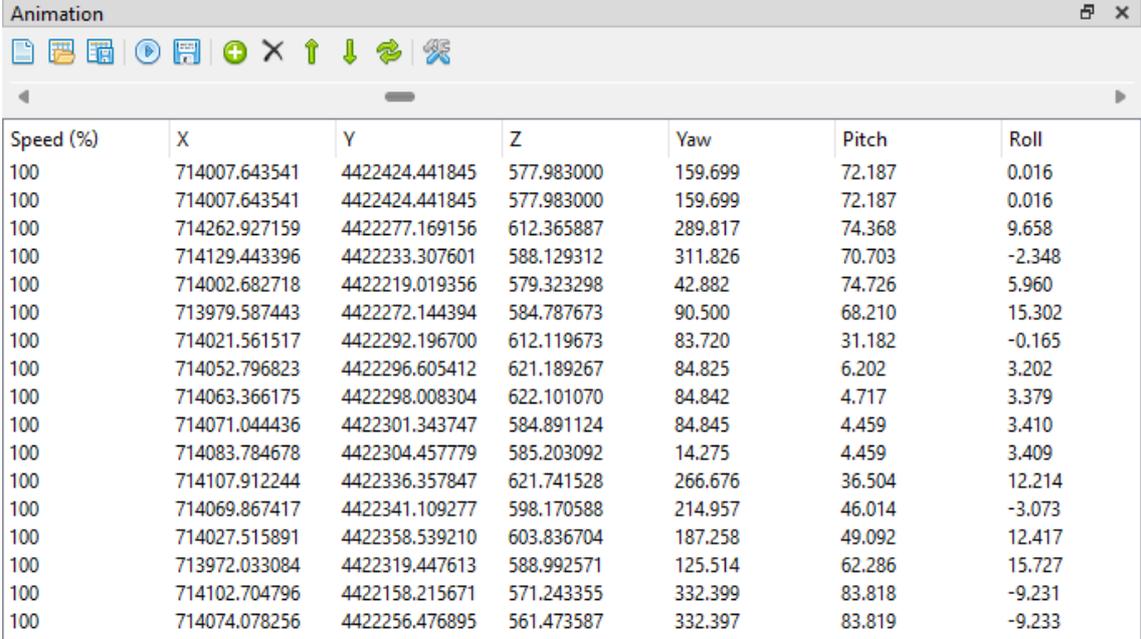


Ilustración 26: Modelo Digital de Superficie - Fuente: Elaboración propia

La configuración seleccionada para la elaboración del MDS priorizó las opciones de más alta calidad que el software permite, tomando como punto de partida los mapas de profundidad generados previamente. Este enfoque garantiza que el MDS producido tenga la mayor fidelidad y detalle posibles, reflejando con precisión las variaciones y características de la superficie del sitio.

4.2.13. Creación de Animación para el Modelo 3D en Metashape

La creación de una animación de vuelo alrededor del modelo 3D en Agisoft Metashape fue una etapa crucial. Inicié abriendo el proyecto y cambiando a la vista 3D, para tener una perspectiva completa del modelo. Luego, procedí a determinar los puntos clave alrededor del modelo, estos puntos no solo marcaban la trayectoria de la cámara, sino que también enfocaban los detalles más significativos del castillo.



The screenshot shows the 'Animation' window in Agisoft Metashape. It features a toolbar with icons for keyframe management and a table of keyframe data. The table has seven columns: Speed (%), X, Y, Z, Yaw, Pitch, and Roll. The data represents the camera's position and orientation at various points in the animation.

Speed (%)	X	Y	Z	Yaw	Pitch	Roll
100	714007.643541	4422424.441845	577.983000	159.699	72.187	0.016
100	714007.643541	4422424.441845	577.983000	159.699	72.187	0.016
100	714262.927159	4422277.169156	612.365887	289.817	74.368	9.658
100	714129.443396	4422233.307601	588.129312	311.826	70.703	-2.348
100	714002.682718	4422219.019356	579.323298	42.882	74.726	5.960
100	713979.587443	4422272.144394	584.787673	90.500	68.210	15.302
100	714021.561517	4422292.196700	612.119673	83.720	31.182	-0.165
100	714052.796823	4422296.605412	621.189267	84.825	6.202	3.202
100	714063.366175	4422298.008304	622.101070	84.842	4.717	3.379
100	714071.044436	4422301.343747	584.891124	84.845	4.459	3.410
100	714083.784678	4422304.457779	585.203092	14.275	4.459	3.409
100	714107.912244	4422336.357847	621.741528	266.676	36.504	12.214
100	714069.867417	4422341.109277	598.170588	214.957	46.014	-3.073
100	714027.515891	4422358.539210	603.836704	187.258	49.092	12.417
100	713972.033084	4422319.447613	588.992571	125.514	62.286	15.727
100	714102.704796	4422158.215671	571.243355	332.399	83.818	-9.231
100	714074.078256	4422256.476895	561.473587	332.397	83.819	-9.233

Ilustración 27: Posicionamiento cámaras para animación - Fuente: Elaboración propia

Con cada punto establecido, ajusté cuidadosamente la orientación y el zoom de la cámara, asegurándome de que cada vista capturara la esencia del modelo. La transición entre los puntos clave se configuró para ser fluida, lo que me permitió obtener una visualización continua y detallada del modelo.

Finalmente, en la etapa de renderizado, seleccioné una calidad de 4K a 100 fps, buscando no solo precisión, sino también una calidad visual impresionante. El resultado fue una animación que no solo destacaba la meticulosidad del modelo 3D, sino que también brindaba una perspectiva dinámica y envolvente del Castillo de Gaibiel.

5. RESULTADOS

La adquisición de datos del Castillo de Gaibiel culminó con una recolección exitosa de 175 imágenes a una altura de vuelo promedio de 20.5 metros, proporcionando una resolución de suelo de 6.98 mm/pix y cubriendo un área total de 1.64e+03 m².

