



Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

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

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

*GEORREFERENCIACIÓN DE VUELOS HISTÓRICOS Y OBTENCIÓN DE PRODUCTOS DERIVADOS PARA EL
ESTUDIO DE EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA. ESTUDIO DE CASO DEL EMBALSE DE ITOIZ.*

presentado por

Daniel Peralta Hernández (e)k

aurkeztua

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



Septiembre de 2021 / 2021ko iraila

Resumen

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE), proporcionan información numérica de la elevación de la superficie terrestre. Éstos, son de gran utilidad en el análisis del territorio y en infinidad de aplicaciones. La existencia de grandes conjuntos de imágenes aéreas desde hace cerca de un siglo y las técnicas de correlación de imágenes basadas en la fotogrametría tradicional, posibilitan la generación de MDEs que permiten reconstruir la geomorfología del terreno décadas atrás. El presente trabajo se centra en el desarrollo metodológico de estas técnicas para su posterior aplicación en el estudio de caso del área del embalse de Itoiz ubicado en la Comunidad Foral de Navarra. Para esta zona, se han generado MDEs, ortofotografías y productos derivados correspondientes a diferentes momentos del final del siglo XX. En este trabajo se ha analizado la fiabilidad de estos productos y se ha estudiado su evolución en el tiempo.

Palabras clave: Ortofoto, LiDAR, fotogrametría aérea, Structure from Motion (SfM), Modelo Digital de Elevación (MDE).

Abstract

Digital Elevation Models (DEM) provides numerical information of the earth's surface elevation. These are very useful in the analysis of the territory and have countless applications. The existence of large sets of aerial images for almost a century and image correlation techniques based on traditional photogrammetry, makes possible to generate DEMs. These models make possible the reconstruction of earth's terrain geomorphology decades ago. This work focuses on the methodological development of these techniques for the application in the case study of the Itoiz reservoir area located in the Autonomous Community of Navarra. For this area, DEMs, orthophotographs and derived products corresponding to different moments of the end of the 20th century have been generated. In this work, the accuracy of these products has been analyzed and their evolution over time has been studied.

Keywords: Ortophoto, LiDAR, aerial photogrammetry, Structure from Motion (SfM), Digital Elevation Model (DEM).

Agradecimientos

A la empresa Tracasa Instrumental y a todo su equipo por haberme dedicado tiempo y esfuerzo para la realización de este trabajo; Jesús, Arantxa, Fermín... En especial a Víctor García por su colaboración y guía en el desarrollo del trabajo en todo momento.

A todo el equipo del MUSIGT, en especial a Jesús Álvarez como director del master y de este trabajo.

De verdad, gracias.

Índice

0.- Preámbulo	1
1.- Introducción-estado del arte	1
1.1.- Fotogrametría y “Structure From Motion”	1
1.2.- LiDAR	3
1.3.- Estado del arte en el tema de estudio	4
2.- Objetivos del trabajo	8
3.-Materiales de partida y metodología	9
3.1.- Área de estudio	9
3.2.- Materiales de partida.....	10
3.2.1.- Vuelos fotogramétricos	10
3.2.2.- Vuelo LiDAR.....	12
3.3.- Metodología	12
3.3.1.- Softwares empleados	13
3.3.2.- Proceso fotogramétrico	14
3.3.3.- Obtención de productos derivados de los MDS, posprocesado	17
3.3.4.- Comparativas temporales de productos	20
3.3.5.- Comparativas datos LiDAR batimétricos ramales embalse.....	23
4.- Resultados	25
4.1.- Modelos Digitales de Elevación obtenidos	25
4.2.- Comparativas con puntos de control.....	32
4.2.1.- Suelo	32
4.2.2.- Vegetación arbórea	33
4.3.- Productos derivados y análisis de resultados	33
4.3.1.- Mapas de pendiente.....	33
4.3.2.- Mapas de orientación	38
4.4.- Comparativas con datos batimétricos	42
4.5.- Resultados LiDAR batimétrico.....	43
4.6.- Ortofotografías.....	44
4.7.- Discusión de resultados.....	46
5.- Conclusiones	47
6.- Bibliografía	48
7.- Anexos	52

Anexo 1.- Puntos en zonas consideradas suelo: Diferencias de cotas entre el modelo LiDAR de 2017 considerado verdad de la superficie y las cotas obtenidas de los modelos derivados de vuelos fotogramétricos.	52
Anexo 2.- Puntos en zonas consideradas cubiertas vegetales: Diferencias de cotas entre el modelo LiDAR de 2017 considerado verdad de la superficie y las cotas obtenidas de los modelos derivados de vuelos fotogramétricos.	53

Contenido figuras

Figura 1.- Modelo estereoscópico. Fuente: (Rocha, 1977)	2
Figura 2.- Solape entre fotogramas para posibilitar la visión estereoscópica. Fuente: (Singh, 2021).	2
Figura 3.- Esquema LiDAR aerotransportado (Aerial Photography - USDA Farm Service Agency).	3
Figura 4.- Retornos LiDAR sobre superficies de agua (Wang & Philpot, 2007).....	3
Figura 5.- Sistema de LiDAR batimétrico (LaRocque & West, 1990).	4
Figura 6.- Diferencia de valores de rugosidad extraídos del MDT LiDAR y por fotogrametría para tres zonas distintas (Alex et al., 2020).....	5
Figura 7.- Diferencia absoluta media entre los modelos LiDAR y los derivados de fotogrametría con un intervalo de confianza del 95% para (a) cada tipo de cobertura vegetal y (b) distintos grados de pendiente.....	5
Figura 8.- Diferencia de modelo digital de elevación (Williams, 2012).	6
Figura 9.- Mapa de localización del área de estudio. Fuente: (IGN, 2021; SITNA - Gobierno de Navarra, 2021).....	9
Figura 10.- Mapa geológico del entorno del embalse de Itoiz (López-Fernández et al., 2018).	10
Figura 11.- Gráficos de vuelos fotogramétricos empleados.....	11
Figura 12.- Gráfico cuadrículas datos LiDAR empleados. Fuente: (SITNA - Gobierno de Navarra, 2021).....	12
Figura 13.- Flujo de proceso.	14
Figura 14.- Recorte de marcos e información de los fotogramas para el vuelo de 1967.	15
Figura 15.- Proceso de orientación relativa de imágenes para el vuelo de 1996 en Agisoft Metashape Professional.....	15
Figura 16.- Asignación de GCPs (Ground Control Points) para el vuelo de 1986. Ejemplo punto de detalle.	16
Figura 17.- Nube de puntos densa para el vuelo de 1996.	17
Figura 18.- Modelo Digital de Elevación para el año 1996 visualizado en el software Global Mapper.	18
Figura 19.- Ventana de escaneo de superficie (ESRI, 2021b).	18
Figura 20.- Leyenda aclaratoria mapa de orientación (ESRI).....	19

Figura 21.- SNAP Mask Manager para zonas zonas no cubiertas por la lámina de agua a 548,19 m.s.n.m.	19
Figura 22.- Puntos de extracción de información digitalizados.	21
Figura 23.- Sonda de medición batimétrica (Schneider & Vidal, 2011).	22
Figura 24.- Puntos de información batimétrica año 2010 en el embalse de Itoiz.	23
Figura 25.- Línea de contorno de cota del embalse de Itoiz sobre puntos LiDAR. Fecha de toma de datos: 9 de septiembre de 2017, 505.50 m.s.n.m.	24
Figura 26.- Cortes de perfil para obtención de datos batimétricos del vuelo LiDAR.	24
Figura 27.- Año 1967. Sup.-izda.: MDE 1967, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) MDE 1967, abajo: histograma de la diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) - MDE 1967.	25
Figura 28.- Año 1986. Sup.-izda.: MDE 1986, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) -MDE 1986, abajo: histograma de la diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) - MDE 1986.	26
Figura 29.- Año 1996. Sup.-izda.: MDE 1996, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) -MDE 1996, abajo: histograma de la diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) - MDE 1996.	27
Figura 30.- Año 2018. Sup.-izda.: MDE 2018, sup.-dcha.: diferencia MDE-verdad superficie, abajo: histograma de diferencia de alturas 2018-verdad superficie.	28
Figura 31.- Evolución geomorfológica (rojo), de vegetación (azul) y de la presa (rosa). Zonas a partir de diferencias con modelo LiDAR. Arriba-izda: 1967, arriba-dcha: 1986, abajo-izda: 1996 y abajo-dcha: 2018.	29
Figura 32.- Histogramas de elevación de los Modelos Digitales de Elevación obtenidos y el tomado como verdad de superficie.	30
Figura 33.- Arriba-izda: 1986 - 1967, arriba-dcha: 1996 - 1986, abajo: 2018 – 1996.	31
Figura 34.- Diagrama de dispersión de puntos considerados suelo obtenidos de modelos derivados de vuelos fotogramétricos y los derivados del MDS LDAR de 2017.	32
Figura 35.- Diagrama de dispersión de puntos considerados vegetación obtenidos de modelos derivados de vuelos fotogramétricos y los derivados del MDS LDAR de 2017.	33
Figura 36.- Productos de pendiente año 1967. Sup.-izda.: Pendiente 1967, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – pendiente 1967, abajo: histograma de verdad de superficie - diferencia de pendiente 1967.	34
Figura 37.- Productos de pendiente año 1986. Sup.-izda.: Pendiente 1986, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – pendiente 1986, abajo: histograma de verdad de superficie - diferencia de pendiente 1986.	35
Figura 38.- Productos de pendiente año 1996. Sup.-izda.: Pendiente 1996, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – pendiente 1996, abajo: histograma de verdad de superficie - diferencia de pendientes 1996.	36
Figura 39.- Productos de pendiente año 2018. Sup.-izda.: Pendiente 2018, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – pendiente 2018, abajo: histograma de verdad de superficie - diferencia de pendientes 2018.	37

Figura 40.- Productos de orientación año 1967. Sup.-izda.: Orientación 1967, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – orientación 1967, abajo: histograma de diferencia de verdad superficie – orientación 1967.	38
Figura 41.- Productos de orientación año 1986. Sup.-izda.: Orientación 1986, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – orientación 1986, abajo: histograma de diferencia de verdad superficie – orientación 1986.	39
Figura 42.- Productos de orientación año 1996. Sup.-izda.: Orientación 1996, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – orientación 1996, abajo: histograma de diferencia de verdad superficie – orientación 1996.	40
Figura 43.- Productos de orientación año 2018. Sup.-izda.: Orientación 2018, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – orientación 2018, abajo: histograma de diferencia de verdad superficie – orientación 2018.	41
Figura 44.- Scatter plot de puntos de fondo del embalse obtenidos de modelos derivados de vuelos fotogramétricos y los puntos de información batimétrica del embalse.	42
Figura 45.- Perfil 1 corte LiDAR topobatimétrico.	43
Figura 46.- Perfil 2 corte LiDAR topobatimétrico.	43
Figura 47.- Ortofoto generada para el vuelo de 1967.	44
Figura 48.- Ortofoto generada para el vuelo de 1986.	45
Figura 49.- Ortofoto generada para el vuelo de 1996.	45

