



Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y
BIOCIENCIAS**

**NEKAZARITZAKO INGENIARITZAKO ETA BIOZIENTZIETAKO GOI MAILAKO
ESKOLA TEKNIKOA**

*VALIDACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE ACTUALIZACIÓN DE CARTOGRAFÍA 1:500 MEDIANTE
IMÁGENES ADQUIRIDAS POR SENSORES NO FOTOGRAFÉTRICOS*

presentado por

BEÑAT URIARTE ISPIZUA(k)

aurkeztua

MASTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN
UNIBERTSITATE MASTERRA INFORMAZIO GEOGRAFIKOKO SISTEMETAN ETA TELEDETEKZIOAN



Septiembre, 2022 / 2022, iraila



Resumen

Actualmente, la cartografía urbana a gran escala se realiza a través de vuelos fotogramétricos además de otras técnicas novedosas como es el Mobile Mapping. Sin embargo, la aplicación conjunta de estos métodos no permite cubrir la totalidad del territorio, quedando zonas ocultas por la presencia de masas arboladas, edificaciones y zonas sombrías. Una posible solución es la toma de datos en campo mediante mediciones, pero es una técnica laboriosa. Otras soluciones más viables son la realización de levantamientos topográficos con láser terrestre en campo o la captura de vídeos terrestres mediante teléfonos móviles. La primera, ofrece resultados precisos, pero es muy costosa económicamente. En cambio, los videos terrestres brindan resultados similares siendo una alternativa económica. En este sentido, el objetivo principal de este trabajo consiste en validar la metodología de trabajo, en función de la precisión de las mediciones de los vídeos terrestres evaluando los resultados por medio de análisis comparativo con los datos obtenidos del láser terrestre. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que mediante la aplicación de técnicas fotogramétricas con vídeos terrestres se obtienen resultados satisfactorios y válidos para cartografiar la zona de estudio, al igual que con los productos obtenidos con datos del láser.

Palabras clave: fotogrametría terrestre, láser terrestre, ortofotografía, medición del error

Abstract

Nowadays, large-scale urban mapping is made by photogrammetric flights as well as other new techniques such as Mobile Mapping. However, the combination of these methods do not allow the total coverage of the entire territory, leaving hidden areas by the presence of wooded areas, buildings and shady areas. One possible solution is to collect data in the field with measurements, but this is a time-consuming technique. Other more viable solutions are topographic surveying in the field with terrestrial laser or the capture of terrestrial videos using mobile phones. The first provides accurate results, but it is very expensive. On the other hand, terrestrial video provides similar results and it is an economical alternative. In this sense, the main objective of this study is to validate the work methodology, based on the accuracy of the measurements of the terrestrial videos, evaluating the results with a comparative analysis with the data obtained from the terrestrial laser. The obtained results show that applying photogrammetric techniques with terrestrial videos, satisfactory and valid results are obtained for mapping the study area, as well as with the products obtained with laser data.

Key words: terrestrial photogrammetry, terrestrial laser, orthophotography, error measurement

Índice

1. INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS	1
1.1. Fotogrametría y LiDAR	1
1.2. Objetivos	5
2. MATERIALES DE PARTIDA	6
2.1. Área de estudio	6
2.2. Materiales de partida	6
2.3. Softwares empleados	10
3. METODOLOGÍA	11
3.1. Planificación previa	12
3.2. Grabación de vídeos	12
3.3. Procesamiento de vídeos	12
3.4. Procesamiento de imágenes	13
3.5. Comparativa de la precisión de las coordenadas	20
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	23
4.1. Productos obtenidos	23
4.2. Comparativas con datos de referencia	26
4.3. Productos derivados	26
4.4. Discusión de los resultados	29
5. CONCLUSIONES	30
6. BIBLIOGRAFÍA	31

Contenido de figuras

Figura 1. Los puntos del objeto se capturan en función de la distancia oblicua (s') y los ángulos ortogonales (w_1 y w_2) de acuerdo con el sistema de coordenadas. Modificado de Staiger (2003).....	2
Figura 2. Distintos Láseres Escáneres Terrestres actuales. De izquierda a derecha: Leica BLK360, Leica RTC360, Z+F IMAGER 5010, Z+F IMAGER 5016 y Faro Focus 3D X330. Fuente: Kersten y Lindstaedt (2022).	3
Figura 3. Mapa de localización de la zona de estudio para la captura de datos.....	6
Figura 4. Imágenes utilizadas del vuelo fotogramétrico del 2021 para la zona de estudio.	7
Figura 5. Visualización de la ortofoto de fachadas para la zona de estudio (izquierda) con una zona más detallada para mostrar algunos de los elementos identificados (derecha).	8
Figura 6. Fotografía tomada en el momento de la adquisición de datos del sensor TLS montado en un trípode en la Plaza de la Cruz. Fuente: OOPP.	9
Figura 7. Pasos seguidos para la obtención de la ortofoto.	11
Figura 8. Planificación previa antes de las grabaciones (izquierda) y recorrido de las grabaciones en campo.	13
Figura 9. Variaciones en los gráficos de distorsión y residuales para los parámetros iniciales y ajustados. Las líneas rojas indican la magnitud de distorsión y la dirección.	14
Figura 10. Opciones seleccionadas para la alineación de las imágenes.	15
Figura 11. Primeramente, se introducen todas las rutas distintas en un único proyecto y después se unen.	16
Figura 12. Las pasadas de las trayectorias comparten puntos de control.	17
Figura 13. Los puntos de control deben coincidir con la posición en el terreno y en las imágenes.	17
Figura 14. Perspectiva de la cámara 360 RGB desde la posición de uno de los puntos de escaneos (derecha). Visualización del punto en la nube de puntos para obtener la posición exacta (izquierda).	18
Figura 15. Asignación de los puntos de control obtenidos del vuelo y del láser.	18
Figura 16. Los pasos seguidos tras realizar la aerotriangulación de la nube densa de poca densidad para lograr la ortofoto.	19
Figura 17. Asignación de puntos de chequeo para validar la aerotriangulación de cada los GCP (vuelo y láser).	20
Figura 18. La distancia euclídea se basa en el teorema de Pitágoras. Elaboración propia.	21
Figura 19. Puntos de control del vuelo y puntos de chequeo (sin seleccionar) para la trayectoria.	22
Figura 20. Ortofoto de la Plaza de La Cruz generada con GCP definidos con el vuelo fotogramétrico del 2021.	24
Figura 21. Ortofoto de la Plaza de La Cruz generada con GCP definidos con datos del láser Leica.	24
Figura 22. Demostración de las dos ortofotos generadas (arriba) y las diferencias de las posiciones de los puntos de chequeo en la zona central (abajo).	25
Figura 23. Mapa de error para los valores de error en XYZ.	27
Figura 24. Mapa de error para los valores de error en XY.	28
Figura 25. Mapa de error de las ortofotos generadas con un segundo de intervalo.	29

Contenido de tablas

Tabla 1. Uso y origen de los distintos datos empleados.	7
Tabla 2. Programas utilizados para el procesamiento de los vídeos e imágenes.	10
Tabla 3. Planificación previa antes de la salida al campo.	12
Tabla 4. Los parámetros de calibración determinan la distancia focal medida en píxeles (f), las coordenadas del punto principal (c_x , c_y), coeficientes de afinidad y no ortogonalidad (b_1 , b_2), coeficientes de distorsión radial (k_1 , k_2 , k_3 , k_4) y los coeficientes de distorsión tangencial (p_1 , p_2 , p_3 , p_4).	14
Tabla 5. Parámetros de calibración una vez ajustado para las imágenes de toda la zona de estudio.	15
Tabla 6. Cantidad de puntos de control y el error para cada modelo tras la orientación absoluta... ..	19
Tabla 7. Diferencias de errores (m) analizados con media y desviación estándar (σ) para XYZ, XY, Z.	26
Tabla 8. Diferencia entre los errores dependiendo del intervalo entre imágenes.	26

Lista de acrónimos

BIM	Building Information Model
BTUNa	Base Topográfica Urbana de Navarra
CRP	Close Range Photogrammetry
GCP	Ground Control Point (Punto de control en el terreno)
GSD	Ground Sample Distance (Tamaño de píxel sobre el terreno)
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo digital de Elevaciones
MDS	Modelo digital del Superficie
MDT	Modelo digital del Terreno
MM	Mobile Mapping
OOPP	Obras públicas
SfM	Structure from Motion
TLS	Terrestrial Laser Scanner

1. INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS

A día de hoy, se está realizando la Base Topográfica Urbana de Navarra (BTUNa) en el Término municipal de Pamplona en la cual se registra información cartográfica del término municipal a una escala 1:500. La captura de la información se efectúa mediante imágenes procedentes de un vuelo fotogramétrico de 5 cm de resolución y a través de Mobile Mapping con un sensor LiDAR e imágenes 360. Por medio de estas dos técnicas se logra cubrir gran parte del territorio, aun así, sigue habiendo zonas donde la nube de puntos no ha completado la captura debido a que se encuentra con algún tipo de oclusión que dificulta la captura de información.

Para solucionar este problema, se lleva a cabo otra captura de datos para generar la nube de puntos de las zonas ocultas utilizando tecnologías diferentes de fotogrametría terrestre. Por una parte, el láser terrestre Leica RTC360 ofrece resultados de buena calidad siendo una técnica costosa. Por otro lado, los vídeos terrestres realizados con sensores no fotogramétricos pueden ser una buena alternativa para lograr resultados suficientemente fiables y factibles con una cuantiosa reducción de costes. Sin embargo, la precisión de estos productos generados es un aspecto a considerar debido al cumplimiento de unos estándares de calidad, es decir, los elementos cartografiados no deben tolerar un error mayor a lo establecido.

1.1. Fotogrametría y LiDAR

Fotogrametría terrestre

La fotogrametría se ocupa principalmente de realizar mediciones precisas de objetos tridimensionales y superficies del terreno a partir de fotografías (Paleo, 2011). La aplicación principal es la producción de mapas y planos (topográficos y temáticos) para la cartografía catastral (urbana y rústica), el cartografiado geomorfológico o de obras de ingeniería. Igualmente, existe una fuerte demanda en la cartografía ráster basada en ortofotografía y modelos digitales de elevación (MDE), del terreno (MDT) y de superficie (MDS). Por otro lado, existen distintos métodos para realizar mediciones de forma precisa, rápida y económica de superficies topográficas como objetos no puramente cartográficos (Lerma, 2002).

En general, la fotogrametría se divide en dos categorías según el tipo de fotografía o sensor empleado (Aber *et al.*, 2010). En la fotogrametría aérea, las imágenes son obtenidas desde una plataforma aérea. En cambio, en la terrestre, los fotogramas se adquieren desde la superficie terrestre y muestran información de un objeto o del terreno. Sin embargo, esta última, tiene un protagonismo incuestionable en zonas donde se requieran planos a gran escala y cuando la captura de datos aérea presenta dificultades de obtención, como, por ejemplo: cerradas de presas, glaciares, vegetación densa, entre otros. Por lo tanto, la terrestre, combinado con la aérea, completa la mayoría de veces las necesidades de información métrica y cartográfica (Cuervo, 1980).

Dentro de la fotogrametría terrestre, cuando el tamaño del objeto y la distancia entre este y la cámara es inferior a 100 metros se define como *Close Range Photogrammetry* en el idioma anglosajón, junto con las siglas, CRP (Cooper & Ronson, 2000). No obstante, se pueden encontrar otras denominaciones menos utilizadas: *fotogrametría de rango cercano*, *fotogrametría de corto alcance*, *fotogrametría de cerca*, *fotogrametría no cartográfica*, etc. Generalmente, la denominación aceptada sería fotogrametría de objeto cercano como sugiere Granshaw (2016).

Además, existe una extensión de la fotogrametría de objeto cercano llamada videogrametría que consiste en obtener la posición espacial de un objeto o del terreno a partir de grabaciones de vídeos o de secuencias de

imágenes (Beraldin *et al.*, 2005), siendo una captura dinámica que se realiza en movimiento (Zhen *et al.*, 2018). Como resultado del procesamiento de los datos de partida se logra una nube de puntos con coordenadas espaciales y un modelo 3D (Lian *et al.*, 2021).

Recientemente se está realizando la reconstrucción tridimensional de objetos y de superficies con imágenes de cámara con el método fotogramétrico *Structure from Motion* (SfM) que consiste en obtener fotografías del objeto de interés desde diferentes ángulos con solapamiento entre fotos (Pezuelo *et al.*, 2018). Por consiguiente, este algoritmo sirve para obtener una nube de puntos de forma automática, creando un modelo con referencia relativa usando puntos comunes de las imágenes. Sin embargo, a este modelo se otorgan unas coordenadas conocidas en un sistema terrestre mediante una serie de puntos de control para su georreferenciación, siendo identificables en las fotografías (Carrivick *et al.*, 2016).

Láser Escáner Terrestre

El láser terrestre, *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), conocido también con los nombres de LiDAR topográfico o LiDAR terrestre. Consiste en un escáner láser montado en un trípode estático con capacidad de adquirir coordenadas XYZ de numerosos puntos (Vosselman & Maas, 2010). El sensor láser emite pulsos de rayos (luz monocromática, coherente, intensa y sin dispersión) realizando un barrido horizontal y vertical para cubrir toda superficie a levantar. Para ello dispone de dos espejos perpendiculares entre sí con la finalidad de determinar el ángulo horizontal y vertical de los giros respecto a un sistema de coordenadas (Buill *et al.*, 2007).

El pulso láser incidente rebota con el objeto y se calcula la distancia recorrida en el haz de retorno según el tiempo empleado. Para cada punto del objeto se registra la distancia oblicua y dos ángulos ortogonales (**Figura 1**). Con la captura de una gran cantidad de puntos se logra una nube de puntos tridimensional teniendo en cuenta que el trípode se sitúa en múltiples posiciones con suficiente solapamiento entre escaneos sucesivos (Batilović *et al.*, 2022). Por otra parte, se mide la intensidad de la señal reflejada conocida como la cuarta dimensión que permite mejorar la visualización en nubes de puntos densas y complejas cuando la información 3D no es suficiente (Straiger, 2003).

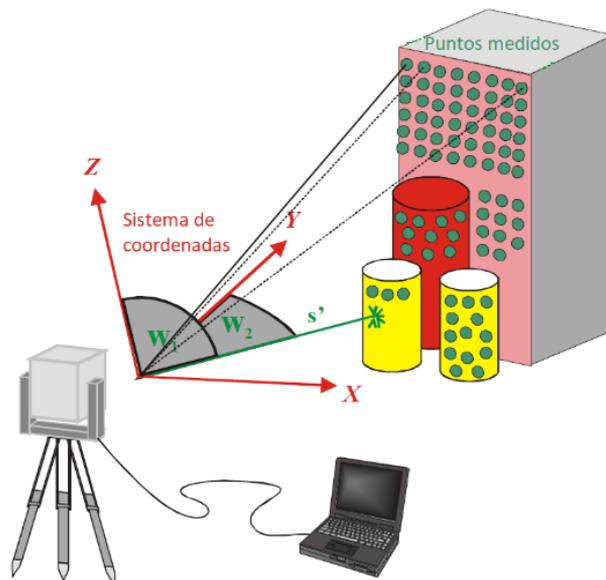


Figura 1. Los puntos del objeto se capturan en función de la distancia oblicua (s') y los ángulos ortogonales (w_1 y w_2) de acuerdo con el sistema de coordenadas. Modificado de Staiger (2003).

