



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



Análisis comparativo de productos geospaciales en fotogrametría con UAV con distintos tipos de vuelo

POR

Esteban Andrés Bustos Muñoz

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía

Ramón Díaz Noriega

Profesor Co-Guía

Julio Manuel de Luis Ruiz

Marzo 2024

Concepción (Chile)

© 2024 Esteban Andrés Bustos Muñoz

© 2024 Esteban Andrés Bustos Muñoz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta memoria.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, César Bustos y Ángela Muñoz, cuyo sacrificio y apoyo incondicional han sido fundamentales en mi formación académica. Gracias a su esfuerzo y dedicación, he podido estudiar una carrera universitaria y, además, realizar una pasantía internacional en la Universidad de Cantabria, España. Ellos han sido uno de los motores que impulsaron cada logro en este proceso. Gracias por su confianza en mí, por demostrarme que con disciplina y esfuerzo puedo conseguir cualquier objetivo que me proponga, les estoy eternamente agradecido.

Agradezco de todo corazón a mi querida Josefina Vera, quien ha estado conmigo desde el colegio y ha sido mi apoyo constante a lo largo de mi recorrido universitario, a pesar de la distancia. Agradecer por entregarme su amor y apoyo incondicional en todas las decisiones que he tomado y por las incontables horas de estudio que tenemos juntos, sus palabras de aliento han sido fundamentales para alcanzar este logro, que también es de ella.

Un agradecimiento especial a mi profesor guía, Ramón Díaz, por entregarme su apoyo, conocimientos y orientación para la realización de mi tesis. Por creer en mí como su memorista, tuve la oportunidad de llevar a cabo una enriquecedora pasantía por España. Su dedicación, compromiso y críticas constructivas han sido un factor determinante en mi formación académica, estoy profundamente agradecido por haberseme permitido aprender de tan destacado profesional y excelente persona

Asimismo, agradecer a los profesionales que me entregaron las herramientas para la realización de esta investigación en la Universidad de Cantabria, Don Julio Manuel de Luis Ruiz y Don Javier Sedano Cibrian, quienes me han orientado en este proceso y han estado siempre disponibles ante cualquier duda o problema. Gracias por haber hecho mi intercambio una instancia gratificante y acogedora.

Por último, agradecer a mis amigos, Vasco Flores, Sebastián Molina, Francisco Rivera, Verónica Gatica, Alex Riveros, Tylor Díaz, Iván Montecinos, Matías Contreras y Roberto Muñoz, por su apoyo académico, moral y motivacional. Además de hacer el paso por la universidad una experiencia inolvidable.

Resumen

La fotogrametría aérea ha sido una disciplina utilizada por décadas para la obtención de información geoespacial. Ha experimentado una transformación significativa en los últimos años gracias a la incorporación de tecnologías de drones y desarrollo de computadoras potentes y softwares especializados. Estos avances han provocado un cambio en la forma de captura de datos y permitido un acceso más asequible al desarrollo de proyectos geoespaciales. Además, computadoras más potentes en conjunto con softwares especializados han revolucionado la fotogrametría digital, permitiendo manejar un mayor conjunto de datos y, a su vez, mejorando la calidad y precisión de los modelos tridimensionales desarrollados.

El presente trabajo se enfoca en la evaluación y comparación de la calidad y precisión en un proyecto de fotogrametría digital con UAV en un área aproximada de $13.800 [m^2]$ perteneciente al Pozo Calero, España. Se exploran tres diferentes patrones de vuelo: tradicional, tradicional en dirección perpendicular y cuadrícula, siguiendo el proceso fotogramétrico tradicional en Agisoft Metashape y utilizando puntos de control con coordenadas conocidas se calcula el Error Medio Cuadrático (RMSE) de las coordenadas proyectadas para ser usado como métrica de evaluación. Los resultados revelan diferencias en la precisión espacial entre los diferentes enfoques de vuelo, en donde la pasada cuadrícula es la más precisa, pero, la que más tiempo de procesamiento y mayor uso de almacenamiento conlleva. Específicamente, en el plano XY (Norte-Este) y en la componente vertical (Altura, eje Z) se obtuvieron los siguientes valores de Error Cuadrático Medio en centímetros:

- Tradicional (XY, Z) = (4,07, 3,19)
- Perpendicular (XY, Z) = (6,47, 4,10)
- **Cuadrícula (XY, Z) = (2,45, 1,77)**

Los resultados indican que, de mayor a menor precisión, los patrones de vuelo se clasifican en el siguiente orden: cuadrícula, tradicional y tradicional en dirección perpendicular. Si bien la pasada cuadrícula muestra una ventaja de **1,62 cm en precisión en el plano XY y 1,42 cm en el plano vertical** en comparación con el enfoque de vuelo tradicional, es esencial tener en consideración que su implementación requiere un tiempo y almacenamiento aproximadamente el doble, por lo que es necesario encontrar un equilibrio entre la precisión y eficiencia, dependiendo de los requerimientos específicos de cada proyecto geoespacial. Tanto el patrón de vuelo como el tamaño del área a mapear influyen significativamente en el consumo de recursos y los tiempos de ejecución del proyecto.

Abstract

Aerial photogrammetry has been a discipline employed for decades in obtaining geospatial information. It has undergone significant transformation in recent years due to the integration of drone technologies and the development of powerful computers and specialized software. These advancements have brought about a shift in data capture methods, allowing more affordable access to the development of geospatial projects. Additionally, more powerful computers, coupled with specialized software, have revolutionized digital photogrammetry, enabling the handling of larger datasets and, consequently, enhancing the quality and precision of developed three-dimensional models.

This study focuses on the evaluation and comparison of quality and precision in a UAV-based digital photogrammetry project covering an approximate area of 13.800 [m^2] in Pozo Calero, Spain. Three different flight patterns are explored: traditional, traditional in a perpendicular direction, and grid. Following the traditional photogrammetric process in Agisoft Metashape and utilizing ground control points with known coordinates, the Root Mean Square Error (RMSE) of the projected coordinates is calculated as the evaluation metric. The results reveal differences in spatial precision among the various flight approaches, where the grid pattern proves to be the most precise, albeit requiring the highest processing time and storage usage. Specifically, in the XY plane (North-East) and in the vertical component (Height, Z-axis), the following RMSE values in centimeters were obtained:

- Traditional (XY, Z) = (4,07, 3,19)
- Perpendicular (XY, Z) = (6,47, 4,10)
- Grid (XY, Z) = (2,45, 1,77)

The results indicate, in terms of precision from highest to lowest, the flight patterns rank in the following order: grid, traditional, and traditional in a perpendicular direction. While the grid pattern shows a precision advantage of 1,62 cm in the XY plane and 1,42 cm in the vertical plane compared to the traditional flight approach, it is essential to consider that its implementation requires approximately double the processing time and storage. Thus, finding a balance between precision and efficiency is crucial, depending on the specific requirements of each geospatial project. Both the flight pattern and the size of the area to be mapped significantly influence resource consumption and project execution times.

Tabla de Contenidos

1. Introducción	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Área de Estudio.....	2
2. Estado del arte	3
2.1 Fotogrametría	3
2.1.1 Visión estereoscópica.....	4
2.1.2 Principio de colinealidad e Intersección Espacial	4
2.1.3 Orientación interna.....	5
2.1.4 Captura de imágenes	5
2.1.5 Orientación externa	6
2.2 Drones	7
2.2.1 Sensores en drones	8
2.3 Drones en Fotogrametría	9
2.3.1 Planificación de vuelo	9
2.3.2 Técnicas de vuelo.....	13
2.3.3 Puntos de apoyo.....	16
2.3.4 Consideraciones de seguridad y regulaciones para el vuelo de drones	17
2.3.5 Recomendaciones de como capturar imágenes	18
2.3.6 Calibración GPS drones	19
2.3.7 Sistemas de referencia.....	20
2.4 Agisoft Metashape.....	22
2.4.1 Nube de puntos	22
2.4.2 Malla.....	22
2.4.3 Modelo digital de elevaciones.....	23

2.4.4 Ortomosaico.....	23
2.5 Aplicaciones de la fotogrametría con drones en minería	24
2.5.1 Prospección minera.....	24
2.5.2 Topografía	24
2.5.3 Control de operaciones, stocks e inspección	25
2.5.4 Inspecciones	25
2.5.5 Prevención de riesgos laborales	25
2.5.6 Vigilancia	25
3. Metodología.....	26
3.1 Estudio bibliográfico	26
3.2 Plan de vuelo en Mission Planner	26
3.3 Puntos de control y de apoyo en tierra	28
3.4 Orientación y georreferenciación de imágenes	31
3.5 Generación de la nube de puntos	32
3.6 Creación malla	33
3.7 Generación de MDE	34
3.8 Generación Ortomosaico	35
3.9 Control de precisión.....	35
4. Resultados	37
5. Discusión	39
6. Conclusión	41
7. Bibliografía	43
8. Anexos.....	45

Lista de tablas

Tabla 1 Características técnicas dron EVO II pro.	26
Tabla 2 Características técnicas cámara incorporada.	27
Tabla 3 Características generales de los planes de vuelo.	28
Tabla 4 Coordenadas UTM puntos de apoyo.	29
Tabla 5 Coordenadas UTM puntos de control.	30
Tabla 6 Tiempo y espacio utilizados en la orientación de las imágenes.	31
Tabla 7 Tiempo y espacio utilizados en el procesamiento de la nube de puntos densa de los modelos.	32
Tabla 8 Tiempo y espacio utilizados en el procesamiento de la malla poligonal de los modelos.	33
Tabla 9 Tiempo y espacio utilizados en el procesamiento del MDE de los modelos.	34
Tabla 10 Tiempo y espacio utilizados en el procesamiento del Ortomosaico de los modelos.	35
Tabla 11 Coordenadas estimadas modelo pasada tradicional.	37
Tabla 12 Coordenadas estimadas modelo pasada tradicional en dirección perpendicular.	37
Tabla 13 Coordenadas estimadas modelo pasada cuadrangular.	37
Tabla 14 Error de precisión pasada tradicional.	38
Tabla 15 Error de precisión pasada tradicional en dirección perpendicular.	38
Tabla 16 Error de precisión pasada cuadrangular.	38
Tabla 17 Error medio cuadrático de cada dirección.	38
Tabla 18 Error cuadrático medio en plano XY de cada dirección.	38
Tabla 19 Tiempos de procesamiento por etapas de pasada tradicional y cuadrangular.	66
Tabla 20 Tamaño de almacenamiento de las nubes de puntos dispersa de las pasadas tradicional, perpendicular y cuadrangular.	67

Lista de figuras

Ilustración 1 Pozo Calero en Barruelo de Santullán. Extraído de “Centro de Interpretación de la Minería, Palencia.”	3
Ilustración 2 Principio de la visión estereoscópica. Extraído de " Contraste metodológico en los MDT realizados con drones. Universidad de Cantabria, España.”	4
Ilustración 3 Orientación relativa. Extraído de Tesis Universidad de Extremadura.	6
Ilustración 4 Partes de un fotograma. Extraído de "Fundamentos de fotogrametría, Universidad de la Rioja, España".	10
Ilustración 5 Relación de altura de vuelo. Extraído de Pix4d User Manual	10
Ilustración 6 Distancia base entre fotogramas. Extraído de "Fundamentos de fotogrametría, Universidad de la Rioja, España".	11
Ilustración 7 Patrón de Vuelo tradicional. Extraído de Pix4d User Manual.	13
Ilustración 8 Patrón de vuelo fotogramétrico circular. Extraído de Pix4d User Manual	14
Ilustración 9 Patrones de vuelo de dos líneas y una sola pasada. Extraído de Pix4d User Manual ...	14
Ilustración 10 Superposición entre planes de vuelo. Extraído de Pix4d User Manual	15
Ilustración 11 Plan de vuelo en cuadrícula, extraído de Pix4d User Manual	15
Ilustración 12 Tipos de vuelo en zonas con desnivel. Extraído de Tesis de Universidad de el Salvador.	16
Ilustración 13 Tipos de marca utilizadas como GCP. Extraído de Pix4d User Manual	16
Ilustración 14 Problemas de fotografías por parámetros erróneos de configuración de cámara o mal uso. Extraído de Pix4d User Manual.....	19
Ilustración 15 Husos que representan el área geográfica de la península Ibérica. Extraído de Tesis Universidad de Extremadura.	21
Ilustración 16 Nube de puntos. Elaboración propia.	22
Ilustración 17 Malla poligonal. Elaboración propia.	22
Ilustración 18 Modelo digital de elevaciones. Elaboración propia.	23
Ilustración 19 Ortomosaico. Elaboración propia.....	23
Ilustración 20 Planes de vuelo fotogramétrico tradicional, tradicional en dirección perpendicular y cuadrícula regular. Elaboración propia.....	28
Ilustración 21 Disposición de los puntos de apoyo. Elaboración propia.....	29
Ilustración 22 Disposición puntos de control de precisión. Elaboración propia.	30

Ilustración 23 Nube de puntos dispersa pasada tradicional, perpendicular y cuadrícula, respectivamente. Elaboración propia.	31
Ilustración 24 Nube de puntos densa pasada tradicional, perpendicular y cuadrícula, respectivamente. Elaboración propia.	32
Ilustración 25 Malla texturizada pasada tradicional, perpendicular y cuadrícula, respectivamente. Elaboración propia.	33
Ilustración 26 Modelo digital de elevaciones pasada cuadrícula con su respectiva leyenda. Elaboración propia.	34
Ilustración 27 Ortomosaico resultante de la pasada cuadrícula regular. Elaboración propia.	35
Ilustración 28 Selección del polígono en el área de interés en Mission Planner. Elaboración propia.	45
Ilustración 29 Ingreso de parámetros de la cámara utilizada. Elaboración propia.	45
Ilustración 30 Parámetros generales y estadísticas del proyecto de vuelo fotogramétrico con pasada tradicional en Mission Planner. Elaboración propia.	46
Ilustración 31 Parámetros generales y estadísticas del proyecto de vuelo fotogramétrico con pasada en dirección perpendicular en Mission Planner. Elaboración propia.	46
Ilustración 32 Parámetros generales y estadísticas del proyecto de vuelo fotogramétrico con pasada cuadrícula regular en Mission Planner. Elaboración propia.	47
Ilustración 33 Características internas de las imágenes resultantes. Elaboración propia.	47
Ilustración 34 Ubicación estimada de cada fotografía una vez importadas en Metashape. Elaboración propia.	48
Ilustración 35 Transformación de coordenadas a UTM. Elaboración propia.	49
Ilustración 36 Orientación de imágenes baja calidad en Metashape. Elaboración propia.	49
Ilustración 37 Resultado de la orientación en baja calidad pasada tradicional, perpendicular y cuadrícula, respectivamente. Elaboración propia.	50
Ilustración 38 Importación de puntos de apoyo para georreferenciación en Metashape. Elaboración propia.	50
Ilustración 39 Paso para importar puntos de apoyo para georreferenciación en Metashape. Elaboración propia.	50
Ilustración 40 Desfase eje z entre modelo y los puntos de apoyo. Elaboración propia.	51
Ilustración 41 Pasos para ajustar manualmente los puntos de apoyo. Elaboración propia.	51
Ilustración 42 Ajuste manual de los puntos de apoyo en las imágenes. Elaboración propia.	51

Ilustración 43 Orientación de imágenes en alta calidad Agisoft Metashape. Elaboración propia.	52
Ilustración 44 Nube de puntos dispersa, patrón de vuelo tradicional. Elaboración propia.	52
Ilustración 45 Nube de puntos dispersa, patrón de vuelo tradicional en dirección perpendicular. Elaboración propia.	52
Ilustración 46 Nube de puntos dispersa, patrón de vuelo en cuadrícula. Elaboración propia.	53
Ilustración 47 Creación nube de puntos densa alta calidad en Agisoft Metashape. Elaboración Propia.	54
Ilustración 48 Vistas nube de puntos densa pasada regular. Elaboración propia.	54
Ilustración 49 Vistas nube de puntos densa pasada en dirección perpendicular. Elaboración propia.	54
Ilustración 50 Vistas nube de puntos densa pasada cuadrícula. Elaboración propia.	55
Ilustración 51 Creación de malla poligonal de alta calidad en Agisoft Metashape. Elaboración propia.	56
Ilustración 52 Vistas malla texturizada pasada regular. Elaboración propia.	56
Ilustración 53 Vistas malla de triángulos pasada regular. Elaboración propia.	56
Ilustración 54 Vistas de malla texturizada pasada regular de acuerdo a su nivel de confianza. Elaboración propia.	57
Ilustración 55 Vistas malla texturizada pasada en dirección perpendicular. Elaboración propia.	57
Ilustración 56 Vistas malla de triángulos pasada en dirección perpendicular. Elaboración propia.	57
Ilustración 57 Vistas de malla texturizada pasada en dirección perpendicular de acuerdo a su nivel de confianza. Elaboración propia.	57
Ilustración 58 Vistas malla texturizada pasada cuadrícula. Elaboración propia.	58
Ilustración 59 Vistas malla de triángulos pasada cuadrícula. Elaboración propia.	58
Ilustración 60 Vistas de malla texturizada pasada cuadrícula de acuerdo a su nivel de confianza. Elaboración propia.	58
Ilustración 61 Creación modelo digital de elevaciones en Agisoft Metashape. Elaboración propia.	59
Ilustración 62 Vistas Modelo digital de elevaciones pasada regular. Elaboración propia.	59
Ilustración 63 Vistas Modelo digital de elevaciones pasada regular en dirección perpendicular. Elaboración propia.	60
Ilustración 64 Vistas Modelo digital de elevaciones pasada cuadrícula. Elaboración propia.	60
Ilustración 65 Creación de ortomosaico en Agisoft Metashape. Elaboración propia.	61
Ilustración 66 Ortomosaico pasada regular. Elaboración propia.	61
Ilustración 67 Ortomosaico pasada regular en dirección perpendicular. Elaboración propia.	62

Ilustración 68 Ortomosaico pasada cuadrícula. Elaboración propia.	62
Ilustración 69 Herramienta para realizar mediciones y ver coordenadas en Agisoft Metashape. Elaboración propia.	63
Ilustración 70 Zoom a punto de control para medir coordenadas. Elaboración propia.....	63
Ilustración 71 Medición del punto de control 205 en el ortomosaico de la pasada tradicional. Elaboración propia.	64
Ilustración 72 Características generales de la computadora utilizada. Elaboración propia.	65
Ilustración 73 Uso de memoria RAM durante procesamiento. Elaboración propia.	65

1. Introducción

La fotogrametría es una disciplina que permite obtener información a partir de imágenes y es utilizada en campos como la cartografía, topografía y la geología. Puede ser terrestre, con imágenes capturadas desde el nivel de suelo, aérea, en donde se utilizan fotografías capturadas desde una posición elevada, generalmente desde una aeronave o un dron y espacial, usando imágenes satelitales.

En los últimos 20 años la fotogrametría aérea ha experimentado grandes avances gracias a la incorporación y masificación de las tecnologías de drones o VANT (Vehículos aéreos no tripulados), comúnmente conocido en inglés *unmanned aerial vehicle* o sus siglas UAV. Estos avances han permitido una captura de imágenes de alta resolución a un costo muy reducido en comparación a la fotogrametría convencional con aviones y, además, los drones facilitan la recopilación de datos en áreas remotas o de difícil acceso.