Contenido tablas

Tabla 1.- Vuelos fotogramétricos empleados en el trabajo.	11
Tabla 2.- Características principales de los vuelos fotogramétricos empleados en el trabajo.	11
Tabla 3.- Detalles del vuelo LiDAR.	12
Tabla 4.- Softwares empleados para el procesado de imágenes y datos.	13
Tabla 5.- Número de GCPs obtenidos para cada vuelo y errores medios de puntos de control.	16
Tabla 6.- Modelos digitales de elevación.	20
Tabla 7.- Puntos de información generados.	20
Tabla 8.- Tamaño de píxel obtenido para los modelos de elevación generados (cm).	30
Tabla 9.- Errores cuadráticos medios para zonas de suelo entre el modelo considerado verdad de superficie y los diferentes años de estudio (m).	32
Tabla 10.- Errores cuadráticos medios para zonas de vegetación arbórea entre el modelo considerado verdad superficie y los diferentes años de estudio (m).	33
Tabla 11.- Media (μ) y desviación estándar (σ) de las diferencias de alturas, pendiente, orientación y curvaturas para los años de estudio.	41
Tabla 12.- Error cuadrático medio puntos área embalse (m).	42
Tabla 13.- Tamaño de píxel de las ortofotos generadas.	44

Listado de acrónimos

MDE: Modelo Digital de Elevación

DoD: DEM of Difference (Modelo de diferencias de MDEs)

MDS: Modelo Digital de Superficies

MDT: Modelo Digital del Terreno

GSD: Ground Sample Distance (Tamaño de píxel sobre el terreno)

GCP: Ground Control Point (Punto de control en el terreno)

0.- Preámbulo

El empleo de la fotogrametría a partir de imágenes aéreas en el estudio de la evolución geomorfológica está cada vez más extendido (Cardenal Escarcena et al., 2008; Dunne, 2015; Jiménez-Jiménez et al., 2021). En los diferentes estudios en los que se aplican este tipo de imágenes, la orientación de los vuelos está basada en técnicas de aerotriangulación aportando puntos de control a los que se les da una referencia para su posterior proceso y obtención de modelos digitales de la elevación por correlación automática (Fernández et al., 2014).

La existencia de imágenes de vuelos históricos con cerca de un siglo de antigüedad, posibilita la generación de modelos altimétricos y ortofotos a partir de estos fotogramas para una amplia serie de años. Estos fotogramas, muchas veces archivados y con difícil acceso, suponen una pieza clave de información para el estudio multitemporal del territorio y su análisis resulta de interés para diferentes ramas de investigación y para la planificación territorial.

El escaneo y georreferenciación de estos negativos correspondientes a diferentes vuelos históricos, en muchas ocasiones es una tarea lenta y difícil de llevar a cabo sobre todo en vuelos con escaso número de fotogramas o inexistencia de continuidad entre pasadas. Las prácticas desarrolladas en la empresa Tracasa Instrumental S.L. dentro del Máster de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección de la Universidad Pública de Navarra, centradas en la georreferenciación de vuelos históricos y la búsqueda de soluciones para una mayor eficacia en su procesado, me llevaron a la propuesta del presente tema de Trabajo Final de Master con la finalidad de desarrollar una metodología para el proceso y la obtención de productos derivados en una fase de posprocesado.

1.- Introducción-estado del arte

Los modelos digitales de elevación, su obtención y aplicación para estudios evolutivos y de caracterización geomorfológica de superficies han tenido una importante evolución en las últimas décadas (Muñoz-Narciso, 2014).

La precisión y cantidad de estos modelos ha crecido de forma importante gracias a la aplicación de nuevos métodos de captura, procesado y posprocesado de los datos. Tecnologías como el GNSS y los sensores LiDAR han posibilitado la obtención directa de datos con grandes resoluciones y las mejoras técnicas en aplicaciones como la fotogrametría tradicional han posibilitado un mayor acceso e interoperabilidad de los datos (Brasington & Smart, 2003; Lane et al., 2000).

1.1.- Fotogrametría y “Structure From Motion”

La técnica fotogramétrica *Structure from Motion*, en adelante también SfM, es un método automatizado de alta resolución y bajo coste en comparación con otras técnicas que posibilitan la adquisición de información de un objeto desde sensores aerotransportados como el LiDAR (Dunne, 2015; Tomás et al., 2016). Esta técnica está basada en la fotogrametría estereoscópica en la que la estructura tridimensional se obtiene a partir de la superposición de imágenes que comparten zonas comunes (**Figura 1**). La combinación de esta técnica y la visión por computadora y los continuos avances tecnológicos y de capacidad de hardware posibilitan su aplicación.

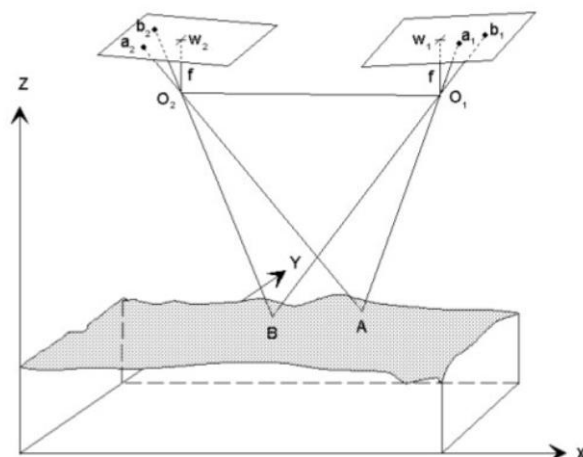


Figura 1.- Modelo estereoscópico. Fuente: (Rocha, 1977)

En un vuelo fotogramétrico, todo punto en la superficie debe figurar al menos en un par de fotografías consecutivas para poderlo examinar estereoscópicamente de modo que la superposición entre fotogramas debe ser de un mínimo del 60% en la dirección de la pasada del vuelo y el longitudinal de un 30% entre las diferentes pasadas (Zubrinic & Reuter, 2002). (**Figura 2**)

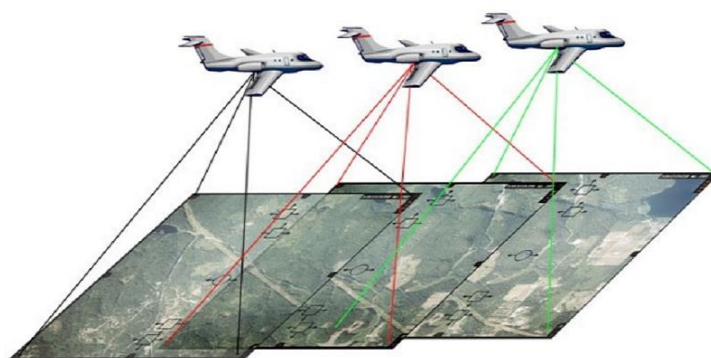


Figura 2.- Solape entre fotogramas para posibilitar la visión estereoscópica. Fuente: (Singh, 2021).

La técnica SfM se diferencia de la fotogrametría convencional, en que la geometría de la escena, las posiciones de cámara y la orientación, son calculadas por el software empleado de forma automática generando un modelo de puntos comunes en las imágenes. Esta nube de puntos generada con una referencia relativa se lleva a su posición geográfica mediante una serie de puntos de control con coordenadas conocidas (Carrivick et al., 2016; Tomás et al., 2016).

Esta técnica permite generar modelos tridimensionales con información de coordenadas de la superficie XYZ de los que se derivan modelos digitales de elevación. Estos posibilitan, mediante la comparación de modelos de diferentes épocas, el análisis y determinación de los cambios de la superficie terrestre (Cardenal Escarcena et al., 2008). Los avances en fotogrametría estereoscópica posibilitan el uso de fotografías aéreas para la toma de medidas y generación de modelos digitales de elevación cuya precisión está condicionada por las propiedades de la cámara, las características del vuelo y de las fotos así como las características morfométricas de la superficie (edificaciones, vegetación, tipos de suelo, etc.) (Dunne, 2015; Özgür Çelik et al., 2020).

1.2.- LiDAR

La técnica de teledetección *Light Detection And Ranging* (LiDAR), también conocida como *Airborne Laser Scanning* (ALS) está formada por unos sensores que portan un emisor láser que envía impulsos a la superficie terrestre los cuales, una vez chocan con los objetos, rebotan y llegan de vuelta al sensor. Cada uno de estos pulsos de retorno, tienen una ubicación espacial tridimensional de alta precisión con coordenadas X e Y e información de altura, Z. Un sistema LiDAR está compuesto por tres componentes: una unidad de escáner, un sistema de posicionamiento global (GNSS) y un sistema de medición inercial (IMU) (Fagua et al., 2011; Liu, 2008). (Figura 3)

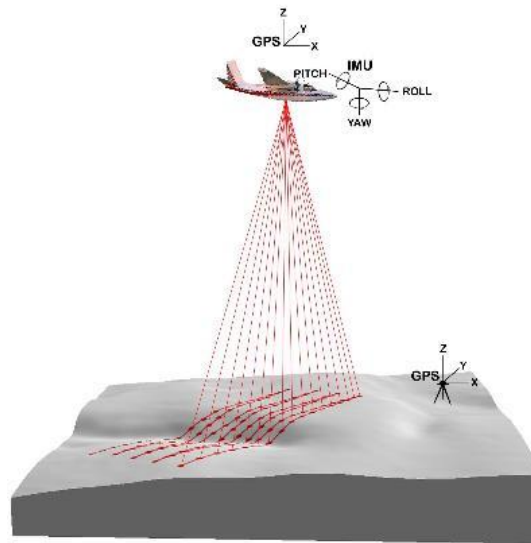


Figura 3.- Esquema LiDAR aerotransportado (Aerial Photography - USDA Farm Service Agency).

Los datos generados por estos impulsos son almacenados y pueden ser procesados para construir modelos digitales de elevación (Fagua et al., 2011). Actualmente, el uso de datos LiDAR para la obtención de modelos de elevación, es la vía más efectiva y con mayor precisión para la obtención de modelos digitales de elevación.

Sobre superficies de agua, a determinadas longitudes de onda (e.g., verde) el retorno LiDAR adopta las formas que describe la **Figura 4**.

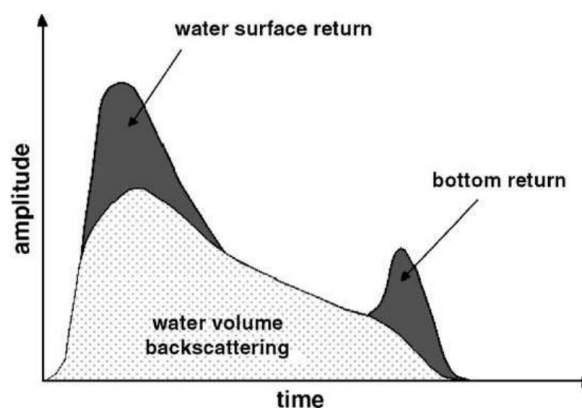


Figura 4.- Retornos LiDAR sobre superficies de agua (Wang & Philpot, 2007).