Aplicaciones de la fotogrametría y del láser terrestre

En los últimos años el avance de la tecnología de los teléfonos móviles sofisticados ha permitido disponer de cámaras no fotogramétricas de alta resolución motivando así a que se popularicen las aplicaciones de la fotogrametría de objeto cercano (Alsubaie & El-Sheimy, 2016). Sin embargo, en la década de los 70 ya se conocía esta metodología y sus usos no únicamente estaban asociados a la topografía, sino también a distintos campos como antropometría, arqueología, criminología, ciencia de los materiales, por mencionar algunos (Karara, 1972; Kennert & Torlegard, 1976)

En la actualidad se está realizando fotogrametría terrestre con diversas tecnologías. Por un lado, la adaptación de los sensores láser escáner aerotransportados a las aplicaciones terrestres ofrecen resultados precisos. Por otro lado, el método más innovador es el sensor no fotogramétrico con alta resolución como las cámaras de los teléfonos móviles modernos de los últimos años. Una de las tareas principales de la fotogrametría terrestre es la generación de modelos 3D de edificios (*Building Information Model*, BIM) con TLS (Bernat *et al.*, 2014; Abed *et al.*, 2018; Tkac *et al.*, 2018; Oseni *et al.*, 2020; Kuzmic *et al.*, 2021) y con fotogrametría (Saygı & Hamamcioğlu-Turan, 2009; Torresani & Remondino, 2019; Odumosu *et al.*, 2021). No obstante, en otros trabajos se ha combinado la fotogrametría terrestre con la aérea utilizando drones para lograr fotogramas de una cierta altura (Luhmann *et al.*, 2019; Parrinello & Picchio, 2019; Sun & Zang, 2019). Igualmente, se pueden lograr modelos 3D de otros objetos de tamaño más reducido que los edificios, convirtiendo así los móviles en escáneres como exponen Kolev *et al.* (2015).

En algunos casos se ha tenido como finalidad realizar mediciones de puentes (Jiang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2019; Leitch, 2020), mediciones a ciertos objetos para calcular la precisión de los instrumentos TLS (Kersten *et al.*, 2005; Karsidag & Alkan, 2012) y CRP (El-Din Fawzy, 2018) o estimaciones de volumen en excavaciones mineras con fotogrametría (Abbaszadeh & Rastiveisa, 2017). En otro estudio realizado por Wang *et al.* (2012) se compara la exactitud que ofrece un teléfono móvil y una cámara fotográfica para modelos estructurales. Incluso, Kujawa (2021) contrasta la precisión de una cámara del móvil tomando fotografías bajo el agua y en el aire de un mismo objeto. Asimismo, en la bibliografía se encuentran comparaciones entre ambos métodos: TLS y CRP (Rüther *et al.*, 2012). De la misma forma, Mechelke *et al.* (2007) equiparan distintos sensores TLS de segunda y tercera generación, además de Kersten y Lindstaedt (2022) que realizan una investigación de la precisión de láser escáneres terrestres de última generación, como Leica BLK360 (2017) y Leica RTC360 (2019) entre otros (**Figura 2**).



Figura 2. Distintos Láseres Escáneres Terrestres actuales. De izquierda a derecha: Leica BLK360, Leica RTC360, Z+F IMAGER 5010, Z+F IMAGER 5016 y Faro Focus 3D X330. Fuente: Kersten y Lindstaedt (2022).

También existen trabajos en distintas áreas realizados con estas tecnologías como estimaciones forestales (Mokros *et al.*, 2018; Torralba *et al.*, 2019; Lian *et al.*, 2021), estudios de accidentes de tráfico (Fraser *et al.*, 2008), estudios forenses (Routsala, 2016), aplicaciones industriales (Luhmann, 2010), análisis de materiales (Afrouz *et al.*, 2019), documentación 3D de un cepo de ancla romano (Fernández-Tudela *et al.*, 2022) y la monitorización de aspas de turbinas eólicas (Guan *et al.*, 2022). De igual modo hay trabajos más inusuales de Dimitriu *et al.* (2021) que estudian los microfósiles mediante fotogrametría *Structure from Motion* con cámara microscópica y, por otro lado, Hillcoat *et al.* (2021) consiguen realizar mediciones morfométricas a cetáceos bajo el agua usando estero-videogrametría.

En cuanto a otras investigaciones más relacionadas con la cartografía destacan los estudios geomorfológicos relacionado con desplazamientos de laderas (Stylianidis *et al.*, 2003; Cardenal *et al.*, 2008; Liu & Huanga, 2016; Kogut & Pilecka, 2020) y valles glaciares (Palà *et al.*, 1999, Carrivick *et al.*, 2015). Adicionalmente, en los trabajos de Javernick *et al.* (2014) y Marteau *et al.* (2017) emplean la fotogrametría SfM para estudiar la geomorfología fluvial y generar Modelos Digitales de Elevación. Asimismo, Bitelli *et al.* (2004) como Raveland & Curtaz (2013) contrastan la metodología de la fotogrametría terrestre con métodos de captura TLS para estudios geomorfológicos. Mientras tanto, Wang *et al.* (2022) acuden al láser terrestre para discriminar características sedimentarias.

En consideración con la obtención de datos urbanos, excluyendo infraestructuras como edificios y puentes, son Lichti *et al.* (2005) y Belton & Bae (2010), autores que logran realizar el registro de información cartográfica de carreteras y calles a través de tecnología TLS. Igualmente, con el uso del LiDAR topográfico se genera un modelo 3D de un aparcamiento de automóviles (Abdullah & Yosuf, 2022) De mismo modo, mediante la utilización del láser terrestre y CRP, Giuffrida *et al.* (2022) consiguen producir documentación gráfica de un área arqueológica urbana romana.

Estado del arte

Una ortofotografía, o simplemente ortofoto, representa la superficie terrestre a partir de fotografías que han sido rectificadas mediante un MDE para que sean corregidas geoméricamente siguiendo una escala constante y proyección ortogonal. Generalmente, en la fotogrametría para obtener una ortofoto se parte de una nube de puntos (Anderson & Gaston, 2013) generada mediante técnicas distintas ya mencionadas como la fotogrametría basada en SfM y otras como la tecnología láser 3D. Una de las ventajas del TLS es su eficiencia, fiabilidad y precisión para la obtención de nube de puntos con gran detalle. Sin embargo, se ha comprobado que es posible producir datos 3D de gran cantidad de puntos precisos con técnicas de fotogrametría SfM siendo un método más económico (Mokroš *et al.*, 2018). En productos cartográficos, tanto ortofotos como productos intermedios, es vital la comprobación de la georreferenciación para el análisis de calidad posicional ya que nos ofrece una garantía final o verificación del producto (Atkinson, 2003). Según Ariza (2003) la exactitud posicional es el grado de conformidad de las posiciones horizontales y verticales, haciendo referencia a la exactitud planimétrica y altimétrica, de los objetos en relación con la posición verdadera de los mismos en la superficie terrestre.

Los métodos de evaluación de la exactitud posicional han evolucionado con los años, empezando por el simple \pm NMAS (National Map Accuracy Standard) (USBB, 1947), hasta el más sofisticado ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (ASPRS, 2015). Igualmente, el avance de las tecnologías de captura permite obtener coordenadas absolutas en campo con altos niveles de veracidad como el caso del sistema global de navegación por satélite GNSS (Ariza-López *et al.*, 2019).

En algunos trabajos sobre la validación de ortofotografías, Korumaz & Yildiz (2021) estudian la precisión de la ortofoto generada a través de un dron para la documentación de una zona arqueológica. Para ello, emplean

el reciente y complejo método de evaluación de ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. La precisión posicional de este estudio se centra en los estándares de ASPRS definiendo clases de precisión específicas y umbrales RMSE asociados para ortoimágenes digitales, datos planimétricos digitales y datos digitales de elevación. Asimismo, incluyen mediciones de precisiones horizontales y verticales con un intervalo de confianza del 95% teniendo en cuenta el número requerido y la distribución espacial de los puntos de chequeo. Los resultados obtenidos con el conjunto de datos cumplen con los estándares de precisión posicional de ASPRS para la clase de precisión horizontal $RMSE_x/RMSE_y$ de 5 cm y para la clase de precisión vertical $RMSE_z$ de 5 cm.

De forma parecida, Sertić *et al.* (2022) investigan la influencia que tienen la altura de vuelo y tipo de sensor para ver la calidad de las ortofotos generadas mediante la captura de imágenes con drones para propósitos catastrales. La precisión de los productos generados consiste en 26 puntos de control y puntos de chequeo medidos con métodos clásicos y el método GNSS RTK (Global Navigation Satellite System Real-Time Kinematic) considerando como valores verdaderos para plasmar la comparación mediante estimaciones del error planimétrico. En este estudio se observa que hay correlación entre el sensor y la precisión del modelo y correlación negativa entre la altura del vuelo y la precisión.

Estos trabajos de análisis y evaluación de ortofotografías, a pesar de que traten de técnicas de captura con vehículos aéreos no tripulados, se ha visto que las técnicas de SfM permiten obtener ortofotos detalladas con la calidad esperada de precisión. No obstante, los avances tecnológicos de los nuevos teléfonos móviles están permitiendo adentrarse a este campo de la fotogrametría para la obtención de modelos 3D, como se ha visto en los estudios mencionadas anteriormente. En esta línea, la realización de este trabajo ha venido motivada por la necesidad de desarrollar una metodología para completar la cartografía de una zona urbana mediante una técnica menos costosa de captura de información geográfica. Al mismo tiempo, el estudio de la precisión de los productos finales se evalúa a lo largo de este Trabajo Fin de Máster.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del trabajo es validar la metodología de trabajo, en función de la precisión de las mediciones de los vídeos terrestres evaluando los resultados por medio de análisis comparativo con los datos obtenidos del láser terrestre Leica RTC360 realizado por Obras Públicas de Gobierno de Navarra. Este objetivo general lleva asociado varios objetivos específicos:

- Aplicar la metodología desarrollada mediante los vídeos terrestres para medir la precisión de los productos partiendo de información del vuelo fotogramétrico del 2021 y la nube de puntos de láser terrestre.
- Evaluar los resultados mediante los datos del láser escáner terrestre como información de referencia.
- Obtener una ortofotografía para poder completar cartografía en las zonas en las que no se puede extraer información de las fuentes de datos originales (Vuelo fotogramétrico y MM)

2. MATERIALES DE PARTIDA

2.1. Área de estudio

La zona de interés se ubica en el área urbana de Pamplona, exactamente en la Plaza de la Cruz. Esta manzana del segundo ensanche de la capital no fue edificada, dando lugar a una plaza con un amplio arbolado que cuenta con un parque infantil, baños públicos y bancos. Además, en la parte central tiene un estanque ajardinado con forma de cruz, pero realmente es la cruz de hierro situada en el interior del estanque la que le concede el nombre (**Figura 3**).



Figura 3. Mapa de localización de la zona de estudio para la captura de datos.

Este lugar es ideal para experimentar con la fotogrametría terrestre, ya que es una zona muy arbolada que oculta totalmente la información cartográfica siendo prácticamente imposible realizar la restitución mediante imágenes aéreas.

2.2. Materiales de partida

Los datos empleados en este trabajo (**Tabla 2**) han sido suministrados por Obras Públicas de Gobierno de Navarra (OOPP) y Ayuntamiento de Pamplona, y son datos para el proyecto de producción de cartografía. Constan del vuelo fotogramétrico de 5 cm del año 2021 incluyendo las pasadas de los vuelos y del levantamiento reciente realizado con el LiDAR terrestre en la misma plaza. Para la grabación de los vídeos terrestres se ha utilizado un teléfono móvil, mediante el que se han ido grabando diversas trayectorias recorriendo la plaza. En los apartados siguientes se describen los datos de partida y las especificaciones del láser y de la cámara. Conjuntamente, se han empleado otros datos capturados a partir de Mobile Mapping para la planificación de las rutas.

Tabla 1. Uso y origen de los distintos datos empleados.

Materiales	Origen	Uso
Vuelo fotogramétrico	OOPP/Ayuntamiento de Pamplona	- Obtención de puntos de control
Mobile Mapping	OOPP/Ayuntamiento de Pamplona	- Planificación de la grabación de las rutas
Láser Escáner Terrestre	OOPP	- Obtención de puntos de control y puntos de chequeo
Teléfono móvil	Beñat Uriarte	- Grabación de los vídeos

Vuelo fotogramétrico

Las imágenes aéreas utilizadas son del vuelo fotogramétrico del año 2021 de 5 cm de resolución capturadas con la cámara *UltraCam Eagle* con una distancia focal de 80 mm. La ortofoto del 2021, fecha de vuelo para el presente proyecto, cuenta también con imágenes aéreas de tres pasadas (7, 8, 9) que cubren la zona de interés logrando así otra perspectiva de la zona de estudio (**Figura 4**)



Figura 4. Imágenes utilizadas del vuelo fotogramétrico del 2021 para la zona de estudio.

Las imágenes aéreas son propiedad de OOPP y son de libre acceso. Su descarga se realiza desde la web de la Cartoteca y Fototeca de Navarra (Gobierno de Navarra, 2022). Actualmente, el vuelo del 2021 de Pamplona está disponible en imágenes a 5 cm de resolución, teniendo en cuenta que se pueden obtener por fotogramas. No obstante, la ortofotografía verdadera ortorrectificada de 0,05 GSD (*Ground Sample Distance*) del vuelo fotogramétrico ha sido producida por Tracasa Instrumental para procesos de producción interna, dicha ortofoto no es de libre acceso, sin embargo, hay otra disponible para el público a menor resolución. En consideración, la ortofoto verdadera forma parte de información adicional que proporciona comodidad a la hora de trabajar, pero la obtención de coordenadas se podría realizar solo con los fotogramas de las distintas pasadas que generan la ortofoto de 2021.

Las pasadas muestran información adicional con otra visión sobre la zona de estudio ya que la captura de la imagen se efectúa de posiciones distintas. Las pasadas dan la posibilidad de elegir cuál se adapta mejor para cada punto de control y de sacar la máxima información posible de las imágenes. Esto sucede debido a las condiciones de vuelo de cada una donde puede que haya zonas sombrías o la distribución de los elementos es distinto en cada captura. Por ejemplo, en una de las pasadas se puede llegar a observar un punto de apoyo en la mitad del trayecto de un video lo cual aporta mucha información.

Mobile Mapping

El Mobile Mapping (MM) consiste en la adquisición de datos geospaciales empleando sensores montados en plataformas móviles (El-Sheimy, 1996). Para el caso de estudio, se usaron datos obtenidos mediante un sensor LiDAR e imágenes 360 desde la parte superior de una furgoneta con un sistema de posicionamiento incorporado para la georreferenciación. La captura de estos datos se realizó para toda la ciudad a fecha del vuelo fotogramétrico (2021).

Una vez procesado los datos capturados, se obtuvieron dos tipos de resultados teniendo en cuenta las características de cada uno de los puntos de la nube. Por una parte, se generó una ortofoto compuesta por puntos correspondientes a la superficie y, por otra parte, una ortofoto de elementos situados con una cierta altura que han sido identificados con las imágenes 360 como árboles, farolas, bancos, etc. Estas dos ortofotos muestran información valiosa, sobre todo la ortofoto que muestra elementos por encima del terreno (**Figura 5**) que ha sido aprovechada para realizar una adecuada planificación antes de grabar los vídeos. Además, el límite externo e interno de la zona de estudio también ha sido realizada con el apoyo de estos datos.