Asimismo, el desarrollo de computadoras más potentes y softwares especializados en fotogrametría impulsaron el cambio de fotogrametría analógica a digital, resultando en una mayor capacidad para manejar conjuntos de datos más grandes, mejorando la calidad y precisión de los modelos 3D. Además, estos avances han facilitado el procesamiento fotogramétrico proporcionando una interfaz de trabajo más amigable y fácil de usar.

La precisión es un aspecto crítico en los proyectos de fotogrametría ya que los productos son utilizados en aplicaciones que requieren una alta exactitud, por lo que es fundamental evaluar y comparar los resultados entre distintos tipos de enfoques de vuelo. Bajo este contexto, el presente trabajo busca realizar un análisis comparativo entre tres diferentes tipos de vuelo en un proyecto de fotogrametría aérea digital con UAV en el pozo El Calero, España. Los vuelos por comparar son el vuelo tradicional, un vuelo tradicional, pero en dirección perpendicular y un vuelo con patrón cuadrangular. El objetivo central es determinar cuál de estos enfoques proporciona la pasada fotogramétrica más precisa, en donde se analizarán los resultados mediante la métrica del Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE) para llegar a una conclusión fundamentada.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Evaluar y comparar la calidad de los resultados y precisión de los productos geoespaciales entre tres distintos tipos de vuelo fotogramétrico en un proyecto de fotogrametría digital con UAV.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Comprender las bases fundamentales de la fotogrametría aérea con drones.
2. Diseñar proyectos de vuelo con UAV en el programa Mission Planner, desarrollando tres tipos de patrones de vuelo: uno con patrón de vuelo tradicional, otro con patrón de vuelo tradicional en dirección perpendicular y, por último, con cuadrícula regular.
3. Comprender el flujo de trabajo de Agisoft Metashape para la creación de productos geoespaciales.
4. Gestionar las imágenes fotográficas previamente adquiridas y proporcionadas por la Universidad de Cantabria, España, para georreferenciarlas correctamente.
5. Generar la nube de puntos, modelo digital de terreno y ortofotografías para cada tipo de patrón de vuelo.
6. Realizar una evaluación de los resultados obtenidos a partir de los vuelos fotogramétricos, centrándose en la calidad, precisión y tiempo de procesamiento de los productos geoespaciales.

1.2 Área de Estudio

El pozo Calero, fue un pozo minero destinado a la extracción de carbón, en donde su construcción fue iniciada en el año 1911, y fue clausurada en el año 2002 debido al constante peligro por la presencia de gas grisú. Está ubicado en la zona norte de España, cercano al municipio de Barruelo de Santullán de la provincia de Palencia, en la comunidad autónoma de Castilla y León. Las coordenadas de la ubicación en el sistema WGS84 son, aproximadamente, 42°54'47.3"N 4°18'20.8"W, siendo, en el sistema Universal Transversa de Mercator: 505055.33 metros este y 4755500.4 metros norte en la zona 30N.

Posee una red de túneles que suman una longitud de 22 kilómetros y una profundidad máxima de 480 metros. Además, alcanzó una producción de 182.000 toneladas de carbón en el año 1924.

Desde sus inicios, el pozo estuvo marcado por la presencia de gases mortales, tales como el Monóxido de Carbono, Sulfito de Hidrógeno y gas Grisú, lo que resultaba en explosiones y accidentes recurrentes dentro de las labores, cobrando la vida de un total de 165 trabajadores a lo largo de la historia de la explotación de la mina. (Calvo, 2022)



Ilustración 1 Pozo Calero en Barruelo de Santullán. Extraído de “Centro de Interpretación de la Minería, Palencia.”

2. Estado del arte

2.1 Fotogrametría

La fotogrametría es la ciencia por la cual a partir de fotos se logra estimar de una manera precisa la forma topográfica de una superficie, en donde estas fotografías pueden tomarse de manera espacial, aérea o terrestre. También puede aplicarse a objetos, para deducir la forma y dimensiones de este. (Santamaría Peña et al., 2011)

Se clasifica también según el tipo de tratamiento de la información: Fotogrametría Analógica, Analítica y Fotogrametría Digital. En donde hoy en día se utiliza la fotogrametría digital gracias a los avances informáticos que han ocurrido en estas últimas décadas. (Soroa, 2020)

La fotogrametría se fundamenta en los principios de la visión estereoscópica, colinealidad e intersección espacial. Estos conceptos son fundamentales para la reconstrucción tridimensional, es decir, obtener coordenadas reales a partir de las imágenes.

2.1.1 Visión estereoscópica

Para lograr una representación tridimensional precisa de un objeto o terreno mediante dos fotografías, es necesario que estas se tomen desde dos puntos distintos, compartiendo una zona en común. Este principio se conoce como visión estereoscópica, fundamental tanto para la visión humana como para la fotogrametría, ya que permite obtener la coordenada Z o de elevación del terreno. (Soroa, 2020)

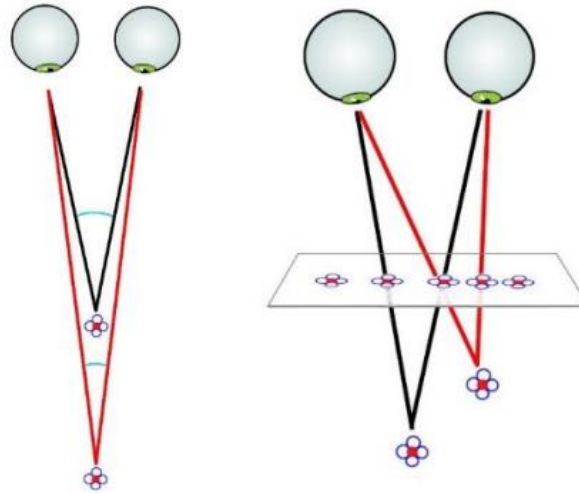


Ilustración 2 Principio de la visión estereoscópica. Extraído de " Contraste metodológico en los MDT realizados con drones. Universidad de Cantabria, España."

2.1.2 Principio de colinealidad e Intersección Espacial

La condición de colinealidad en el contexto de la fotogrametría se refiere a la alineación de tres puntos en una línea recta. Esta alineación geométrica conecta los puntos en el objeto tridimensional o terreno, sus proyecciones en la imagen 2D y el centro de proyección de la cámara. La colinealidad es fundamental para llevar a cabo la orientación externa y, a través de la intersección espacial, determinar las coordenadas del terreno en cualquier punto dentro de la zona de recubrimiento entre dos imágenes.

La intersección espacial es el proceso mediante el cual se determinan las coordenadas tridimensionales de un punto en el espacio a partir de su proyección en dos o más imágenes. Para lograr esto el principio de colinealidad es esencial, ya que establece la relación precisa entre el terreno y sus imágenes capturadas por la cámara. (Soroa, 2020)

2.1.3 Orientación interna

En la fotogrametría digital, una de las fases más importantes es la orientación interna de las imágenes capturadas con una cámara. En esta etapa se realizan correcciones de los parámetros internos de la cámara, como la distancia focal, distorsión radial y la resolución de la imagen. También se aplican una serie de correcciones, todo esto con el objetivo de lograr una reproducción precisa del haz perspectivo, que representa una vista particular de la escena en cada imagen (Sánchez Espeso & Pereda García, 2014) y lograr transformar los píxeles de la imagen a dimensiones físicas reales y viceversa. (López, 2006)

2.1.4 Captura de imágenes

En la fotogrametría digital con UAV, varios parámetros y características son claves para obtener un resultado de alta calidad. El Fotograma es la imagen capturada por la cámara, además de guardar los datos de los colores RGB de cada píxel, también almacenan otros datos como la distancia focal, altura de vuelo, hora de captura y coordenadas geográficas. El plano focal, por otro lado, es la superficie dentro de la cámara en donde se enfoca la luz que llega a través del lente.

La distancia focal es la separación entre el centro óptico del lente y el punto donde la luz converge para formar una imagen nítida en el plano focal de la cámara, ésta juega un papel crucial en la determinación del ángulo de visión y el “Zoom” de las imágenes capturadas.

La capacidad de un lente fotográfico para capturar la luz viene determinada por la luminosidad, que está relacionada con la apertura máxima del lente y se expresa con la fórmula:

$$Luminosidad = \frac{f}{N}$$

Donde “f” es la distancia focal del lente y “N” su diámetro efectivo de la apertura. Cuando el valor de “F” es bajo, significa que la apertura es más amplia resultando en una mayor luminosidad. El cambiar este parámetro es útil especialmente en situaciones de poca luz, permitiendo así, que la cámara capture más luz y produzca imágenes con una mejor claridad.

El tiempo de exposición es otro factor fundamental en la fotogrametría aérea, este indica la duración en la que el sensor está expuesto a la luz al capturar una imagen y, en general, este aumenta con el cuadrado de la luminosidad. Para objetos muy luminosos se necesita menos tiempo de exposición,

pero un tiempo de exposición alto puede generar desenfoques por movimientos en la imagen final. (Santamaría Peña et al., 2011)

Por último, el ajuste ISO en las cámaras (nombre referido a la Organización Internacional de Normalización, en inglés, *International Organization for Standardization*) influye en la sensibilidad del sensor a la luz. Un ISO alto permite tomar fotografías de mejor calidad en condiciones de poca luz y un ISO bajo es recomendable para condiciones de mucha luz, además se generan imágenes más nítidas y con menor ruido. (Claros Zelaya et al., 2016)

2.1.5 Orientación externa

En la orientación externa, se obtienen los parámetros para posicionar correctamente el haz de rayos correspondiente a la imagen en el instante que fueron tomadas, siendo estos la posición y orientación relativa de la cámara en el espacio tridimensional del mundo real y utilizando un sistema de referencia vinculado al terreno. (López, 2006)

Este proceso consta de dos partes: Orientación relativa y orientación absoluta: (Soroa, 2020)

- Orientación relativa: Su objetivo es colocar dos haces de rayos proyectivos (provenientes de la cámara y que se reflejan en objetos del mundo real) en una posición perspectiva, significando en una intersección de los rayos en un punto del espacio y permitiendo una representación precisa del objeto en las imágenes. Se resume en la alineación y posición adecuada de los rayos proyectivos para permitir la creación de un modelo tridimensional a partir de imágenes. (Quirós Rosado, 2014)

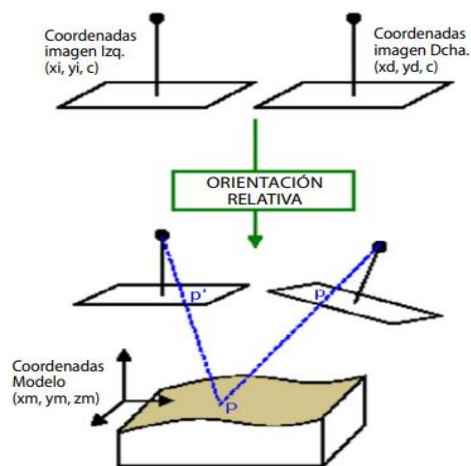


Ilustración 3 Orientación relativa. Extraído de Tesis Universidad de Extremadura.

- **Orientación absoluta:** Es el proceso realizado para ajustar el modelo generado a partir de imágenes al sistema de coordenadas del terreno fotografiado, el cual consta de dos pasos principales, el ajuste de la escala adecuada para que las mediciones del modelo coincidan con las mediciones reales del terreno y, el ajuste del eje z, que implica corregir cualquier error de altura, asegurando que el modelo esté a la altitud correcta con respecto al terreno.

2.2 Drones

Los drones o por sus siglas UAV son unidades aéreas no tripuladas y pilotadas a control remoto. Existen diversos tipos de formas y tamaños, en donde se encuentran: helicópteros (un rotor), multirrotor o de ala fija. (Sánchez García, 2017)

- **Multirrotor:** Son los más comunes hoy en día e incluyen varios motores en los extremos del equipo, pueden ser clasificados según la cantidad de motores que tengan, que son entre 4 a 16 motores. Estos pueden volar estáticamente, despegar y aterrizar verticalmente y es el más popular en cuanto a usos debido a su gran estabilidad, versatilidad y facilidad de manejo. No posee diseño aerodinámico por lo que tienen un gran consumo de energía y una autonomía de vuelo entre 20 a 40 minutos, por lo que es muy común utilizar más de una batería en un proyecto fotogramétrico.
- **Helicópteros:** Su forma es idéntica a los helicópteros convencionales, pero de un menor tamaño. Son de los menos utilizados debido a la complejidad tanto mecánica como de manejo. Existen drones helicópteros de combustión interna que pueden volar hasta 1 hora con una sola carga.
- **Ala fija:** Son drones que imitan la aerodinámica de los aviones, por lo que son más eficientes y tienen una gran autonomía. Tienen 1 o 2 motores que pueden ser eléctricos o de combustión. En cuanto a las desventajas del dron ala fija es la baja maniobrabilidad, no poder mantenerse en vuelo estático y la necesidad de una gran superficie para aterrizar y despegar.

En este estudio se analizarán datos tomados con un dron multirrotor, los principales componentes de un dron de este tipo son: (Sánchez García, 2017)

- **Cuerpo o armazón:** Es el esqueleto principal del dron, en este se monta el resto de los componentes. Los materiales más comunes en su fabricación son el plástico, aluminio y la fibra de carbono, siendo este último el más utilizado debido a que es un material resistente y liviano.

- Baterías: Son la fuente de poder del dispositivo, normalmente ofrecen una autonomía entre 20 a 40 minutos y el factor limitante de producir baterías más grandes es el peso.
- Motor y hélices: Son los encargados de mantener el dron en vuelo, el motor transforma la energía eléctrica en energía mecánica haciendo girar las hélices. La diferencia de velocidad de giro entre las hélices determina hacia donde se dirige el dron, y estas normalmente son de fibra de carbono.
- Gimbal: Es una estructura que está acoplada al armazón del dron, en donde se ubican la cámara y los sensores. Tiene la capacidad de absorber las vibraciones del motor y de inclinar la cámara para evitar distorsiones. También se puede inclinar la cámara desde el control remoto del dron.
- Radio receptor: Recibe la señal de radio enviada desde el control remoto y la transforma a datos que posteriormente se envían a la CPU del dron.
- CPU: Dispositivo responsable de ejecutar todas las acciones del dron de acuerdo con las instrucciones del radio receptor. Controla la gestión de los movimientos, recopilación de datos y la estabilización del dron.

2.2.1 Sensores en drones

Los drones pueden tener incorporados distintos tipos de sensores con variadas finalidades. Algunos de los más comunes son:

- GPS: Es el sistema de posicionamiento global, mediante el uso de satélites en órbita que transmiten ondas de radio de velocidad conocida, el dron puede determinar su ubicación geográfica en cualquier lugar gracias a la distancia que hay entre al menos 4 satélites y el objeto receptor. Es utilizado para la georreferenciación y la navegación del dron en tiempo real. (Peñañiel & Zayas, 2001)
- Cámara RGB: Tipo más común de cámara, captura ondas del espectro visible (rojo, verde y azul).
- Cámara infrarroja: Cámara que detecta variaciones de temperatura en la superficie del terreno mediante la captura de ondas infrarrojas del espectro electromagnético (Mayor longitud que luz visible).
- Cámaras Multiespectral o Hiperespectral: Es una cámara que captura imágenes en varias bandas del espectro. (Sánchez García, 2017)

- Lidar: Sensor que utiliza pulsos de láser de velocidad fija para medir distancia entre el dron y la superficie.
- Flujo óptico: Mide cambios en el movimiento y se usa en sistemas de navegación, mantiene la estabilidad y posición del dron durante el vuelo.
- Sensores Ultrasonido: Mide la distancia mediante el uso de ondas ultrasónicas sabiendo el tiempo entre la emisión y recepción de la onda y es utilizado en drones para detectar obstáculos durante el vuelo. (Fernández & Gutiérrez, 2016)

2.3 Drones en Fotogrametría

La planificación de vuelo es esencial para lograr un buen resultado final, hay que tener todas las consideraciones necesarias para cumplir con el proyecto y se puede dividir en 3 fases: planificación de vuelo, apoyo topográfico y ejecución de vuelo. (Claros Zelaya et al., 2016)

- Planificación de vuelo: Determina la forma en la que se obtendrán las fotos aéreas, incluye la determinación de la escala de mapa, *ground sample distance* o por sus siglas en inglés GSD (distancia entre el centro de dos píxeles consecutivos en tierra), coordenadas a utilizar, solapamiento entre fotografías y el horario de realización de toma de fotos.
- Apoyo topográfico: Planificación y realización de los trabajos topográficos requeridos para asegurar una buena precisión en el proyecto.
- Ejecución de vuelo: Realización de las actividades para tomar las fotografías con el dron.

2.3.1 Planificación de vuelo

En este apartado hay que tener en consideración ciertas características: la escala, estereoscopia y solapamiento, altura de vuelo y GSD (cm/píxel), tiempo de intervalo, etc. Una de las más importantes es la escala del fotograma, y se refiere a la relación entre las dimensiones reales de una unidad en el terreno y la representación en la fotografía aérea, dicho de otra forma, la relación entre dos líneas homólogas cualesquiera, una del terreno y otra del fotograma. Si la escala es de 1:10.000 significa que 1 unidad de medida en la fotografía son 10.000 unidades de medida en el terreno. Se expresa generalmente en una fracción mediante las fórmulas y relaciones: (Santamaría Peña et al., 2011)

- $$E = \frac{1}{e} = \frac{f}{H} = \frac{l}{L}$$

- $\frac{1}{e^2} = \frac{s}{S} = \frac{l^2}{L^2}$
- $H = e * f$

Con:

- e= denominador de la escala del fotograma.
- f= focal de la cámara en mm/100.
- H= altura de vuelo.
- l= largo del fotograma.
- L= largo del terreno.
- s= superficie del fotograma = l*l.
- S= superficie del terreno = L*L .

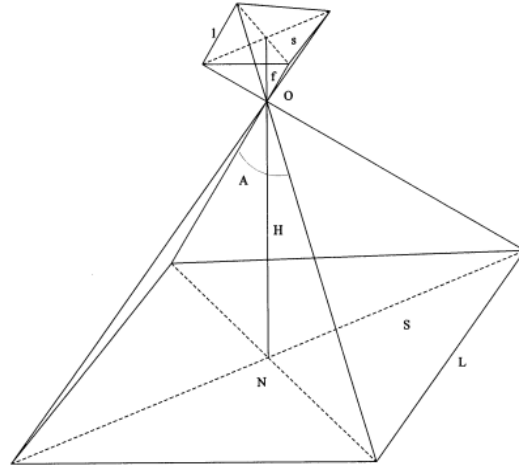


Ilustración 4 Partes de un fotograma. Extraído de "Fundamentos de fotogrametría, Universidad de la Rioja, España".