Las ondas de sensores específicos de LiDAR batimétrico, registran un primer retorno en la superficie del agua, seguido el retorno del fondo en zonas de poca profundidad (**Figura 5**). Por tanto, existe la posibilidad de realizar estudios batimétricos usando LiDAR. No obstante, el

tiempo y amplitud de retorno es variable en función de la rugosidad de la lámina de agua, su turbidez o la longitud de onda del sensor. La retrodispersión del pulso se inicia cuando entra en el agua y se va a atenuando exponencialmente a medida que se sumerge en el agua siendo inferior en el último retorno (Wang & Philpot, 2007).

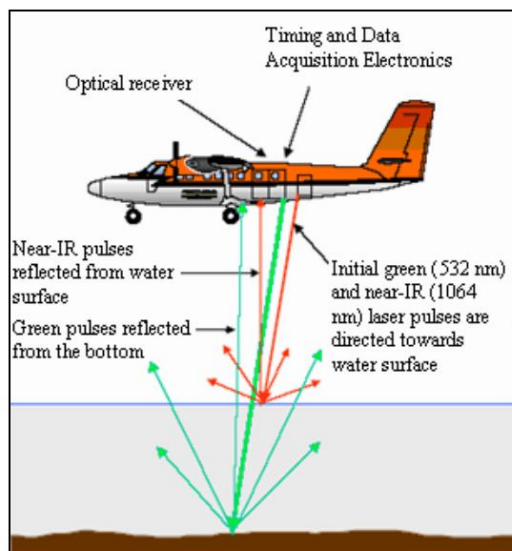


Figura 5.- Sistema de LiDAR batimétrico (LaRocque & West, 1990).

El formato de almacenamiento de estos datos LiDAR que se están generalizando en el sector es .LAZ. Este formato público, desarrollado por Martin Isenburg, almacena los datos en el formato estándar ASPRS LAS comprimidos permitiendo que ocupen entre un 7 y un 25% del tamaño inicial (Isenburg, 2013).

1.3.- Estado del arte en el tema de estudio

Los modelos digitales de elevación son uno de los elementos básicos de representación digital de la superficie terrestre. Actualmente, los métodos basados en sensores remotos sin necesidad de la toma de datos a partir de topografía tradicional o GNSS proporcionan gran precisión y abarcan mayor extensión a menor coste (Moreno Brotóns et al., 2010). Estos modelos, representan las cotas de las elevación a representar en forma de mallas regulares de píxeles (Felicísimo, 1994).

Su uso se extiende en diversos campos como la geografía, la hidrología, los estudios de impacto ambiental o la elaboración de cartografía general (Méndez & Jiménez, 2013). Centrados en los estudios de cambios geomorfológicos de la superficie terrestre, a partir de los modelos digitales de elevación se pueden analizar y cuantificar fenómenos de diversa índole como las erupciones volcánicas, desplazamientos de laderas o evolución de los glaciares (Fabris & Pesci, 2005).

Centrados en las diferencias de modelos obtenidos entre fotogrametría y datos LiDAR, Alex et al., 2020, realizaron un estudio cuantitativo de comparación entre modelos digitales del terreno (MDT) derivados de datos LiDAR y los derivados de fotogrametría en zonas con características topográficas diversas. En estas zonas, los modelos derivados de datos LiDAR mostraron mayor detalle que los obtenidos a partir de fotogrametría convencional (**Figura 6**). Principalmente, demostraron como estos mejores resultados se evidencian en zonas con topografía más abruptas (Zona 1 en la **Figura 6**) o en las que predominan masas forestales densas (Zona 3) donde los softwares de SfM basados en fotogrametría tradicional no realizan una correlación de puntos tan precisa como en zonas con topografías más sencillas, zonas urbanas, edificaciones y suelos sin vegetación (Zona 2).

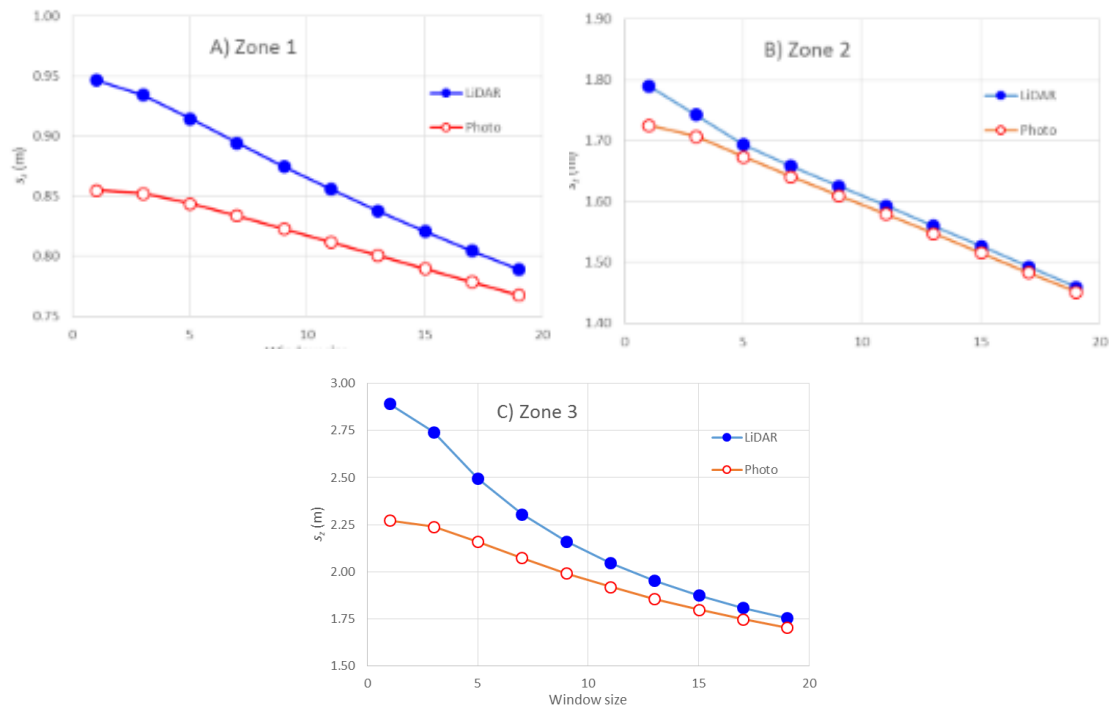


Figura 6.- Diferencia de valores de rugosidad extraídos del MDT LiDAR y por fotogrametría para tres zonas distintas (Alex et al., 2020).

De forma similar, Gil et al., 2013 realizaron un trabajo comparativo entre modelos digitales de elevación con un tamaño de píxel de 5 metros; el modelo obtenido a partir de la restitución de un vuelo fotogramétrico y el generado a partir de datos LiDAR aerotransportado con una densidad de 0,8 puntos por metro cuadrado. Demostraron como, del modelo derivado de datos LiDAR se obtuvieron precisiones mayores en zonas con una densidad vegetal alta donde un vuelo fotogramétrico no alcanza el nivel de suelo dado que no es visible. A pesar de ello obtuvieron un intervalo de confianza del 95% y demostraron como la diferencia es mayor a medida que aumenta la altura y densidad de la vegetación o la forma y pendiente de la superficie tal y como puede verse en sus resultados presentados en la **Figura 7**.

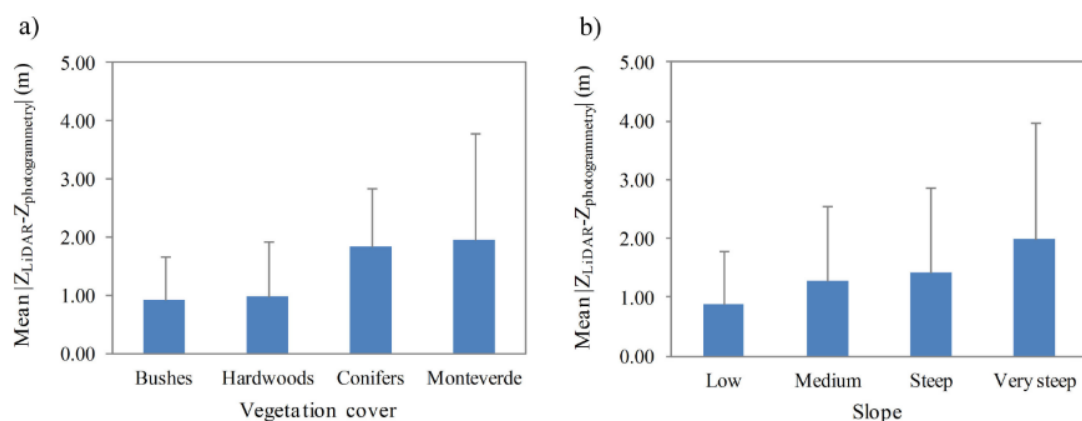


Figura 7.- Diferencia absoluta media entre los modelos LiDAR y los derivados de fotogrametría con un intervalo de confianza del 95% para (a) cada tipo de cobertura vegetal y (b) distintos grados de pendiente.

Siguiendo la línea de trabajo de este proyecto, Llena et al., 2018 presentaron un flujo de trabajo para la obtención de información empleada en el análisis de los cambios geomorfológicos fluviales tras la aplicación de la técnica SfM a series de fotografías aéreas. En su trabajo,

demonstraron la importante aplicación de este proceso en este tipo de vuelos para realizar análisis evolutivos del territorio.

La técnica de producción de diferencia de modelos digitales de elevación (DoD del inglés *DEM of Difference*), posibilita cuantificar los cambios de volumen entre dos modelos topográficos de diferentes fechas (Williams, 2012).

La posibilidad de aplicar la técnica SfM a fotografías aéreas históricas y obtener modelos digitales de elevación derivados, permiten la generación de DoD como producto final de comparación y análisis de la elevación de la superficie terrestre para amplias series temporales (Williams, 2012) (**Figura 8**).

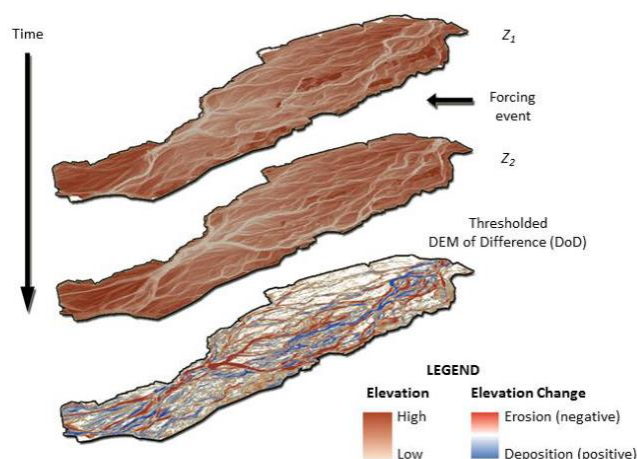


Figura 8.- Diferencia de modelo digital de elevación (Williams, 2012).

La resolución de estos modelos obtenidos, varía en función de la disposición del relieve. Así, Deng et al., 2007 realizaron una evaluación de estas resoluciones analizando la pendiente, curvatura del perfil, orientación de las pendientes y el índice de humedad topográfica.