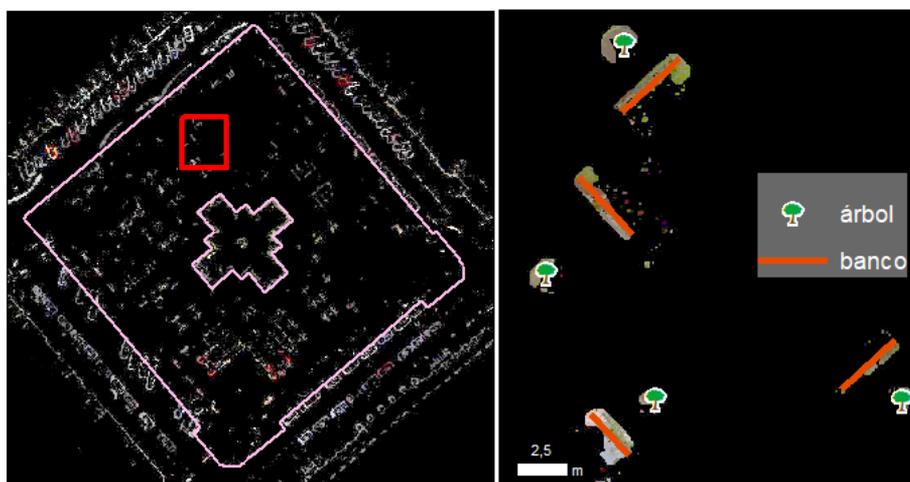


Figura 5. Visualización de la ortofoto de fachadas para la zona de estudio (izquierda) con una zona más detallada para mostrar algunos de los elementos identificados (derecha).

Láser escáner terrestre

Los datos del LiDAR terrestre fueron capturados por el sensor Leica RTC360 por OOPP el día 19 de julio del 2022 (**Figura 6**) y fueron proporcionados en formato E57, LAS y LGS, además de un informe de registro después de su procesamiento con el software *Cyclone REGISTER 360*. Dichos datos fueron ajustados a 8 puntos de referencia de los vuelos fotogramétricos situados en las cuatro esquinas de la plaza, es decir, dos puntos por cada 4 esquinas. En cuanto a la adquisición de datos, con una duración de 3 horas, se realizaron 17 escaneos dispersados por la zona de estudio para abarcar los datos desde distintos ángulos.

El láser escáner 3D Leica RTC360 efectúa un escaneo de 360° en el plano horizontal y de 300° en vertical. Hace uso de un láser de clase 1 con una longitud de onda de 1550 nm (fuera del espectro visible), es capaz de capturar hasta 2 millones de puntos por segundo hasta una distancia de 130 metros. La precisión de los datos se reduce con la distancia: error de 1,9 mm a 10 m; 2,9 mm a 20 m y 5,3 mm a 40 m. Por otro lado, viene acompañado de un sistema de tres cámaras RGB con el mismo campo de visión del escáner (RPG, 2018).

Cabe señalar que estos datos son muy fiables con un detalle milimétrico, y con casi un total de 1000 millones de puntos para la zona de estudio. En el presente trabajo los datos capturados por el láser han sido empleados para realizar la comparativa de los resultados del láser con los productos generados con las técnicas fotogramétricas. Por ello, los datos del LiDAR se han considerado como datos de referencia para comparar y obtener el error que tienen los productos generados mediante técnicas de fotogrametría.



Figura 6. Fotografía tomada en el momento de la adquisición de datos del sensor TLS montado en un trípode en la Plaza de la Cruz.
Fuente: OOPP.

Cámara del teléfono móvil

Los vídeos terrestres fueron grabados el 30 de julio con el móvil Huawei P20 Pro (2018) con la máxima resolución que ofrece a 3840x2160. La grabación de los vídeos se realizó con el móvil sujetado en una orientación apaisada, es decir, en horizontal, para capturar la máxima información posible de la superficie. Por mencionar algunas de las características, el teléfono dispone de una triple cámara trasera con óptica firmada por Leica compuesta por dos sensores RGB de 40 y 8 Megapíxeles con una distancia focal de 27 mm, y otro monocromo de 20 Mpx, con una distancia focal de 80 mm.

2.3. Softwares empleados

Para el tratamiento de los datos y su posterior procesamiento se han empleado algunos programas dependiendo de la tarea a realizar. En la **Tabla 2** se indican los softwares utilizados y cuál ha sido la función de cada uno de ellos.

Tabla 2. Programas utilizados para el procesamiento de los vídeos e imágenes.

Software	Función	Tareas
Python 3.5	Lenguaje de programación	- Obtención de fotogramas sucesivos de los vídeos
Agisoft PhotoScan Professional	Procesamiento de imágenes digitales mediante la combinación de técnicas de fotogrametría digital y reconstrucción 3D del entorno	- Procesamiento de las imágenes - Definición de puntos de control en las imágenes - Generación del ortomosaico y MDT
ArcMap 10.4.1	Representación de la información geográfica como una colección de capas y otros elementos en un mapa	- Identificación de puntos de control y - Extracción de coordenadas de la ortofoto - Interpolación para los puntos de validación
JetStreamerViewer	Permite visualizar, explorar y compartir datos del escáner Leica en formato LGS, además de realizar mediciones	- Obtención de GCP y puntos de chequeo de la nube de puntos LiDAR

3. METODOLOGÍA

La videogrametría permite obtener la posición del terreno a partir de grabaciones de vídeos de las cuales se derivan en un conjunto de fotogramas sucesivos. Estas imágenes tienen partes en común, en forma de puntos homólogos que sirven para la alineación, es decir, en este proceso se realiza la orientación relativa que determinan las orientaciones angulares y las posiciones relativas de las imágenes en el momento de la toma. El modelo arbitrario (x_m, y_m, z_m) logrado en el primer paso requiere una transformación a coordenadas terreno (X, Y, Z) . Para ello, se necesita conocer las coordenadas de al menos 3 puntos para realizar la orientación absoluta (Lerma, 2002). Por último, se precisa crear una nube densa de puntos para toda la zona de estudio y en especial en algunas zonas dedicadas para la comparación de la precisión de los datos generados con los datos del TLS.

En esta parte del trabajo se propone una metodología que explica el proceso seguido desde la planificación y la grabación de los vídeos hasta la comparativa de los resultados y la generación de la ortofotografía (**Figura 7**). En los siguientes apartados se desarrollan cada uno de los pasos seguidos.

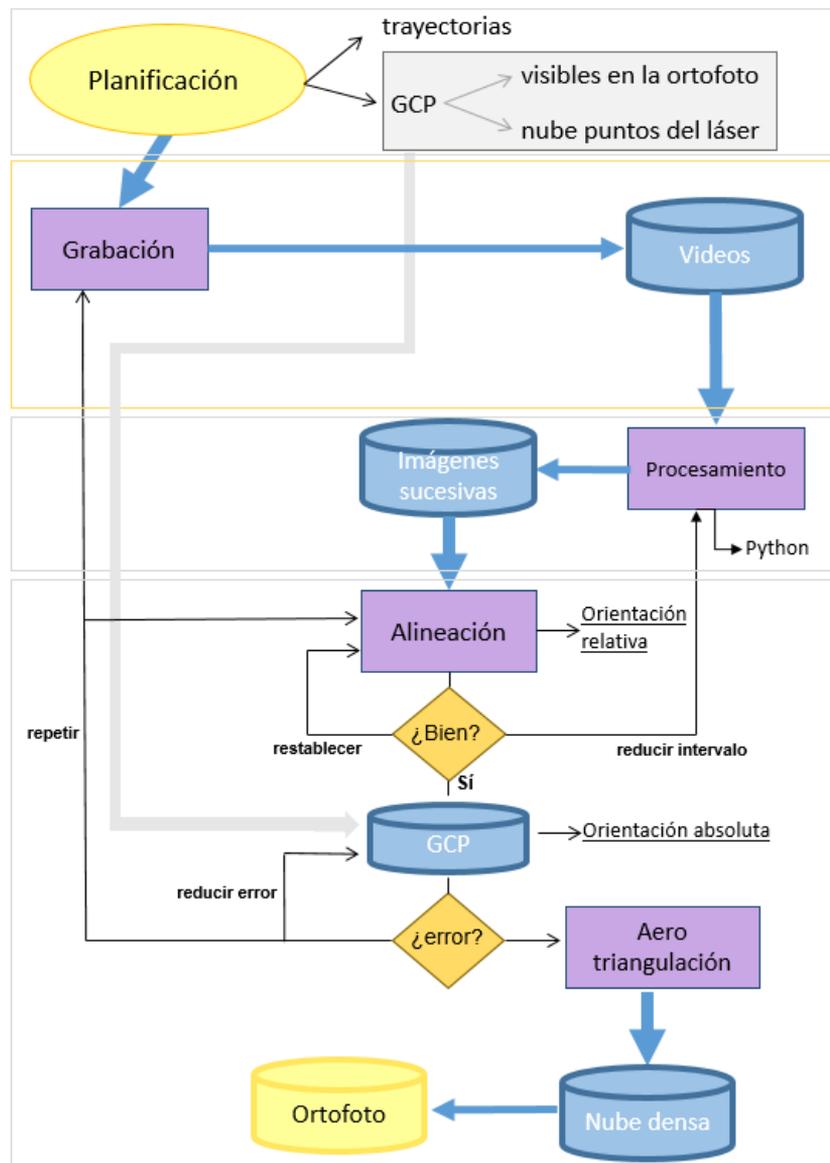


Figura 7. Pasos seguidos para la obtención de la ortofoto.

3.1. Planificación previa

Antes de empezar con la grabación de los vídeos se ha analizado la zona de estudio y se ha calculado el coste temporal requerido para ejecutar cada una de las tareas (**Tabla 3**). Por ello, como se representa en el diagrama de flujo de la **Figura 7**, la planificación es la etapa inicial de mayor repercusión para el resto del proceso. En esta fase se han organizado las trayectorias de los vídeos para la Plaza de la Cruz (**Figura 8**) teniendo en cuenta la capacidad de campo de visión lateral del sensor y el posicionamiento de los puntos de control o *Ground Control points* (GCP).

Tabla 3. Planificación previa antes de la salida al campo.

Trayectos	23
Videos	23
Distancia trayectos	1872,9 metros
Duración vídeos	56 minutos (velocidad 2km/h)
Duración de grabaciones	1 hora aprox.

Como se observa en la **Figura 8**, para recorrer toda la zona de estudio se ha planteado realizar barridos en ambas direcciones para lograr cubrir la plaza en su totalidad. En las partes externas, las trayectorias de los vídeos se han trazado mediante paralelas a las calles, sin embargo, al tener que entrar más al interior de la plaza se han diseñado rutas arqueadas. Esto se debe que todas las rutas están obligadas a pasar por los bordes visibles de la plaza para poder obtener puntos de control de las imágenes aéreas. Generalmente, al realizar recorridos curvos el modelo tiende a no ajustarse adecuadamente.

Pequeñas pruebas en campo

Además de la planificación, antes de realizar la captura de datos de toda la plaza se realizaron varias pruebas. Un aspecto importante a tener en cuenta fue el momento del día para realizar las grabaciones debido a que algunos factores como la elevación solar y la afluencia de gente en la plaza podrían influir en los resultados finales de los productos. Estas evidencias fueron notables en algunas de las pruebas que se hicieron al mediodía (14h00) y a la tarde (20h00). En el primer caso, una vez realizado el procesamiento de los datos y la nube de poca densidad, se observó que la luz solar directa provocaba mucho contraste entre zonas de sombras oscuras con poca discriminación del suelo y otras zonas con demasiada iluminación. Los vídeos grabados al oscurecer consiguieron solucionar el problema de la luz, pero la plaza esta vez estaba muy concurrida por gente que se interponía enfrente de la cámara, siendo dificultosas las grabaciones.

3.2. Grabación de vídeos

Considerando los aspectos de una buena planificación para conseguir los mejores resultados posibles, los vídeos fueron efectuados a la primera hora de la mañana (7:18 a.m.) y la captura tuvo una duración de 50 minutos. En total se grabaron 22 vídeos para toda la plaza, en la **Figura 8** pueden observarse los trazados que se han seguido.

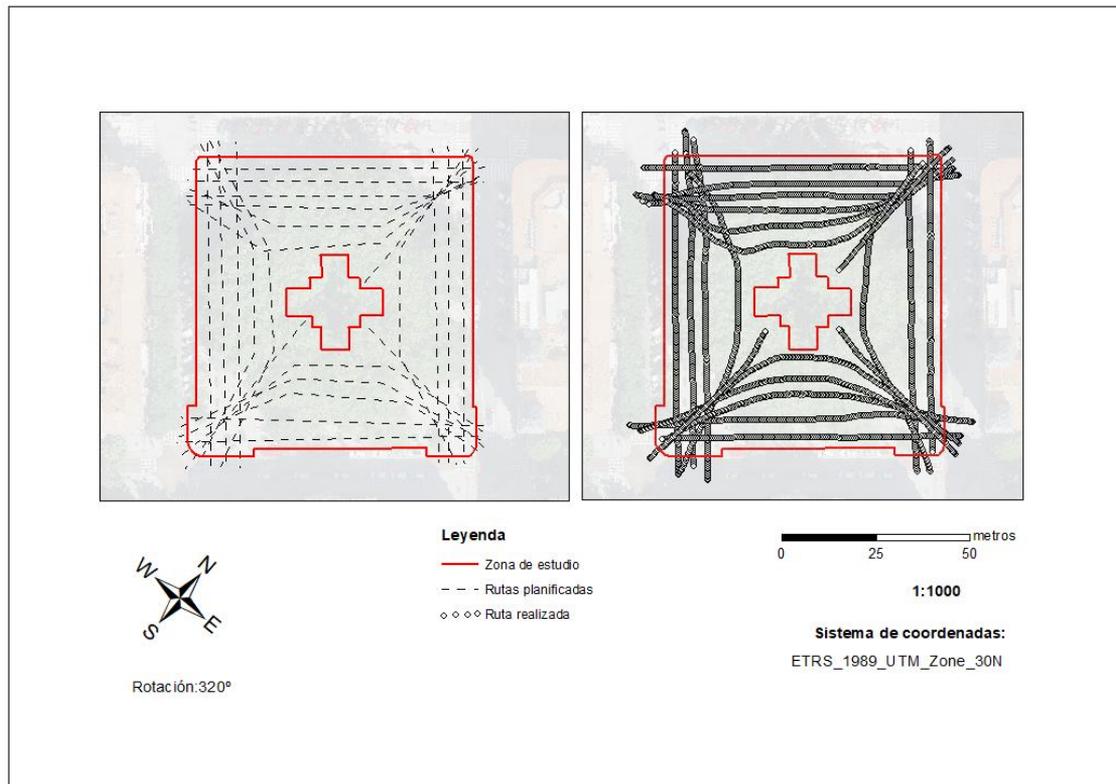


Figura 8. Planificación previa antes de las grabaciones (izquierda) y recorrido de las grabaciones en campo.

3.3. Procesamiento de vídeos

Una vez realizado el levantamiento mediante los vídeos en la zona de estudio, se han procesado las grabaciones con el objetivo de conseguir fotogramas a partir de un intervalo definido de tiempo. Generalmente, un segundo suele ser suficiente como se ha demostrado en los vídeos realizados en otras partes de la cartografía de la ciudad, pero para obtener más fotogramas sucesivos se ha reducido a medio segundo para tener más solape entre imágenes con lo que lleva a una mejor alineación. Para ello, con la ayuda de un código de Python se han conseguido un total de 3632 fotogramas a partir de los 23 vídeos para la generación de los productos.