Otra forma para calcular la altura de vuelo es usando el GSD, este está estrechamente relacionado con la escala de mapa elegida siendo inversamente proporcionales y depende del nivel de detalle que necesitemos en el proyecto, un GSD más pequeño significa mayor resolución y captura de detalles pequeño, pero también un mayor volumen de datos. Una vez definido el GSD podemos calcular la altura de vuelo máxima para cumplir con la resolución mediante esta relación (Claros Zelaya et al., 2016):

- $$GSD = \frac{H * Sw * 100}{f * AnchoImagen}$$

Siendo:

- Sw: Anchura del sensor óptico en milímetros.
- AnchoImagen: Cantidad de píxeles a lo ancho del fotograma.
- Dw: Distancia en tierra cubierta por 1 imagen = GSD*AnchoImagen.



Ilustración 5 Relación de altura de vuelo. Extraído de Pix4d User Manual

En cuanto a la altura de vuelo, no existe la obligación de que ésta sea constante durante la captura de las imágenes, pero si es recomendable, debido a que tendrán el mismo GSD si se ocupara la misma cámara. Una distancia desde el suelo constante significaría mismo nivel de detalles en los fotogramas facilitando la búsqueda de puntos coincidentes. Se pueden procesar imágenes con diferentes GSD, pero

intentando que el GSD más alto sea siempre menor a 2 veces el GSD más bajo: $GSD1 \leq 2 * GSD2$. (Claros Zelaya et al., 2016)

La altura de vuelo variable se utiliza para adaptarse a zonas con mayor complejidad topográfica o para obtener más detalles y mejor resolución en zonas de interés.

Otro parámetro fundamental que considerar es la generación de la estereoscopia. Es la creación de información tridimensional a partir de fotografías aéreas tomadas en distinta posición, lo que da una ligera variación en la captura de información entre éstas, con un porcentaje de solapamiento longitudinal entre las imágenes (%p) y otro porcentaje de cubrimiento transversal o lateral (%q).

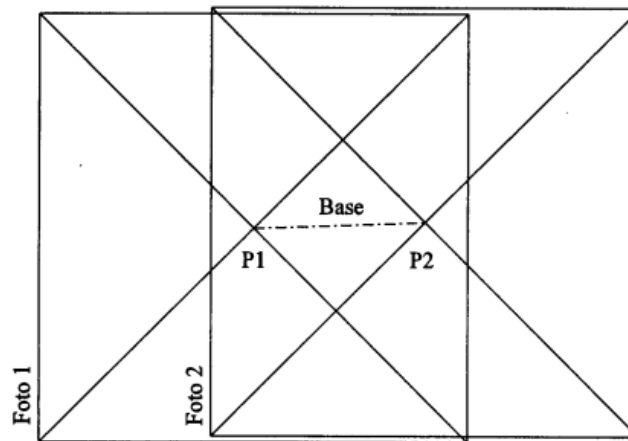


Ilustración 6 Distancia base entre fotogramas. Extraído de "Fundamentos de fotogrametría, Universidad de la Rioja, España".

El solapamiento, imprescindible en proyectos fotogramétricos aéreos, es la zona común entre dos fotogramas capturados consecutivamente, para conseguir una visión estereoscópica en fotogrametría convencional los recubrimientos habituales son del 60% para el %p y del 20% para el %q, salvo cuando se plantea realizar un Ortomosaico, en cuyo caso ambos recubrimientos pueden llegar a ser del 80%, mientras que en fotogrametría con drones ambos parámetros pueden llegar al 80% o 90%. Los puntos centrales de cada fotograma, llamados puntos principales (P1, P2) están en la zona de solapamiento y la distancia entre estos se llama base (B). Se puede conocer la distancia entre los puntos principales tanto en el fotograma como en el terreno mediante la relación de escala y longitudes: (Santamaría Peña et al., 2011)

- $B = b * e$
- $A = a * e$

Siendo:

- e = denominador de la escala del fotograma.
- b = distancia base en el fotograma.
- B = distancia base en el terreno.
- a = distancia entre los ejes de dos pasadas consecutivas en el fotograma.
- A = distancia entre los ejes de dos pasadas consecutivas en el terreno.
- L = Longitud del fotograma en metros.

Luego, están las siguientes relaciones:

- $b = L - \frac{p*L}{100} \rightarrow B = \frac{100-p}{100} * L * e$
- $a = L - \frac{q*L}{100} \rightarrow A = \frac{100-q}{100} * L * e$

El intervalo de disparo es la diferencia de tiempo entre dos capturas consecutivas, se calcula mediante una relación de distancia base y velocidad del dron y es el parámetro que determina el solapamiento entre las imágenes. Su fórmula es $I = \frac{B(m)}{v(\frac{m}{s})}$, si la velocidad está en (km/h) se divide en 3,6 para cambiar sus unidades a (m/s).

La Superficie neta (S_n) es la superficie que aporta un fotograma por sí solo, teniendo en consideración el % p y % q , se calcula mediante: $A = (100 - p) * (100 - q) * (\frac{e*L}{100})^2$.

Si la superficie (S) a abarcar es regular, se puede calcular el N° de fotogramas a capturar mediante: $N^\circ \text{ Fotogramas} = \frac{S}{S_n}$. (Santamaría Peña et al., 2011)

La dimensión de la superficie capturada por las fotos depende de 3 factores, la inclinación del eje vertical, el relieve del terreno y variaciones en la altura de vuelo. Estos factores no deben ser la causa de errores o pérdidas de precisión, ya que el % p se define con un porcentaje de error de no más del 5%. (Claros Zelaya et al., 2016)

2.3.2 Técnicas de vuelo

Existen distintos tipos de vuelo y ajustes de superposición de las imágenes dependiendo del escenario que se necesita capturar.

El más común es el patrón cuadrícula regular que es aplicable en todo ámbito general que no tengan elementos con pocas coincidencias como cuerpos de agua, bosques, campos agrícolas, nieve y/o desiertos. Como recomendaciones tenemos considerar un sobrelape común y mantener una altura constante para garantizar el GSD deseado.

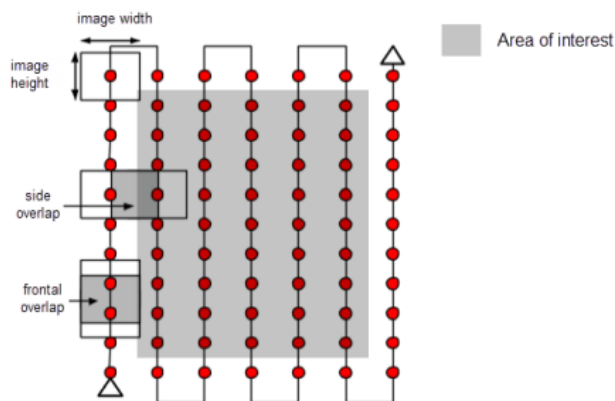


Ilustración 7 Patrón de Vuelo tradicional. Extraído de Pix4d User Manual.

En cuanto a las excepciones en donde se aplica el mismo tipo de patrón de vuelo hay que aplicar ciertas recomendaciones:

Bosques, campos de agricultura, nieve y arena:

- Aumentar $\%p > 85\%$ y $\%q > 70$ debido a la ausencia de puntos característicos comunes en las imágenes y la homogeneidad de la zona.
- Mayor altitud de vuelo implica menor distorsión de perspectiva, por lo que es más fácil encontrar similitudes en esas áreas.

Cuerpos de agua:

- No reconstruir océanos, el reflejo del sol y las olas impiden la búsqueda de las coincidencias.
- Para zonas de ríos y lagos, volar más alto ayuda a incluir zonas de tierra en donde si haya coincidencias.

Existe el patrón de vuelo fotogramétrico circular, este es utilizado cuando se necesita generar de manera precisa volúmenes en tercera dimensión como lo pueden ser edificios o zonas topográficas con estructuras verticales.

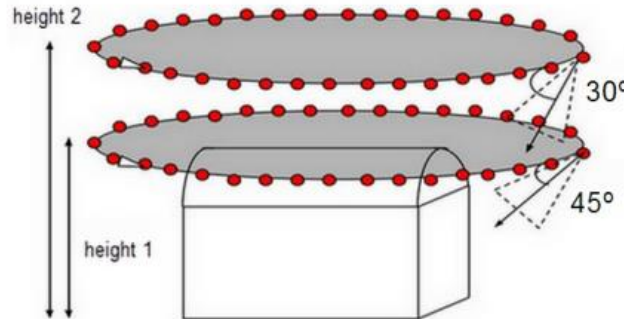


Ilustración 8 Patrón de vuelo fotogramétrico circular. Extraído de Pix4d User Manual

Para este tipo de fotogrametría se debe:

- Realizar un primer vuelo alrededor de la zona de interés con un ángulo de cámara de 45°.
- Realizar un segundo y tercer vuelo con mayor altitud y disminuyendo el ángulo de la cámara.
- Recomendable realizar vuelos cada 5° a 10° para asegurar el solapamiento requerido.

Para modelar zonas alargadas como carreteras, ríos o líneas de ferrocarriles está el patrón de vuelo de dos líneas, o de una sola pasada.

Consideraciones:

- Usar $p > 85$ y $q > 60$ para el patrón de vuelo de dos líneas.
- Se pueden usar imágenes tomadas perpendiculares al suelo u oblicuas con un ángulo entre 0° y 45° con dirección al centro de ambas líneas.
- Usar $p > 85$ para el patrón de vuelo de una sola pasada definiendo puntos de control a lo largo de toda la zona de vuelo.

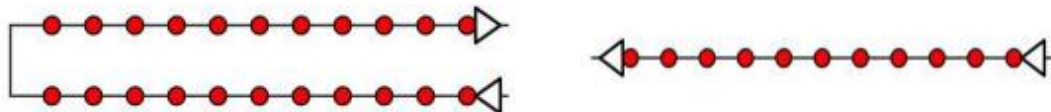


Ilustración 9 Patrones de vuelo de dos líneas y una sola pasada. Extraído de Pix4d User Manual

Si la zona a mapear es demasiado extensa o el dron no tiene la capacidad de realizar la captura de fotogramas en un solo vuelo, se pueden realizar distintos planes de vuelo hasta cumplir el objetivo y posteriormente procesar las imágenes en un solo proyecto. Para lograr esto se debe cumplir con:

- Cumplir con el %p y %q en cada plan de vuelo.
- Entre los planes debe haber superposición de las imágenes para facilitar la reconstrucción y que el programa detecte que es un proyecto único.

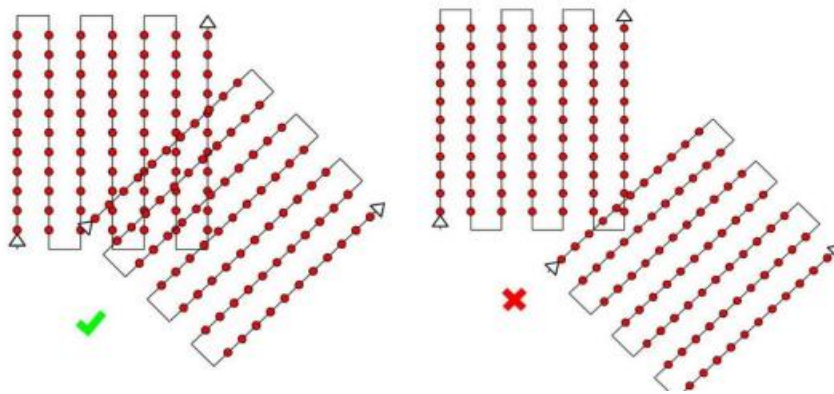


Ilustración 10 Superposición entre planes de vuelo. Extraído de Pix4d User Manual

Por último, está el plan de vuelo rejilla doble o cuadrícula. Usado para zonas construidas o canteras, en donde se necesite obtener fotografías desde distintos puntos de vista. El dron vuela en dos pasadas perpendiculares entre sí, siendo vuelos separados o uno solo formando una cuadrícula y cubriendo el área objetivo desde diferentes direcciones y ángulos, logrando capturar, en el caso de áreas urbanas todas las fachadas de la zona y, en el caso de canteras, sus paredes verticales. El solapamiento usado es el mismo que en el caso general. (Claros Zelaya et al., 2016)

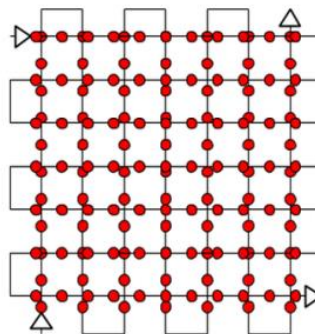


Ilustración 11 Plan de vuelo en cuadrícula, extraído de Pix4d User Manual

Hay 3 distintos escenarios en cuanto a la altura de vuelo en un terreno con desnivel:

1. Vuelo a altura constante independientemente del cambio de la topografía: Al haber un cambio en la distancia del dron con el suelo también habrá un cambio en el GSD de los fotogramas en el traslape.
2. Realización de distintos vuelos, cada vuelo a diferente altura: En este caso el GSD se mantendrá casi constante debido a que la altura del dron con el suelo se mantiene a lo largo de los proyectos de vuelo. Hay que mantener un traslape entre los vuelos para facilitar la detección de zonas comunes.
3. Vuelo manteniendo una altura constante con respecto a la variación de la elevación del terreno: Entrega mejores resultados ya que mantiene el GSD constante, facilita al programa la detección de puntos comunes y es más rápido que el segundo método debido a que es un vuelo único. (Claros Zelaya et al., 2016)

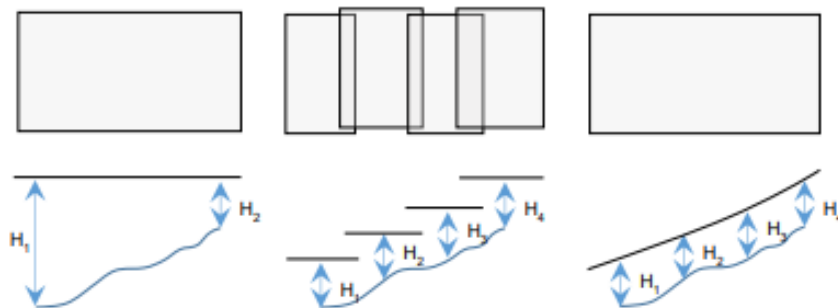


Ilustración 12 Tipos de vuelo en zonas con desnivel. Extraído de Tesis de Universidad de el Salvador.

2.3.3 Puntos de apoyo

Para tener un proyecto fotogramétrico preciso, es necesario georreferenciar el modelo y realizar la orientación externa absoluta, por esto deben usar puntos de apoyo o asistencia en tierra, en inglés *Ground Control Points* (GCP), de los cuales se obtienen sus coordenadas geográficas precisas mediante algún método de georreferenciación.

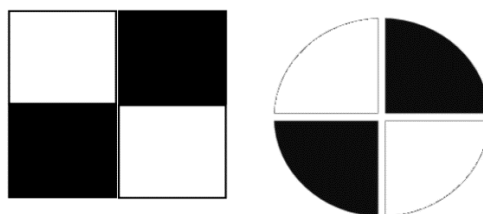


Ilustración 13 Tipos de marca utilizadas como GCP. Extraído de Pix4d User Manual

Estos puntos pueden ser zonas u objetos fácilmente reconocibles en el área de estudio en donde haya una gran cantidad de imágenes en solapamiento, si hay ausencia de estos se ocupan objetos físicos portátiles como dianas y conos que hagan contraste en la zona o con marcas en el suelo. La cantidad de puntos de control dependerán de la extensión del área de estudio.

Las dimensiones de los puntos de apoyo varían con respecto al GSD utilizado, siendo entre 5 a 10 veces mayor que este para distinguir fácilmente el centro. Si es posible, usar puntos 10 veces mayor al GSD. (Claros Zelaya et al., 2016)

$$\text{Dimensión de la marca} = \text{GSD} * 10$$

2.3.4 Consideraciones de seguridad y regulaciones para el vuelo de drones

Antes de realizar el levantamiento fotogramétrico se debe cumplir con ciertas regulaciones dependiendo la zona geográfica en la que se hará el proyecto, y además una serie de inspecciones y pasos para evitar incidentes durante el proceso, en cuanto a las limitaciones generales para volar drones en España (Drones España, 2020):

- Cumplir con la normativa vigente (Registrarse en Agencia Estatal de Seguridad Aérea, AESA).
- Drones a partir de 250 gramos es obligatorio un certificado que acredite conocimientos.
- Nunca sobrepasar los 120 metros y tener siempre alcance visual del UAV.
- Volar al menos a 8km de distancia de cualquier aeropuerto y comprobar zonas habilitadas para vuelos.
- El dron debe llevar placa de identificación que contenga: fabricante, modelo, número de serie y datos de contacto del piloto.
- Proteger el derecho a la intimidad.

En cuanto a la seguridad para garantizar un proceso efectivo y sin incidentes es recomendable:

- Asegurarse de tener la suficiente autonomía.
- Inspección pre-vuelo para comprobar el buen funcionamiento de todos los componentes.
- Elegir una zona segura y despejada para el despegue y aterrizaje.
- No volar durante condiciones climáticas adversas.
- Respaldo periódicamente los datos recopilados.

En cuanto a la batería del dron, siempre es recomendable que al finalizar la toma de fotos el nivel sea mayor a 20% para dejar margen al dispositivo de volver al lugar de inicio si ocurriese algún inconveniente, el porcentaje consumido por misión se puede calcular sabiendo el tiempo de vuelo máximo y el tiempo de vuelo estimado de la misión mediante la siguiente relación: (Claros Zelaya et al., 2016)

$$Pc = \frac{Tp}{\frac{Tmax}{Nmax} * N\acute{u}til} * 100\%$$

Pc: Porcentaje de carga útil consumido en la misión.

Tp: Tiempo de vuelo estimado.

Tmax: Tiempo de vuelo máximo del dispositivo.

Nmax: Nivel de batería máximo.

Nútil: Nivel de batería útil (Nivel actual – 20%).

2.3.5 Recomendaciones de como capturar imágenes

Para asegurar una toma de imágenes de buena calidad y con poco ruido hay que seguir recomendaciones generales con respecto a los ajustes de la cámara: (Claros Zelaya et al., 2016)

- Mantener en automático el ajuste de apertura de cámara.
- Las imágenes deben ser lo más nítidas posibles, por lo que se deben capturar cuando la zona esté lo suficientemente iluminada, de no ser así las imágenes tendrán ruido disminuyendo la precisión del proyecto.
- Mantener una velocidad de obturación fija y un ISO lo más bajo posible.
- Desactivar opciones de estabilización de la cámara.
- Modo de enfoque recomendado: Manual en el infinito.
- Mantener un zoom fijo.

Los problemas más comunes al realizar fotografías son los siguientes:



Ilustración 14 Problemas de fotografías por parámetros erróneos de configuración de cámara o mal uso. Extraído de Pix4d User Manual

(1)

(2)

(3)

(4)

- 1- Baja velocidad de obturador, el sensor pasa mucho tiempo capturando luz.
- 2- Imagen con mucho ruido debido a un ISO muy alto.
- 3- Sobreexposición debido a una apertura, velocidad de obturación, ISO mal configurados.
- 4- Efecto Rolling Shutter, al fotografiar objetos en movimiento, dependiendo de la cámara, el sensor captura la información desde la parte superior hacia abajo, o viceversa creando una imagen distorsionada debido a que las partes del objeto se capturan en un momento ligeramente diferente.