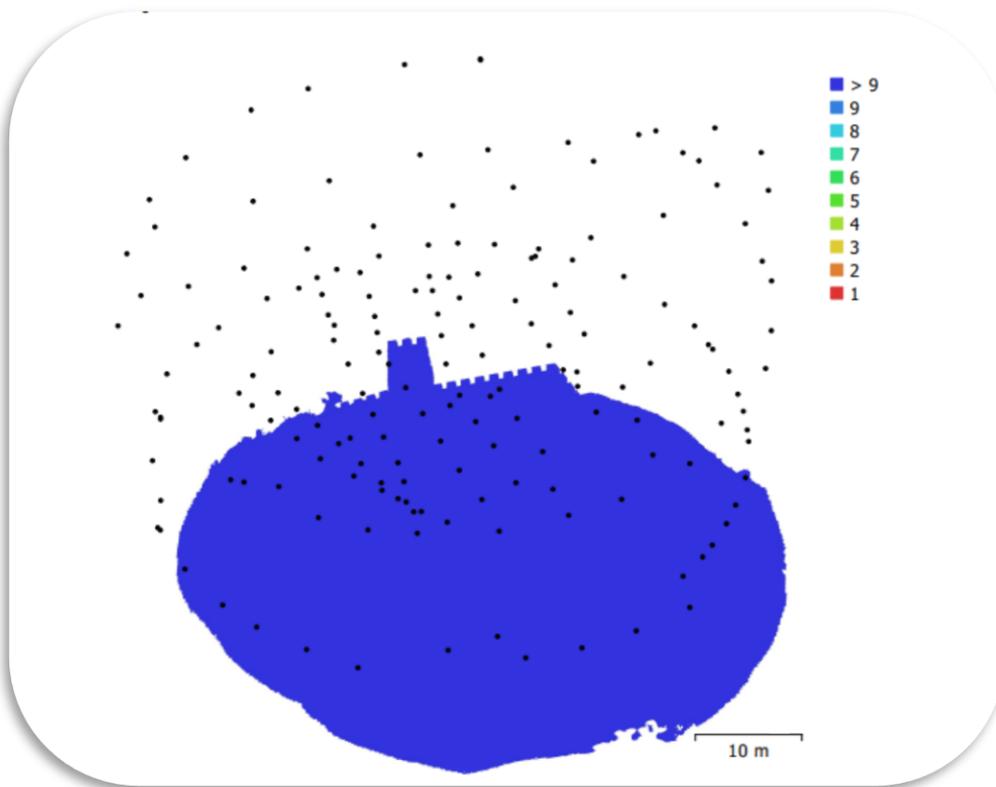


Ilustración 28: Cantidad de redundancia del modelo - Fuente. Elaboración propia

La precisión del posicionamiento de la cámara, con un error de reproyección promedio de 0.408 pix, refleja la alta calidad de las imágenes capturadas y la eficacia del algoritmo de alineación utilizado. La calibración de la cámara se realizó satisfactoriamente, ajustando la longitud focal y los parámetros de distorsión, lo que garantiza la confiabilidad del modelo 3D resultante.

Number of images:	175	Camera stations:	175
Flying altitude:	20.5 m	Tie points:	143,966
Ground resolution:	6.98 mm/pix	Projections:	607,846
Coverage area:	1.64e+03 m ²	Reprojection error:	0.408 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8mm)	4864 x 3648	8.8 mm	2.61 x 2.61 μm	No

Ilustración 29: Datos de calidad del modelo - Elaboración propia

La generación de mapas de profundidad con parámetros de calidad ultra alta y un modo de filtrado agresivo permitió la reconstrucción de un modelo digital de elevación (DEM) con una resolución de 1.16 cm/pix, mostrando la superficie del terreno con gran detalle y permitiendo un análisis topográfico preciso.

Digital Elevation Model

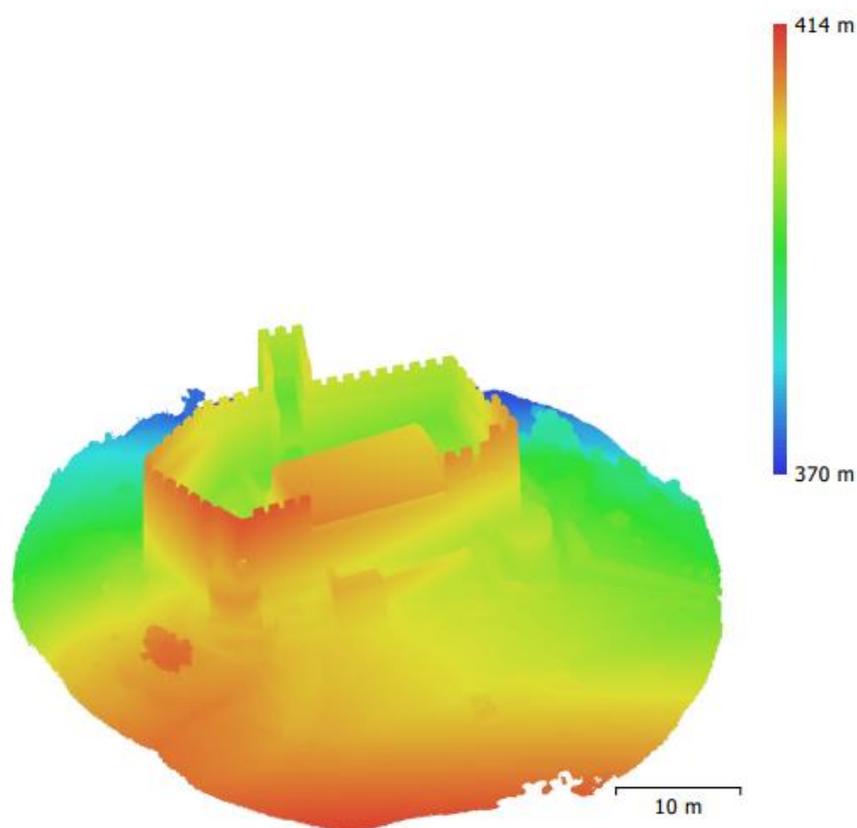


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 1.16 cm/pix
Point density: 0.74 points/cm²

Ilustración 30: Resolución y densidad del DEM - Fuente: Elaboración propia

El procesamiento generó una nube de puntos de paso detallada con 143,966 puntos y 607,846 proyecciones, lo que demuestra una cobertura exhaustiva y múltiples observaciones de cada punto de interés. Este nivel de detalle es esencial para crear representaciones tridimensionales precisas y completas del sitio histórico.

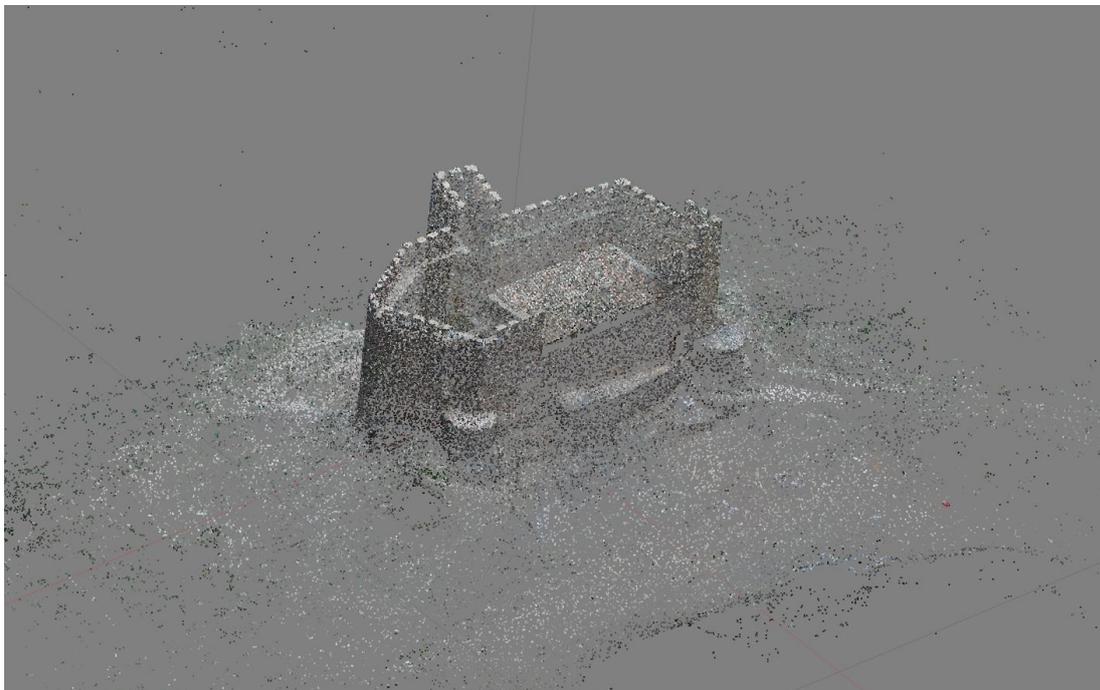


Ilustración 31: Nube de puntos de paso - Fuente Elaboración propia

El modelo finalizado ofrece una visualización detallada y texturizada del castillo, con un archivo de gran tamaño que confirma la riqueza de los datos y la minuciosidad del procesamiento aplicado. La modelización proporciona no solo un archivo de valor patrimonial sino también un recurso analítico para futuras intervenciones de conservación.