3.4. Procesamiento de imágenes

Después de conseguir las imágenes sucesivas, se han introducido en el software *Agisoft PhotoScan Professional* (en adelante, *Agisoft*) para lograr las ortofotografías de toda la zona de estudio a partir de los trayectos grabados. En los siguientes apartados se explican con detalle cada uno de los pasos seguidos.

Calibración de la cámara

Primeramente, para cada uno de los trayectos de los vídeos se ha creado un proyecto por separado para poder trabajar individualmente al mismo tiempo con varias rutas mientras se ejecutan las alineaciones de las imágenes de otros vídeos. Sin embargo, antes de empezar con la alineación de las imágenes, se ha realizado una precalibración de la cámara. De esta forma, el software determina los parámetros de calibración para el móvil (**Tabla 4**) que sirven para conocer la orientación interna de la cámara, y los gráficos de distorsión y residuales como se indica en la **Figura 9**.

Tabla 4. Los parámetros de calibración determinan la distancia focal medida en píxeles (f), las coordenadas del punto principal (c_x , c_y), coeficientes de afinidad y no ortogonalidad (b_1 , b_2), coeficientes de distorsión radial (k_1 , k_2 , k_3 , k_4) y los coeficientes de distorsión tangencial (p_1 , p_2 , p_3 , p_4).

Resolución	3840x2160	Tipo	Frame
f	2982.15549	b_1	-1.6994
c_x	13.9215	b_2	-4.41619
c_y	-28.5518	p_1	7.61439×10^{-5}
k_1	0.0251843	p_2	0.00126664
k_2	0.102688	p_3	-4.18097
k_3	-0.603714	p_4	2.798
k_4	0.703341		

Sin embargo, estos valores iniciales se cambian al realizar el ajuste de las imágenes en la alineación de todas las trayectorias para la Plaza de la Cruz. Los distintos valores de cada una de las rutas son fusionados en una misma para la zona de estudio para conocer los parámetros de calibración ajustados (**Tabla 5**). Este cálculo de la calibración ajustada se ha realizado una vez se han agregado todas las rutas para formar la plaza.

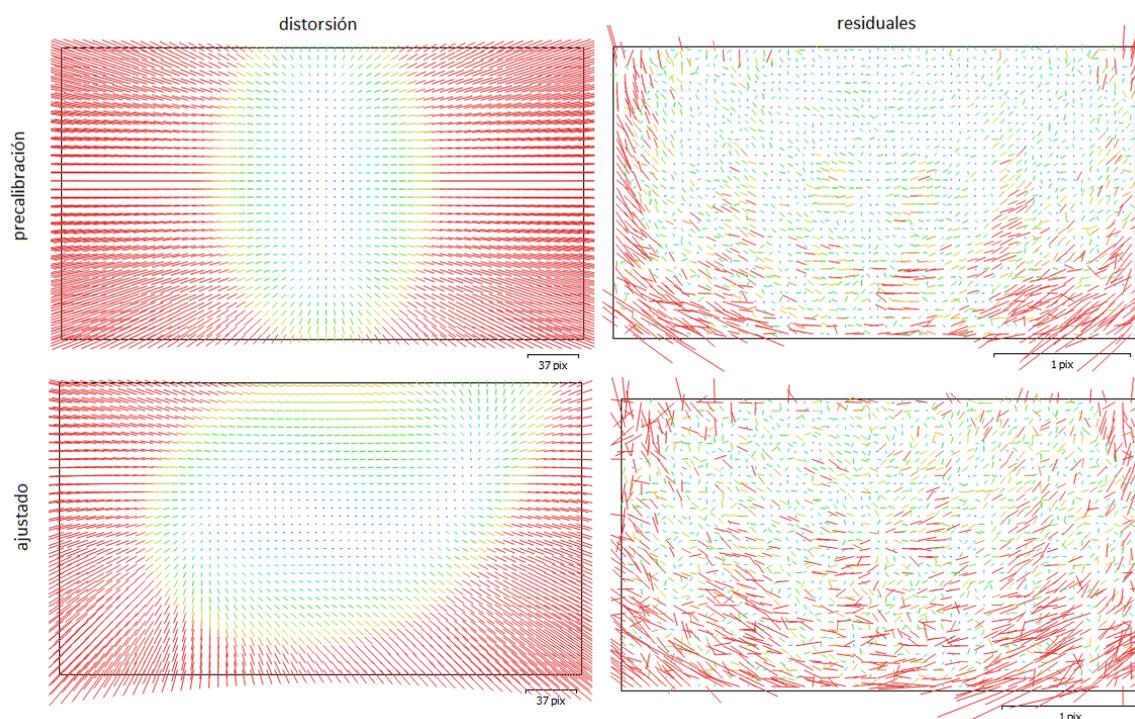


Figura 9. Variaciones en los gráficos de distorsión y residuales para los parámetros iniciales y ajustados. Las líneas rojas indican la magnitud de distorsión y la dirección.

Observando los parámetros ajustados se puede valorar si la alineación se ha realizado adecuadamente. Por lo general, en el caso de que los valores de c_x y c_y tienen un rango de un par de docenas de píxeles y para los parámetros de b_1 y b_2 no suelen pasar unas pocas unidades. Dicho esto, los valores de cien o incluso miles, muestran que la calibración es posiblemente incorrecta. En este caso, se debe realinear el conjunto de datos con la opción de ajuste desactivada.

Tabla 5. Parámetros de calibración una vez ajustado para las imágenes de toda la zona de estudio.

f	2979.27124	b1	-6.92212
cx	13.33	b2	16.2558
cy	-18.0705	p1	-0.000201412
k1	0.0261331	p2	0.00323843
k2	0.16203	p3	1.53175 x 10 ⁻⁵
k3	-0.688702	p4	1.95477
k4	0.756706		

Alineación de las fotografías

Una vez calibrada la cámara, se han introducido los grupos de fotogramas de cada video en proyectos diferentes para realizar la alineación mediante el comando *Align photos*. La alineación permite conocer las posiciones y orientaciones estimadas de las cámaras a partir de algoritmos que dispone el software para generar una primera nube de puntos de puntos de enlace para cada uno de los vídeos. Este proceso se ha lanzado con la máxima calidad posible (*Highest*) para los parámetros de precisión de alineación en todos los bloques de trabajo. Además, en las opciones avanzadas se puso el valor de cero para que el programa no tuviese ningún límite de puntos. De esta manera, se consigue trabajar con el máximo potencial del programa, obteniendo así una mejor alineación entre fotogramas y el máximo de puntos de enlace (**Figura 10**).

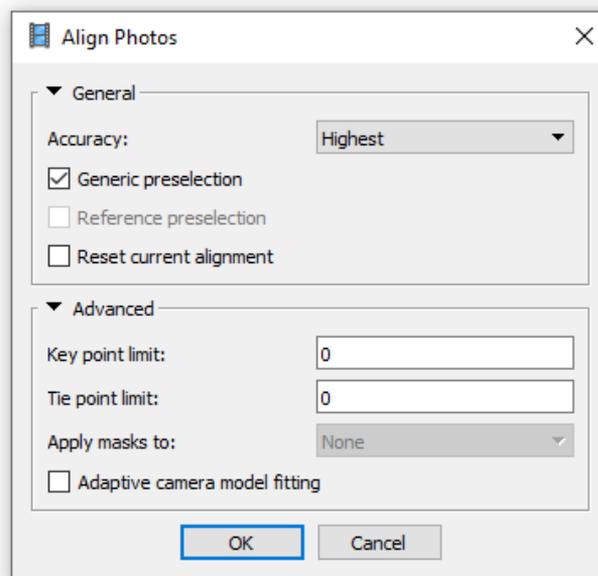


Figura 10. Opciones seleccionadas para la alineación de las imágenes.

Unión de las rutas independientes

Con todas las rutas alineadas en cada bloque de trabajo en proyectos de *Agisoft* distintos, el siguiente paso ha sido fusionar todas en un mismo proyecto. De esta forma, se ha conseguido que todos los trayectos se uniesen (**Figura 11**), sin embargo, la nube de poca densidad de toda la plaza no existe aún ya que todavía no tienen puntos que le otorguen referencia geográfica.

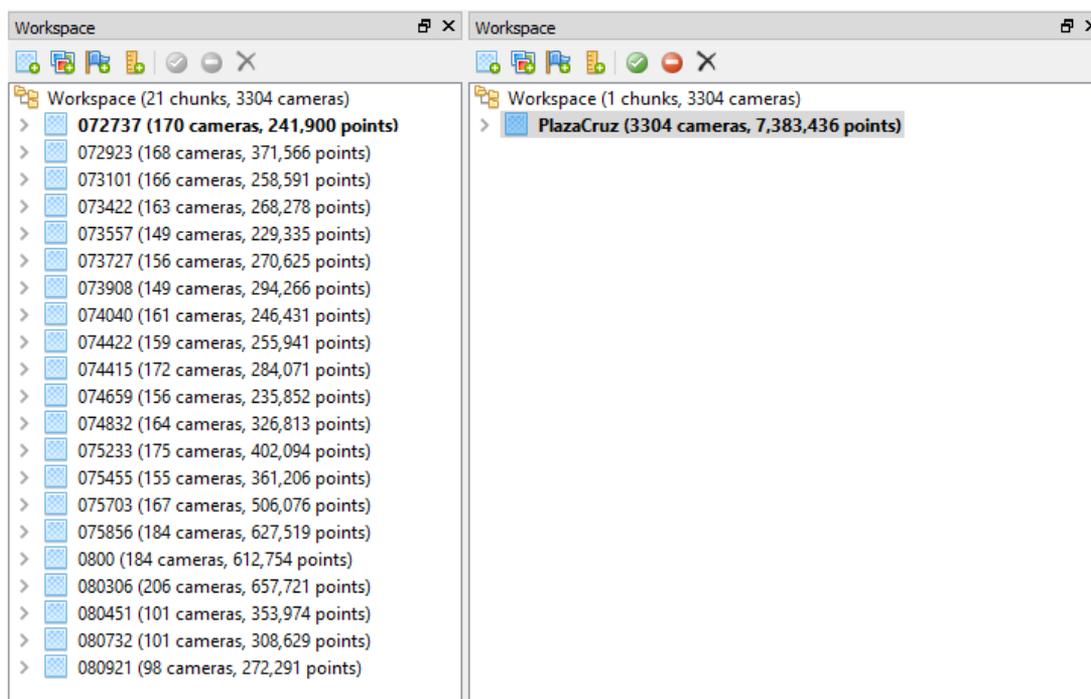


Figura 11. Primeramente, se introducen todas las rutas distintas en un único proyecto y después se unen.

Asignación de puntos de control

En el paso anterior, se ha utilizado un sistema de referencia relativo logrando un modelo arbitrario sin ninguna referencia geográfica. Para que este modelo tenga información geográfica, se han otorgado puntos de control únicos y globales para todas las imágenes de la misma pasada tanto en las pasadas adyacentes y solapadas (**Figura 12**). Tener más solape entre las pasadas permite que los GCP estén en trayectorias adyacentes y solapadas obteniendo así una mejor aerotriangulación (Jarve & Liba, 2011). Además, estos GCPs (*Ground Control Points*) han sido distribuidos en toda la zona de estudio siguiendo un patrón con densidad constante (Hughes *et al.*, 2006). Estos puntos deben ser identificables tanto en las imágenes como en la información de referencia, generalmente, se han asignado en elementos tales como los bordes de alcantarillas, alcorques, pasos de cebra, entre otros.

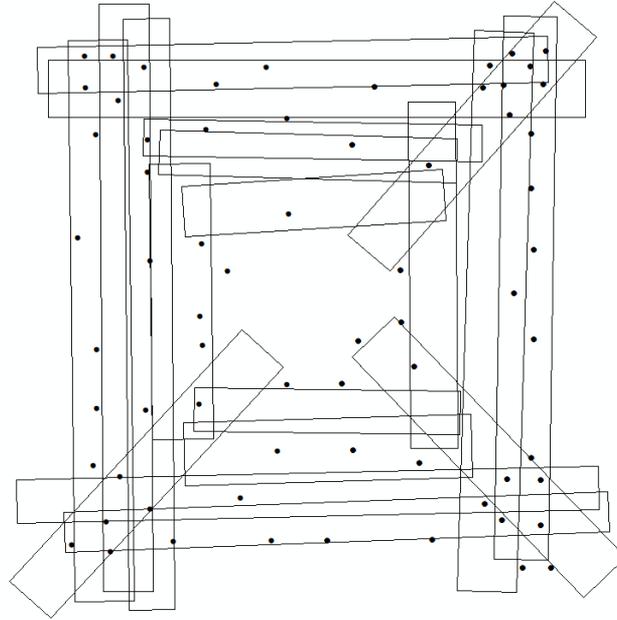


Figura 12. Las pasadas de las trayectorias comparten puntos de control.

Dichos puntos, han sido tomados de dos fuentes de distintas y se han comparado los resultados entre ambas fuentes. Las fuentes han sido, por un lado, de la ortofoto del 2021 y de sus pasadas, y, por otro lado, de la nube de puntos del láser terrestre. Los puntos de apoyo por topografía clásica fueron reemplazados por un levantamiento con Láser terrestre (TLS – *Terrestrial Laser Scanner*)

Para el caso de los vuelos fotogramétricos, las coordenadas X e Y se han obtenido con la herramienta de información en el software *ArcMap* con el apoyo de un modelo digital de la superficie con una resolución de 12,5 centímetros para la extracción de la elevación, Z (**Figura 13**).

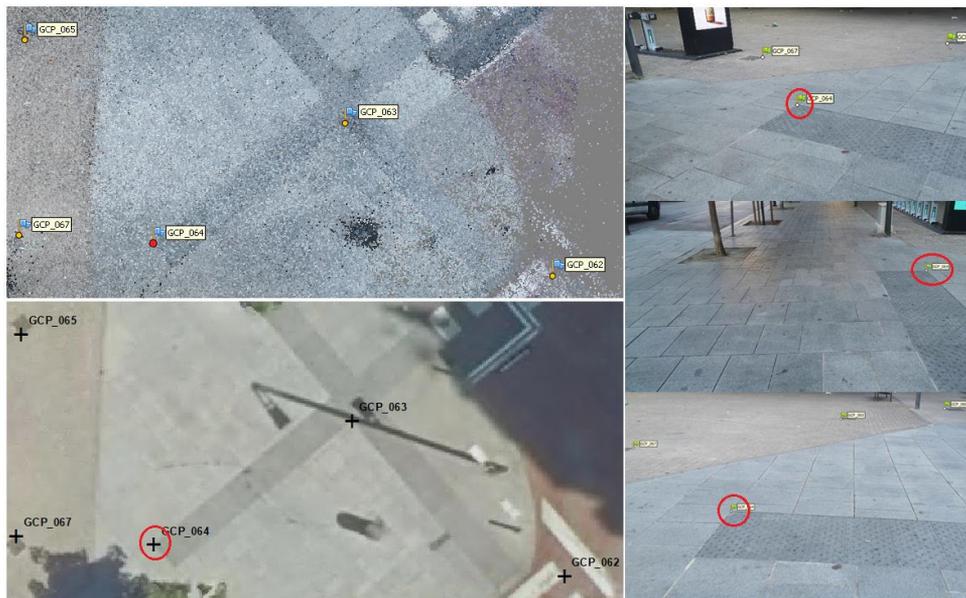


Figura 13. Los puntos de control deben coincidir con la posición en el terreno y en las imágenes.

Sin embargo, los datos del TLS se han tomado desde el visualizador de JetStreamViewer donde se ha cargado la nube de puntos para poder capturar las coordenadas XYZ de cada punto de control (**Figura 14**). Los datos obtenidos desde esta fuente de información se han considerado como verdad absoluta.