2.3.6 Calibración GPS drones

Se deben calibrar los drones que tengan GPS integrado para cada nueva locación, al no hacerlo se pueden producir defectos o fallos en el vuelo.

El proceso de calibración para drones es similar para todos los modelos y marcas, se calibra horizontal y verticalmente siguiendo estos pasos:

1. Abrir aplicación en el teléfono previamente conectado el dron, hacer click en el apartado para calibrar la brújula.
2. Tomar el dron de manera horizontal con el brazo extendido y hacer un giro de 360° sobre el propio eje de la persona.
3. Tomar el dron de manera vertical con la cámara apuntando hacia abajo y el brazo extendido, y realizar un giro de 360° sobre el propio eje de la persona.

Para que la calibración sea exitosa tener precaución de:

- No realizar la calibración cuando hay posibilidad de interferencia magnética en la zona. (Causados por equipos electromagnéticos, líneas de alta tensión, materiales ferromagnéticos, vías ferroviarias, etc.)
- No realizar la calibración en interiores ni junto a elementos metálicos grandes.

La recalibración de la brújula del dron debe realizarse cuando los datos que proporciona están erróneos, al realizar un vuelo en otra locación, al cambiar algún elemento físico o actualización de software del dron y cuando se observa que la línea de vuelo no es recta. (Claros Zelaya et al., 2016)

2.3.7 Sistemas de referencia

Para desarrollar un modelo preciso es necesario determinar un sistema de coordenadas georreferenciadas para ajustar el modelo tridimensional al mundo real, en el cual se aplica el uso de GCP.

Si bien no existe un método obligatorio para la determinación de la posición específica en la superficie de la tierra, el más común es el sistema World Geodetic System 84 (WGS84) utilizado por GPS, siendo el error de cálculo estimado menor a 2 cm. Las bases de este sistema es representar la tierra como un elipsoide usando el sistema de coordenadas geográficas que se expresan en longitud y latitud.

La latitud mide la posición norte o sur del ecuador, esta varía entre -90 y +90 grados, siendo la línea del ecuador 0°, polo norte 90° y polo sur -90°.

La longitud mide la posición al este u oeste del meridiano de Greenwich, esta varía entre -180° y 180°, siendo 0 el meridiano de Greenwich, que atraviesa el Observatorio real de Greenwich en Londres, y -180° y 180° representando el meridiano internacional de cambio de fecha, encontrándose en el océano pacífico. (Peñafiel & Zayas, 2001)

Los drones equipados con GPS pueden representar su posición en tiempo real mediante el sistema de coordenadas geográficas, siendo el valor z la elevación sobre el nivel del mar, usando en conjunto el sistema GPS con el sensor de altitud por láser para tener una ubicación completa en 3 dimensiones (x, y, z) = (latitud, longitud, elevación). (Claros Zelaya et al., 2016)

Otro sistema de coordenadas es la proyección UTM o *Universal Transverse Mercator*. Se basa en la proyección de la superficie de la tierra en un cilindro en la que su eje está en la línea del ecuador y que es tangente a un meridiano central de cada zona a representar, de esta forma el sistema UTM

divide la tierra en diferentes zonas rectangulares (huso) en donde cada uno tiene su propio meridiano central.

El huso se define como el espacio comprendido entre dos meridianos, en donde comprenden 6° de longitud y sus coordenadas se representan mediante un sistema cartesiano en términos de distancia en metros norte-sur (Eje y) y este-oeste (Eje x) desde el punto de origen en una zona UTM en particular. (Quirós Rosado, 2014)

Las ventajas de este sistema de proyección son:

- Los ángulos son iguales tanto en el mapa como en terreno.
- Sencillez de cálculos debido al sistema cartesiano simple de ejes (x, y).
- Las zonas UTM son relativamente pequeñas por lo que proporciona una alta precisión a nivel regional.
- No distorsiona las superficies por debajo de los 80° de latitud.
- Alta compatibilidad con dispositivos GPS.

En este estudio se ocuparán imágenes referenciadas con el sistema WGS84 gracias al GPS integrado del dron utilizado, pero posteriormente transformadas para su procesamiento en Agisoft Metashape a coordenadas UTM en la zona 30 Norte, en donde está ubicada la zona de estudio.



Ilustración 15 Husos que representan el área geográfica de la península Ibérica. Extraído de Tesis Universidad de Extremadura.

2.4 Agisoft Metashape

Agisoft Metashape es un software de procesamiento de imágenes digitales mediante fotogrametría, genera datos tridimensionales espaciales para su uso en sistemas de información geográfica, conservación de patrimonio cultural, producción de efectos visuales y también para realizar mediciones indirectas de objetos de distintos tamaños. (Agisoft, 2023)

Existe una serie de productos geospaciales que deben ser generados para llegar al resultado final del Ortomosaico, estos son la nube de puntos, modelo 3d de malla y el modelo digital de elevaciones.

2.4.1 Nube de puntos

En la primera etapa del procesamiento, el programa analiza las imágenes proporcionadas en busca de correlaciones. Esto genera una nube de puntos tridimensional que contiene coordenadas x, y, z definidas en el sistema de referencia junto con el respectivo color. Estos puntos no están unidos entre sí, ya que sólo son ubicaciones en el espacio.



Ilustración 16 Nube de puntos. Elaboración propia.

2.4.2 Malla

El dato fuente para crear la malla para luego ser texturizada es la nube de puntos. Una malla es un modelo tridimensional compuesto por triángulos formados al conectar cada punto de la nube, en donde su superficie contiene información de detalles visuales, asemejando la apariencia real del objeto. (Claros Zelaya et al., 2016)



Ilustración 17 Malla poligonal. Elaboración propia.

2.4.3 Modelo digital de elevaciones

Utilizando la nube de puntos como conjunto de datos de entrada, es posible generar un modelo digital de terreno conocido como modelo digital de elevaciones. El MDE proporciona una representación tridimensional detallada de una variable cuantitativa continua de un área geográfica en particular, que es la altura. (Soroa, 2020)

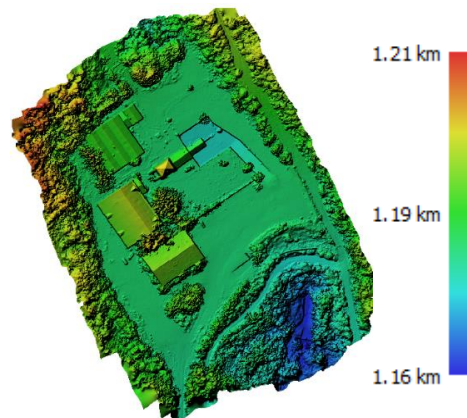


Ilustración 18 Modelo digital de elevaciones. Elaboración propia.

2.4.4 Ortomosaico

Una imagen adquirida de la manera tradicional tiene una perspectiva cónica, en donde la escala varía en función de la cercanía con el centro. Una ortofoto es una imagen en donde se elimina la perspectiva cónica mediante correcciones, dando como resultado una imagen con perspectiva ortogonal y escalas iguales en toda la representación. Un Ortomosaico, es un conjunto de autoimágenes y permite representar áreas extensas de esta manera. (López, 2006)



Ilustración 19 Ortomosaico. Elaboración propia.

2.5 Aplicaciones de la fotogrametría con drones en minería

2.5.1 Prospección minera

Para explotar un recurso mineral primero se deben encontrar las zonas potenciales que contengan el mineral de interés, por lo que podemos explorar terrenos para descubrir la existencia de yacimientos, agua o algún recurso del cual se pueda generar un beneficio económico.

Para los drones multirrotor, existe la magnetometría aérea. La presencia de materiales ferromagnéticos a una profundidad baja, pueden producir alteraciones en el campo magnético del planeta tierra, estas variaciones pueden ser detectadas mediante un sensor magnetométrico incorporado en el dron. Estas variaciones indican una posible presencia de magnetita, que está vinculada a los yacimientos de hierro.

También se pueden realizar mediciones precisas de los cambios en la gravedad producidos por grandes diferencias de densidades de los minerales presentes en la corteza de la Tierra. Este tipo de estudios permite la localización de rocas duras, blandas, ácidas, básicas, anhídras, etc. Cabe destacar que este tipo de estudios sólo es válido cuando la diferencia de densidad y volúmenes son lo suficientemente grandes para producir anomalías en la gravedad.

Por último, con la Radiometría aérea se pueden realizar estudios a la corteza para detectar formaciones geológicas de uranio, torio y potasio mediante el registro de los rayos Alfa, Beta y Gamma que produce la desintegración de estos elementos.

2.5.2 Topografía

Es la principal aplicación a los drones actualmente en ámbitos de ingeniería, en donde mediante la captura de imágenes aéreas previamente georreferenciadas se logra hacer un modelo 3d de la zona con el cual se pueden realizar:

- Reconocimiento de terrenos, cálculo de volúmenes y distancias.
- Cálculo de reservas mineras.
- Modelado 3D del diseño de la mina.
- Desarrollo de plan minero y fases futuras.
- Cálculo de pendientes.
- Modelado de tranques de relaves y botaderos.

2.5.3 Control de operaciones, stocks e inspección

Gracias a las cámaras incorporadas en los drones se pueden realizar inspecciones en directo o grabados de la capacidad de un botadero, el avance de una fase minera, un ciclo de operación minera en particular, como del conjunto de varias al ofrecer una visión más global. Ayuda al personal de trabajo ya que no se necesita ir físicamente al lugar de trabajo para hacer la inspección, además de que no se necesitan sensores especiales, por lo que es una opción bastante económica y rápida.

2.5.4 Inspecciones

Mediante el mismo razonamiento del apartado 2.5.3 se pueden realizar inspecciones en zonas de difícil acceso y verificar el estado en el que se encuentran correas, construcciones, maquinarias o materiales, dando a conocer si es necesario realizar alguna mantención, reparación o sustitución de piezas. De la misma forma, mediante una cámara térmica realizar inspecciones a plantas de tratamiento o maquinarias, para ver si hay algún sobrecalentamiento en el sistema.

2.5.5 Prevención de riesgos laborales

El uso del dron ayuda a prevenir riesgos laborales en varias situaciones, como lo pueden ser detectar fallas en los frentes de explotación, ver maniobras inseguras de los vehículos de carguío y transporte, exponer al dron en zonas de toxicidad de ambiente con sensores incorporados y detección de zonas con riesgo de combustión.

2.5.6 Vigilancia

Otra aplicación de los drones en minería es el uso de estos a modo de cámaras de vigilancia, evitando así el ingreso de gente externa que pueda realizar robos de maquinarias o materiales de labor. Cabe destacar que hay drones que son capaces de buscar, localizar mediante GPS y seguir objetivos por lo que es una opción económica y útil para el ámbito de seguridad de faena.

(Sánchez García, 2017)

3. Metodología

La metodología contemplada para la realización de la memoria de título se basa en las siguientes fases:

- Recopilación de información y estudio bibliográfico
- Planificación de vuelos con Mission Planner
- Adquisición de datos
- Procesamiento de imágenes
- Comparación de resultados

3.1 Estudio bibliográfico

Revisión de literatura relacionada con la fotogrametría digital y la aplicación de los drones en este campo. Se mencionan conceptos fundamentales que van desde la orientación interna de la cámara utilizada en la captura de imágenes digitales hasta el procesamiento de datos para la generación del producto geoespacial final, conocido como ortofotografía.

3.2 Plan de vuelo en Mission Planner

Para la realización de los diferentes planes de vuelo se usó el software de código abierto *Mission Planner*, que está diseñado para realizar diferentes tareas con drones, tales como: planificación de misiones, control en tiempo real, configuración del dron, descarga de datos registrados y simulación de vuelo. (Ardupilot, 2023)

Los primeros datos necesarios son el modelo de dron y cámara utilizados. El dron utilizado es el dron Autel Explorer EVO II pro, con las siguientes características: (Autel, 2020)

Tabla 1 Características técnicas dron EVO II pro.

Característica dron	Valor
Peso	1.192 gramos
Diámetro	397 milímetros
Velocidad máxima	15 m/s
Autonomía	40 minutos
Distancia máxima	9.000 metros
Altura máxima	7.000 m.s.n.m.

Transmisión	2,4 GHz Alink
Almacenaje interno	8 Gb
Almacenaje externo	SD 128 Gb máximo
Batería de vuelo	7.100 mAh
Pantalla mando	3,3 " OLED
Batería mando	5.000 mAh
Sistema de navegación	GPS + GLONASS
Campo de visión horizontal	60°
Campo de visión vertical	80°

Tabla 2 Características técnicas cámara incorporada.

Cámara Incorporada	Valor
Sensor	Sony IMAX383
Tamaño de sensor	1 "
Tipo de obturador	Rolling Shutter
Resolución máxima fotografía	5.472*3.648
Resolución máxima video	5.472*3.076
Formato	JPG/MOV/MP4
Apertura	f/2,8 - f/11
Zoom	1-8x
Rango ISO fotografía	100-6.400
Rango ISO video	100-12.800

Una vez dibujado el polígono en la zona de estudio e ingresados los datos de la cámara en Mission Planner se configuran otros parámetros necesarios como la altura de vuelo y el recubrimiento entre las imágenes. ([Anexo A](#))

Es importante señalar que se realizó un solo vuelo fotogramétrico con un patrón de cuadrícula regular. Este vuelo incluyó tanto el patrón tradicional en su primera fase como la pasada en perpendicular en su segunda fase. En consecuencia, se generarán 3 modelos, uno con la primera pasada, otro con la segunda fase del vuelo y el último con las imágenes capturadas por completo.

Con una altura de vuelo de 65 metros, velocidad de 10 kph para evitar distorsiones por movimiento, sobrelape longitudinal del 80% y lateral de 70% para garantizar resultados precisos y de calidad, los planes de vuelo tradicional, tradicional en dirección perpendicular y cuadrícula regular quedan, respectivamente:



Ilustración 20 Planes de vuelo fotogramétrico tradicional, tradicional en dirección perpendicular y cuadrícula regular. Elaboración propia.

En donde Mission Planner proporciona los siguientes parámetros de forma aproximada:

Tabla 3 Características generales de los planes de vuelo.

	Tradicional	Perpendicular	Cuadrícula
Área [m ²]	13.795	13.795	13.795
Distancia [km]	1,52	1,57	2,96
Distancia entre imágenes [m]	7,3	7,3	7,3
GSD [cm]	0,75	0,75	0,75
Imágenes	178	180	356
Cobertura en tierra [m * m]	36,5 * 27,4	36,5 * 27,4	36,5 * 27,4
Tiempo de vuelo [min] a 10[kph]	11,67	11,72	22,65
Tiempo entre capturas [s]	2,58	2,58	2,58

3.3 Puntos de control y de apoyo en tierra

Antes de proceder con la realización del vuelo del UAV y para asegurar una buena precisión en el proyecto, se implementan puntos de control y de apoyo en tierra con coordenadas UTM30N conocidas, obtenidas mediante dispositivo GPS. En el área de estudio, se distribuyeron 9 puntos de apoyo que sirven para referenciar el modelo de la siguiente manera:



Ilustración 21 Disposición de los puntos de apoyo. Elaboración propia.

Estos puntos de apoyo tienen las siguientes coordenadas:

Tabla 4 Coordenadas UTM puntos de apoyo.

Punto	Norte [m]	Este [m]	Altura [m]
204	393.422,92589	4.751.993,42064	1.128,04559
206	393.464,80941	4.752.010,30847	1.127,79665
209	393.427,87736	4.752.062,17706	1.127,58489
210	393.400,27566	4.752.042,17851	1.128,35955
215	393.485,84915	4.751.974,59836	1.127,51794
216	393.450,99205	4.751.940,62939	1.127,63970
217	393.405,58136	4.751.903,40780	1.127,11122
218	393.377,96705	4.751.953,70595	1.128,06291
219	393.361,37591	4.751.996,00661	1.128,76101

Además, se incorporaron otros 4 puntos de control de precisión con esta distribución:



Ilustración 22 Disposición puntos de control de precisión. Elaboración propia.

Los cuales tienen las siguientes coordenadas:

Tabla 5 Coordenadas UTM puntos de control.

Punto	Norte [m]	Este [m]	Altura [m]
201	393.413,8904	4.751.988,061	1.127,98317
205	393.452,8794	4.752.002,564	1.127,89775
207	393.395,5103	4.751.999,049	1.128,14044
208	393.422,8036	4.752.026,726	1.127,98020

3.4 Orientación y georreferenciación de imágenes

El número total de imágenes resultantes fue un total de 349, con un peso conjunto de 4.54 [GB]. Siendo las primeras 179 imágenes ocupadas para el modelo de pasada tradicional, las siguientes 170 usadas para el modelo con pasada tradicional en dirección perpendicular y, el número total para el modelo de pasada en cuadrícula regular. Luego, se empieza a realizar el proceso general de fotogrametría, el cual comienza con la importación de las fotos, la orientación de estas y la transformación del sistema de coordenadas geográficas incorporadas en las imágenes por el GPS integrado en el dron a UTM en la zona 30N. ([Anexo B](#)). En este apartado, se agregan los puntos de referencia al modelo y se ajustan de manera manual en cada fotografía en la que se encuentre el GCP para corregir las distorsiones de la superficie terrestre y mejorar la precisión del modelo final. El resultado final de este proceso es una nube de puntos dispersa con los puntos de la georreferenciación bien ubicados.

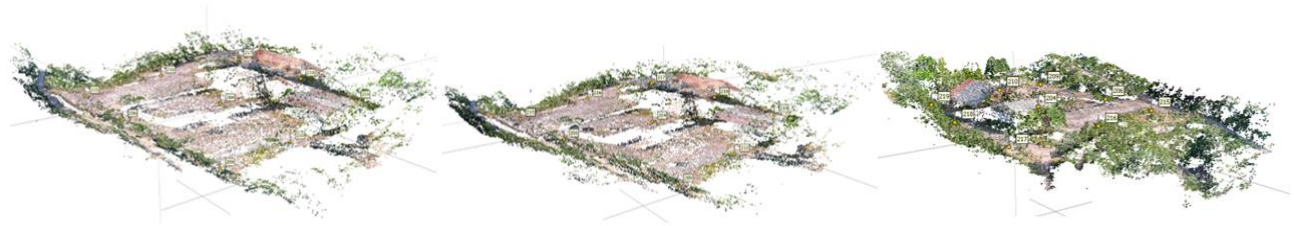


Ilustración 23 Nube de puntos dispersa pasada tradicional, perpendicular y cuadrícula, respectivamente. Elaboración propia.

El tiempo utilizado para la orientación y el tamaño de la nube de puntos dispersa están reflejados en la siguiente tabla:

Tabla 6 Tiempo y espacio utilizados en la orientación de las imágenes.

Pasada	Tiempo [min]	Tamaño del archivo [GB]
Tradicional	97,23	1,1343
Perpendicular	78,95	1,0536
Cuadrícula	168,5	2,0374

3.5 Generación de la nube de puntos

Después de haber alineado las imágenes y obtener la nube de puntos dispersa, se crea la nube de puntos densa en calidad alta, que está compuesta por una gran cantidad de puntos ubicados en coordenadas específicas, representando la escena ([Anexo C](#)). La nube de puntos densa es necesaria para posteriormente generar el modelo digital de elevaciones.