Ilustración 32: Modelo 3D Texturizado - Fuente: Elaboración propia

Incorporando los resultados de la validación de puntos de control terrestre (GCP), se observó una distribución homogénea y precisa de los puntos de verificación en el modelo. La exactitud en la ubicación de estos puntos es crucial para garantizar la fiabilidad del modelo en futuras aplicaciones, como la planificación de conservación y análisis arquitectónico.

Ground Control Points

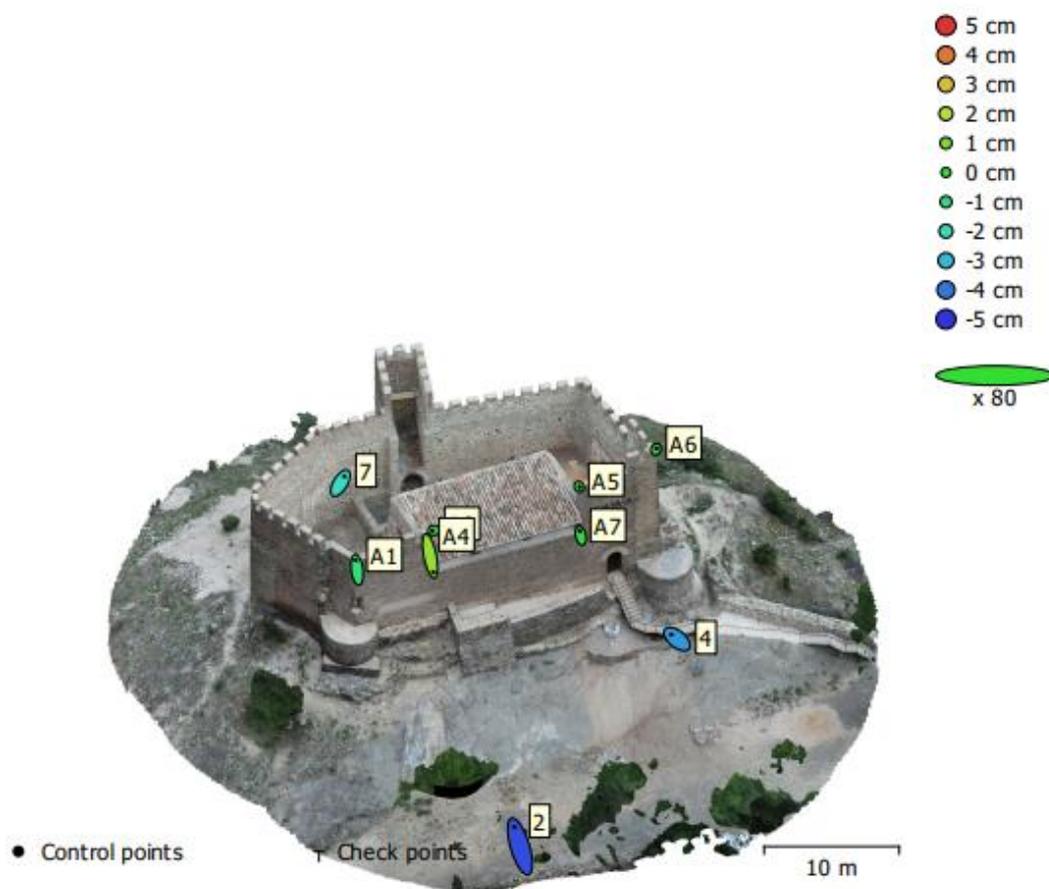


Ilustración 33: Error en puntos de apoyo - Fuente: Elaboración propia

La tabla detallada de errores para cada GCP revela una precisión extraordinaria en las coordenadas X, Y y Z, contribuyendo a la validación del modelo 3D. Los errores se mantienen dentro de un rango que confirma la precisión del levantamiento y la efectividad de la integración de datos entre la estación total, el GNSS y el procesamiento fotogramétrico.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
9	0.598957	1.76912	2.13836	1.86776	2.83921

Ilustración 34: Error total de precisión en marcadores - Fuente: Elaboración propia

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
A1	-0.22474	1.80238	-0.984551	2.06602	1.867 (56)
A2	-0.215315	-0.0543801	-0.00667519	0.222176	1.171 (58)
A4	0.59693	-3.00166	1.39525	3.36348	3.402 (34)
A5	0.0536592	-0.0703855	-0.0447558	0.0991792	0.745 (55)
A6	0.0581516	0.161093	-0.0884652	0.192766	0.804 (57)
A7	-0.18479	0.832644	-0.235742	0.884883	2.253 (34)
2	-1.06077	3.59654	-4.59889	5.93381	0.681 (30)
4	-1.02505	0.831354	-3.51145	3.75129	0.870 (44)
7	0.747781	1.24739	-2.16607	2.60903	0.409 (44)
Total	0.598957	1.76912	2.13836	2.83921	1.529

Ilustración 35: Error de cada marcador - Fuente: Elaboración propia

Estos resultados refuerzan la viabilidad de la fotogrametría aérea como herramienta para la documentación y conservación del patrimonio histórico, proporcionando datos precisos y detallados que son esenciales para cualquier trabajo de reconstrucción o restauración arquitectónica.

6. PRESUPUESTO

Recursos Humanos:

- **Ingeniero en Geomática y Topografía:**
 - **Remuneración:** La experiencia y la pericia técnica se valoran a 250€ por día laborable.
 - **Total para 5 días:** Este experto dirigirá y supervisará todos los aspectos técnicos del proyecto, lo que acumula un total de 1.250€.

Equipamiento Técnico:

- **Dron DJI Phantom 4 Pro:**
 - **Alquiler:** Esencial para la captura de imágenes aéreas, el dron tiene un coste de alquiler diario de 100€.
- **GNSS Leica Zeno FLX100 Smart Antenna:**
 - **Alquiler:** Fundamental para la georreferenciación precisa, el alquiler diario se estima en 100€.
- **Estación Total Leica TS02:**
 - **Alquiler:** Proporciona medidas de apoyo terrestre con alta precisión, con un alquiler diario de 55€.

Software de Procesamiento:

- **Agisoft Metashape Professional:**
 - **Licencia anual:** Con un costo anual de 3.150€, se distribuye en un costo diario de uso de 12,60€ para la duración del proyecto.

Logística:

- **Transporte y Combustible:**
 - **Costos de desplazamiento:** Se estima un total de 100€ para cubrir el transporte y el combustible necesario para el día de trabajo en campo.