De forma similar, Brotóns et al., 2010 desarrollaron una metodología para la cuantificación de errores en MDE derivados de restitución fotogramétrica, entre los que principalmente destacan las umbrías y zonas de bordes de los fotogramas. Para ello, analizaron el error medio a partir de un muestreo de errores de una serie de puntos con cotas reales medidas en campo. A partir de estos datos realizaron un análisis estadístico en el que el error altimétrico de un punto con coordenadas conocidas X,Y se define como la diferencia entre la altitud real y la estimada.

De este modo, obtenido un número de puntos de validación elevado, obtienen una muestra de errores con las siguientes propiedades:

- Media y varianza próximos a cero.
- Independencia espacial (los errores son sistemáticamente mayores en unas zonas que en otras).
- No autocorrelación (la magnitud del error en un punto es independiente de los errores en puntos cercanos).

A partir de estos datos, definen un estadístico válido para la evaluación global de un modelo de una determinada área; el error cuadrático medio para una muestra de errores N.

Esta metodología de análisis estadístico desarrollada por Brotóns et al., 2010 será aplicada en el desarrollo metodológico y de resultados del presente trabajo.

En otro trabajo sobre la validación de modelos, Pakoksung & Takagi, 2016 realizaron un análisis del error entre modelos digitales de elevación disponibles globalmente y mediciones GNSS en campo para un área de Japón. Al igual que Brotóns et al., 2010 analizaron el error de elevación para puntos concretos. También evaluaron otras métricas como la media de los errores, la desviación estándar del error y el error cuadrático medio para el análisis y validación de los diferentes modelos que compararon.

Con estos trabajos de análisis y evaluación de modelos como base unido a un continuo desarrollo y avance de nuevas tecnologías como el LiDAR que posibilitan la obtención de modelos de elevación de gran precisión, la existencia de conjuntos de imágenes áreas desde hace cerca de un siglo para grandes extensiones del territorio, posibilitan la obtención de modelos comparativos de análisis que permiten analizar la evolución, así como cuantificar los cambios producidos en la superficie terrestre. Estos productos tienen aplicaciones de gran utilidad para el análisis de la evolución geomorfológica, fluvial, forestal o urbana del territorio entre otras. La necesidad de desarrollo de una metodología específica y la aplicación de esta para el análisis de su fiabilidad y precisión en un estudio de caso concreto, llevaron al desarrollo del presente trabajo con los objetivos descritos a continuación en el siguiente apartado.

2.- Objetivos del trabajo

El objetivo general del trabajo es evaluar la utilidad de los vuelos históricos para la obtención de diferentes productos derivados de interés en estudios geomorfológicos.

Este objetivo general se concreta en varios objetivos específicos:

-Desarrollar una metodología para la aplicación de la técnica *Structure from Motion* para la obtención de modelos digitales de elevación y productos derivados como mapas de pendiente y orientación derivados de estos.

-Aplicar la metodología desarrollada en un caso de estudio centrado en el vaso del embalse de Itoiz (Navarra) en el que se realizan comparativas y obtienen diferentes productos derivados para el análisis de la fiabilidad de los modelos y productos derivados obtenidos.

-Evaluar estos resultados utilizando como referencia modelos derivados de datos LiDAR, así como datos batimétricos en las zonas inundadas por el embalse.

3.-Materiales de partida y metodología

3.1.- Área de estudio

El área de estudio (**Figura 9**), como se ha mencionado en el anterior apartado, se centra en el vaso del Embalse de Itoiz, localizado al este de la Comunidad Foral de Navarra entre los valles de Arce y Lónguida. Recibe el nombre de uno de los pueblos inundado con su llenado, iniciado en el año 2004. El embalse, regula el río Irati, afluente indirecto del río Ebro alimentando el Canal de Navarra con la finalidad de abastecer zonas agrícolas, urbanas e industriales del sur de la Comunidad Foral.

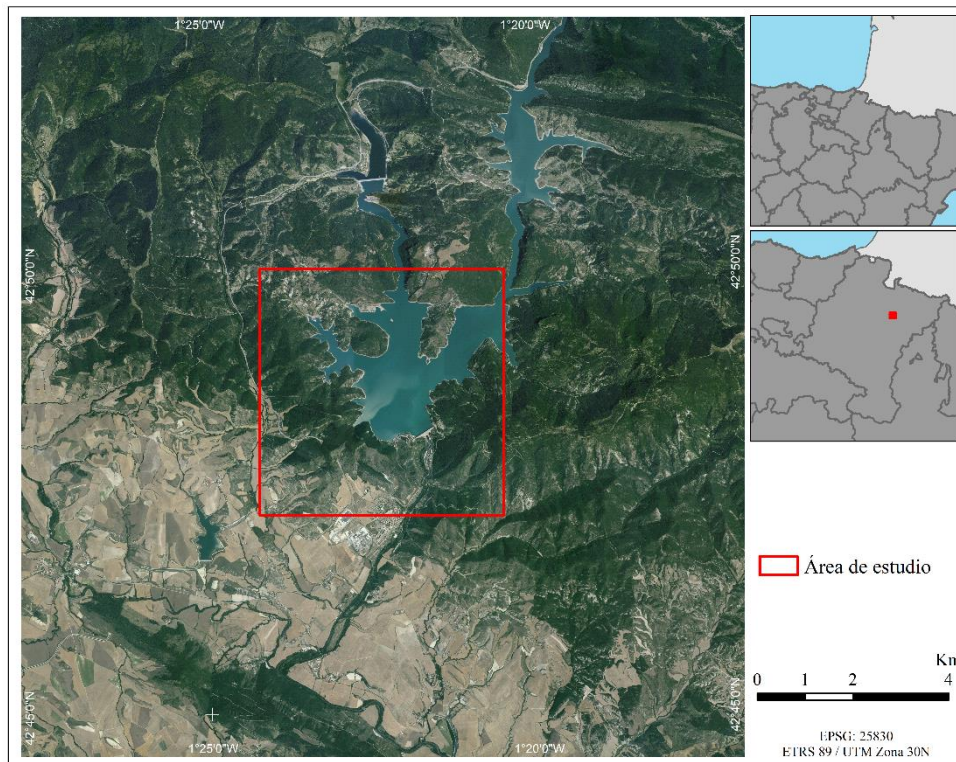


Figura 9.- Mapa de localización del área de estudio. Fuente: (IGN, 2021; SITNA - Gobierno de Navarra, 2021)

Desde un punto de vista geológico (**Figura 10**), está ubicado en la cordillera Surpirenaica formada entre el Cretácico superior y el Mioceno. El embalse se localiza sobre rocas de edades entre el Cretácico superior y el Eoceno Luteciense. En un primer nivel predominan materiales impermeables del terciario, principalmente margas y areniscas. En niveles inferiores, afloran calizas y dolomías del paleoceno y del cretácico superior (García-Sansegundo, 2005; López-Fernández et al., 2018).

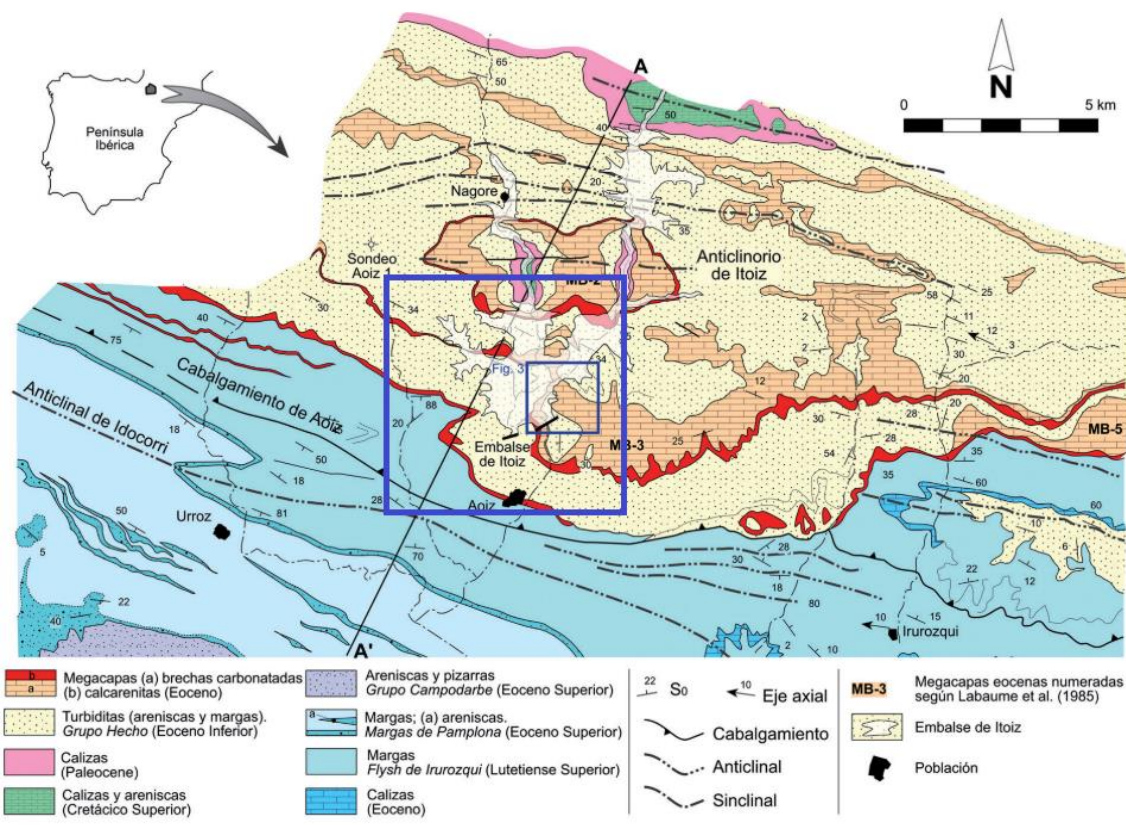


Figura 10.- Mapa geológico del entorno del embalse de Itoiz (López-Fernández et al., 2018)

3.2.- Materiales de partida

La metodología desarrollada, se ha aplicado a una serie multitemporal de vuelos adquiridos sobre el área de estudio, propiedad de Obras Públicas del Gobierno de Navarra. En los siguientes apartados y tablas se presentan los vuelos empleados y sus principales características.

3.2.1.- Vuelos fotogramétricos

La selección de los fotogramas y años de vuelos ha estado condicionada por la disponibilidad temporal, su resolución, la altura del vuelo y el grado de solape entre los diferentes fotogramas del vuelo. Así, para el estudio de caso del embalse de Itoiz se han obtenido las siguientes series temporales: 1967, 1986, 1996, y 2018.

Los fotogramas necesarios para el procesado y obtención de productos derivados de análisis están disponibles para su descarga online en la web de la Cartoteca y Fototeca de Navarra (Gobierno de Navarra, 2021). Sin embargo, estos fotogramas propiedad de Obras Públicas, se encuentran disponibles para su descarga a menor resolución que la original. Por ello, han sido obtenidos de las copias de seguridad almacenadas que Tracasa Instrumental S.L. dispone de estos vuelos. En la **Tabla 1** se muestran los vuelos empleados.