Ilustración 24 Nube de puntos densa pasada tradicional, perpendicular y cuadrícula, respectivamente. Elaboración propia.

El tiempo y almacenamientos utilizados para la creación de la nube de puntos densa están en la siguiente tabla:

Tabla 7 Tiempo y espacio utilizados en el procesamiento de la nube de puntos densa de los modelos.

Pasada	Tiempo [min]	Número de puntos	Tamaño del archivo [MB]
Tradicional	36,82	74.764.769	978
Perpendicular	40	71.909.665	940
Cuadrícula	317	81.723.768	1.075

3.6 Creación malla

Luego, se crea la malla poligonal con la nube de puntos densa y los datos de referencia para tener una representación tridimensional sólida de buena calidad del área de estudio.

Este paso proporciona 4 distintos modos de vista del modelo: Texturizado, monocromático, malla poligonal y de estimación de confianza. [\(Anexo D\)](#)



Ilustración 25 Malla texturizada pasada tradicional, perpendicular y cuadrícula, respectivamente. Elaboración propia.

El tiempo y almacenamientos utilizados para la creación de la malla se muestran en la siguiente tabla:

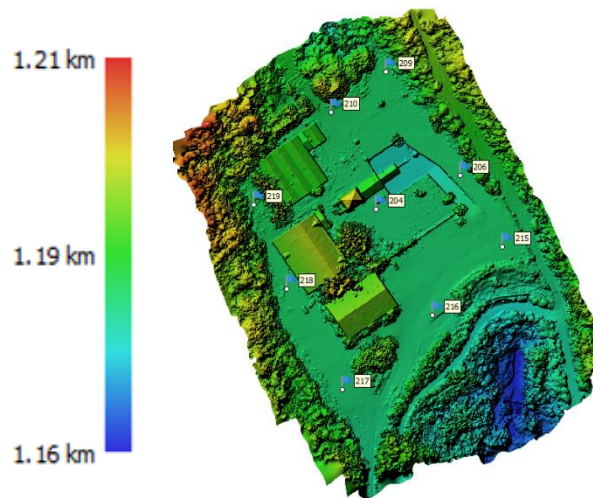
Tabla 8 Tiempo y espacio utilizados en el procesamiento de la malla poligonal de los modelos.

Pasada	Tiempo [min]	Número de caras	Tamaño del archivo [MB]
Tradicional	71	11.977.114	627,11
Perpendicular	59,06	17.375.024	397,81
Cuadrícula	151	10.928.507	594,24

3.7 Generación de MDE

Una vez procesada la nube de puntos densa se utiliza para generar uno de los productos geospaciales más utilizados en fotogrametría, el modelo digital de elevaciones, en donde cada pixel contiene la información de altura en ese punto. También se puede tener una vista según el ángulo de pendiente.

[\(Anexo E\)](#)



*Ilustración 26 Modelo digital de elevaciones pasada cuadrícula con su respectiva leyenda.
Elaboración propia.*

El tiempo de procesamiento y el tamaño de los MDE están en la siguiente tabla:

Tabla 9 Tiempo y espacio utilizados en el procesamiento del MDE de los modelos.

Pasada	Tiempo [min]	Tamaño del archivo [Mb]
Tradicional	93	184,56
Perpendicular	80	174,04
Cuadrícula	98	187,89

3.8 Generación Ortomosaico

Utilizando los modelos digitales de elevación como datos de entrada se genera el Ortomosaico, que representa una proyección ortogonal del área de estudio. (Anexo F) Este producto se caracteriza por no tener distorsiones de escala, por lo que es el utilizado para la obtención de las coordenadas de los puntos de control.



Ilustración 27 Ortomosaico resultante de la pasada cuadrícula regular. Elaboración propia.

Tabla 10 Tiempo y espacio utilizados en el procesamiento del Ortomosaico de los modelos

Pasada	Tiempo [min]	Tamaño del archivo [GB]
Tradicional	11	4,44
Perpendicular	10,32	4,16
Cuadrícula	20,6	8,06

3.9 Control de precisión

Para medir la precisión de los modelos y compararlos, se usan las coordenadas de los puntos de control y puntos proyectados mediante el error medio cuadrático o RMSE (*Root Mean Square Error*). Es una medida estadística útil en aplicaciones en donde se realizan predicciones y estimaciones, verificando que tan lejos están las predicciones del valor real y se expresa en las mismas unidades de los datos de

referencia. Es calculada para las coordenadas Norte (X), Este (Y) y la altura (Z) de manera independiente para comprender la precisión en cada dirección.

El error medio cuadrático calcula la raíz cuadrada del promedio de las diferencias al cuadrado entre los valores estimados en el proceso y los valores reales de los puntos de control y se representa mediante la siguiente fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

Donde:

- n es la cantidad de puntos de control.
- x_i es la coordenada real del punto.
- y_i es la coordenada estimada por el modelo.

Para tener una visión más clara del error en la componente posicional (X, Y) se calcula un nuevo RMSE que sirve para evaluar la precisión en dos dimensiones, el cual se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores medios cuadráticos en las direcciones X e Y: (Cisneros et al., 2019)

$$RMSE = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$$

Donde:

- $RMSE_x$: Error cuadrático medio en componente horizontal norte.
- $RMSE_y$: Error cuadrático medio en componente horizontal este.

4. Resultados

Las coordenadas de los puntos de control obtenidas a partir del Ortomosaico en Agisoft Metashape ([Anexo G](#)) de los 3 modelos son las siguientes:

Tabla 11 Coordenadas estimadas modelo pasada tradicional.

Punto	Norte [m]	Este [m]	Altura [m]
201	393.413,8844	4.751.988,021	1.127,996
205	393.452,9236	4.752.002,574	1.127,92
207	393.395,4849	4.751.999,024	1.128,188
208	393.422,8196	4.752.026,688	1.128,014

Tabla 12 Coordenadas estimadas modelo pasada tradicional en dirección perpendicular.

Punto	Norte [m]	Este [m]	Altura [m]
201	393.413,9104	4.751.988,053	1.128,024
205	393.452,828	4.752.002,521	1.127,959
207	393.395,5286	4.751.999,141	1.128,198
208	393.422,7631	4.752.026,762	1.128,019

Tabla 13 Coordenadas estimadas modelo pasada cuadrangular.

Punto	Norte [m]	Este [m]	Altura [m]
201	393.413,9082	4.751.988,037	1.127,991
205	393.452,8843	4.752.002,54	1.127,876
207	393.395,4978	4.751.999,074	1.128,161
208	393.422,7983	4.752.026,734	1.127,963

Luego, el error en centímetros de cada punto se obtiene mediante la resta de la coordenada real y la coordenada estimada en el proyecto y se calcula para cada dirección en particular. En cuanto a la altura, un error negativo indica que el punto estimado está a una altura más baja que el punto real.

Tabla 14 Error de precisión pasada tradicional.

Punto	Error X [cm]	Error Y [cm]	Error Z [cm]
201	0,59930	3,99320	-1,28300
205	-4,42730	-0,94210	-2,22500
207	2,54510	2,48840	-4,75600
208	-1,59790	3,78010	3,38000

Tabla 15 Error de precisión pasada tradicional en dirección perpendicular.

Punto	Error X [cm]	Error Y [cm]	Error Z [cm]
201	-2,00110	0,85930	-4,08300
205	5,13910	4,32970	1,50000
207	-1,82200	-9,21760	-5,75600
208	4,04580	-3,57810	-3,88000

Tabla 16 Error de precisión pasada cuadrícula.

Punto	Error X [cm]	Error Y [cm]	Error Z [cm]
201	-1,78650	2,43580	0,78300
205	-0,49530	2,41940	2,17500
207	1,25620	2,52810	2,05600
208	0,53260	0,79120	1,72000

Luego, los errores medios cuadráticos en cada dirección son los siguientes:

Tabla 17 Error medio cuadrático de cada dirección.

Pasada	RMSE _x [cm]	RMSE _y [cm]	RMSE _z [cm]
Tradicional	2,692162893	3,054279347	3,18750098
Perpendicular	3,539171221	5,414139989	4,095937774
Cuadrícula	1,150935003	2,16817348	1,769834032

Y el error cuadrático medio posicional es:

Tabla 18 Error cuadrático medio en plano XY de cada dirección.

Pasada	RMSE [cm]
Tradicional	4,071408033
Perpendicular	6,468279892
Cuadrícula	2,454715385

5. Discusión

Una vez obtenidos los resultados del procesamiento fotogramétrico de los 3 distintos tipos de enfoque en el patrón de vuelo, se pueden conocer las fortalezas y limitaciones del desarrollo de este proyecto de memoria de título. A continuación, se detallarán los puntos fuertes, aspectos mejorables y otros tipos de enfoques que puedan ayudar a entender mejor el comportamiento de la precisión en la fotogrametría con UAV utilizando *Agisoft Metashape* como software de procesamiento.

- Al analizar los resultados obtenidos en cuanto a la precisión fotogramétrica entre los 3 tipos de vuelo evaluados, se confirma que estos cumplen con las expectativas. El patrón de vuelo cuadrícula ha demostrado ser más eficiente al proporcionar una mayor cantidad de información y puntos coincidentes entre las imágenes para el programa de procesamiento *Agisoft Metashape*. La disposición estructurada de las líneas de vuelo en cuadrícula ha permitido una cobertura más completa en el área de estudio. Considerando el contexto de este estudio, el aumento en la cantidad de información disponible ha contribuido de manera positiva a la precisión del modelado tridimensional, respaldando la efectividad del enfoque de patrón cuadrícula para obtener resultados fotogramétricos más precisos.
- El ordenador utilizado estaba equipado con componentes de gama baja y generaciones anteriores, incluyendo una CPU Intel i7-3770-k, 32 GB de memoria RAM DDR3 a 1.333 MHz y una GPU AMD Radeon RX550 2GB ([Anexo H](#)). El factor limitante identificado fue principalmente la tarjeta gráfica, ya que no resulta adecuada para tareas de diseño gráfico 3D exigentes. Además, el rendimiento podría beneficiarse de la actualización a memorias RAM DDR4 o DDR5, que ofrecen velocidades mayores. Teniendo en cuenta estos aspectos, se reconoce que la precisión y tiempos de procesamiento podrían mejorar significativamente empleando un ordenador con componentes más recientes y potentes.
- Todos los puntos evaluados en este estudio fueron analizados en relación con la cota de la superficie del suelo. Sería de interés ampliar la evaluación para incluir la precisión altimétrica tanto en las zonas elevadas, como tejados, y en áreas con desniveles, como la entrada al túnel. La necesidad de extender la evaluación a estas áreas específicas se fundamenta en la posibilidad de que existan mayores desviaciones altimétricas en lugares alejados del suelo, donde la topografía puede influir significativamente en la precisión de los resultados.

- Mediante otra perspectiva, sería de interés investigar el rendimiento del programa al incorporar exclusivamente puntos de apoyo ubicados en la zona de desnivel, que corresponde a la entrada del túnel, para la georreferenciación del modelo. El objetivo sería comparar la precisión del modelo resultante en los puntos de control ya determinados. Esta evaluación permitirá entender de mejor manera cómo los distintos tipos de enfoques de vuelo responden y se adaptan a cambios topográficos, especialmente en entornos desafiantes como lo es la entrada al túnel.

6. Conclusión

En este estudio, se ha explorado la aplicación de distintos patrones de vuelo en fotogrametría con UAV, evaluando su impacto en la precisión y eficiencia del procesamiento. Los resultados obtenidos proporcionan valiosas ideas entre cuando aplicar un tipo de enfoque, ofreciendo una orientación para futuros proyectos geoespaciales. Asimismo, se destaca que la fotogrametría digital con UAV ha demostrado ser una herramienta efectiva para la obtención de información geoespacial, permitiendo la generación de modelos tridimensionales de alta precisión.

Los resultados de la evaluación de precisión revelan diferencias notables entre los diferentes patrones de vuelo. En la pasada tradicional se registraron errores medios cuadráticos (RMSE) de 2,69 [cm], 3,05 [cm] y 3,19 [cm] en las direcciones X, Y y Z, respectivamente. La pasada perpendicular mostró mayores errores con valores de RMSE de 3,54 [cm], 5,41 [cm] y 4,10 [cm] en las mismas direcciones. Sin embargo, el patrón de vuelo en cuadrícula mostró la mayor precisión, con errores significativamente menores de 1,15 [cm], 2,17 [cm] y 1,77 [cm] en X, Y y Z, respectivamente. Estos resultados indican la elección del patrón de vuelo en proyectos de fotogrametría con UAV influye significativamente en la precisión de los resultados, siendo la pasada en cuadrícula la que proporciona una precisión superior en comparación con las otras dos pasadas evaluadas.

Considerando que el área de estudio es relativamente pequeña, abarcando 13.800 [m^2], el formato de vuelo en cuadrícula podría no ser la opción más recomendable para áreas considerablemente más grandes. Esto se debe a la abundante información generada por la pasada en cuadrícula en comparación con las pasadas tradicionales. En este estudio, se observó una gran diferencia en los tiempos de procesamiento entre las pasadas tradicional y cuadrícula en diversas fases, siendo esta última la que mayor tiempo demanda: en la orientación de imágenes fue un 73,3 %, la creación de la nube de puntos en un 760,95 %, la generación de la malla en 112,68 %, y la creación del ortomosaico demandó un 87,27 % más de tiempo ([Anexo I](#)). En la fase del modelo digital de elevaciones no hubo diferencias significativas de tiempo durante su procesamiento.

En relación con la presencia de huecos en las nubes y modelos generados, se observó una mayor calidad en la nube de puntos dispersa generada mediante el patrón de vuelo en cuadrícula. Esta pasada exhibió menos huecos en comparación con las pasadas tradicional y perpendicular. Es crucial tener en consideración el uso de almacenamiento en este contexto, ya que, para la nube de puntos dispersa

de esta pasada, el tamaño del archivo es un 79,62% mayor en comparación con la pasada tradicional y un 93,38% mayor en comparación con la pasada tradicional en dirección perpendicular. ([Anexo J](#)) Esta clara diferencia se evidencia en las ilustraciones [44](#), [45](#) y [46](#), donde la pasada cuadrícula presenta menos huecos y una mayor densidad de puntos. Este patrón de mejor calidad se repite en la creación de la nube de puntos densa, sugiriendo que la pasada en cuadrícula debería proporcionar una mejor precisión debido a la mayor cantidad de información disponible.

En última instancia, estos resultados resaltan la importancia de encontrar un equilibrio adecuado para cada tipo de proyecto fotogramétrico, considerando la precisión deseada, la extensión del área y la capacidad de procesamiento disponible. El componente más limitante es el hardware de procesamiento, especialmente la potencia de las computadoras, ya que el tiempo de procesamiento depende directamente de estos factores, así como de la extensión del área y del tipo de vuelo fotogramétrico.

7. Bibliografía

- Agisoft. (2023). *Agisoft*. <https://www.agisoft.com/>
- Ardupilot. (2023). *Mission Planner Overview*. <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>
- Autel. (2020). *Autel Drones EVO II Pro 6K*. <https://www.autelevodrone.com/collections/evo-black-friday-sale/products/autel-evo-ii-pro-6k>
- Calvo, P. (2022). *Pozo Calero: el agujero siniestro de la minería de Palencia*. El Español. https://www.elespanol.com/castilla-y-leon/region/palencia/20220828/pozo-calero-agujero-siniestro-mineria-palencia/697680289_0.html
- Cisneros, S., García, E., Montoya, K., & Sinde, Í. (2019). Estudio De Las Configuraciones De Puntos De Control Terrestre Para Fotogrametría Con Drone. *Revista Geoespacial*, 16(1), 43–57. <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v16i1.1278>
- Claros Zelaya, R. A., Guevara Aguilar, A. E., & Pacas Cruz, N. R. (2016). Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados. *Universidad de El Salvador*, 1–319. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14218/1/50108282.pdf>
- Drones España. (2020). *Normativa Europea 2023*. <https://xn--drones-espaa-khb.eu/nueva-normativa-de-drones-2021/>
- Fernández, J., & Gutiérrez, G. (2016). Aplicaciones Geológicas de los Drones-Geological Applications of UAVs. *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 29(1), 89–105. <https://www.researchgate.net/publication/303696594%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/303696594%0Awww.topografiapirineos.com>
- López, D. H. (2006). Introducción a la fotogrametría digital. *Universidad Castilla La Mancha*, 3, 149–175. <http://www.revista.unam.mx/vol.7/num7/art55/int55.htm>
- Peñañiel, J., & Zayas, J. (2001). Fundamentos del sistema GPS y aplicaciones en la topografía. *Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos En Topografía*, 1–135.
- Quirós Rosado, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería*

Civil.

https://mascvuex.unex.es/ebooks/sites/mascvuex.unex.es.mascvuex.ebooks/files/files/file/Fotogrametria_9788469713174_0.pdf

Sánchez Espeso, J., & Pereda García, R. (2014). Metodologías topográficas y aplicaciones. *Universidad de Cantabria.*

<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/713/course/section/736/Fotogrametria.pdf>

Sánchez García, M. (2017). Uso y aplicaciones de drones en minería. *Universidad Politécnica de Catalunya, I* (Permite Planificar, monitorear, controlar y hacer seguimiento de los trabajos en mina además ayuda entre otros a la medición del impacto ambiental), 71.

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/112714/PFC_Manuel_Sanchez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Santamaría Peña, J., Sanz Méndez, T., & Universidad de la Rioja. (2011). Fundamentos de Fotogrametría. In *Fundamentos de Fotogrametría*. publicaciones.unirioja.es

Soroa, C. D. (2020). “ CONTRASTE METODOLÓGICO EN LOS MDT REALIZADOS CON DRONES ” Grado en Ingeniería de los Recursos Energéticos. *Universidad de Cantabria.*

8. Anexos

Anexo A.- Pasos de planificación de vuelo en Mission Planner

El primer paso por realizar en Mission Planner es buscar el área de interés manualmente en el apartado de “Plan”, para luego dibujar un polígono sobre el área que se quiere mapear. El polígono se dibuja haciendo click derecho sobre el área, seleccionando “Dibujar un polígono” y luego “Draw a Polygon” en donde se establecen los vértices del terreno.



Ilustración 28 Selección del polígono en el área de interés en Mission Planner. Elaboración propia.

Luego, para ingresar los datos de la cámara está la opción de importar una de las fotos tomadas por el dron, en donde el programa extrae automáticamente métricas como la distancia focal, tamaño de imagen, tamaño del sensor y el GSD.

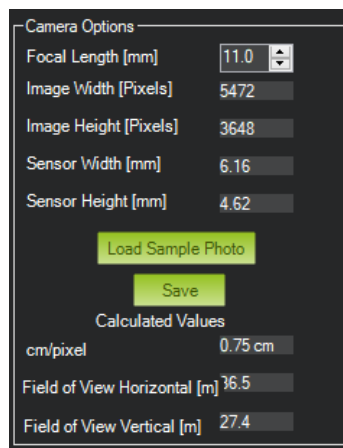


Ilustración 29 Ingreso de parámetros de la cámara utilizada. Elaboración propia.