Desglose y Totalización de Costos:

Concepto	Costo Unitario	Cantidad	Subtotal
Ingeniero en Geomática	250€/día	5 días	1.250€
Dron DJI Phantom 4 Pro	100€/día	1 día	100€
GNSS Leica Zeno FLX100	100€/día	1 día	100€
Estación Total Leica TS02	55€/día	1 día	55€
Software Agisoft Metashape	12,60€/día	5 días	63€
Transporte y Combustible	100€/total	1 día	100€
Subtotal			1.668€
Beneficio Industrial (25%)			417€
Total antes de IVA			2.085€
IVA (21%)			437,85€
Presupuesto Total			2.522,85€

Tabla 2: Presupuesto - Fuente: Elaboración propia

7. CONCLUSIONES

En la culminación de este proyecto, se ha evidenciado la accesibilidad y el poder de las tecnologías emergentes en el campo de la geomática y la topografía. La experiencia de manejar un dron de alta capacidad, utilizar una antena GPS precisa, trabajar con una estación total avanzada y aplicar software especializado ha sido reveladora. Ha demostrado de manera práctica la preparación sólida y la versatilidad que poseemos como ingenieros al finalizar nuestros estudios para abordar y ejecutar proyectos tan complejos como este.

La aplicación de la fotogrametría aérea ha probado ser una metodología excepcionalmente eficiente para este proyecto, reafirmando su valor cuando se requiere una precisión meticulosa y cuando las condiciones del terreno son propicias para el vuelo de drones, sin restricciones legales o físicas que lo impidan.

Los resultados obtenidos han superado las expectativas iniciales. La combinación de un dron equipado con una cámara de alto rendimiento, una extensa serie de imágenes aéreas, la georreferenciación precisa mediante GPS y la ejecución de un flujo de trabajo detallado en "Agisoft Metashape Professional" ha resultado en un modelo 3D de texturas ricas y una notable precisión de 2,7 centímetros.

Este proyecto ha sido una oportunidad no solo para dominar el proceso de captura de datos y la secuencia de trabajo en Metashape, sino también para explorar áreas adicionales como la visualización del modelo 3D mediante renderización en vídeo.

Para futuras iniciativas, consideraría la posibilidad de incorporar tecnologías avanzadas de seguimiento en tiempo real durante los vuelos para mejorar aún más la precisión y eficiencia en la recopilación de datos. Asimismo, la exploración de software adicional que pueda ofrecer algoritmos de procesamiento más rápidos o resultados más detallados podría ser una valiosa adición al flujo de trabajo actual.

Los conocimientos y habilidades adquiridos abren un nuevo abanico de posibilidades profesionales, aumentando mi interés en continuar trabajando con drones y modelado 3D, ya sea colaborando con empresas especializadas o emprendiendo iniciativas propias.

Además, este tipo de proyectos tiene el potencial de aportar beneficios sociales significativos, como la promoción del turismo a través de la mejora de la experiencia de visitar sitios de interés como el Castillo de Gaibiel, enriqueciendo la oferta cultural y educativa. De igual manera, esta tecnología puede tener un impacto positivo en la conservación y el estudio del medio ambiente, facilitando el mapeo de áreas naturales y el monitoreo de especies tanto animales como vegetales para su protección y estudio.

En definitiva, la realización de este proyecto ha sido una valiosa experiencia de aprendizaje y un claro ejemplo del potencial que la fotogrametría aérea ofrece en una variedad de campos. Al superar las expectativas establecidas, abre caminos hacia la innovación en la recopilación de datos geoespaciales y refuerza el papel fundamental de la tecnología de drones en la ingeniería geomática y la topografía moderna. La posibilidad de aplicar estos conocimientos en futuros proyectos personales o colaborativos me motiva a seguir explorando y expandiendo los horizontes de esta disciplina apasionante.

8. BIBLIOGRAFIA

1. Instituto Geográfico Nacional. (2020). *Introducción a la fotogrametría*. Recuperado de [sitio web del IGN](#).
2. DJI Technology Co., Ltd. (2021). *Phantom 4 Pro V2.0 - Manual del usuario*. Recuperado de [sitio web oficial de DJI](#).
3. Leica Geosystems. (2019). *Estaciones totales Leica - Guía de selección y uso*. Recuperado de [sitio web de Leica Geosystems](#).
4. Comunidad Valenciana. (2018). *Castillo de Gaibiel: Historia y conservación*. Recuperado de [Portal de Turismo de la Comunidad Valenciana](#).
5. Agisoft LLC. (2021). *Agisoft Metashape Professional: Guía de procesamiento fotogramétrico*. Recuperado de [foro de Agisoft](#).
6. Consejería de Educación, Cultura y Deportes. (2022). *Patrimonio cultural de Castilla-La Mancha: El Castillo de Gaibiel*. Recuperado de [sitio web de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha](#).
7. Real Academia de la Ingeniería. (2021). *Diccionario de términos de topografía y cartografía*. Recuperado de [sitio web de la RAI](#).
8. Centro Nacional de Información Geográfica. (2022). *Sistemas de Información Geográfica aplicados al patrimonio*. Recuperado de [sitio web del CNIG](#).