Tabla 1.- *Vuelos fotogramétricos empleados en el trabajo.*

Fecha de vuelo	Nombre del vuelo	Escala	Nº fotogramas
Junio-noviembre 1967	Obras públicas: Itoiz-Sangüesa	1 / 7.000	152
Octubre-noviembre 1986	Navarra Sur Zona J	1 / 7.000	170
Agosto 1996	Navarra Noreste	1 / 20.000	47
Septiembre 2018	Comunidad Foral. Vuelo 2018	1 / 32.000	16

Los vuelos fotogramétricos, a excepción del año 2018 fueron capturados por cámaras analógicas y son los negativos de estas capturas el punto de partida del desarrollo de los diferentes procesos a partir del escaneo de los fotogramas. Para el vuelo de 2018, al tratarse de un vuelo digital, los fotogramas ya se encontraban almacenados en formato digital.

En la **Figura 11**, se presentan los gráficos de huellas de los diferentes vuelos empleados en el desarrollo de este trabajo.

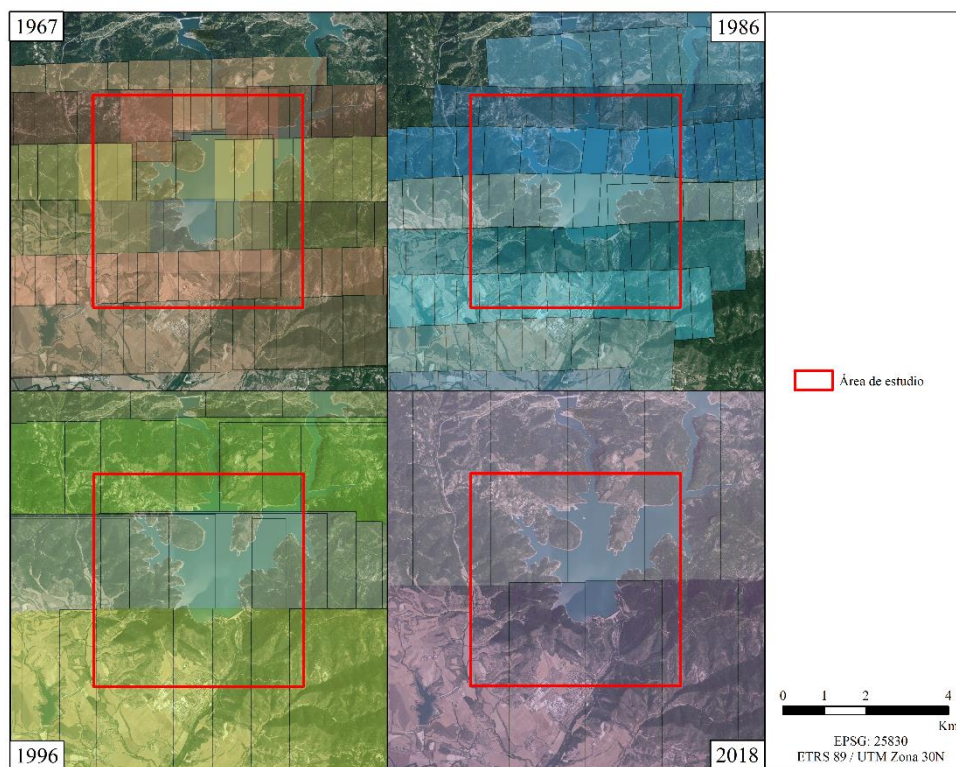


Figura 11.- *Gráficos de vuelos fotogramétricos empleados.*

A continuación, en la Tabla 2 se presentan las principales características de estos vuelos.

Tabla 2.- *Características principales de los vuelos fotogramétricos empleados en el trabajo.*

Año de vuelo	GSD (m)	Focal (mm)	Altura de vuelo m.s.n.m.	Solape longitudinal medio	Solape transversal medio
1967	0,1	152,67	± 1650	80%	20%
1986	0,105	153,26	± 1800	75%	30%
1996	0,33	152,92	± 3700	80%	50%
2018	0,33	92,00	± 7800	60%	30%

3.2.2.- Vuelo LiDAR

Los datos LiDAR, **Tabla 3**, se descargaron por cuadrículas de la Cartoteca y Fototeca de Navarra como nubes de puntos ya procesadas del vuelo de 2017 (Tabla 2) en formato .LAZ.

Tabla 3.- Detalles del vuelo LiDAR.

Material / Año de vuelo	Proyecto	Densidad de puntos	Nº cuadrículas empleadas
2017	Vuelo LiDAR 2017	14 m ²	36

En la **Figura 12** se presentan las cuadrículas de datos empleadas correspondientes con el área de estudio.

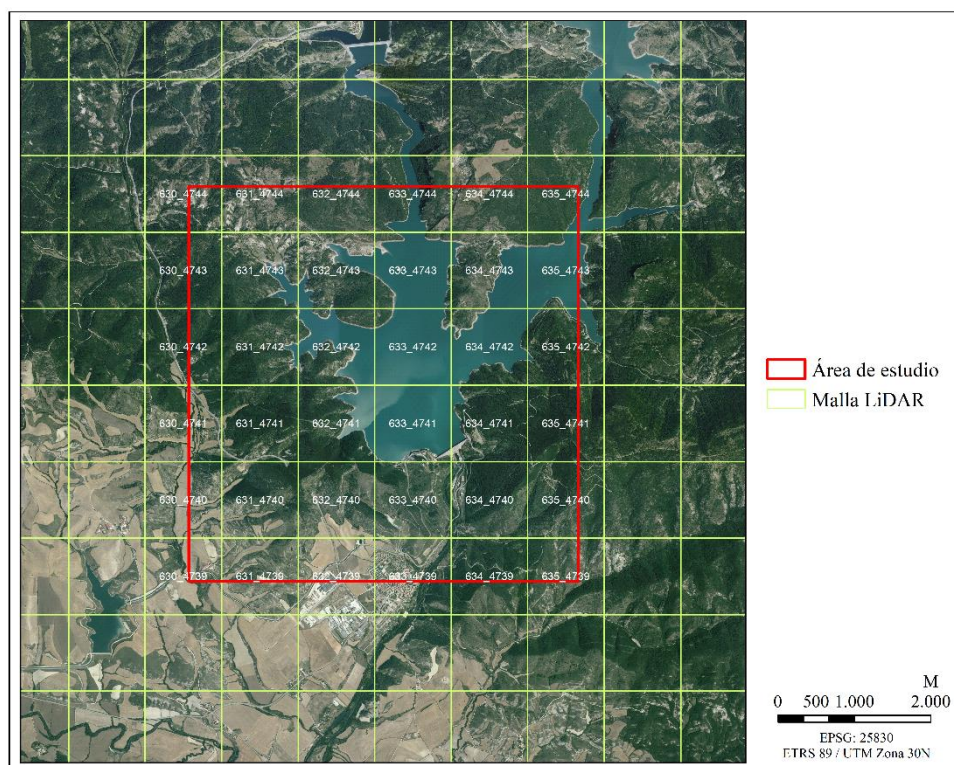


Figura 12.- Gráfico cuadrículas datos LiDAR empleados. Fuente: (SITNA - Gobierno de Navarra, 2021).

3.3.- Metodología

La restitución fotogramétrica se basa en la reconstrucción de los haces de rayos de las cámaras de los vuelos fotogramétricos y su posición respecto a la superficie en el momento del vuelo. Dado que de los vuelos fotogramétricos históricos no se dispone de certificados de calibración, se han trabajado como si fuesen imágenes digitales con las que los softwares de restitución fotogramétrica empleados, utilizan algoritmos de ajuste que estiman la geometría 3D de la escena, posición de las cámaras, orientación, etc. (Dietrich, 2014; Smith et al., 2015).

En este apartado, se exponen los diferentes procesos llevados a cabo para la obtención de los modelos derivados objetivo del trabajo a partir de la técnica de *Structure from Motion* la cual posibilita transformar la proyección cónica de las imágenes en una proyección ortogonal con referencia geográfica.

3.3.1.- Softwares empleados

Para el desarrollo del presente trabajo, se han empleado diferentes softwares en función de las características de los datos o las imágenes a procesar y de los resultados a obtener. En la **Tabla 4** se muestran los diferentes programas y los principales hitos para los que han sido empleados.

Tabla 4.- *Softwares empleados para el procesado de imágenes y datos.*

Software	Hitos empleados
Adobe Phtooshop CS4 11.0	· Recorte de marcos de los fotogramas.
Agisoft Metashape Professional 1.5.5	· Orientación relativa de imágenes. · Búsqueda de puntos homólogos. · Georreferenciación de fotogramas. · Aerotriangulación de vuelos históricos. · Generación de modelos digitales de elevación.
Arcgis Phyton (Command line) GDAL libraries	· Conversión .tif 16 a 8 bits.
ArcMap 10.4.1	· Estilo y maquetación final de mapas.
Geobide Desktop 4.0	· Generación huellas de vuelos. · Transformación de sistemas de coordenadas.
Global Mapper v20.1	· Tratamiento de datos LiDAR. · Generación de modelos digitales de elevación. · Generación de modelos de diferencias temporales.
INPHO 5.3.0	· Procesado imágenes vuelo 2018. · Aerotriangulación Match-AT. · Generación DEM Match-T.
SNAP 8.0 (SeNtinel Applications Platform)	· Extracción de valores de píxel para la realización de gráficos y cálculo de estadísticas. · Extracción de valores medios y desviaciones de los valores totales de los modelos.

3.3.2.- Proceso fotogramétrico

En este apartado, se desarrolla la metodología para desarrollo del proceso fotogramétrico llevado a cabo resumido en la **Figura 13**.