El siguiente paso por realizar es la creación de las mallas de vuelo, se hace click dentro del área, se selecciona “Auto WP” y luego “Survey (Grid)”. En este apartado se establecen parámetros generales como la cámara a utilizar, el ángulo de dirección, la altitud y la velocidad de vuelo.

Para crear la pasada de vuelo tradicional en dirección perpendicular se le suma 90° al ángulo de vuelo y, en el apartado “Grid Options” se selecciona “Cross Grid” para generar la malla cuadrícula. El resultado de los diferentes planes de vuelo, se encuentra reflejado en las siguientes imágenes:



Ilustración 30 Parámetros generales y estadísticas del proyecto de vuelo fotogramétrico con pasada tradicional en Mission Planner. Elaboración propia.



Ilustración 31 Parámetros generales y estadísticas del proyecto de vuelo fotogramétrico con pasada en dirección perpendicular en Mission Planner. Elaboración propia.



Ilustración 32 Parámetros generales y estadísticas del proyecto de vuelo fotogramétrico con pasada cuadrícula regular en Mission Planner. Elaboración propia.

Una vez realizado el vuelo fotogramétrico las imágenes quedan con las siguientes características:

Cámara		Imagen	
Fabricante de cámara	Autel Robotics	Id. de imagen	
Modelo de cámara	XT705	Dimensiones	5472 x 3648
Punto F	f/2.8	Ancho	5472 píxeles
Tiempo de exposición	1/400 s	Alto	3648 píxeles
Velocidad ISO	ISO-100	Resolución horizontal	96 ppp
Compensación de exposición	0 paso	Resolución vertical	96 ppp
Distancia focal	11 mm	Profundidad en bits	24
Apertura máxima	2.9709	Compresión	
Modo de medición	Promedio central pond...	Unidad de resolución	2
Distancia al objeto		Representación del color	sRGB
Modo de flash	Sin flash	Bits comprimidos/píxel	6.3935546875
Intensidad de flash		GPS	
Longitud focal de 35 mm	29	Latitud	42; 54; 47.576000000...
		Longitud	4; 18; 19.8369999999...
		Altitud	1236.1

Ilustración 33 Características internas de las imágenes resultantes. Elaboración propia.

Anexo B.- Orientación de imágenes fotogramétricas en Agisoft Metashape

Para cada proyecto la metodología a seguir es la misma. El primer paso es importar las fotos desde el flujo de trabajo, en donde para el primer modelo se seleccionan las primeras 179 imágenes, para el segundo modelo las siguientes 170 y para el tercer modelo se seleccionan todas. El programa proporciona una ubicación estimada de la posición de la cámara al momento de la captura de la fotografía:

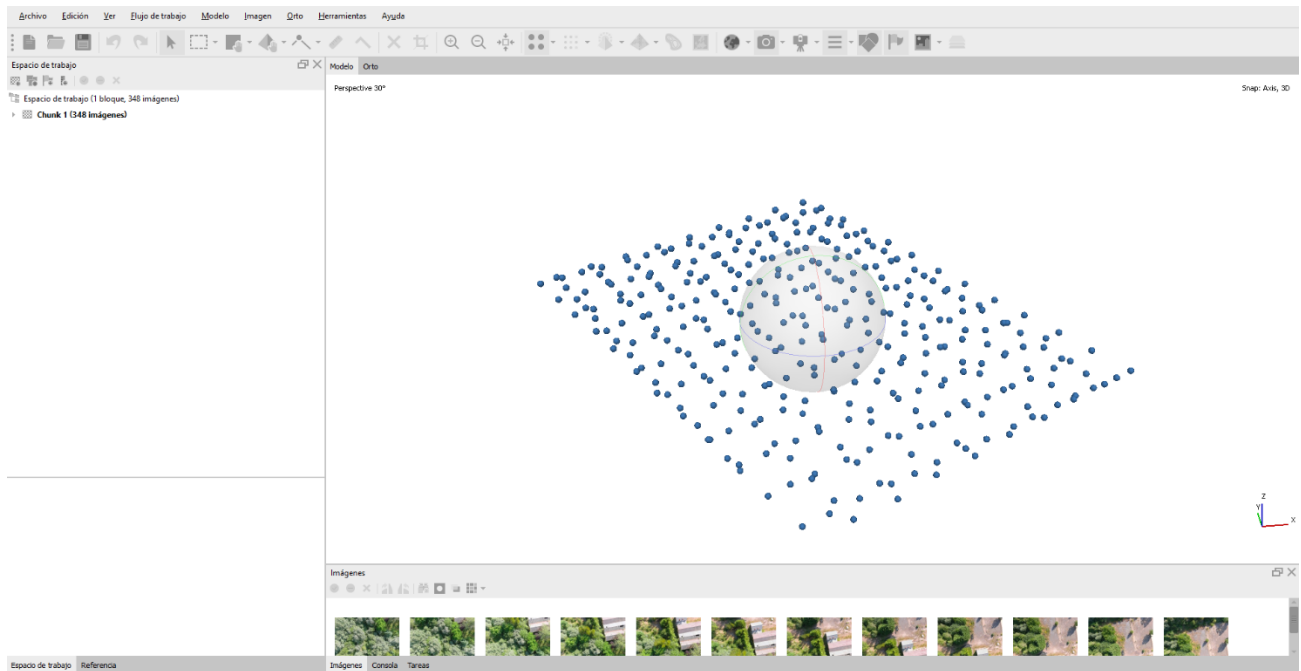


Ilustración 34 Ubicación estimada de cada fotografía una vez importadas en Metashape. Elaboración propia.

Luego se realiza un paso indispensable para la correcta realización del modelo, convertir las coordenadas de referencia, se seleccionan todas las fotos y en el apartado “Referencia” se selecciona “Convertir coordenadas”:

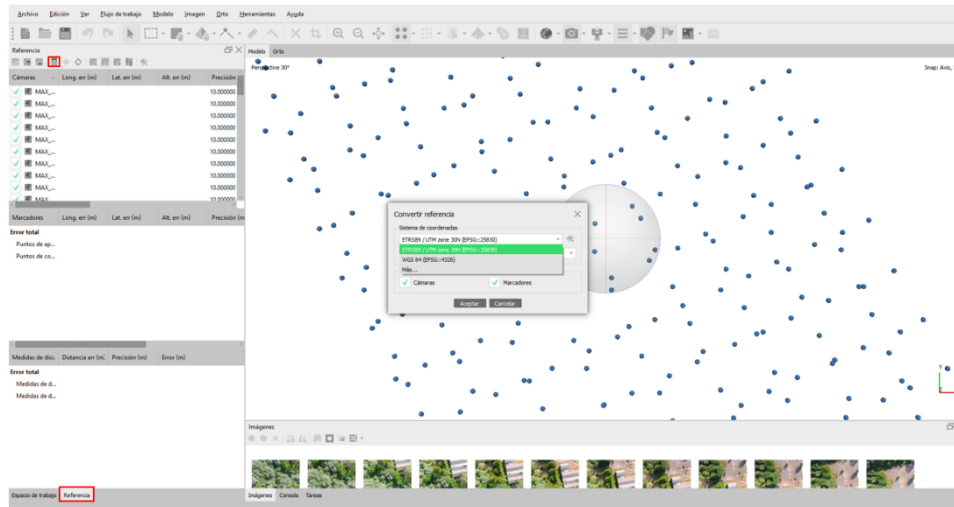


Ilustración 35 Transformación de coordenadas a UTM. Elaboración propia.

Se inicia el proceso de orientación de fotos en calidad baja para posteriormente importar y definir manualmente los puntos de apoyo en el modelo. Este procedimiento permite que la orientación de fotos de alta calidad sea más precisa.

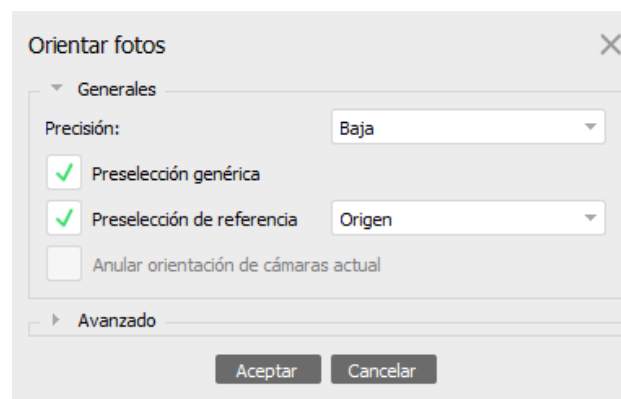


Ilustración 36 Orientación de imágenes baja calidad en Metashape. Elaboración propia.

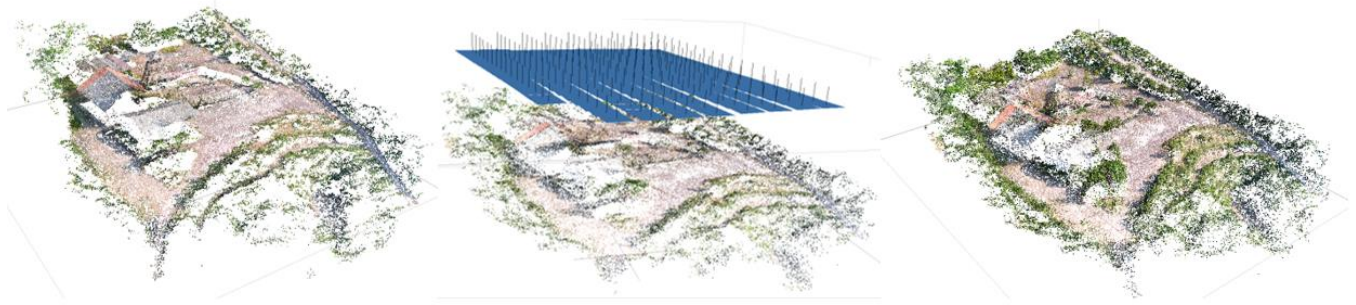


Ilustración 37 Resultado de la orientación en baja calidad pasada tradicional, perpendicular y cuadrícula, respectivamente. Elaboración propia.

Se importan las referencias desde la siguiente manera

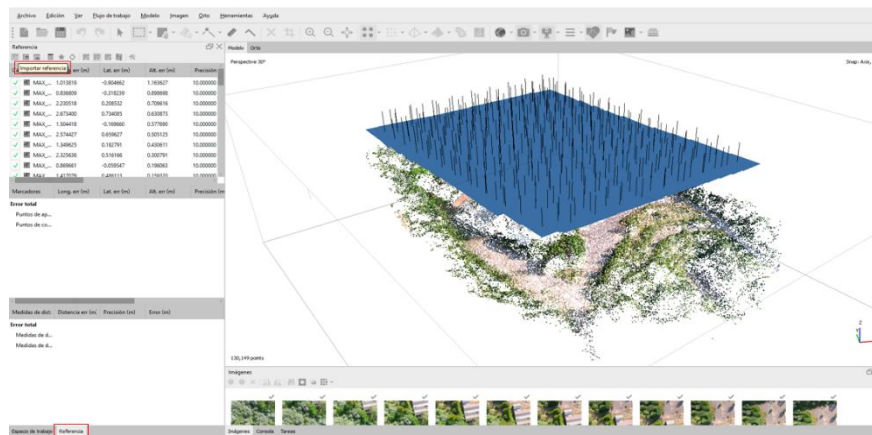


Ilustración 38 Importación de puntos de apoyo para georreferenciación en Metashape. Elaboración propia

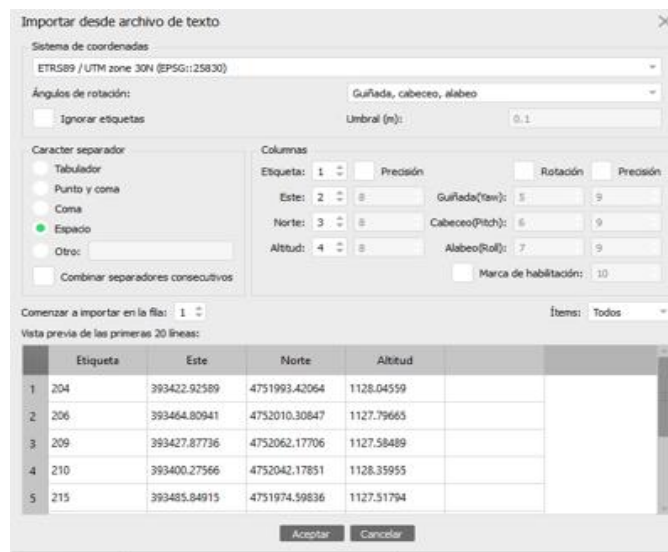


Ilustración 39 Paso para importar puntos de apoyo para georreferenciación en Metashape. Elaboración propia.

Una vez importadas las coordenadas, se observa una gran separación entre el modelo y los puntos en el eje z, por lo que se ajustan manualmente las coordenadas para cada foto, seleccionando la referencia y “filtrar fotos por referencia”. Al finalizar este proceso se debe apretar “Actualizar referencias”.

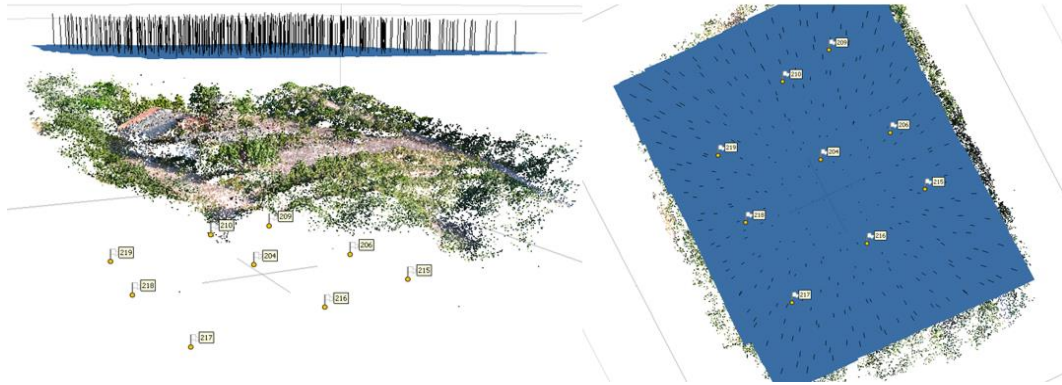


Ilustración 40 Desfase eje z entre modelo y los puntos de apoyo. Elaboración propia.

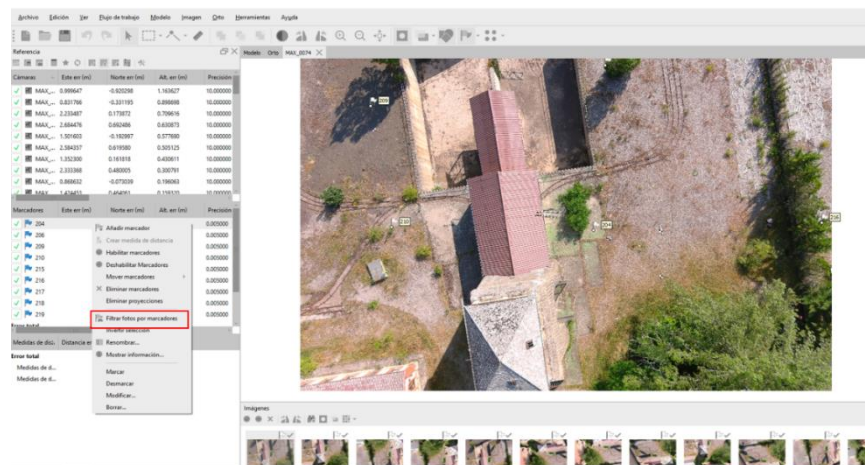


Ilustración 41 Pasos para ajustar manualmente los puntos de apoyo. Elaboración propia



Ilustración 42 Ajuste manual de los puntos de apoyo en las imágenes. Elaboración propia.

Quedando el modelo a la altura de las coordenadas y ajustado. Por último, se realiza la orientación de fotos en calidad alta, dando las siguientes nubes de puntos dispersa:

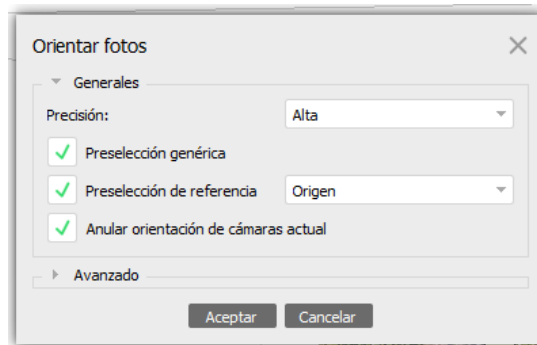


Ilustración 43 Orientación de imágenes en alta calidad Agisoft Metashape. Elaboración propia.

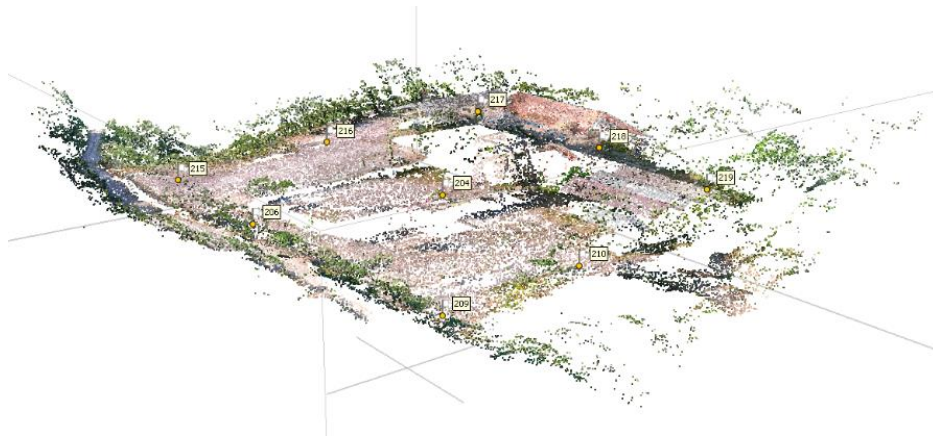


Ilustración 44 Nube de puntos dispersa, patrón de vuelo tradicional. Elaboración propia.