9. CARTOGRAFIA

714040

714050

714060

714070

714080

4422330

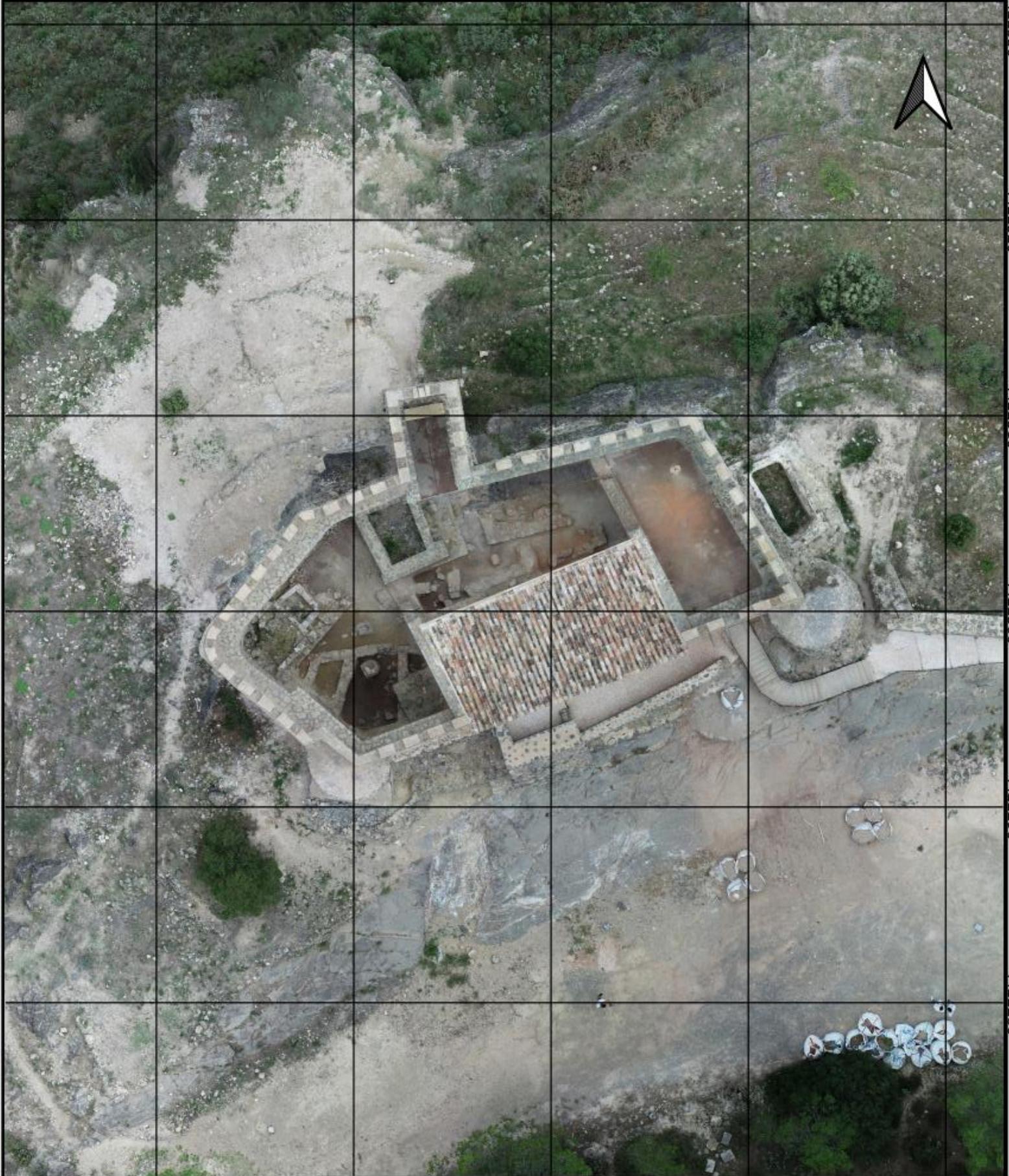
4422320

4422310

4422300

4422290

4422280



Título plano:
CARTOGRAFÍA ORTOMOSAICO

Sistema de referencia: ETRS89
 Proyeccion: UTM ZONA30

ESCALA 1:250 (A4)
 0 5 10 15 m



Título proyecto:
**Fotogrametría Aérea y Georreferenciación Precisa:
 Desarrollo de un Modelo Tridimensional Avanzado del
 Castillo de Gaibiel mediante RPAS**

Fecha:
 2023

714040

714050

714060

714070

714080

4422330

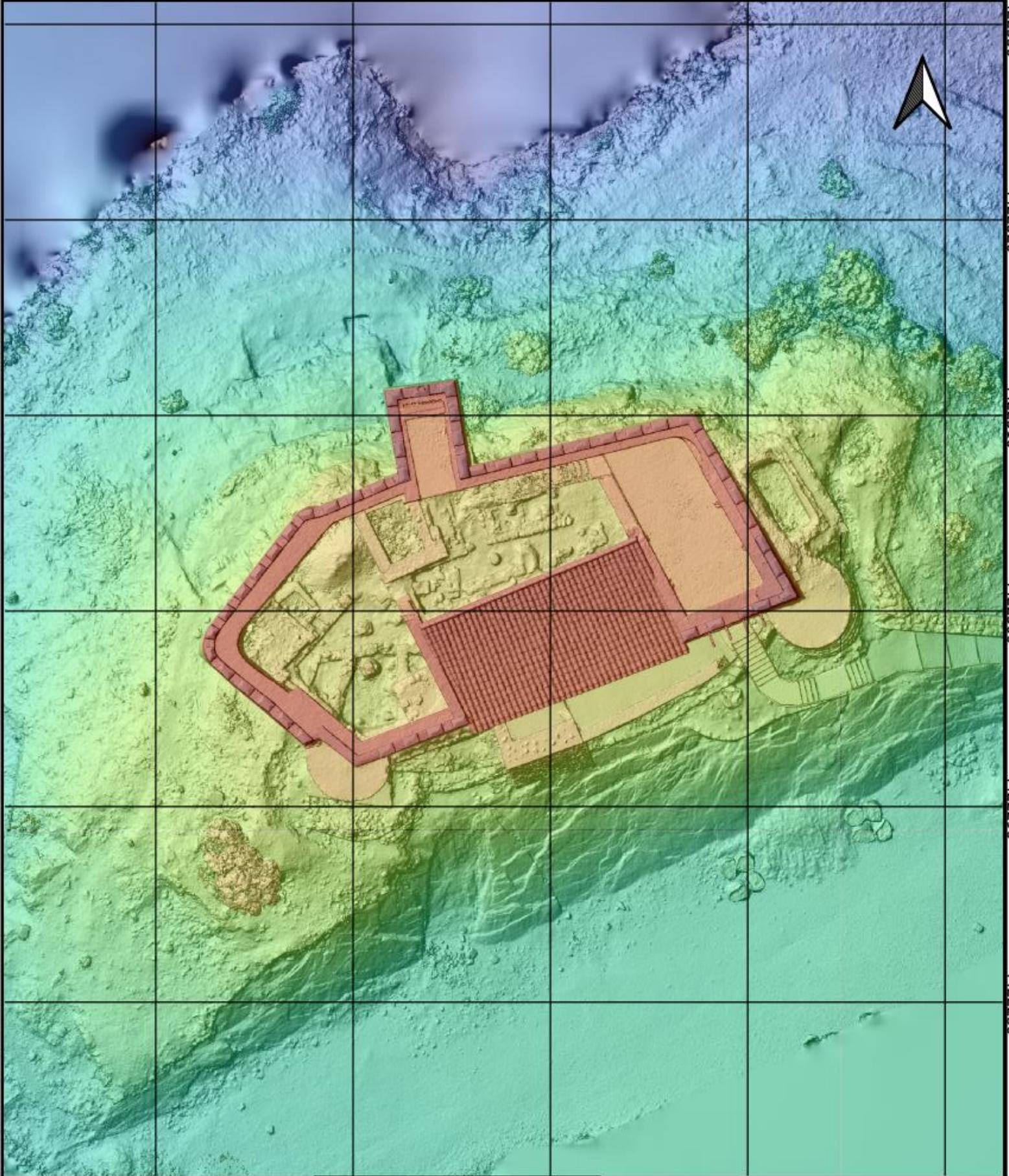
4422320

4422310

4422300

4422290

4422280



Título plano:

CARTOGRAFÍA DEM

Sistema de referencia: ETRS89

Proyeccion: UTM ZONA30

ESCALA 1:250 (A4)

0 5 10 15 m



Título proyecto:

Fotogrametría Aérea y Georreferenciación Precisa:
Desarrollo de un Modelo Tridimensional Avanzado del
Castillo de Gaibiel mediante RPAS

Fecha:

2023



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

10. ANEXOS

Anexo

Processing Report

13 November 2023



Survey Data

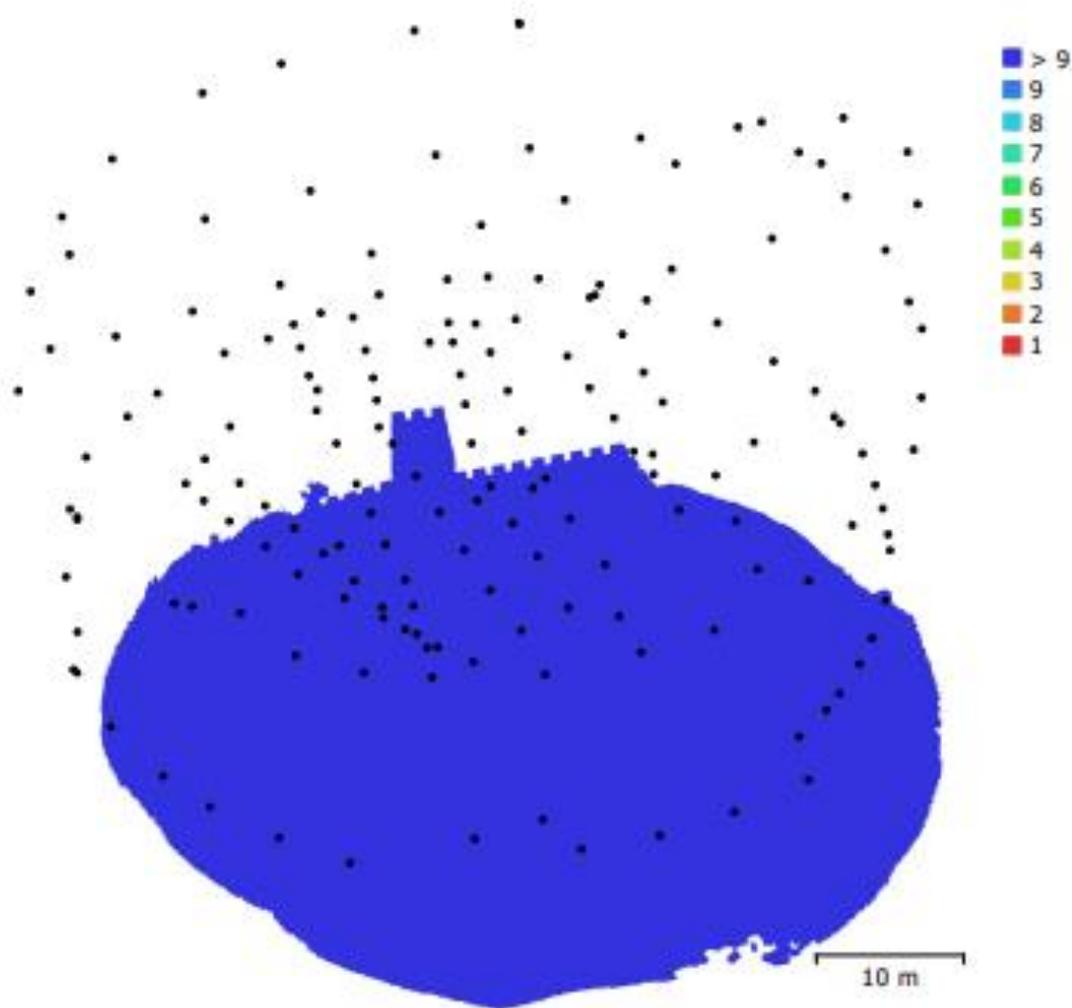


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	175	Camera stations:	175
Flying altitude:	20.5 m	Tie points:	143,966
Ground resolution:	6.98 mm/pix	Projections:	607,846
Coverage area:	1.64e+03 m ²	Reprojection error:	0.408 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8mm)	4864 x 3648	8.8 mm	2.61 x 2.61 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

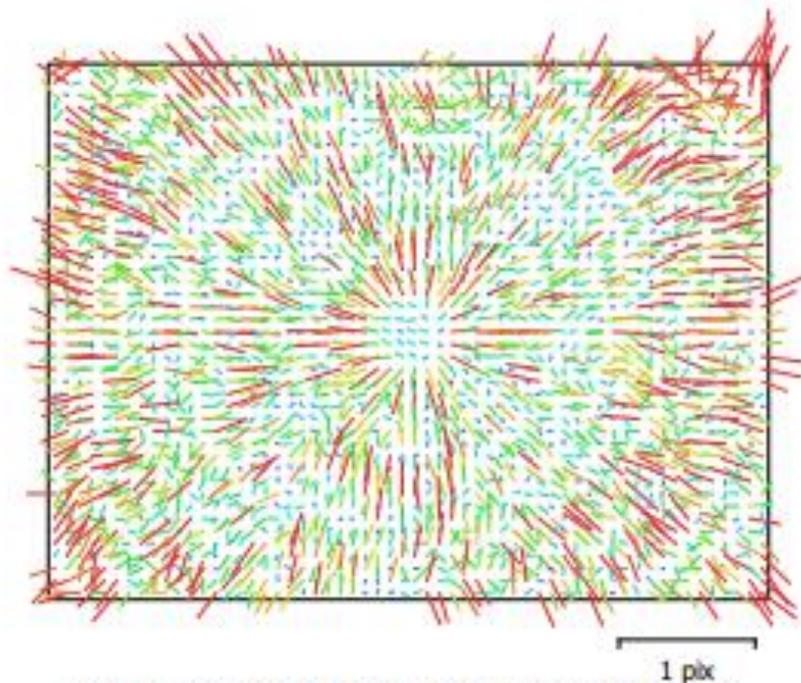


Fig. 2. Image residuals for FC6310 (8.8mm).

FC6310 (8.8mm)

175 images

Type

Resolution

Focal Length

Pixel Size

Frame

4864 x 3648

8.8 mm

2.61 x 2.61 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3696.78	0.032	1.00	0.06	-0.08	-0.25	0.25	-0.20	0.01	-0.09
Cx	-40.536	0.017		1.00	-0.04	-0.02	0.01	-0.00	0.90	-0.04
Cy	-13.2512	0.013			1.00	-0.01	0.01	-0.01	-0.04	0.83
K1	-0.0129807	2.5e-05				1.00	-0.96	0.90	-0.02	-0.01
K2	-0.00214492	8.7e-05					1.00	-0.98	0.01	0.01
K3	0.0122227	9.3e-05						1.00	-0.01	-0.01
P1	-0.00266263	1.6e-06							1.00	-0.03
P2	-0.00212879	1.3e-06								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