Figura 14. Perspectiva de la cámara 360 RGB desde la posición de uno de los puntos de escaneos (derecha). Visualización del punto en la nube de puntos para obtener la posición exacta (izquierda).

De esta forma se ha logrado hacer la aerotriangulación obteniendo dos modelos georreferenciados, uno para los puntos de control obtenidas desde los vuelos fotogramétricos, y otro, basándose en los GPCs de la nube de puntos del LiDAR terrestre (**Figura 15**). En ambos casos, al igual que la información de origen las coordenadas han sido establecidas con el sistema de referencia ETRS 1989 zona 30 Norte.

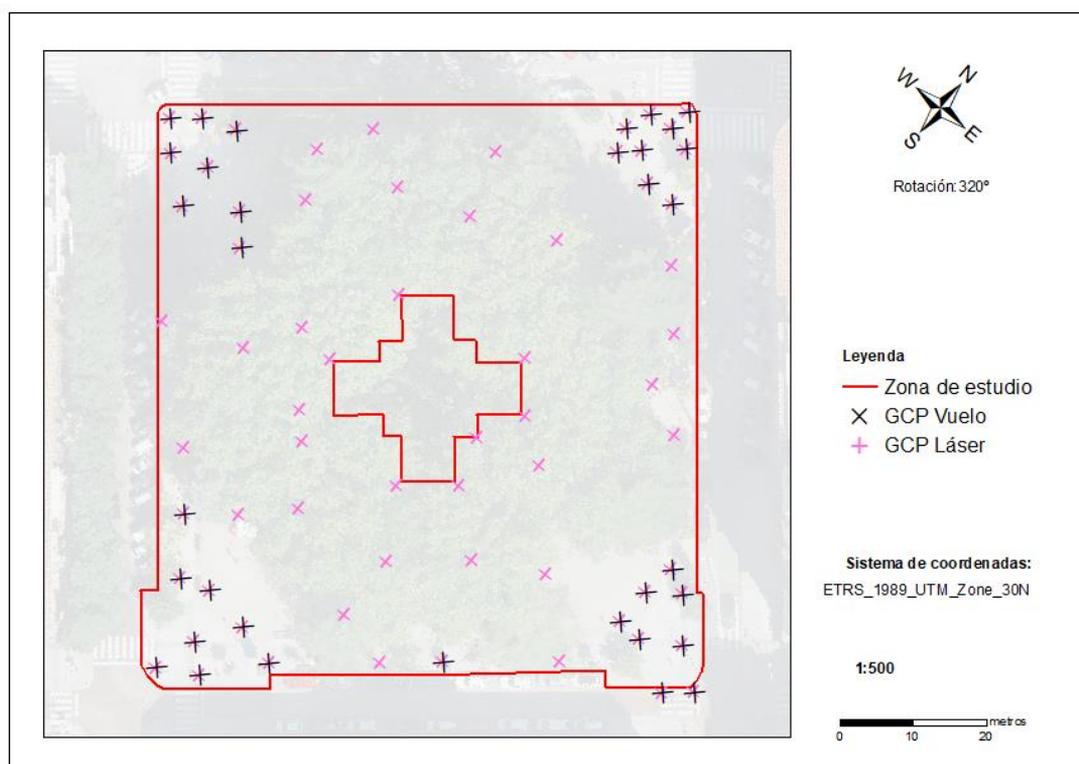


Figura 15. Asignación de los puntos de control obtenidos del vuelo y del láser.

Una vez finalizado con la aerotriangulación, las dos nubes de tie points tienen asociada información geográfica basándose en los GCPs definidos. Mediante estos puntos de control se muestra el error medio que tienen cada una de las nubes. Como se ha demostrado en la **Figura 15** el número y la distribución varía entre las dos (**Tabla 6**).

Tabla 6. Cantidad de puntos de control y el error para cada modelo tras la orientación absoluta.

Aerotriangulación	Número de puntos	Error medio (cm)
Vuelo fotogramétrico del 2021	34	7,897
Láser (Leica)	67	12,832

Generación de las nubes densas de puntos, los MDE y las ortofotografías

Después de lograr las dos nubes de puntos de enlaces georreferenciadas, se ha procedido con el proceso para lograr la nube de puntos densa para cada método. No obstante, antes de lanzar la nube de toda la zona de estudio, se han realizado algunas pruebas con pequeñas zonas para ver que parámetros se ajustan mejor para el procesamiento de toda la plaza. Teniendo en cuenta el tiempo de procesamiento, la precisión y el coste computacional, se ha optado por los parámetros de calidad baja (*Low*) y un el filtrado de profundidad desactivado (*Disabled*) mediante el comando *Build Dense Cloud*.

Una vez finalizada la aerotriangulación de los puntos de control y obtenido el modelo con referencia geográfica se ha llevado a cabo, primeramente, la generación del MDE, un producto derivado la nube densa. En el modelo creado se ha mantenido el mismo sistema de coordenadas y se ha determinado la resolución, es decir el tamaño de píxel del modelo siendo el mínimo posible. Cuanto menor sea la resolución del MDE, la densidad de puntos será más reducida implicando que el procesamiento sea más rápido pero la precisión disminuye (Modiri *et al.* 2015). Finalmente, para producir la ortofoto para cada una de las aerotriangulaciones se ha partido de la nube y MDE generado para realizar el proceso de ortorrectificación (**Figura 16**). Habitualmente, las imágenes que han sido rectificadas se conocen como ortofotografías, pero siguiendo su estricto significado se denominan así cuando se trata de una única imagen. Sin embargo, el producto final después de juntar todas las ortofotos individuales se obtiene un ortomosaico.

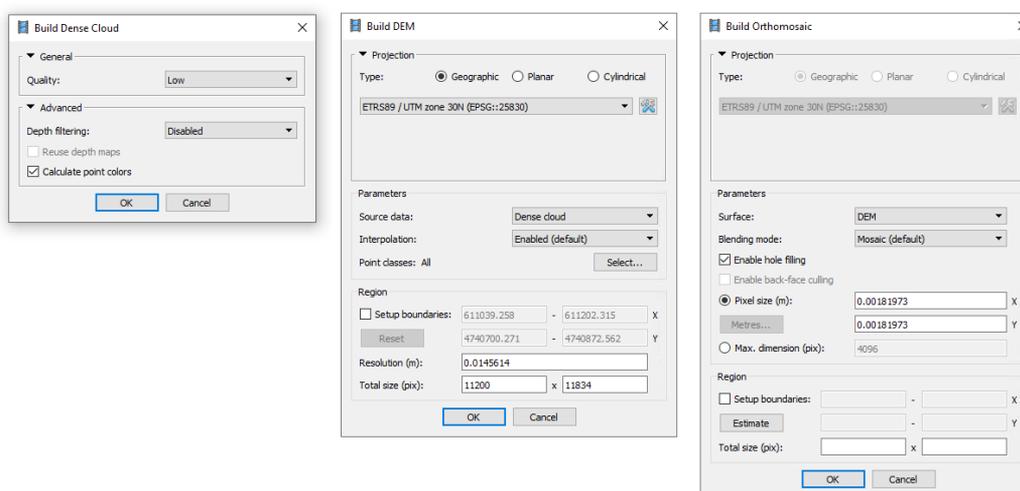


Figura 16. Los pasos seguidos tras realizar la aerotriangulación de la nube densa de poca densidad para lograr la ortofoto.

3.5. Comparativa de la precisión de las coordenadas

Para la comparativa de los productos elaborados se han empleado los datos del láser terrestre como información de referencia y verdad obtenidos de la nube de puntos del láser Leica. De todas formas, no se ha repetido ningún punto usado en la aerotriangulación del láser para la validación del modelo. Estas comparaciones se han ejecutado para toda la plaza y para una de las rutas de grabación.

Plaza de La Cruz

En total se han escogido 46 puntos de chequeo o validación con una distribución homogénea para analizar la distribución del error para las dos ortofotos generadas (**Figura 17**). La colocación de puntos cumple con una de las condiciones propuestas por MPLMIC (1999) para la representatividad de la validación, refiriéndose a una adecuada distribución espacial. Por una parte, esta selección de puntos de chequeo respeta una distribución de cuatro cuadrantes con una superficie idéntica, donde en cada una estén al menos el 20% de los puntos. Por otra parte, no todos los puntos acatan la segunda condición de separación entre los puntos, es decir, la distancia mínima entre los elementos tiene que ser mayor a la distancia del orden de un 1/10 de la diagonal (unos 10 metros para la Plaza de La Cruz).

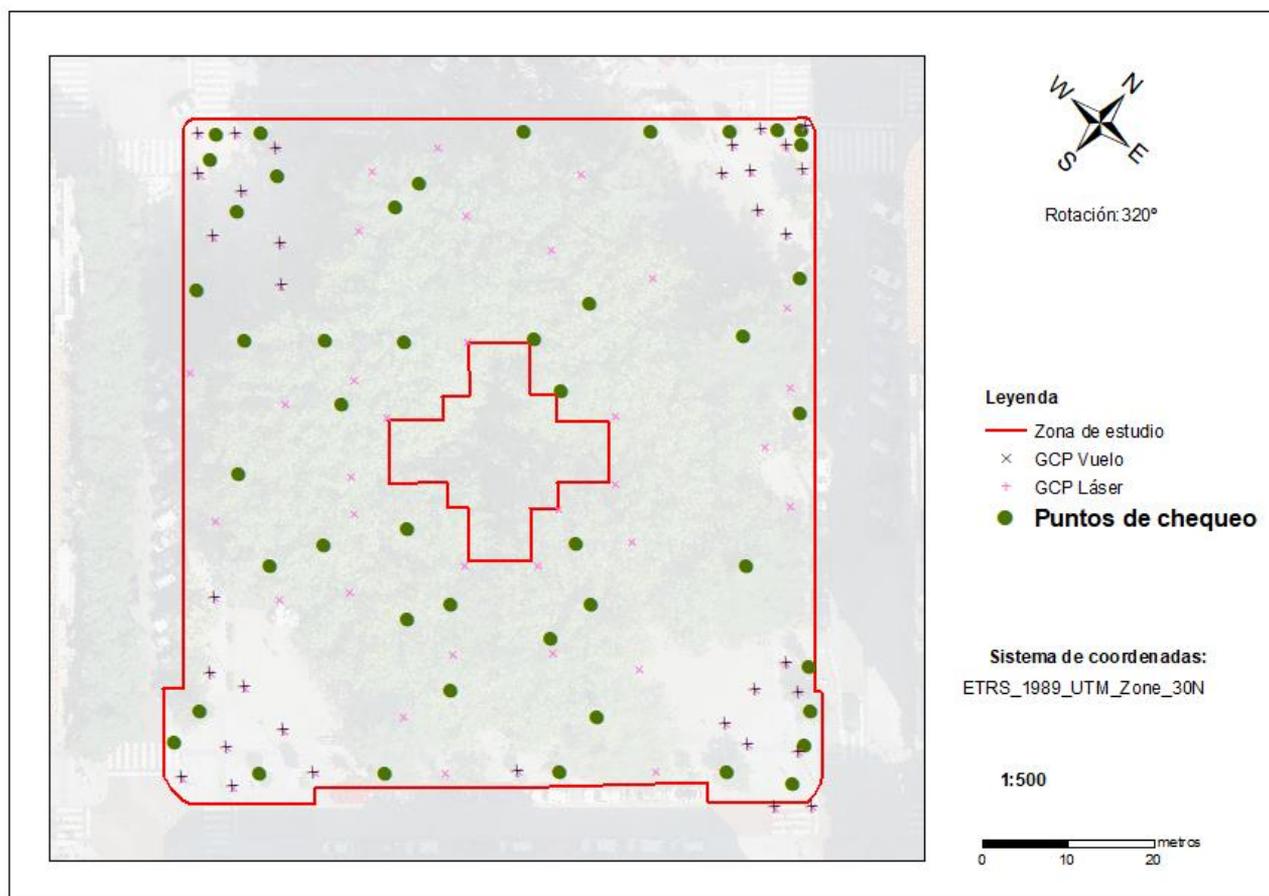


Figura 17. Asignación de puntos de chequeo para validar la aerotriangulación de cada los GCP (vuelo y láser).

Primeramente, se han identificado en cada proyecto de *Agisoft* en cada una de las ortofotos los puntos correspondientes a los puntos de chequeo mostrados en la figura anterior. Para ello, en el software se han digitalizado cada uno de los puntos de validación en su sitio correspondiente visualizando la ortofoto generada.

Después de definir los puntos de chequeo en las ortofotos, se han exportado en formato SHP para visualizar en *ArcMap* y poder recalcular la geometría de cada una de las coordenadas XYZ por separado.

Ahora que se conoce la posición exacta de cada uno de los puntos de chequeo se ha calculado el error para cada uno de estos puntos obtenidos en las ortofotos generadas con GCP del vuelo y del láser. La medición del error se ha realizado mediante el error absoluto del desplazamiento de los puntos obtenidos de las ortofotos en contraste con los puntos de validación del láser de gran precisión. Estas desviaciones entre los puntos (**Figura 18**) se ha computada de distintas formas (**Ecuación 4**, **Ecuación 5**, **Ecuación 6**):

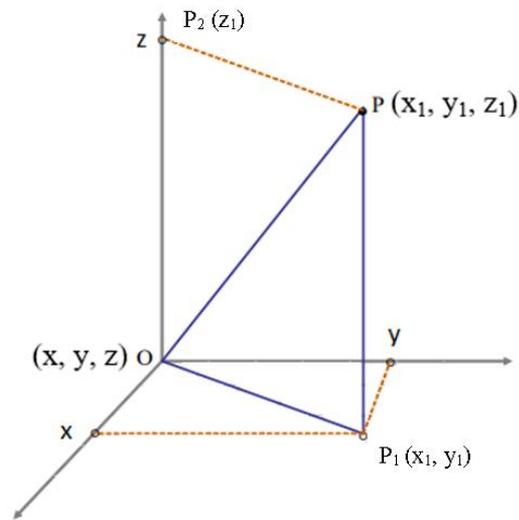


Figura 18. La distancia euclídea se basa en el teorema de Pitágoras. Elaboración propia.

- Error en XYZ.

$$d = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \quad [4]$$

- Error en XY (Error planimétrico)

$$d = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad [5]$$

- Error en Z (Error altimétrico)

$$d = |z - z_1| \quad [6]$$

Trayectoria 074659

Además de analizar los resultados de toda la plaza, por otra parte, se ha observado la distribución del error en una trayectoria individual por separado. Como en el caso de la plaza se han fijado unos *check points* siguiendo la misma metodología, sin embargo, para esta ruta se han usado otros puntos de control y chequeo. En el caso de la aerotriangulación del vuelo se han usado 9 y para el del láser 15 medidos con el TLS. Los 17 puntos de chequeo también ha sido medidos con el láser terrestre. Todos estos puntos no coinciden con los puntos que se han usado para toda la plaza.

Para esta trayectoria, primero se han comparado los puntos sacados del vuelo con los del láser con imágenes sucesivas de medio segundo, de la misma forma que se ha realizado con toda la zona de estudio. Para tener las mismas condiciones de comparación se han fijado los puntos de control y chequeo en las mismas imágenes y posiciones idénticas. Esto se ha llevado a cabo haciendo la aerotriangulación del láser al inicio y después haciendo un duplicado y cambiando a las coordenadas obtenidas del vuelo fotogramétrico. De la misma forma, se han creado otros duplicados de las trayectorias anteriores y se han eliminado la mitad de las imágenes de manera intercalada para trabajar con imágenes consecutivas de un segundo.