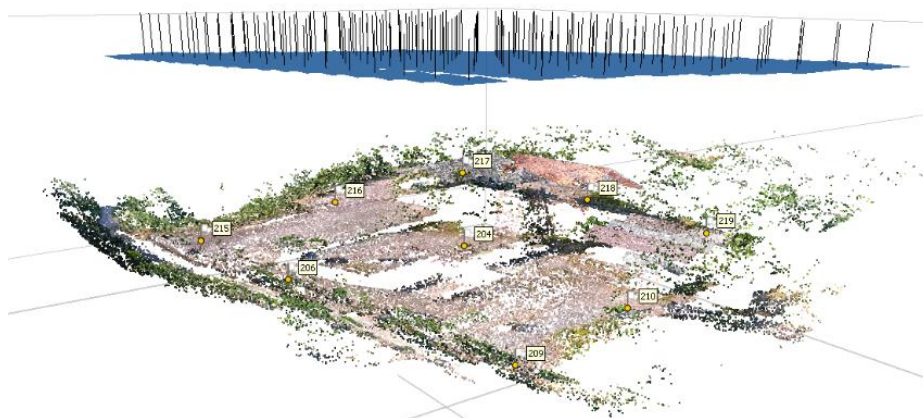
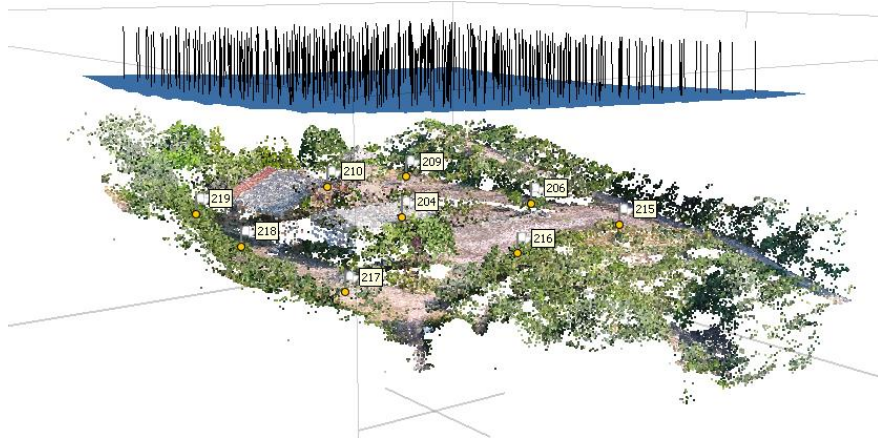


Ilustración 45 Nube de puntos dispersa, patrón de vuelo tradicional en dirección perpendicular. Elaboración propia.



*Ilustración 46 Nube de puntos dispersa, patrón de vuelo en cuadrícula.
Elaboración propia.*

Anexo C.- Vistas de la Nube de puntos densa.

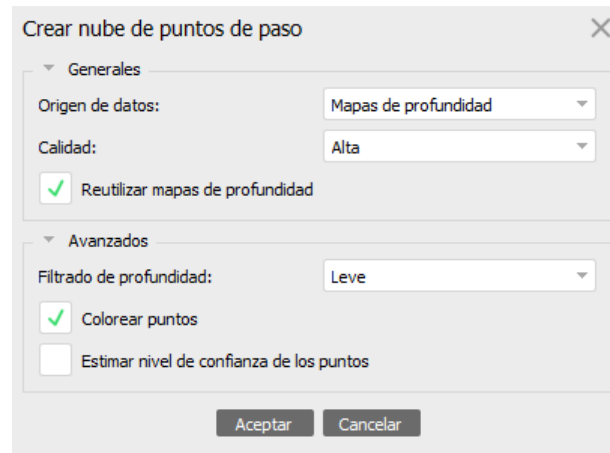


Ilustración 47 Creación nube de puntos densa alta calidad en Agisoft Metashape. Elaboración Propia.

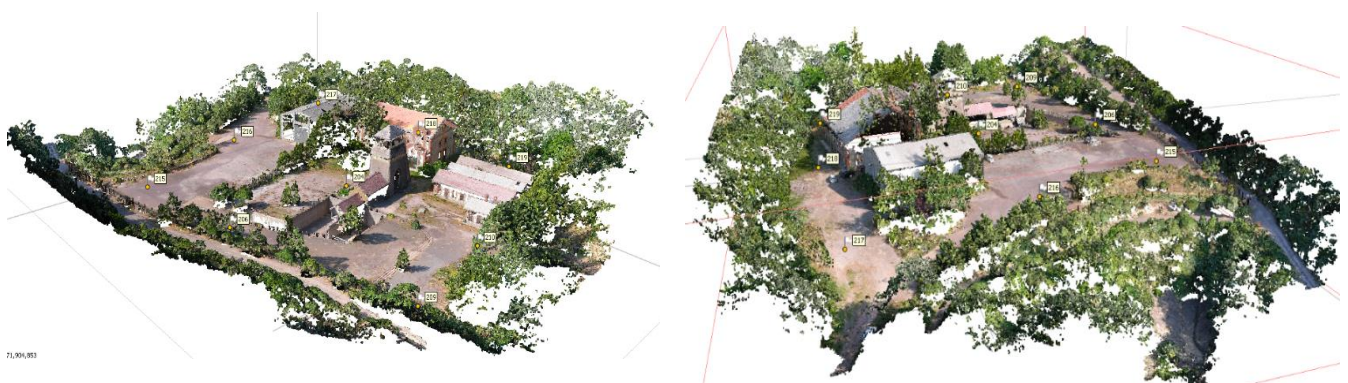


Ilustración 48 Vistas nube de puntos densa pasada regular. Elaboración propia.



Ilustración 49 Vistas nube de puntos densa pasada en dirección perpendicular. Elaboración propia.



Ilustración 50 Vistas nube de puntos densa pasada cuadrícula. Elaboración propia.

Anexo D.- Vistas malla poligonal

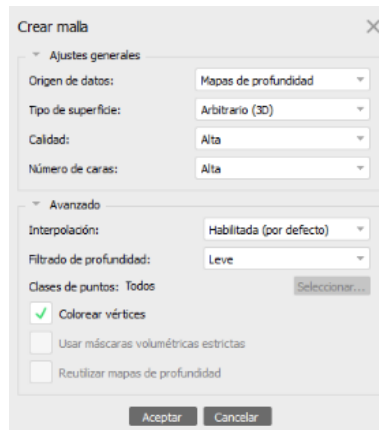


Ilustración 51 Creación de malla poligonal de alta calidad en Agisoft Metashape. Elaboración propia.

Vistas pasada regular:

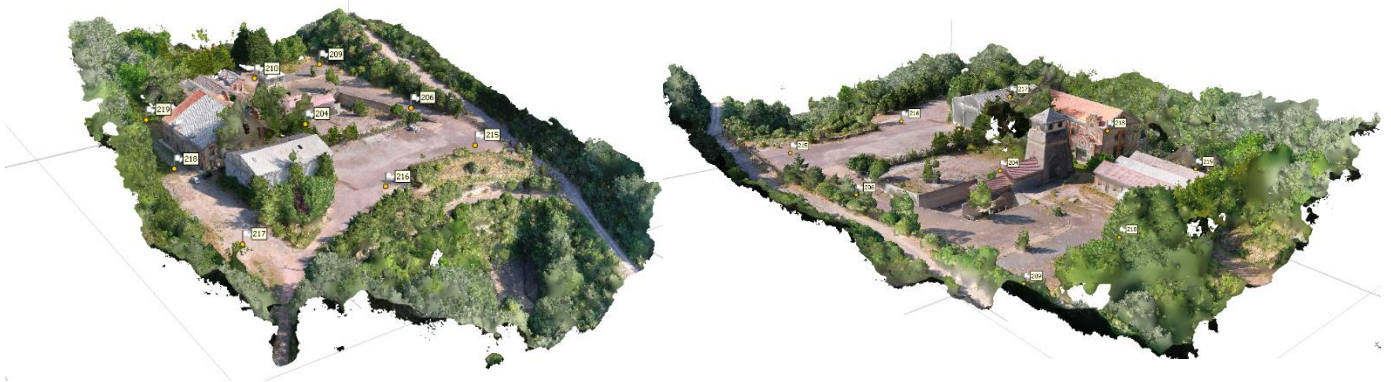


Ilustración 52 Vistas malla texturizada pasada regular. Elaboración propia.

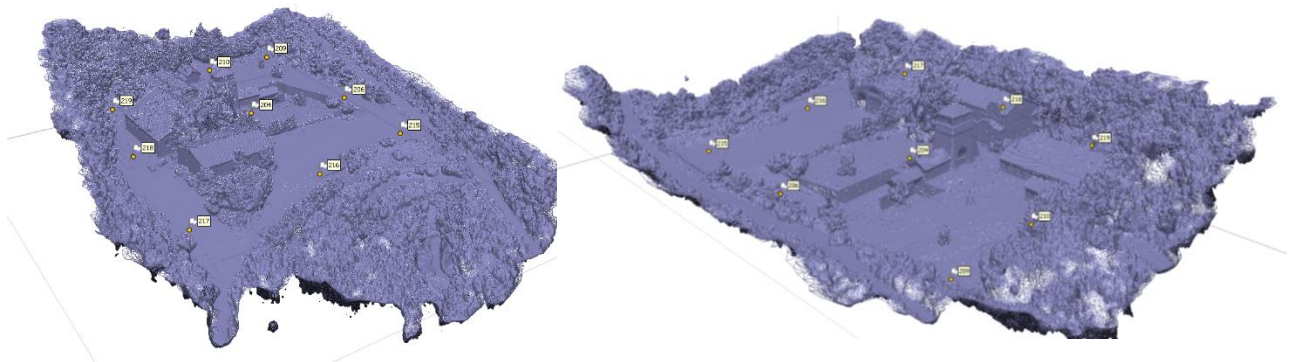


Ilustración 53 Vistas malla de triángulos pasada regular. Elaboración propia

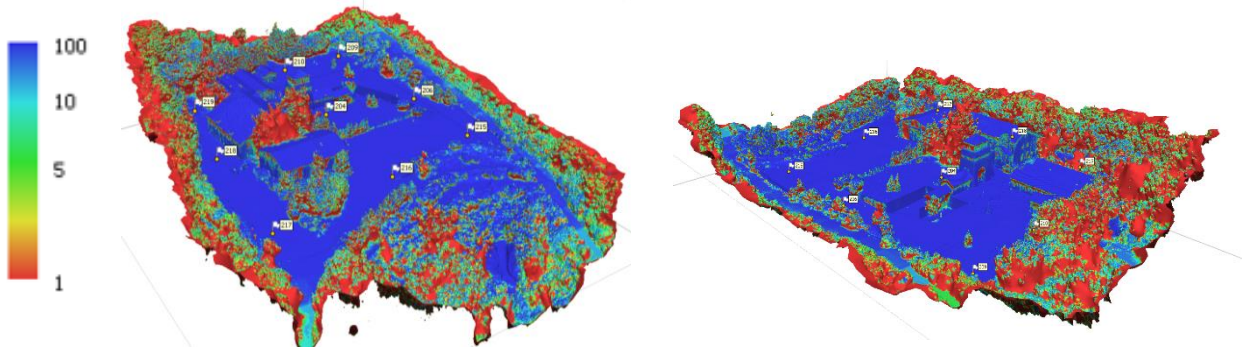


Ilustración 54 Vistas de malla texturizada pasada regular de acuerdo a su nivel de confianza. Elaboración propia.

Vistas pasada tradicional en dirección perpendicular:

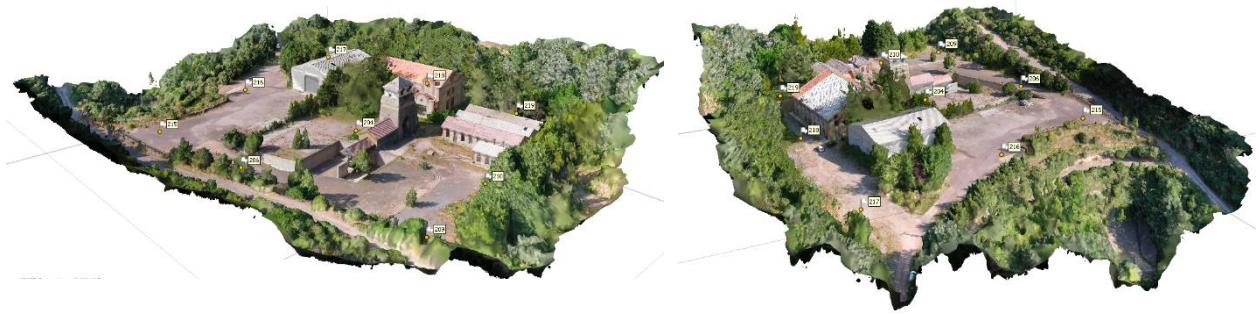


Ilustración 55 Vistas malla texturizada pasada en dirección perpendicular. Elaboración propia.

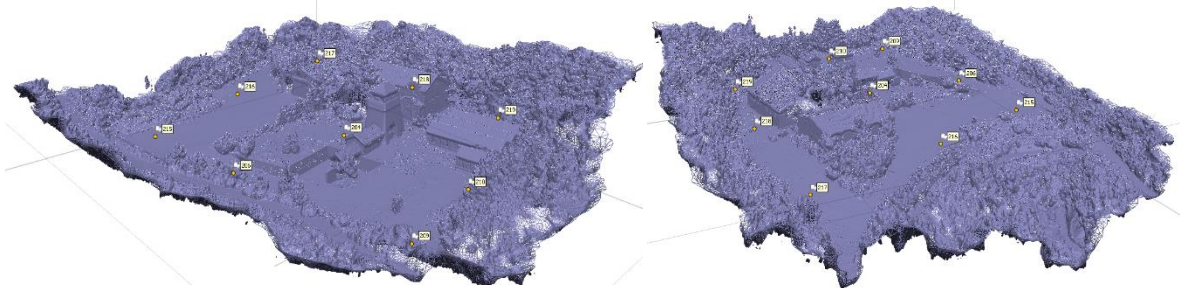


Ilustración 56 Vistas malla de triángulos pasada en dirección perpendicular. Elaboración propia

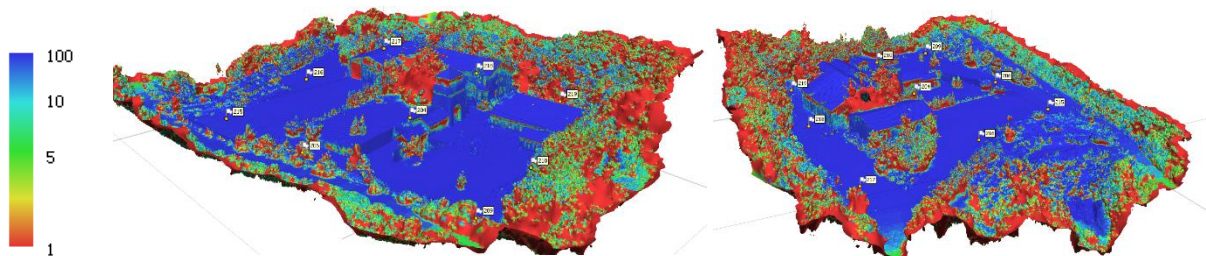


Ilustración 57 Vistas de malla texturizada pasada en dirección perpendicular de acuerdo a su nivel de confianza. Elaboración propia.

Vistas pasada cuadrícula:



Ilustración 58 Vistas malla texturizada pasada cuadrícula. Elaboración propia.

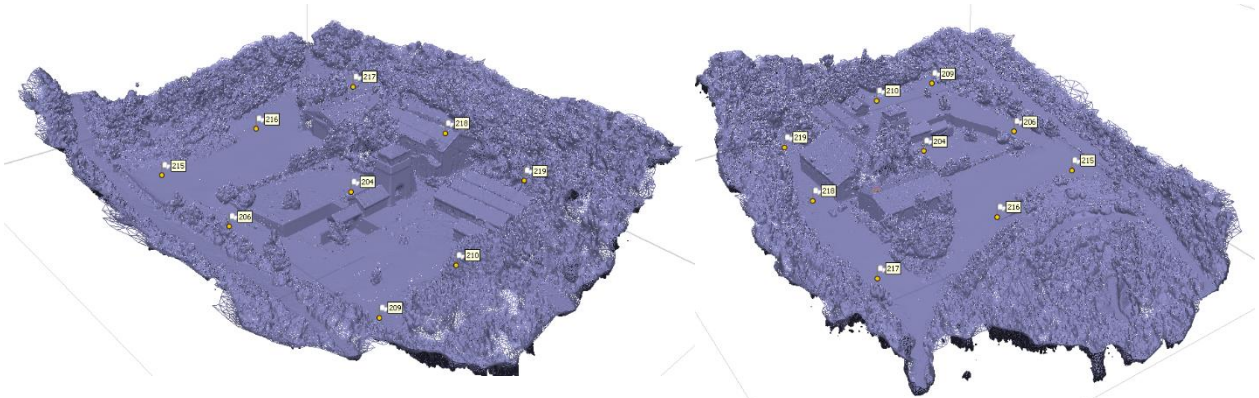


Ilustración 59 Vistas malla de triángulos pasada cuadrícula. Elaboración propia

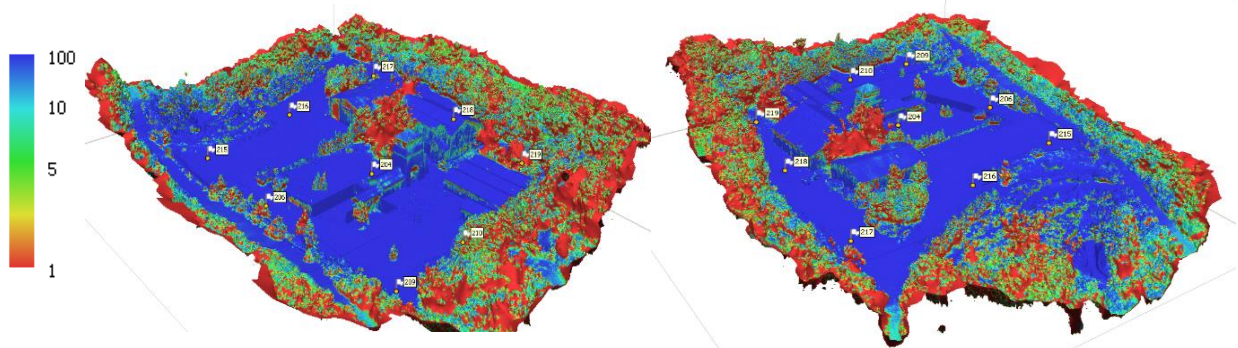


Ilustración 60 Vistas de malla texturizada pasada cuadrícula de acuerdo a su nivel de confianza. Elaboración propia.

Anexo E.- Vistas modelos digitales de elevaciones

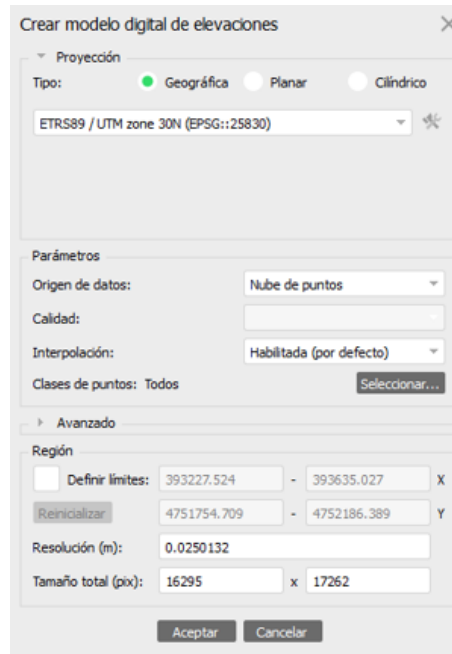


Ilustración 61 Creación modelo digital de elevaciones en Agisoft Metashape. Elaboración propia.