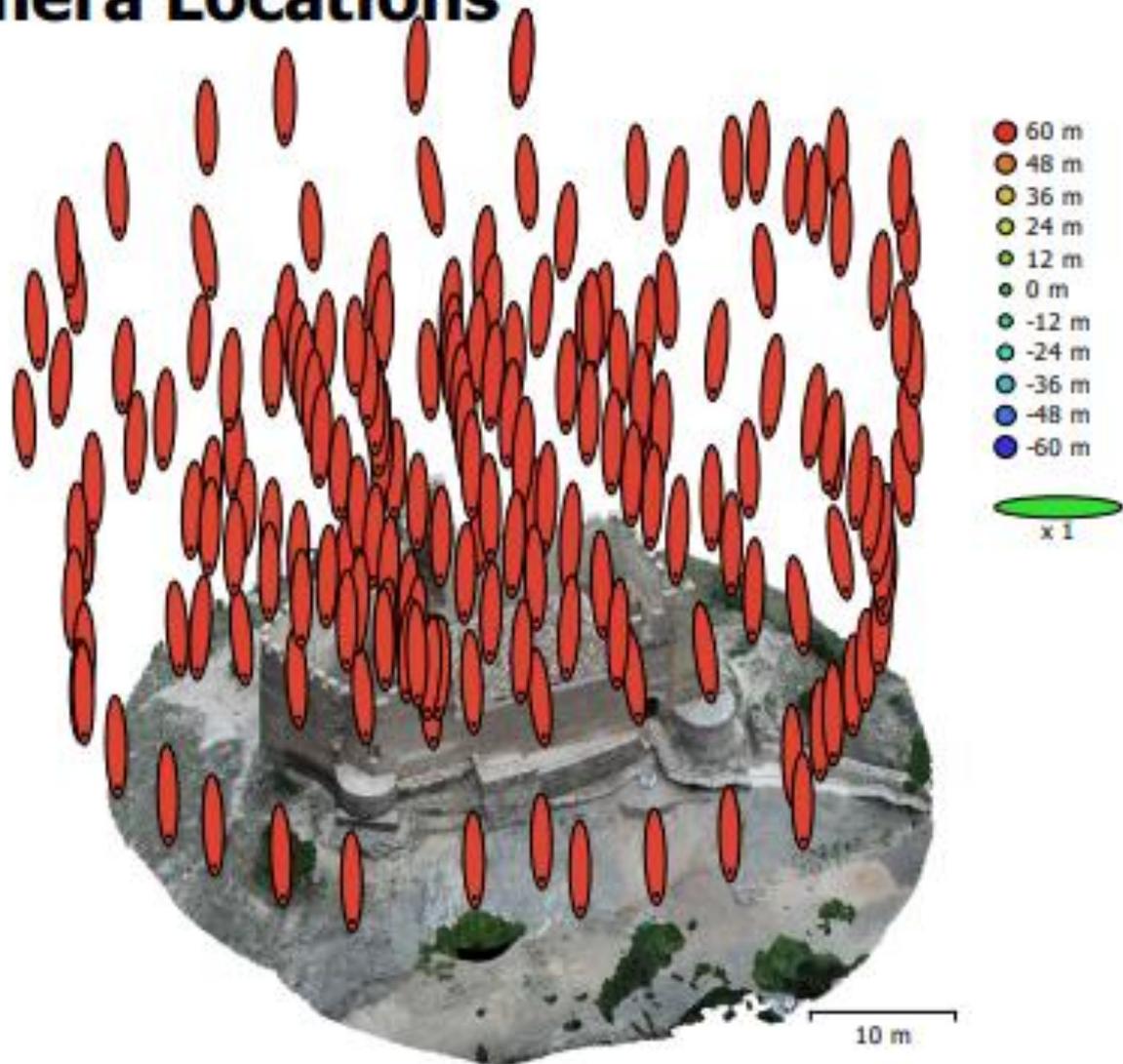


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.292137	5.58372	57.2337	5.59136	57.5061

Table 3. Average camera location error.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

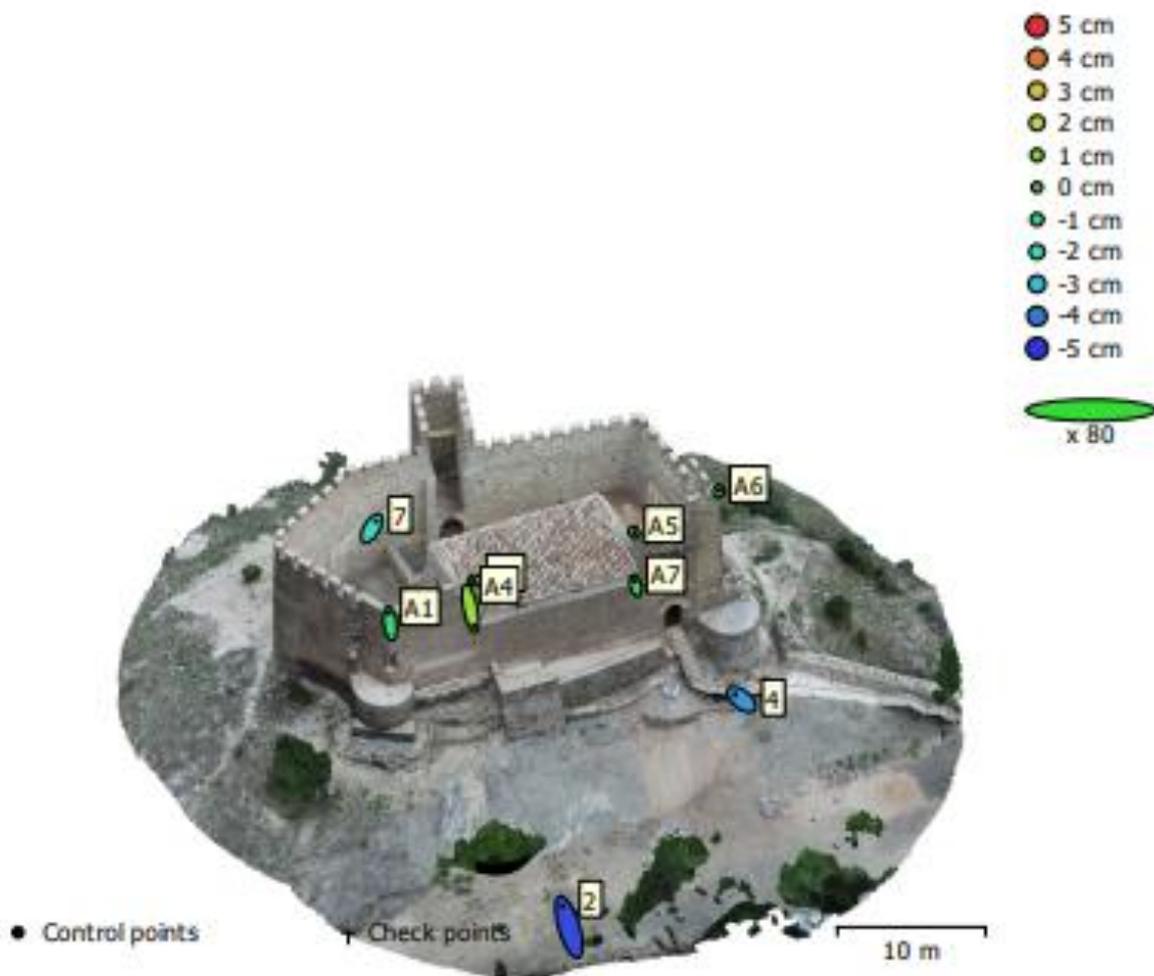


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
9	0.598957	1.76912	2.13836	1.86776	2.83921

Table 4. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
A1	-0.22474	1.80238	-0.984551	2.06602	1.867 (56)
A2	-0.215315	-0.0543801	-0.00667519	0.222176	1.171 (58)
A4	0.59693	-3.00166	1.39525	3.36348	3.402 (34)
A5	0.0536592	-0.0703855	-0.0447558	0.0991792	0.745 (55)
A6	0.0581516	0.161093	-0.0884652	0.192766	0.804 (57)
A7	-0.18479	0.832644	-0.235742	0.884883	2.253 (34)
2	-1.06077	3.59654	-4.59889	5.93381	0.681 (30)
4	-1.02505	0.831354	-3.51145	3.75129	0.870 (44)
7	0.747781	1.24739	-2.16607	2.60903	0.409 (44)
Total	0.598957	1.76912	2.13836	2.83921	1.529