Además, las mediciones de error de la trayectoria se han realizado directamente en *Agisoft*. De esta manera, se ha estimado el error de los puntos de validación si estas están deseleccionadas consiguiendo que estos puntos de chequeo no se usen en la aerotriangulación como lo hacen los GCP y sirvan para saber el error cuadrático medio para las coordenadas XYZ (**Figura 19**).

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)
<input type="checkbox"/> PC_01	611122.214000	4740838.765000	454.761000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_02	611120.025000	4740836.578000	454.689000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_03	611121.199000	4740835.193000	454.717000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_04	611123.251000	4740836.946000	454.759000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_05	611171.331000	4740778.958000	455.565000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_07	611168.878000	4740783.106000	455.551000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_08	611166.945000	4740786.735000	455.484000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_09	611159.999000	4740784.491000	455.516000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_10	611155.819000	4740795.925000	455.334000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_11	611147.610000	4740799.304000	455.291000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_12	611152.318000	4740802.295000	455.210000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_13	611146.750000	4740808.917000	455.095000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_14	611132.502000	4740815.455000	455.013000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_15	611134.362000	4740820.785000	454.937000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_16	611124.523000	4740827.334000	454.817000	0.005000
<input type="checkbox"/> PC_17	611127.609000	4740831.589000	454.770000	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> point 1	611122.096395	4740838.335560	454.821381	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> point 2	611120.703890	4740837.162130	454.773376	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> point 3	611122.204081	4740835.129770	454.820038	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> point 4	611125.172712	4740834.722320	454.835358	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> point 5	611128.632763	4740827.666750	454.911377	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> point 6	611164.231243	4740787.373890	455.544800	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> point 8	611170.853367	4740775.148870	455.672302	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> point 9	611174.243348	4740777.930310	455.724457	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> point 10	611168.850046	4740781.947751	455.663756	0.005000
Total Error				
Control points				
Check points				

Figura 19. Puntos de control del vuelo y puntos de chequeo (sin seleccionar) para la trayectoria.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este apartado, se muestran y se analizan los resultados conseguidos a partir de la metodología desarrollada para la zona de estudio para las dos diferentes fuentes de información de puntos de control: vuelo fotogramétrico y láser escáner terrestre.

4.1. Productos obtenidos

Los productos finales han sido cuatro ortofotos generadas por puntos de control procedentes de dos distintas fuentes de información para toda la plaza y para la ruta analizada aisladamente.

Plaza de la Cruz

En la **Figura 20** se muestra la ortofoto producida a través de la aerotriangulación con puntos obtenidos del vuelo fotogramétrico y en la **Figura 21**, la ortofoto con datos del láser siguiendo la misma metodología para toda la zona de estudio. Cabe señalar que entre las dos ortofotos apenas hay diferencias visuales.

Uno de los rasgos a destacar de las ortofotos ha sido su gran detalle a nivel de píxel logrando una resolución de 2 milímetros por píxel, es decir, 25 veces mayor resolución que la ortofoto del vuelo fotogramétrico (5 cm de GSD). Sin embargo, a la hora de exportar las ortofotos se ha definido un GSD de un centímetro ya que es suficiente para su visualización y uso posterior.

Pese a su detalle, en las dos ortofotos aparecen zonas sin datos en el lado noreste (NE) de la parte media y en la zona central este (W) junto al recinto ajardinado. Esta pérdida de información se debe a la falta de imágenes y está estrechamente relacionado con la planificación. En el primer ejemplo mencionado, la ausencia de la grabación de ruta ha causado que las imágenes correspondientes de las rutas izquierdas y derechas no hayan podido cubrir la zona en su totalidad. Sin embargo, justo en la otra parte de la plaza, se ha tenido que eliminar una de las trayectorias porque las condiciones de capturas fueron más oscuras de lo que se planteó y la alineación de la pasada no se ha realizado adecuadamente. No obstante, en esta zona se ha logrado capturar la información geográfica ya que las otras trayectorias han cubierto la zona. Por último, la falta de datos en la pequeña zona central ha sido originada debido a que no se llevó a cabo la grabación de la parte externa hacia el interior como se grabó en las otras tres esquinas de la plaza pensando que el mobiliario del parque infantil afectaría a las imágenes.

Otras carencias que muestran las ortofotos son las distorsiones de algunas de las pasadas que no han enlazado bien a pesar de tener GCP idénticos y únicos entre las pasadas adyacentes y solapadas en otras direcciones. Esto es causado porque las rutas han sido alineadas independientemente y no conjuntamente. Este paso importante para la cohesión de todas las pasadas no se ha logrado porque al tener tantas rutas e imágenes y una zona de estudio compleja, el software no ha sido capaz de alinear todas a la vez. En algunos elementos de la plaza, como los alcorques y las aceras de distinto color, este efecto ha provocado que aparezcan distorsiones y desplazamientos de unos decímetros.

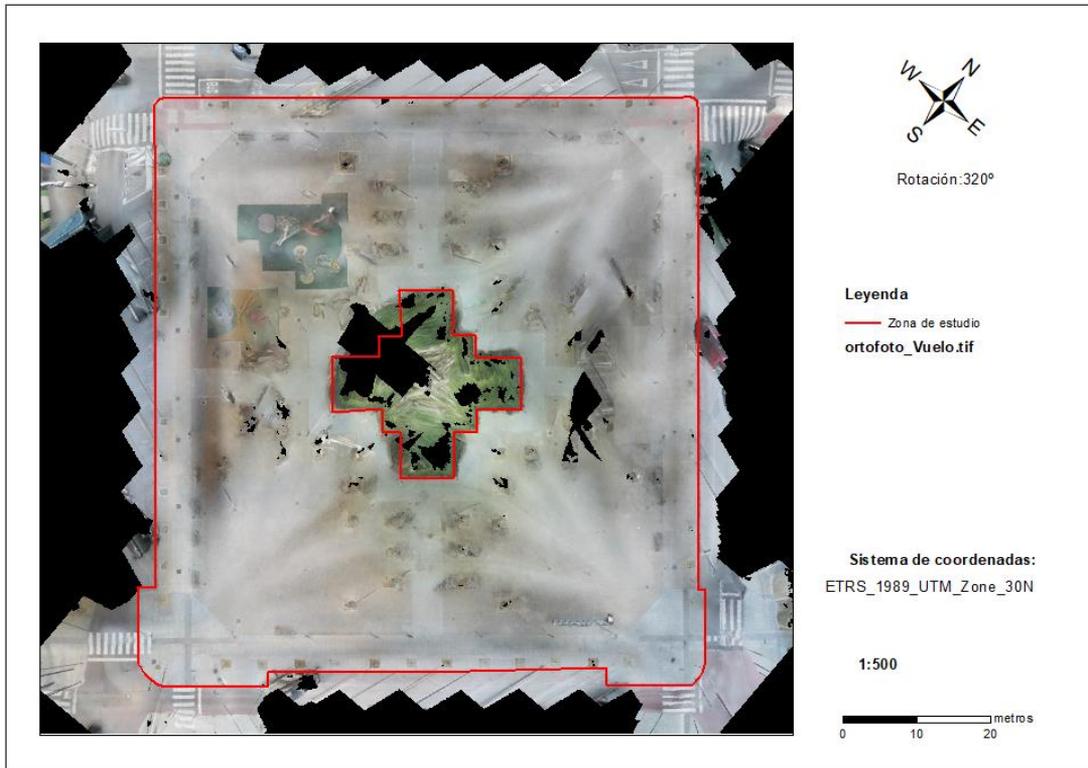


Figura 20. Ortofoto de la Plaza de La Cruz generada con GCP definidos con el vuelo fotogramétrico del 2021.

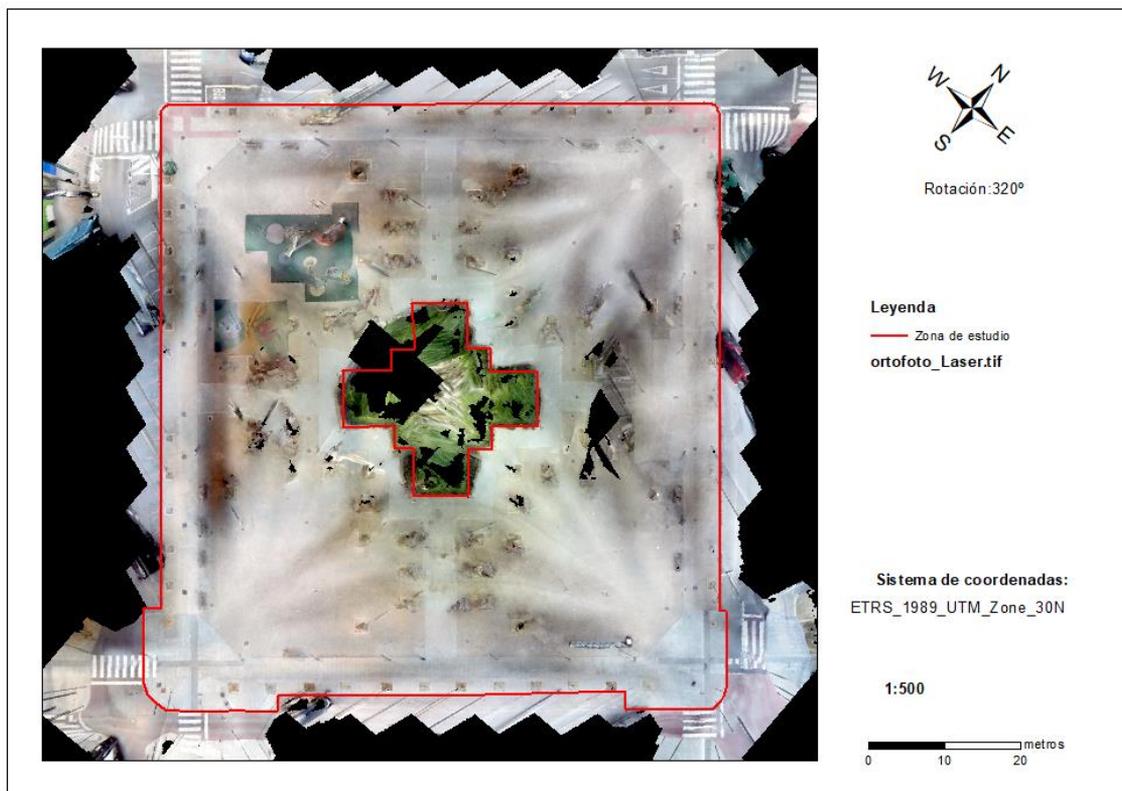


Figura 21. Ortofoto de la Plaza de La Cruz generada con GCP definidos con datos del láser Leica.

Trayectoria 074659

En el caso de las ortofotos de las trayectorias tampoco se ha observado ninguna diferencia visual notable entre las ortofotos de medio segundo de intervalo. Sin embargo, en una de las pruebas que se ha llevado adelante aumentado el intervalo entre fotogramas de 0,5 segundos a un segundo, sí se ha percibido que en la mitad del trayecto los puntos se encuentran desplazados significativamente como se observa en la **Figura 22**.

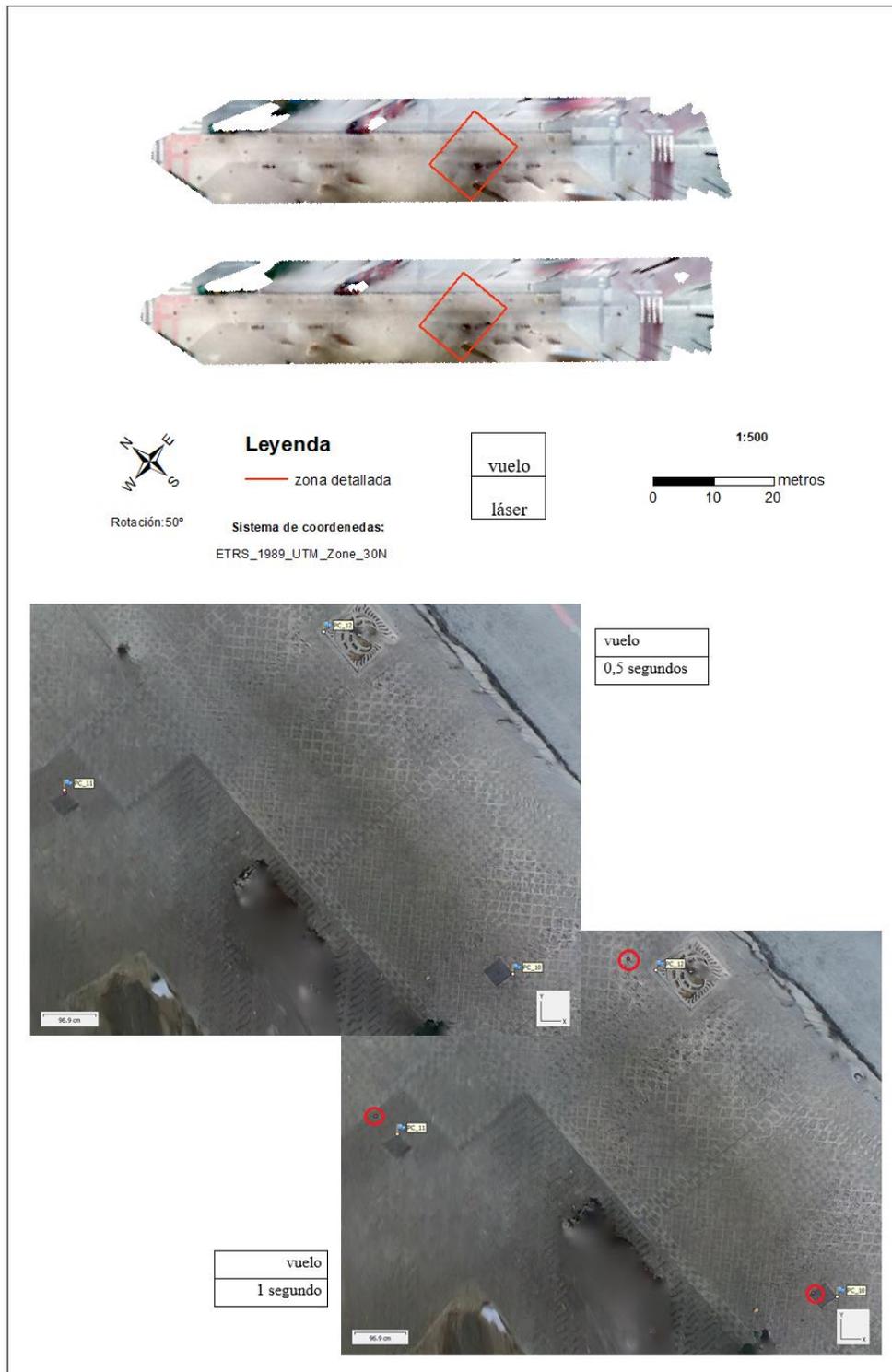


Figura 22. Demostración de las dos ortofotos generadas (arriba) y las diferencias de las posiciones de los puntos de chequeo en la zona central (abajo).

4.2. Comparativas con datos de referencia

Partiendo de los datos calculados de los puntos de chequeo mostrados en la **Figura 17**, se ha procedido a calcular el error absoluto medio para medir la precisión de las ortofotos generadas con GCP de distinto origen de información.

Plaza de la Cruz

Siguiendo el proceso metodológico mencionado, se han cuantificado las diferencias (**Ecuación 4**, **Ecuación 5**, **Ecuación 6**) de los puntos de validación entre los puntos de chequeo medidos en las ortofotos generadas con los datos del LiDAR terrestre teniendo en cuenta los distintos componentes de XYZ (**Tabla 7**).