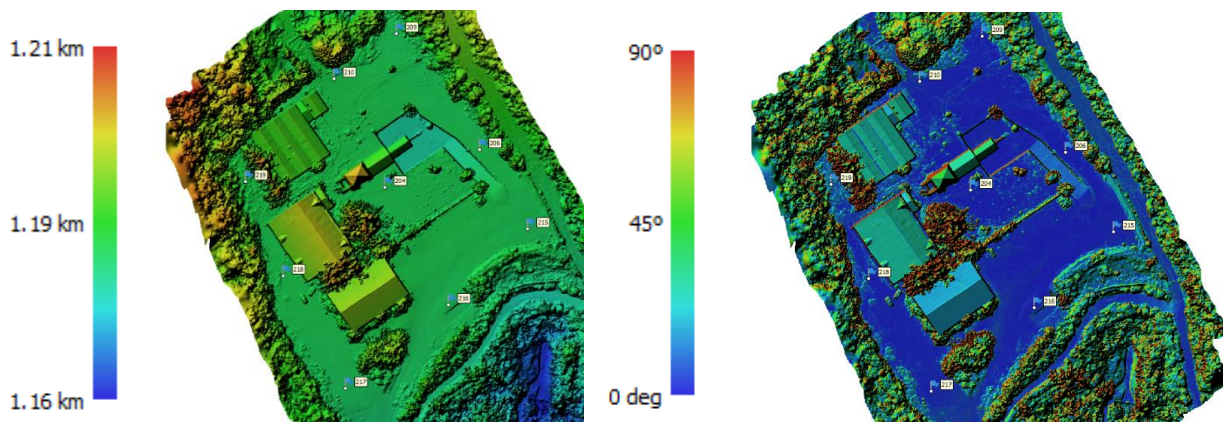


Ilustración 62 Vistas Modelo digital de elevaciones pasada regular. Elaboración propia.

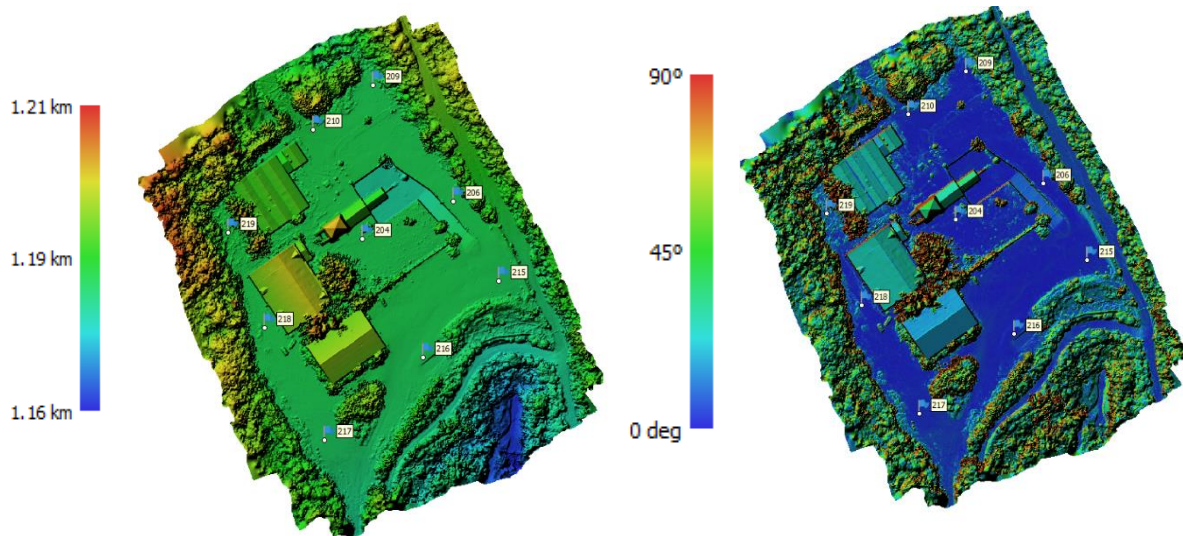


Ilustración 63 Vistas Modelo digital de elevaciones pasada regular en dirección perpendicular. Elaboración propia.

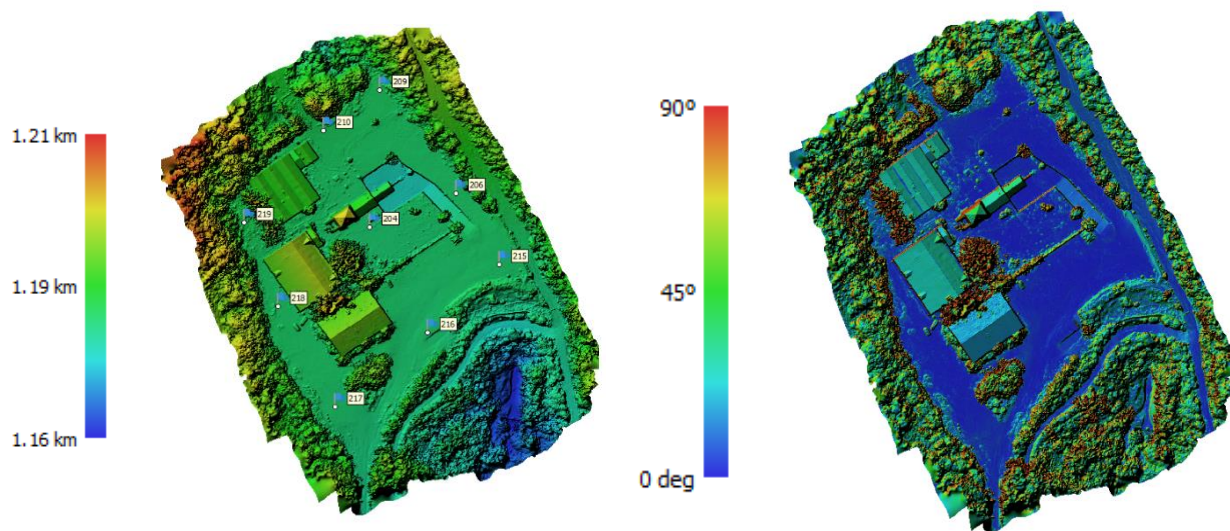


Ilustración 64 Vistas Modelo digital de elevaciones pasada cuadrícula. Elaboración propia.

Anexo F.- Vistas ortomosaicos

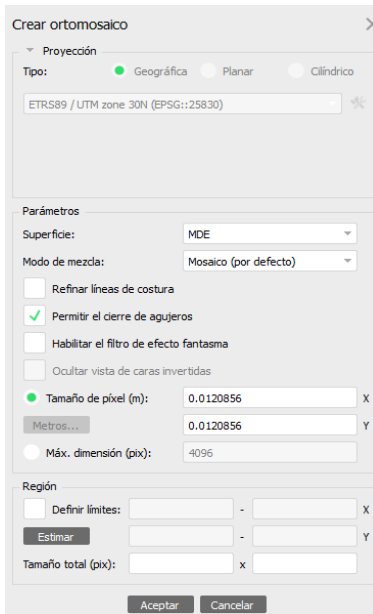


Ilustración 65 Creación de ortomosaico en Agisoft Metashape. Elaboración propia.



Ilustración 66 Ortomosaico pasada regular. Elaboración propia.



Ilustración 67 Ortomosaico pasada regular en dirección perpendicular. Elaboración propia.



Ilustración 68 Ortomosaico pasada cuadrícula. Elaboración propia.

Anexo G.- Obtención de coordenadas en Agisoft Metashape

Para medir coordenadas y distancias en el Ortomosaico se utiliza una herramienta específica, y luego se hace click en el punto de interés para mostrar su coordenada.

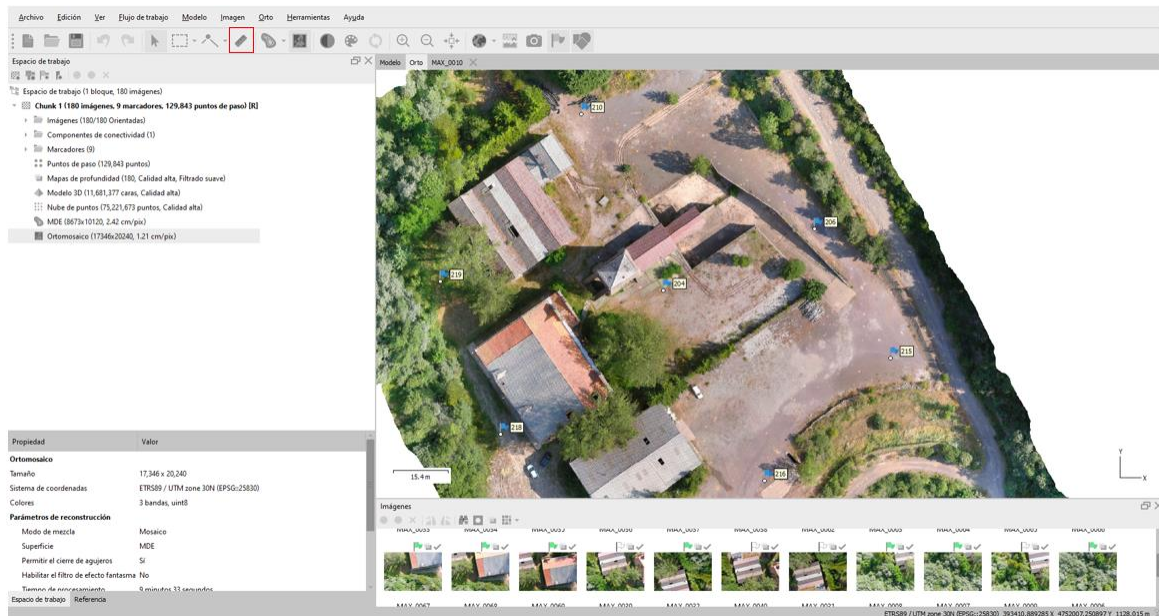


Ilustración 69 Herramienta para realizar mediciones y ver coordenadas en Agisoft Metashape. Elaboración propia.

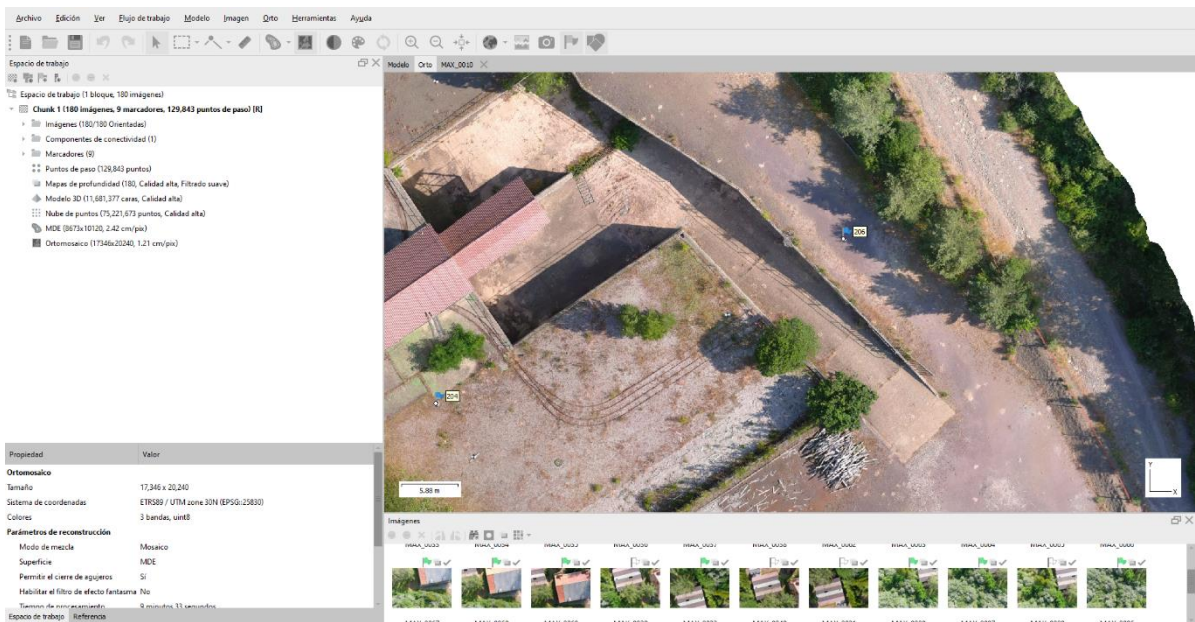


Ilustración 70 Zoom a punto de control para medir coordenadas. Elaboración propia.

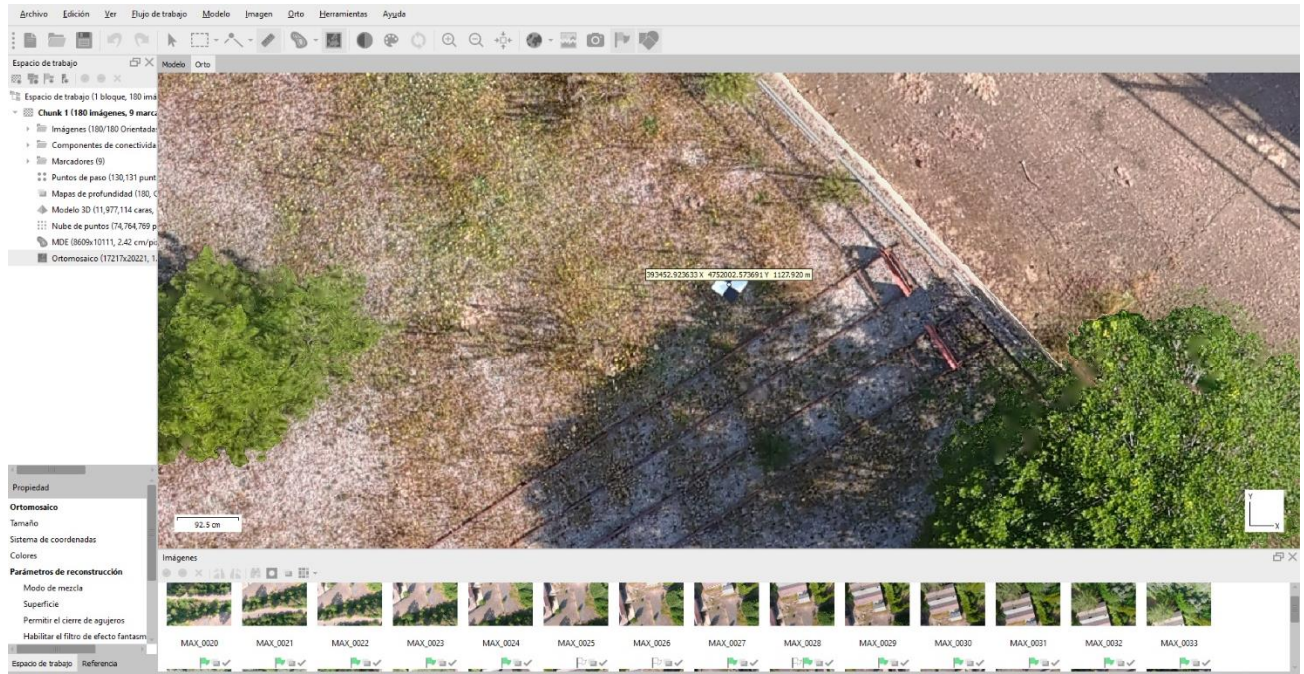


Ilustración 71 Medición del punto de control 205 en el ortomosaico de la pasada tradicional. Elaboración propia.

Anexo I.- Cálculo de variación de tiempos de procesamiento entre pasada tradicional y cuadrícula

Los tiempos de procesamiento en minutos para cada etapa entre la pasada tradicional y cuadrícula están resumidos en la siguiente tabla :

Tabla 19 Tiempos de procesamiento por etapas de pasada tradicional y cuadrícula.

Proceso	Tradicional	Cuadrícula
Orientación de imágenes	97,23	168,5
Nube de puntos	36,82	317
Malla	71	151
Ortomosaico	11	20,6

Para calcular el porcentaje de aumento entre los valores se usa la fórmula:

$$\text{Porcentaje de aumento} = \left(\frac{\text{Valor Cuadrícula} - \text{Valor Tradicional}}{\text{Valor Tradicional}} \right) * 100$$

Dando los siguientes resultados:

$$\text{Orientación de imágenes} = \left(\frac{168,5 - 97,23}{97,23} \right) * 100 \approx 73,3\%$$

$$\text{Creación de nube de puntos} = \left(\frac{317 - 36,82}{36,82} \right) * 100 \approx 760,95\%$$

$$\text{Creación de malla poligonal} = \left(\frac{151 - 71}{71} \right) * 100 \approx 112,68\%$$

$$\text{Creación de ortomosaico} = \left(\frac{20,6 - 11}{11} \right) * 100 \approx 87,27\%$$

Anexo J.- Cálculo de variación en el tamaño de almacenamiento de nube de puntos dispersa entre la pasada cuadrícula con la pasada tradicional y perpendicular

A continuación, se presenta el tamaño de los archivos de las nubes de puntos dispersa una vez finalizada la búsqueda de correlaciones entre las fotos para cada tipo de pasada:

Tabla 20 Tamaño de almacenamiento de las nubes de puntos dispersa de las pasadas tradicional, perpendicular y cuadrícula.

Pasada	Tamaño del archivo [GB]
Tradicional	1,1343
Perpendicular	1,0536
Cuadrícula	2,0374

Para calcular el aumento porcentual entre la pasada cuadrícula con la pasada tradicional y perpendicular se debe seguir el mismo razonamiento que en el [Anexo I](#).

$$\text{Aumento porcentual respecto a tradicional} = \left(\frac{2,0374 - 1,1343}{1,1343} \right) * 100 \approx 79,62\%$$

$$\text{Aumento porcentual respecto a perpendicular} = \left(\frac{2,0374 - 1,0536}{1,0536} \right) * 100 \approx 93,38\%$$

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Análisis comparativo de productos geoespaciales en fotogrametría con UAV con distintos tipos de vuelo		
Nombre Memorista: ESTEBAN ANDRÉS BUSTOS MUÑOZ		
Modalidad	Proyecto	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof. Ramón Díaz Noriega
Calificación	7.0	
Fecha	15.03.2024	
  Prof. René Gómez P.		 Prof. Julio Manuel De Luis Ruiz
Ingeniero Supervisor:		
Institución:		
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Cristian Vera Soriano		
Resumen		
<p>El trabajo se enfoca en la evaluación y comparación de la calidad y precisión en un proyecto de fotogrametría digital con UAV en un área aproximada de 13800 [m²] perteneciente al Pozo Calero, España. Se exploran tres diferentes patrones de vuelo: tradicional, tradicional en dirección perpendicular y cuadrícula, siguiendo el proceso fotogramétrico tradicional en Agisoft Metashape y utilizando puntos de control con coordenadas conocidas se calcula el Error Medio Cuadrático (RMSE) de las coordenadas proyectadas para ser usado como métrica de evaluación. Los resultados revelan diferencias en la precisión espacial entre los diferentes enfoques de vuelo, en donde la pasada cuadrícula es la más precisa, pero, la que más tiempo de procesamiento y mayor uso de almacenamiento conlleva. Seguido de la pasada tradicional como el segundo enfoque más preciso y, por último, la pasada tradicional, pero en dirección perpendicular, que coincide con la pasada que menos información proporcionaba al programa de procesamiento del área de estudio.</p>		