Table 5. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

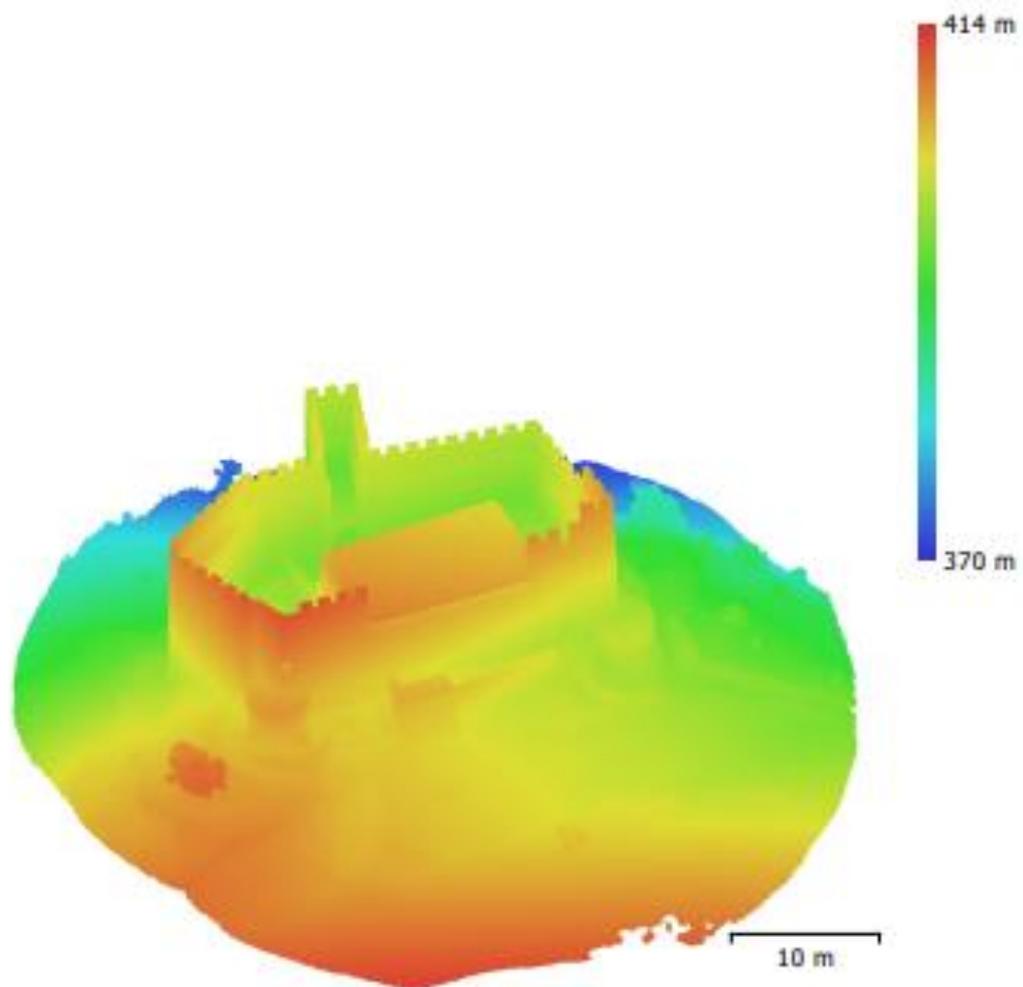


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 1.16 cm/pix
Point density: 0.74 points/cm²

Processing Parameters

General

Cameras	175
Aligned cameras	175
Markers	9
Coordinate system	ETRS89 / UTM zone 30N (EPSG::25830)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Tie Points

Points	143,966 of 163,921
RMS reprojection error	0.184327 (0.407963 pix)
Max reprojection error	0.64698 (19.2667 pix)
Mean key point size	2.05257 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	4.38711

Alignment parameters

Accuracy	Highest
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	20,000
Key point limit per Mpx	1,000
Tie point limit	4,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	1 minutes 3 seconds
Matching memory usage	260.73 MB
Alignment time	49 seconds
Alignment memory usage	104.22 MB

Optimization parameters

Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	1 seconds
Date created	2023:10:15 15:12:14
Software version	2.0.0.15597
File size	14.76 MB

Depth Maps

Count	175
Depth maps generation parameters	
Quality	Ultra High
Filtering mode	Aggressive
Max neighbors	16
Processing time	25 minutes 6 seconds
Memory usage	13.24 GB
Date created	2023:11:12 00:49:05
Software version	2.0.0.15597
File size	3.84 GB

Point Cloud

Points	138,907,085
Point attributes	
Position	
Color	3 bands, uint8
Normal	
Point classes	
Created (never classified)	138,907,085
Depth maps generation parameters	
Quality	Ultra High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	28 minutes 16 seconds
Memory usage	11.59 GB
Point cloud generation parameters	
Processing time	3 hours 6 minutes
Memory usage	22.57 GB
Date created	2023:10:15 21:57:37
Software version	2.0.0.15597
File size	3.05 GB
Model	
Faces	21,705,008
Vertices	10,859,368
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	16,384 x 16,384, 4 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	Ultra High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	28 minutes 16 seconds
Memory usage	11.59 GB
Reconstruction parameters	
Surface type	Arbitrary
Source data	Depth maps
Interpolation	Enabled
Strict volumetric masks	No
Processing time	55 minutes 22 seconds
Memory usage	14.24 GB
Texturing parameters	
Mapping mode	Generic
Blending mode	Mosaic
Texture size	16,384
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
UV mapping time	6 minutes 6 seconds
UV mapping memory usage	4.97 GB
Blending time	34 minutes 8 seconds
Blending memory usage	20.46 GB
Date created	2023:10:15 16:36:22
Software version	2.0.0.15597
File size	1.23 GB
Tiled Model	
Texture	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	

Quality	Ultra High
Filtering mode	Aggressive
Max neighbors	16
Processing time	25 minutes 6 seconds
Memory usage	13.24 GB
Reconstruction parameters	
Source data	Depth maps
Tile size	256
Face count	High
Enable ghosting filter	Yes
Processing time	1 hours 38 minutes
Memory usage	14.67 GB
Date created	2023:11:12 16:16:44
Software version	2.0.0.15597
File size	546.45 MB
Orthomosaic	
Size	8,171 x 8,175
Coordinate system	ETRS89 / UTM zone 30N (EPSG::25830)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	Mesh
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	10 minutes 27 seconds
Memory usage	1.89 GB
Date created	2023:11:12 13:13:44
Software version	2.0.0.15597
File size	2.22 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2.0.0 build 15597
OS	Windows 64 bit
RAM	31.88 GB
CPU	11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11600KF @ 3.90GHz
GPU(s)	NVIDIA GeForce RTX 3070 Ti

ID	Coordenada X	Coordenada Y	Altitud	Error (m)
2	714061.912	4422279.617	545.178	0.02/0.03
4	714073.547	4422295.408	549.459	0.02/0.03
7	714049.323	4422317.713	543.156	0.02/0.03
A1	714050.179	4422292.051	560.976	0.005
A2	714055.862	4422294.274	561.823	0.005
A4	714055.902	4422294.2869	557.3651	0.005
A5	714066.7258	4422298.4258	562.2098	0.005
A6	714072.4226	4422300.7477	563.935	0.005
A7	714066.7487	4422298.411	557.4452	0.005

Tabla 3: Puntos de apoyo - Fuente: Elaboración propia