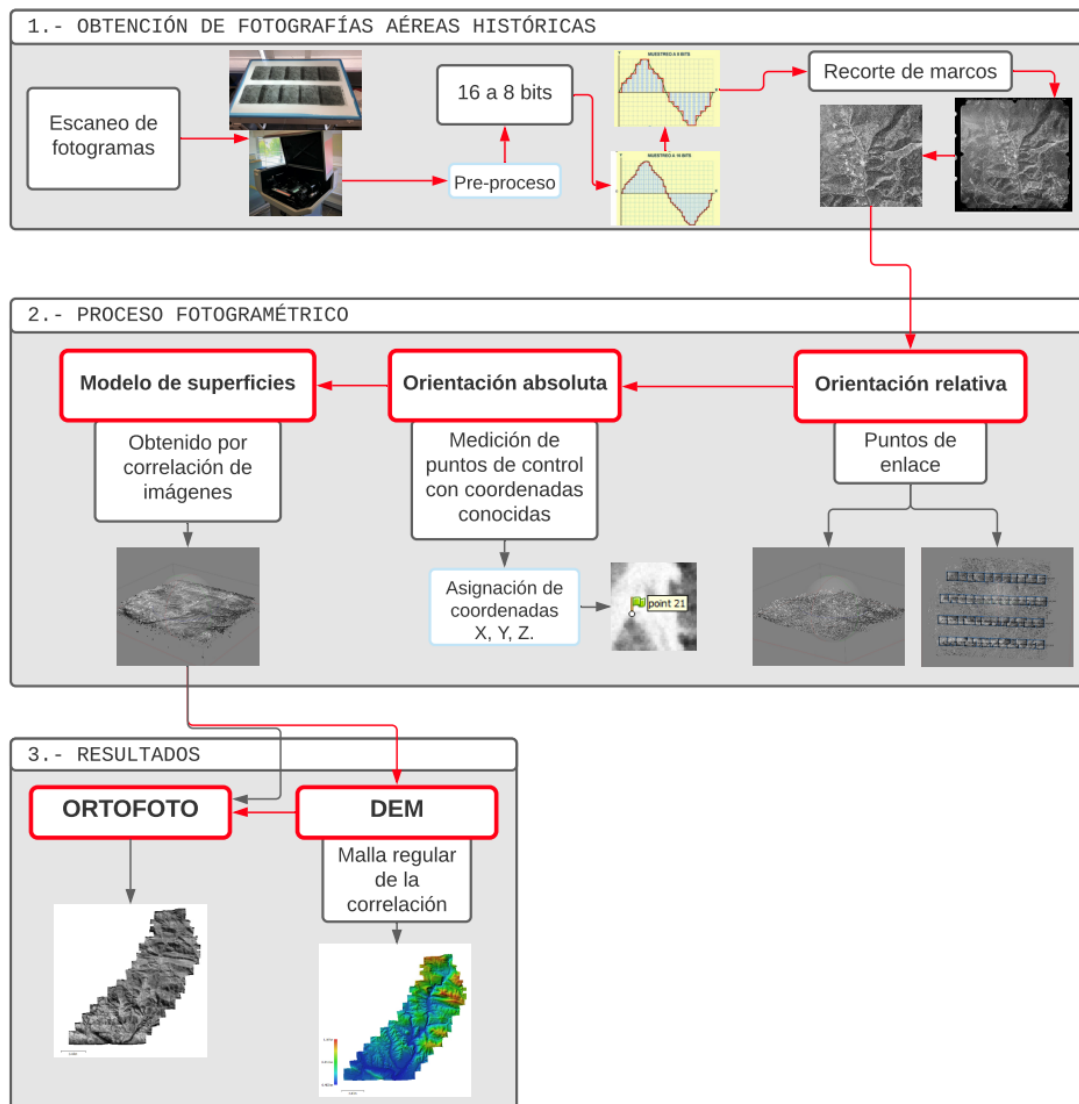


Figura 13.- Flujo de proceso.

Siguiendo el flujo representado en la **Figura 13**, el procesado de un vuelo histórico se inicia con el escaneo de los fotogramas. Estos fotogramas escaneados, son almacenados en formato TIFF a 16 bits, resolución que podría haber mejorado la precisión y calidad de los resultados, pero hubiera supuesto un tiempo computacional demasiado elevado. De este modo, el procesado digital comienza con la transformación de las imágenes de 16 a 8 bits. Esta transformación se ha llevado a cabo a partir de un script de código Python empleando las librerías GDAL para el total de los archivos en formato .tif del directorio en el que se ejecuta.

```
for %i in (*.tif) do gdal_translate -of GTiff -ot Byte -scale -co TFW=YES %i %~ni_8bit.tif
```

Una vez que disponemos de las imágenes en formato .tif en 8 bits, recortamos los marcos que contienen la información de los fotogramas y las marcas fiduciales con la finalidad de que, en las

fases de proceso posteriores y búsqueda de puntos homólogos entre los diferentes fotogramas, no generen puntos homólogos erróneos. Este proceso se ha realizado mediante un proceso de lotes en el software Adobe Photoshop CS4 en el que se han recortado todas las imágenes y exportado manteniendo el formato con las mismas dimensiones para la totalidad del vuelo.

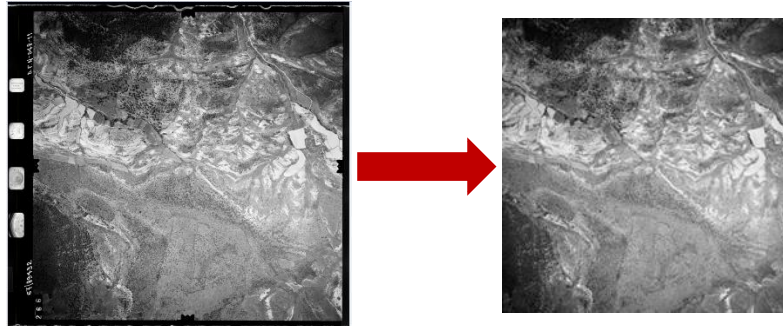


Figura 14.- Recorte de marcos e información de los fotogramas para el vuelo de 1967.

Tras este proceso, las imágenes están preparadas para iniciar el procesado fotogramétrico. Éste, se inicia con la importación de las imágenes aéreas históricas por bloques de trabajo correspondientes a los años de cada vuelo en el software Agisoft Photoscan Professional.

Estos bloques de trabajo, a partir de una serie de algoritmos estiman la geometría 3D del área de trabajo y a partir de las posiciones estimadas de las cámaras generan una primera nube de puntos de baja densidad dentro de un sistema de coordenadas local para el espacio de trabajo (Llena et al., 2018). Este proceso se ha lanzado con los parámetros de precisión de alineación en calidad media dado que, en muchas de las pruebas, al realizar la alineación en calidad alta o extra alta, además del elevado coste computacional del hardware, realizaba una sobre búsqueda de puntos generando relaciones en muchas de las ocasiones entre puntos no coincidentes con el consecuente empeoramiento de los resultados.

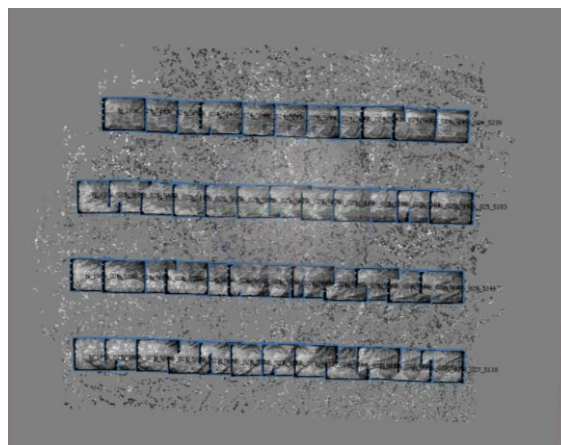


Figura 15.- Proceso de orientación relativa de imágenes para el vuelo de 1996 en Agisoft Metashape Professional

La alineación de los fotogramas en estas series históricas, estará condicionada por el porcentaje de solape entre fotogramas y la calidad y resolución de las imágenes (Micheletti et al., 2015). La localización de puntos comunes por el software entre fotogramas se da cuando aparecen en al menos un par de imágenes. En los casos en los que un punto común aparece en tres o más fotogramas, ya son validados geoméricamente (Llena et al., 2018). Así, a un mayor solape entre fotogramas, el software localizará un mayor número de puntos comunes y consecuentemente, la identificación de los puntos de enlace tendrá una mayor fiabilidad. De este modo, finalizado este primer paso del proceso, obtenemos como resultado una nube de puntos dispersa.

Continuando con el procesado fotogramétrico, el siguiente paso es la orientación absoluta de estos fotogramas. Para ello se toman como referencia y apoyo ortofotografías correctamente georreferenciadas cargadas en el software ArcMap en el que crearemos puntos de control de los que obtendremos mediante la herramienta de información las coordenadas X, Y. Para la extracción de la información de altura, Z, se han utilizado como referencia los modelos digitales de la superficie actual correspondientes con el área de estudio con una precisión de dos metros. Estos datos de coordenadas y de altura se irán asignando y localizando en los diferentes fotogramas del vuelo en proceso a partir de la creación de puntos de control. Para unos mejores resultados con bajas métricas de error, la distribución de estos GCPs (*Ground Control Points*) debe seguir un patrón perimetral sobre una amplia distribución con una densidad constante y deben ser localizados en el mayor número de fotogramas posibles (Hughes et al., 2006; Leys & Werritty, 1999).

La localización de estos puntos de control para el área de estudio se ha centrado en la búsqueda y asignación de puntos identificables como cercados, lindes entre parcelas, cruces de caminos, señalizaciones o bajas edificaciones.

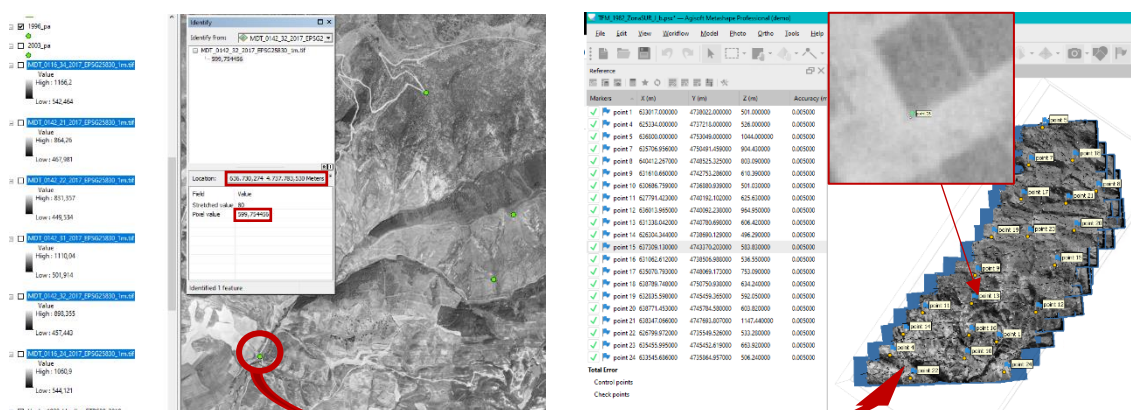


Figura 16.- Asignación de GCPs (*Ground Control Points*) para el vuelo de 1986. Ejemplo punto de detalle.

Al igual que las ortofotos y modelos digitales de referencia, las coordenadas asignadas tienen el sistema de referencia ETRS 1989 zona 30 norte.

Una vez asignados los puntos de control, todos los fotogramas disponen de información geográfica estimada a partir de la asignada por los GCPs con errores que oscilan en función de los vuelos presentados en la **Tabla 5**. Estos valores se encuentran dentro de la media de los errores en este tipo de vuelos históricos (Arnaud et al., 2015). En este paso, las imágenes han pasado de una posición y escala de píxeles de imagen a un sistema de coordenadas reales (Llena et al., 2018).

Tabla 5.- Número de GCPs obtenidos para cada vuelo y errores medios de puntos de control.

Año de vuelo	Número de puntos	Error medio (m)
1967	21	2,27
1986	21	2,75
1996	21	4,37

Al tratarse de vuelos históricos y no disponer de parámetros de calibración de la cámara, el software permite la calibración automática mediante un paso de optimización de las cámaras para

minimizar y eliminar las distorsiones ocasionadas por las características de la lente ajustando el error de georreferenciación estimando los diferentes parámetros.

Finalizada esta primera parte del proceso ya disponemos de una nube de puntos de enlace con referencia geográfica a partir de la cual, por correlación de imágenes se genera el modelo de elevación. En este proyecto, ha sido obtenida con unos parámetros de calidad alta y un filtrado moderado de puntos de profundidad tardando una media de 6 horas en el procesado del área de estudio para cada año de trabajo. Para la obtención de estos resultados, se lanzaron pruebas en calidad extra alta y, a pesar lanzarse en equipos con buenas características de hardware, los errores derivados de la saturación de memoria RAM de procesado, forzaron a tener que generar los procesos en calidad alta.