Tabla 7. Diferencias de errores (m) analizados con media y desviación estándar (σ) para XYZ, XY, Z.

	Errores Vuelo Fotogramétrico			Errores Láser		
	ϵ_{xyz}	ϵ_{xy}	ϵ_z	ϵ_{xyz}	ϵ_{xy}	ϵ_z
PC1	0,078	0,028	0,072	0,079	0,073	0,031
PC2	0,087	0,057	0,066	0,075	0,070	0,025
PC3	0,115	0,104	0,048	0,060	0,060	0,006
...
PC46	0,155	0,116	0,102	0,094	0,070	0,064
Media	0,175	0,151	0,067	0,151	0,140	0,040
Desviación	0,125	0,131	0,045	0,121	0,123	0,035

Trayectoria 074659

Respecto a la trayectoria analizada, la forma de medición de los puntos ha sido distinta como se explicada en el apartado anterior. En vez de, realizar las mediciones en las ortofotos y después realizar los cálculos, en este caso se han asignado los puntos de chequeo en las imágenes dentro de *Agisoft*. De esta forma, se ha obtenido el error medio total de los puntos de validación, además de cada punto de chequeo por separado en XYZ, para los intervalos de medio segundo y un segundo (**Tabla 8**).

Tabla 8. Diferencia entre los errores dependiendo del intervalo entre imágenes.

	Error en medio segundos		Error en un segundo	
	GCP	Check points	GCP	Check points
Vuelo	0,065	0,078	0,084	0,346
Láser	0,067	0,105	0,045	0,917

4.3. Productos derivados

En este apartado, se muestran los productos derivados de los resultados originados de las comparaciones de los puntos de validación descritos previamente. Para estimar el error de la zona de estudio a través de los puntos de chequeo, se han realizado interpolaciones *IDW* para los puntos digitalizados en las dos ortofotos de origen distinto y exportados con los valores de error.

Plaza de La Cruz

Para esta extensión, los puntos interpolados han sido los 46 puntos de validación (**Figura 17**) donde el error se ha analizado de formas diferente teniendo en cuenta los diferentes componentes. El mapa de error presentando en la **Figura 23**, corresponde al error medido en los tres componentes XYZ. las desviaciones que se dan en las dos ortofotos generadas comparando con los datos de verdad absoluta. Mientras tanto, el mapa de error de la **Figura 24** cuantifica el error planimétrico.

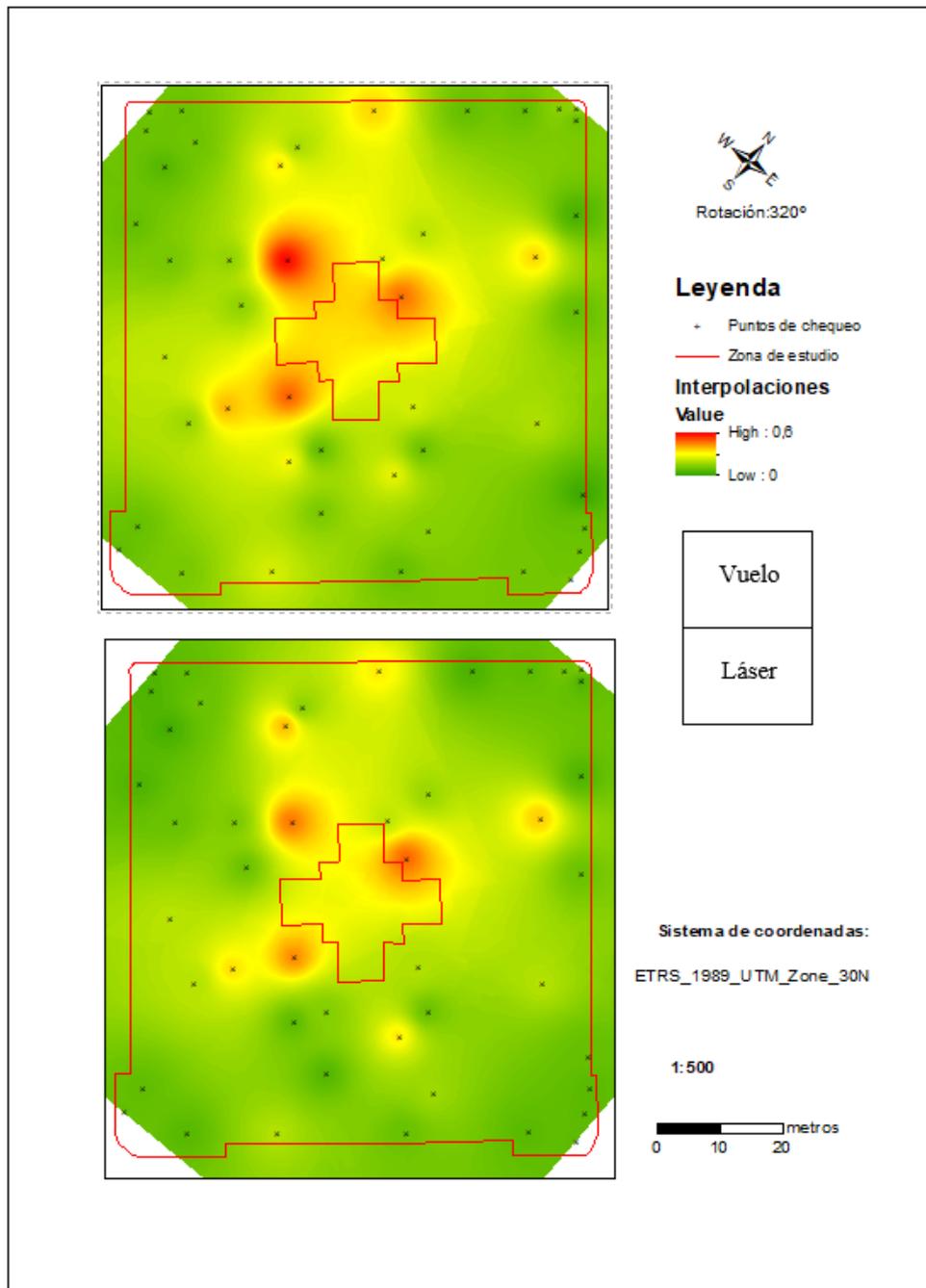


Figura 23. Mapa de error para los valores de error en XYZ.

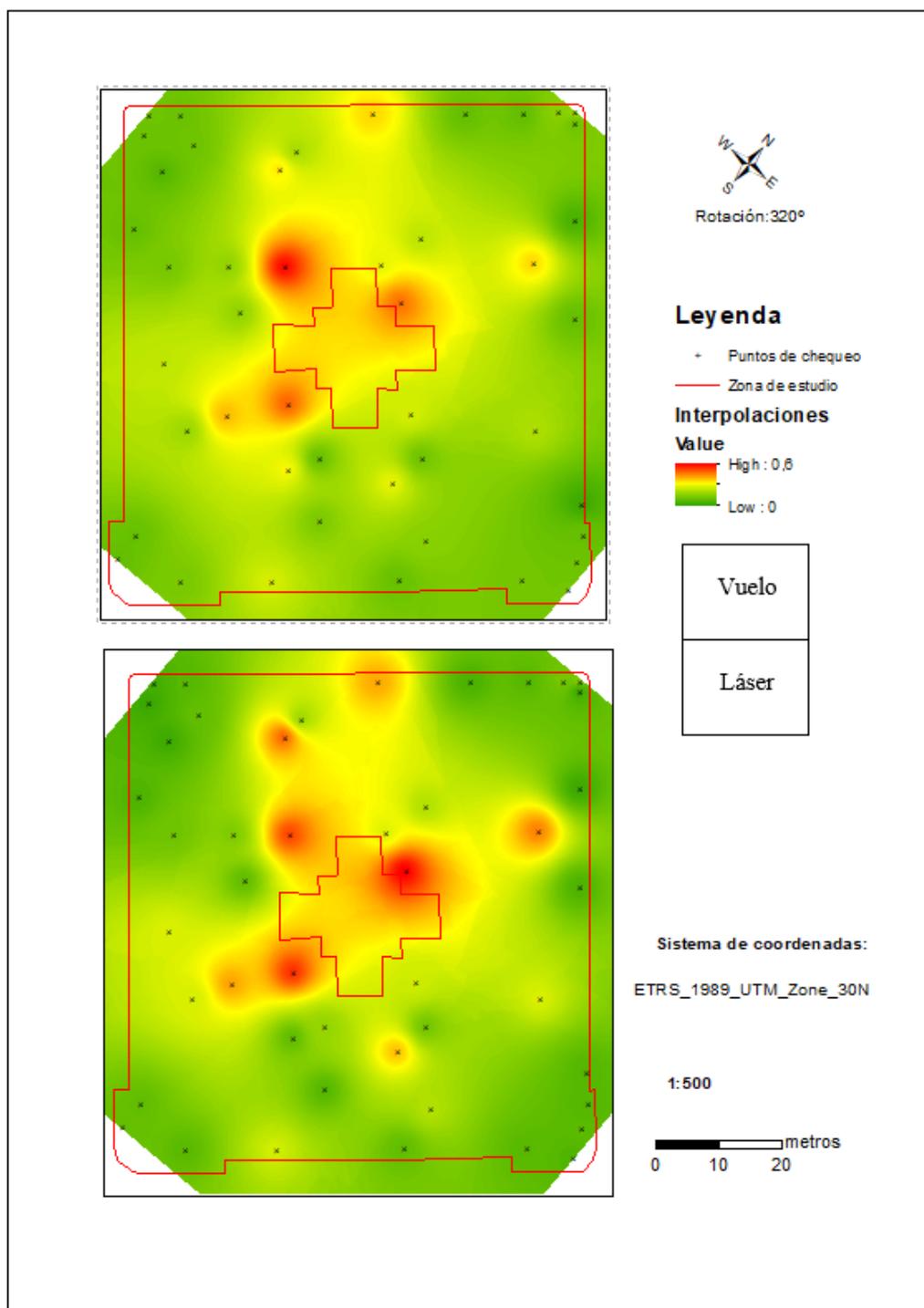


Figura 24. Mapa de error para los valores de error en XY.

Trayectoria 074659

En esta ruta individual se han empleado 17 puntos de chequeo distribuidos a lo largo del recorrido. En este caso, las mediciones de error se han cuantificado en XYZ únicamente, sin embargo, se han equiparado los errores de los distintos GPC teniendo en cuenta el intervalo de imágenes extraídas del vídeo. Los intervalos están relacionados con la distancia de separación entre fotogramas. La distancia media entre imágenes ha sido de 1,08 metros para los intervalos de medio segundo. En la **Figura 25** se presentan los mapas de errores para esta parte de la zona de estudio para el intervalo de un segundo.

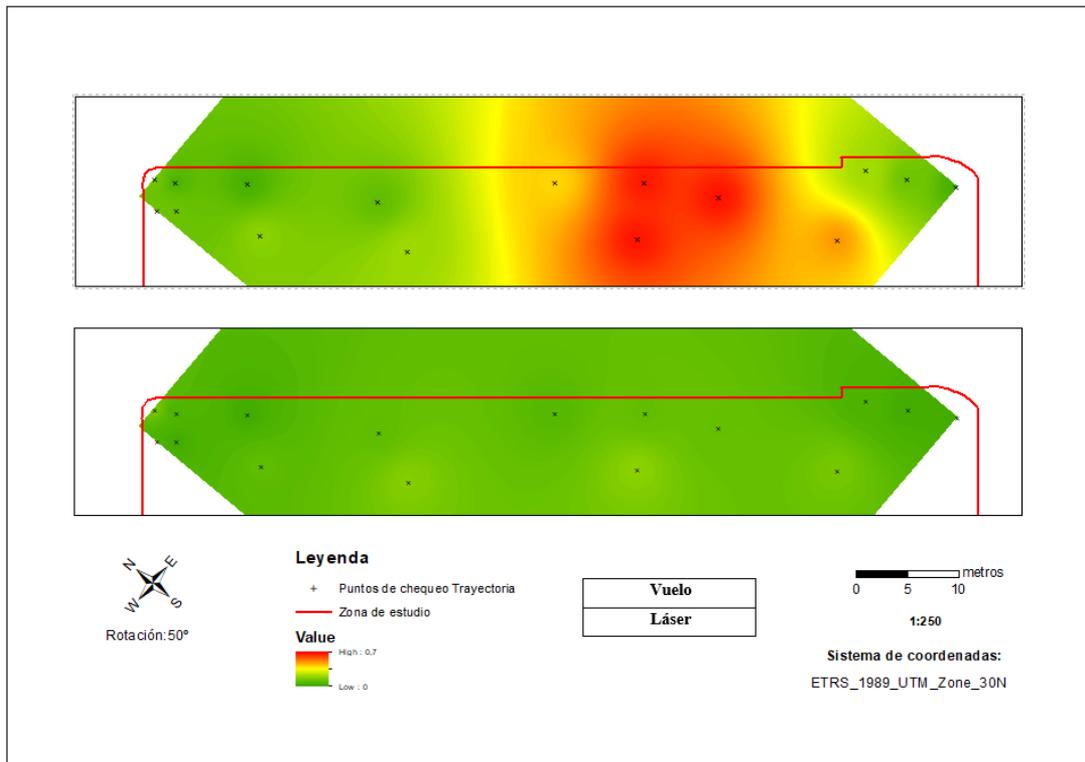


Figura 25. Mapa de error de las ortofotos generadas con un segundo de intervalo.

4.4. Discusión de los resultados

Los resultados mostrados en el apartado anterior, permiten observar cómo se ha comportado el error en la zona de estudio para las ortofotografías generadas con GCP obtenidos desde el vuelo fotogramétrico y el levantamiento del LiDAR terrestre Leica RTC360 (**Figura 17**).

En general, las mediciones de los puntos de control no han llevado a diferencias notables en las ortofotos generadas con medio segundo de intervalo entre fotogramas (**Figura 23**, **Figura 24**) y la distribución del error ha sido similar en ambos casos con pequeñas variaciones. No obstante, la asignación de puntos de control medidos con estas dos técnicas distintas, han reflejado una ligera mejoría para las mediciones del láser (**Tabla 7**, **Tabla 8**).

Los resultados a destacar son los obtenidos en la trayectoria individual con imágenes de intervalos de un segundo que a diferencia de los demás la mitad de los fotogramas han sido eliminados y la aerotriangulación se ha vuelto a calcular. El intervalo está relacionado con la distancia entre la captura de imágenes sucesivas, lo cual se ha visto involucrado en los resultados finales. Las diferencias entre la aerotriangulación de las imágenes con GCP del vuelo con un segundo de intervalo han sido considerables equiparando con la aerotriangulación con GCP del láser y con la del vuelo de medio segundo (**Tabla 8**). Estas discrepancias son medidas en el mapa de error, en la **Figura 25**, donde aparte de cuantificar la magnitud del error ha servido para analizar el comportamiento del error en la superficie. Como ha sido de esperar en la mitad de la trayectoria el error ha aumentado ya que a medida que el modelo se aleja de los puntos de control pierde precisión.

Por último, la utilización de un móvil con cámara de alta resolución ha ayudado a lograr ortofotos de gran detalle. Además, la planificación diseñada ha sido adecuada para cubrir casi toda la zona de estudio, a pesar de dejar unas pequeñas zonas sin cartografiar.

5. CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados obtenidos siguiendo esta metodología, que ha consistido en contrastar la precisión de las ortofotos generadas con puntos de control de fuentes distintas (vuelo fotogramétrico y láser escáner terrestre), se ha comprobado que se pueden llegar a obtener productos finales con errores muy similares.

En cuanto a la distribución del error, se ha comportado de manera similar en ambos casos siendo menor en las cuatro esquinas de la plaza que en la parte interior. Esta zonificación del error está estrechamente relacionada con la cantidad de imágenes y GCP que han formado parte en la aerotriangulación del modelo. Las diferencias entre los distintos puntos de control (vuelo y láser) no han sido significativo, aunque los puntos de láser han mostrado errores menores.

El análisis de una de las trayectorias por separado ha facilitado determinar que el ajuste del modelo con un intervalo de medio segundo entre imágenes se consiguen resultados prácticamente iguales. Sin embargo, aumentando el intervalo a un segundo, dicho de otra forma, con la mitad de las imágenes que el anterior caso, el error ha aumentado de manera significativa.

Por lo tanto, se concluye que el procesamiento de imágenes con gran solape entre fotogramas y distancias reducidas entre fotocentros, es decir, la posición de la cámara en el momento de la captura, permiten obtener una mejor alineación con un mayor número de puntos de enlace, consiguiendo que el modelo se ajuste mejor y reduzca el error en la parte central de la trayectoria donde no se disponen de puntos de control.

Por último, cabe mencionar que la aplicación de la técnica SfM mediante imágenes capturadas mediante teléfono móvil, es una técnica menos costosa que el TLS manteniendo unos errores aceptables y siendo una alternativa para futuras aplicaciones en zonas urbanas donde requieran la obtención de datos geográficos. Sin embargo, este método tiene sus limitaciones para zonas urbanas complejas como plazas amplias y calles largas ya que dificultan el trabajo de esta técnica fotogramétrica y requieren una planificación muy específica. A pesar de las dificultades que surjan para la cartografía de dichas zonas, se tendrán que realizar nuevos estudios y métodos para el avance de la fotogrametría terrestre en este ámbito.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abbaszadeh, S., & Rastiveis, H. (2017). A comparison of close-range photogrammetry using a non-professional camera with field surveying for volume estimation. *XLII-4/W4*, 1-4. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-1-2017
- Agisoft LLC. (2018). *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4*. Obtenido de https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf
- Alsubaie, N., & El-Sheimy, N. (2016). THE FEASIBILITY OF 3D POINT CLOUD GENERATION FROM SMARTPHONES. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences.*, *XLI-B5*, 621-626. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B5-621-2016
- Anderson, K., & Gaston, K. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *FRONTIERS IN ECOLOGY AND THE ENVIRONMENT*, *11*(3), 138-146. doi:10.1890/120150
- Ariza-López, F. (2003). Calidad en la producción cartográfica. *Mapping*(84), 96-98.
- Atkinson, A. (2003). ESTUDIO TEÓRICO PARA EL CONTROL POSICIONAL EN IMÁGENES DE TELEDETECCIÓN GEORREFERENCIADAS. *Teledetección y Desarrollo Regional. X Congreso de Teledetección*, 117-222.
- Belton, D., & Bae, K. H. (2010). The Fifth International Conference on Applications of Magnetic Resonance in Food Science. *Trends in Food Science & Technology*, *11*(6), 226. doi:10.1016/s0924-2244(00)00075-3
- Beraldin, J. A., Lin, S. Y., & Mills, J. P. (2005). Integration of videogrammetry and terrestrial laser scanning for dynamic surface modeling. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 243–251.
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). Structure from Motion in the Geosciences. *Structure from Motion in the Geosciences, August*. doi:<https://doi.org/10.1002/9781118895818>
- Caspary, W., & Scheuring, R. (1993). Positional accuracy in spatial databases. *Computers, environment and urban systems*, *17*(2), 103-110. doi:10_1016_0198_9715_93_90040_C
- Cooper, M. A., & Robson, S. (2000). Theory of close range photogrammetry. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles, Roseleigh House, Latheronwheel, Caithness, KW56DW, Scotland, UK*, 9-50.
- El-Din Fawzy, H. (2019). Study the accuracy of digital close range photogrammetry technique software as a measuring tool. *Alexandria Engineering Journal*, *58*(1), 171-179. doi:10.1016/j.aej.2018.04.004
- El-Sheimy, N. (1996). The development of VISAT: a mobile survey system for GIS applications. doi:10.11575/prism/16734
- Fernández-Tudela, E., Zambrano, L. C., Lagóstena, L. G., & Bethencourt, M. (2022). Documentación y análisis de un cepo de ancla romano y sus elementos iconográficos y epigráficos sellados. *Virtual archaeology review*, *13*(26), 147-162. doi:10.4995/var.2022.15349
- Fraser, C. S. (1993). A resume of some industrial applications of photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *48*(3), 12-23.
- Granshaw, S. I. (2016). Photogrammetric Terminology: Third Edition. *Photogrammetric record*, *31*(154), 210-252. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/304067308_Photogrammetric_Terminology_Third_Edition
- Guan, B., Su, Z., Yu, Q., Li, Z., Feng, W., Yang, D., & Zhang, D. (2022). Monitoring the blades of a wind turbine by using videogrammetry. *Optics and lasers in engineering*, 152. doi:10.1016/j.optlaseng.2021.106901

- Hillcoat, S., Curnock, M. I., Gardiner, N. M., & Birtles, R. A. (2021). Developing protocols for in-water morphometric measurements of cetaceans using stereo-videogrammetry. *Marine mammal science*, 37(1), 45-63. doi:10.1111/mms.12724
- Hughes, M., McDowell, P., & Marcus, W. (2006). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74(1-4), 1-16. doi:10.1016/j.geomorph.2005.07.001
- Järve, I., & Liba, N. (2011). GEOMETRICAL QUALITY OF ORTHOPHOTO MOSAICS MADE BY DIFFERENT PRINCIPLES OF AERIAL TRIANGULATION. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING*.
- Javernick, L., Brasington, J., & Caruso, B. (2014). Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, 213, 166-182. doi:10.1016/j.geomorph.2014.01.006
- Jiang, R., Jáuregui, D. V., & White, K. R. (2008). Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review. *Measurement : journal of the International Measurement Confederation*, 41(8), 823-834. doi:10.1016/j.measurement.2007.12.005
- Karara, H. M. (1972). Simple cameras for close range applications. *Photogrammetric Engineering*, 447-451. Obtenido de <https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1972journal/>
- Karsidag, G., & Alkan, R. M. (2012). Analysis of The Accuracy of Terrestrial Laser Scanning Measurements (6097).
- Kennert, A., & Torlegard, I. (1976). Commission V Invited Paper State-of-the-Art of Close-Range Photogrammetry A review of cameras and photography, measuring instruments, and methods for applications.
- Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. (2022). Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanner systems in the laboratory and in the field. *Applied geomatics*, 14(2), 421-434. doi:10.1007/s12518-022-00442-2
- Kogut, J. P., & Pilecka, E. (2020). Application of the terrestrial laser scanner in the monitoring of earth structures. *Open Geosciences*, 12(1), 503-517. doi:10.1515/geo-2020-0033
- Kolev, K., Tanskanen, P., Speciale, P., & Pollefeys, M. (2014). Turning Mobile Phones into 3D Scanners. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. doi:10.1109/CVPR.2014.504
- Korumaz, S., & Yıldız, F. (2021). Positional Accuracy Assessment of Digital Orthophoto Based on UAV Images: An Experience on an Archaeological Area. *Heritage*, 4(3), 1304-1327. doi:10.3390/heritage4030071
- Kujawa, P. (2021). Comparison of 3D models of an object placed in two different media (air and water) created on the basis of photos obtained with a mobile phone camera. *IOP conference series. Earth and environmental science*, 684(1), 12032. doi:10.1088/1755-1315/684/1/012032
- Kurniawan, R. A., Ramdani, F., & Tanzil, M. T. (2017). Videogrammetry: A new approach of 3-dimensional reconstruction from video using. *Proceedings of the 2017 International Symposium on Geoinformatics (ISyG)*, 24-25.
- Lian, Y., Feng, Z., Huai, Y., Lu, H., Chen, S., & Li, N. (2021). Terrestrial Videogrammetry for Deriving Key Forest Inventory Data: A Case Study in Plantation. *Remote sensing*, 13(16), 3138. doi:10.3390/rs13163138
- Lichti, D. D., Franke, J., Cannell, W., & Wheeler, K. D. (2005). The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys. *Journal of spatial science*, 50(1), 75-89. doi:10.1080/14498596.2005.9635039
- Liu, W. C., & Huang, W. C. (2016). CLOSE RANGE DIGITAL PHOTOGRAMMETRY APPLIED TO TOPOGRAPHY AND LANDSLIDE MEASUREMENTS. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences.*, XLI-B5, 875-880. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B5-875-2016

- Liu, X., Wang, P., Lu, Z., Gao, K., Wang, H., Jiao, C., & Zhang, X. (2019). Damage Detection and Analysis of Urban Bridges Using Terrestrial Laser Scanning (TLS), Ground-Based Microwave Interferometry, and Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR). *Remote Sensing*, 11(5), 580. doi:10.3390/rs11050580
- Luhmann, T. (2010). Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 65(6), 558-569. doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003
- Luhmann, T., Chizhova, M., Gorkovchuk, D., Hastedt, H., Chachava, N., & Lekveishvili, N. (2019). COMBINATION OF TERRESTRIAL LASERSCANNING, UAV AND CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR 3D RECONSTRUCTION OF COMPLEX CHURCHES IN GEORGIA. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences.*, 753-761. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-753-2019
- Marteau, B., Vericat, D., Gibbins, C., Batalla, R. J., & Green, D. R. (2016). Application of Structure-from-Motion photogrammetry to river restoration. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(3), 503. doi:10.1002/esp.4086
- Mechelke, K., Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. (2007). COMPARATIVE INVESTIGATIONS INTO THE ACCURACY BEHAVIOUR OF THE NEW GENERATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING SYSTEMS. (I), 319.
- Modiri, M., Enayati, H., & Ebrahimikia, M. (2015). THE ASSESSMENT OF ORTHOPHOTO QUALITY WITH RESPECT TO THE STRUCTURE OF DIGITAL ELEVATION MODEL. *XL-1/W5(1)*, 487-492. doi:10.5194/isprsrarchives-XL-1-W5-487-2015
- Mokroš, M., Liang, X., Surový, P., Valent, P., Čerňava, J., Chudý, F., . . . Merganič, J. (2018). Evaluation of Close-Range Photogrammetry Image Collection Methods for Estimating Tree Diameters. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(3), 93.
- Mokroš, M., Liang, X., Surový, P., Valent, P., Čerňava, J., Chudý, F., . . . Merganič, J. (2018). Evaluation of Close-Range Photogrammetry Image Collection Methods for Estimating Tree Diameters. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(3), 93. doi:10.3390/ijgi7030093
- Nocerino, E., Lago, F., Morabito, D., Remondino, F., Porzi, L., Poesi, F., . . . Eisert, P. (2017). A SMARTPHONE-BASED 3D PIPELINE FOR THE CREATIVE INDUSTRY – THE REPLICATE EU PROJECT –. *smInternational archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, XLII-2/W3, 535-541. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-535-2017
- Odumosu, J. O., Ajayi, O. G., Nnam, V. C., & Ajayi, S. (2021). ACHIEVING CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY WITH NON-METRIC MOBILE PHONE CAMERAS. *Geodesy and cartography (Vilnius)*, 71-79. doi:10.3846/gac.2021.12241
- Oseni, A. E., Ajani, O. K., Adewale, A. J., Ayodeji, O. O., Desalu, T., & Desalu, T. O. (2020). 3d Modelling of Structures using terrestrial laser scanning technique. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 6(7), 316-331. doi:10.22161/ijaems.67.4
- Paleo, U. (2011). *Diccionari terminològic de fotogrametria*. Barcelona.
- Pezzuolo, A., Giora, D., Sartori, L., & Guercini, S. (2018). Automated 3D reconstruction of rural buildings from Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry approach. *Engineering for Rural Development*. doi:10.22616/erdev2018.17.n060
- Rashidi, M., Mohammadi, M., Abdolvand, M., Abdolvand, M. M., Truong-Hong, L., & Samali, B. (2020). A decade of modern bridge monitoring using terrestrial laser scanning: Review and future directions. *Remote sensing*, 12(22), 3796. doi:10.3390/rs12223796
- Routsala, A. H. (2016). Digital Close-Range Photogrammetry : A Modern Method to Document Forensic Mass Graves. doi:10.13140/rg.2.1.1668.7603

- Rüther, H., Bhurtha, R., Held, C., Schröder, R., & Wessels, S. (2012). Laser Scanning in Heritage Documentation. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 78(4), 309-316. doi:10.14358/PERS.78.4.309
- Saygi, G., & Hamamcioğlu-Turan, M. (2009). DOCUMENTATION OF A HISTORICAL STREETScape WITH CLOSE RANGE DIGITAL PHOTOGRAMMETRY
DOCUMENTATION OF A HISTORICAL STREETScape WITH CLOSE RANGE DIGITAL PHOTOGRAMMETRY.
- Sertić, H., Paar, R., Tomić, H., & Ravlić, F. (2022). Influence of Flight Height and Image Sensor on the Quality of the UAS Orthophotos for Cadastral Survey Purposes. *Land*, 11(1250), 1250. doi:10.3390/land11081250
- Sheng, L., & Gong, Z. B. (2014). A novel mesh subdivision algorithm for dense reconstruction from multi-image based on preliminary model. *The Imaging Science Journal*, 62(1), 16-26.
- Staiger, R. (2003). Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications. 1–10.
- Sternberg, H., Mechelke, K., Lindstaedt, M., & Kersten, T. (2009). Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*(4), 301-315. doi:10.1127/1432-8364/2009/0023
- Sun, Z., & Zhang, Y. (2019). Accuracy Evaluation of Videogrammetry Using A Low-Cost Spherical Camera for Narrow Architectural Heritage: An Observational Study with Variable Baselines and Blur Filters. *Sensors*, 19(3), 496. doi:10.3390/s19030496
- Tkac, M., Mesaros, P., & Mandicak, T. (2018). Terrestrial laser scanning – effective technology for creating building information models. *Pollack periodica*, 13(3), 61-72. doi:10.1556/606.2018.13.3.7
- Torresani, A., & Remondino, F. (2019). VIDEOGRAMMETRY VS PHOTOGRAMMETRY FOR HERITAGE 3D RECONSTRUCTION. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences.*, 1157-1162. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1157-2019
- USBB. (1947). United States national map accuracy standards.
- Vosselman, G., & Maas, H. (2010). Airborne and Terrestrial Laser Scanning. *Whittles Publishing, Caithes*, 336.
- Wang, C. H., Mills, J. P., & Miller, P. E. (2012). Automated low-cost photogrammetry for flexible structure monitoring. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences.*, 393-398. doi:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-393-2012
- Wang, J., Dai, Z., Fagherazzi, S., & Long, C. (2022). A novel approach to discriminate sedimentary characteristics of deltaic tidal flats with terrestrial laser scanner: Results from a case study. *Sedimentology*, 69(4), 1626. doi:10.1111/sed.12970
- Zhen, Y., Xiaohua, T., Yusheng, X., Sa, G., Shijie, L., Huan, X., . . . Xianglei, L. (2018). An Improved Subpixel Phase Correlation Method with Application in Videogrammetric Monitoring of Shaking Table Tests. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 84(9). doi:10.14358/PERS.84.9.579