Dentro de los diferentes tipos de algoritmos existentes para la generación de nubes de puntos densas, el software empleado aumenta la densidad de la nube de puntos dispersa usando una combinación de métodos basados en el cálculo del mapa de profundidad por pares y un método basado en un enfoque de múltiples vistas (Llena et al., 2018; Seitz et al., 2006).

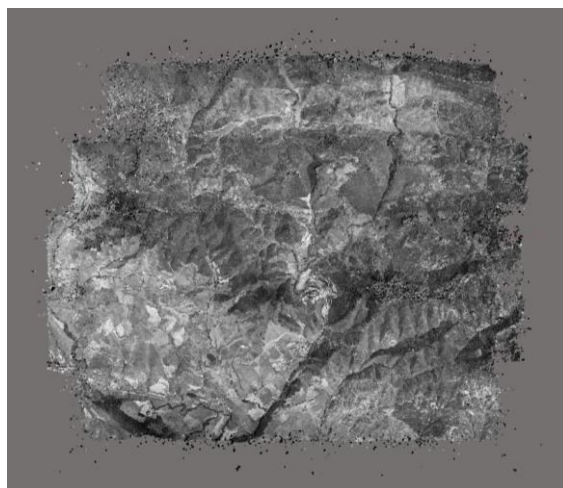


Figura 17.- Nube de puntos densa para el vuelo de 1996.

Una vez disponemos del producto de la nube de puntos densa, podemos obtener una ortofoto definitiva. Mediante el proceso de ortorectificación a partir de la información contenida en la nube de puntos densa con información de referencia geográfica. Obtenemos una ortofotografía completa con correcciones geográficas y geométricas y sin distorsiones en las zonas de bordes entre fotogramas aplicando correcciones de color mediante la homogeneización de los histogramas.

Los MDEs se han obtenido con un tamaño de píxel de dos metros para todos los vuelos empleados. Por su parte, las ortofotografías se generaron con el máximo tamaño de píxel posible. Estos tamaños se presentan en el apartado de resultados.

3.3.3.- Obtención de productos derivados de los MDS, posprocesado

El mismo software en el que se ha realizado la restitución de los vuelos fotogramétricos, Agisoft Metashape, nos permite generar un MDE a partir de la nube de puntos densa en el que se puede determinar el sistema de coordenadas, en este caso geográficas y la resolución y tamaño de píxel del modelo a obtener.

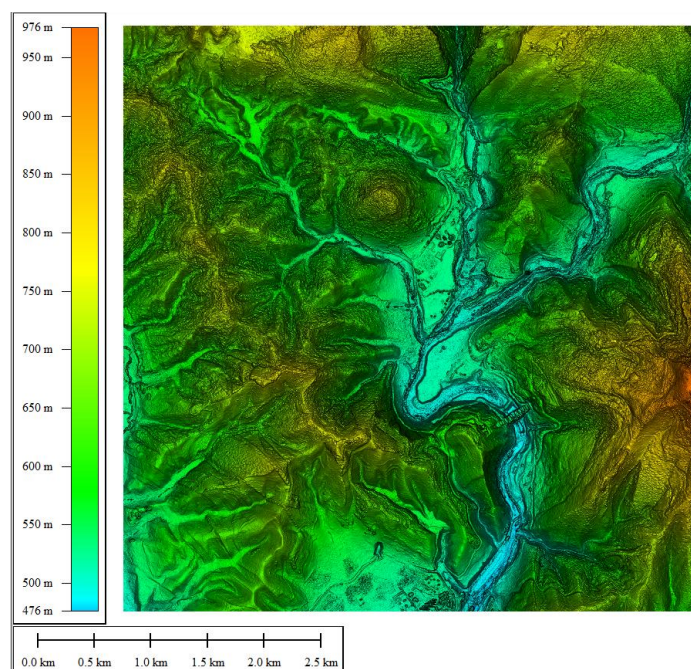


Figura 18.- Modelo Digital de Elevación para el año 1996 visualizado en el software Global Mapper.

Una vez generados los modelos digitales de elevación para los diferentes años de estudio de los que se dispone de imágenes, se obtienen los productos de pendiente y orientación.

3.3.3.1.- Mapa de pendiente

Un mapa de pendiente indica la inclinación de la superficie con respecto a la horizontal para cada píxel. Derivado de un modelo en formato ráster, la información de pendiente la obtendremos para cada píxel. De este modo, la resolución y precisión de estos mapas dependerán directamente del tamaño de píxel de los modelos digitales de elevación de los que derivan estos mapas, en el desarrollo de este trabajo, dos metros. El mapa ráster de salida con información de la pendiente para cada píxel, se calcula como el cambio de elevación en grados o porcentaje sobre cada celda en relación a sus ocho celdas vecinas. En cuanto a los valores del mapa resultantes, cuanto menores sean más plana es la superficie y, por lo tanto, cuanto mayores sean, las pendientes serán más elevadas (Cone, 1998; ESRI, 2021b). En la **Figura 19** se muestra la fórmula de tasa de cambio de dirección en X e Y para el cálculo de la pendiente de una celda en una ventana de 3x3.

a	b	c
d	e	f
g	h	i

$$[dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / (8 * x_cellsize)$$

$$[dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / (8 * y_cellsize)$$

Figura 19.- Ventana de escaneo de superficie (ESRI, 2021b).

La obtención de estos productos ráster con información de pendiente se ha realizado mediante la herramienta Slope en ArcMap (3D Analyst Tools → Raster Surface → Slope).

3.3.3.2.- Mapa de orientación

En estos mapas, el valor de cada celda derivado de los píxeles del modelo digital de elevación indica la tasa de cambio máxima desde cada celda hacia sus vecinas, es decir, la dirección a la que apunta la pendiente de la celda medida en el sentido de las agujas del reloj de 0 al norte al 359. Las zonas planas, no presentan dirección y se les asigna valor -1 (ESRI, 2021a), (**Figura 20**).

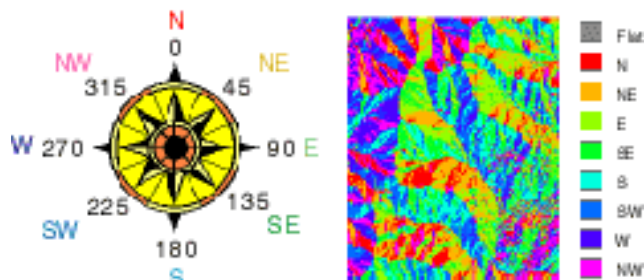


Figura 20.- Leyenda aclaratoria mapa de orientación (ESRI).

Estos mapas de orientación se han obtenido a partir de los modelos digitales de elevación generados mediante la herramienta *Aspect* de *ArcMap* (*3D Analyst Tools* → *Raster Surface* → *Aspect*).

Una vez obtenidos los modelos de elevación y los diferentes productos derivados de estos, para la extracción de información numérica de cada píxel y su representación gráfica se ha empleado el software SNAP. Dado que los valores correspondientes al área inundada por el embalse nos arrojarían valores erróneos, por las diferencias entre los valores previos a la construcción del embalse y los arrojados por la superficie de la lámina de agua, se digitalizó una máscara vectorial para la obtención de valores que correspondieran únicamente con zonas no coincidentes con la lámina a partir de los softwares *ArcMap* y *GlobalMapper* para ser importadas en SNAP a partir de la herramienta *MaskManager*. Esta máscara nos limita así, los valores ajenos a los píxeles cubiertos por la lámina de agua en el estado de embalsado para las fechas de obtención de datos de los vuelos LiDAR (22 y 23 de septiembre de 2017) como puede verse en la siguiente **Figura 21**.

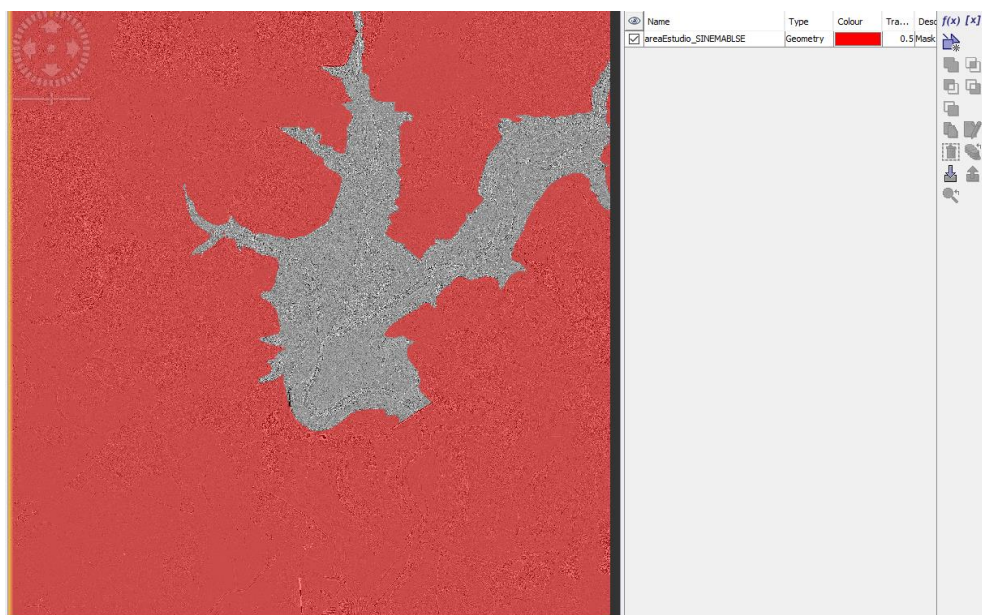


Figura 21.- SNAP Mask Manager para zonas no cubiertas por la lámina de agua a 548,19 m.s.n.m..

3.3.4.- Comparativas temporales de productos

Dado que no se disponen de datos altimétricos medidos en campo del área de estudio, el modelo de superficie derivado de datos del vuelo LiDAR de Navarra del año 2017 con una densidad de 14 puntos por metro cuadrado ha sido tomado como referencia y verdad de las elevaciones. Este MDS empleado con una resolución de 2 m por píxel, está disponible en la Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra (SITNA - Gobierno de Navarra, 2021).

A partir de este modelo, realizamos las comparativas multitemporales en el software Global Mapper mediante la herramienta *Combine/Compare Terrain Layers*. Esta herramienta genera una nueva capa de elevación, en este caso, de diferencia entre la primera y la segunda capa a partir de la selección de la operación *Substraction (Difference) – Signed* (Blue Marble Geographics, 2021). Estas comparativas se realizan a partir de los modelos digitales de elevación especificados en la **Tabla 6** obtenidos siguiendo la metodología descrita anteriormente a excepción del vuelo de 2018 procesado mediante el software INPHO con la aerotriangulación ya realizada para su publicación..

Tabla 6.- Modelos digitales de elevación

Año	Origen - generación producto
1967	Fotogrametría SfM
1986	Fotogrametría SfM
1996	Fotogrametría SfM
2017	Vuelo LiDAR 2017
2018	Fotogrametría 2018

Para la obtención de información y cálculo de métricas de error entre los diferentes modelos generados para los distintos años en relación al modelo tomado como verdad de las elevaciones correspondiente con los puntos LiDAR del año 2017, a partir de la fotointerpretación de las ortofotos generadas se han digitalizado de forma manual una serie de puntos correspondientes a diferentes superficies cuyos usos del suelo no han presentado cambios importantes en toda la serie temporal de estudio. En la **Tabla 7**, se especifican las zonas seleccionadas y el número de puntos de información tomados para cada una de ellas.

Tabla 7.- Puntos de información generados.

Tipo de zona	Características de las zonas	Número de puntos
Vegetación arbórea	Zonas con vegetación arbórea durante toda la serie temporal de estudio.	40
Suelo	Suelos desnudos y campos de cultivo.	40

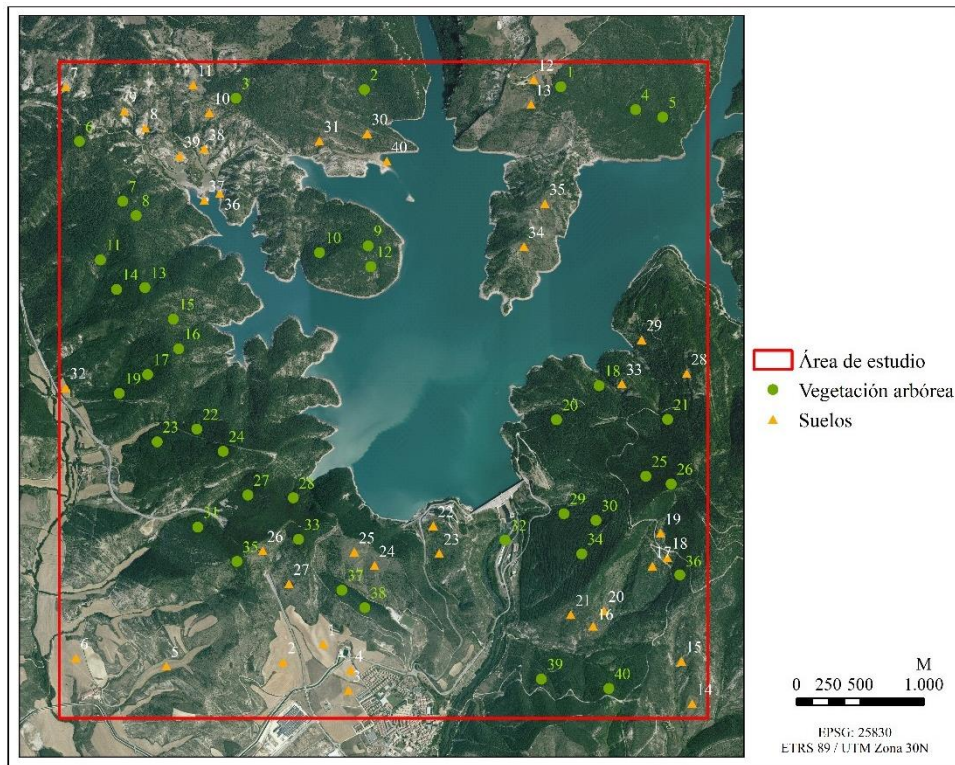


Figura 22.- Puntos de extracción de información digitalizados.

Para estos puntos vectoriales digitalizados, mediante el software ArcMap se ha obtenido las diferencias de alturas entre modelos y con estos datos se han calculado los errores cuadráticos medios de la altura para los diferentes tipos de superficies.

Además de estos estadísticos para estos puntos de referencia, también se han realizado comparativos temporales a partir de los productos de pendiente y orientación con la finalidad de identificar las diferencias entre los modelos de cada año de los productos derivados de vuelos fotogramétricos en comparación al producto de referencia, el modelo digital de superficies LiDAR de 2017. Estos productos, se han centrado en las zonas no inundadas por las aguas del embalse dado que no se dispone de modelos de la superficie precisos de estas zonas cubiertas por la lámina de agua.

No obstante, para el análisis de la precisión de los modelos generados en la zona inundada del embalse, el presente trabajo se ha apoyado en el estudio realizado en el año 2010 por la Confederación Hidrográfica del Ebro junto a la empresa AQUASON (Schneider & Vidal, 2011). En este, emplearon un ecosonda digital científica con un haz vertical que emitía varios pulsos por segundo al agua para la obtención de datos batimétricos de fondo y un haz horizontal para la obtención de estimaciones de abundancia de peces con métodos hidroacústicos, objeto de este estudio (Schneider & Vidal, 2011).

En la **Figura 23**, se muestra un gráfico del haz empleado para los datos de levantamiento topográfico y la embarcación empleada para portar la sonda de captura de datos.



Figura 23.- Sonda de medición batimétrica (Schneider & Vidal, 2011).

Los datos obtenidos en el estudio, han sido facilitados por la Confederación Hidrográfica del Ebro para la elaboración del presente Trabajo de Fin de Máster como un fichero de texto con información por puntos de coordenadas X e Y así como profundidad (distancia desde la superficie de la lámina de agua al fondo). El posicionamiento de estos datos, se llevó a cabo con un sistema de posicionamiento satélite DGPS de precisión submétrica conectado a la ecosonda modelo LEICA MX Marine MX421B-10 (Schneider & Vidal, 2011).

Estos puntos (**Figura 24**), se proporcionaron en el sistema de coordenadas ED50. A partir de estos puntos, se generó un Shapefile al cual se le aplicó la conversión de sistema de coordenadas mediante el software *GeoConverter* que emplea el modelo de transformación de coordenadas del *Instituto Geográfico Nacional*.

Los datos proporcionados, fueron obtenidos los días 22 y 23 de septiembre de 2010. En estas fechas, la cota de llenado del embalse de media de los dos días de levantamiento fue de 548,19 m.s.n.m. (548,32 y 548,06 m.s.n.m.) (*SAIH Ebro. Datos a La Carta.*, 2021). Con la información de esta cota de llenado del embalse desde la que se obtuvieron los datos de profundidad, se calcula una diferencia entre la cota de la lámina de agua y la profundidad obteniendo así la información de cota de cada punto en el fondo.

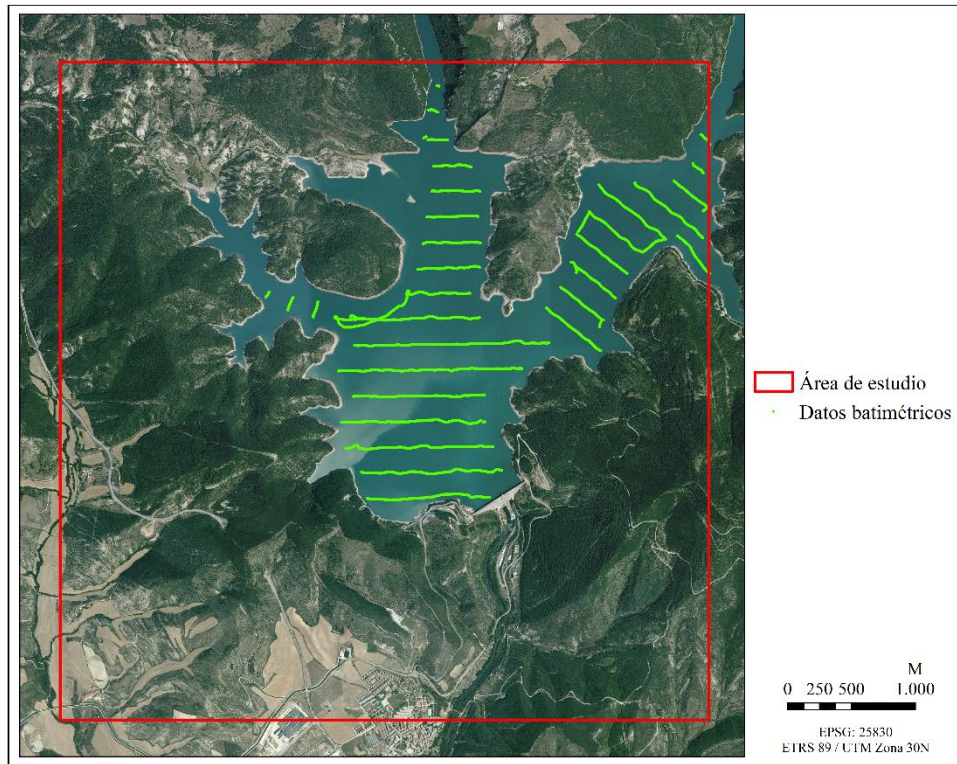


Figura 24.- Puntos de información batimétrica año 2010 en el embalse de Itoiz.

3.3.5.- Comparativas datos LiDAR batimétricos ramales embalse

Como un análisis complementario, se evaluó la posible utilidad de los datos LiDAR para la obtención de batimetrías en zonas cubiertas por la lámina de agua del embalse de Itoiz. Para ello se utilizaron la totalidad de puntos LiDAR a excepción de los clasificados como ruido sobre los modelos de elevación generados a partir de fotogramas históricos. Sobre estos datos, se realizaron perfiles topográficos para analizar la relación entre los puntos obtenidos de retornos del fondo del embalse y el perfil de las elevaciones de los diferentes modelos de elevación generados.

Para zonificar con certeza estas áreas inundadas en el momento de la toma de datos LiDAR, se cargó un Shapefile generado a partir del llenado del modelo de elevación derivado de fotogrametría en 1986 a la cota obtenida para la fecha del 9 de septiembre de 2017 dado que las pasadas del vuelo que abarcan la zona de estudio se realizaron los días 8 y 10. Esta cota obtenida de SAIH Ebro era de 505,50 m.s.n.m (**Figura 25**).

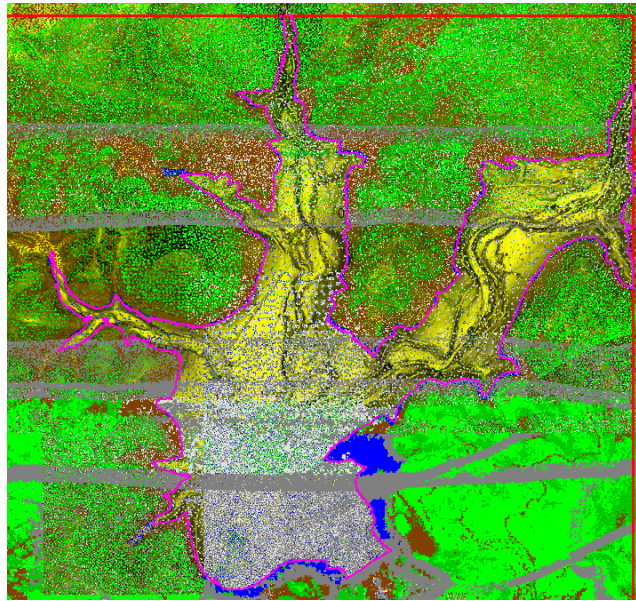


Figura 25.- Línea de contorno de cota del embalse de Itoiz sobre puntos LiDAR. Fecha de toma de datos: 9 de septiembre de 2017, 505.50 m.s.n.m..

En la siguiente **Figura 26**, se presentan digitalizados los cortes de ejemplo ubicados en uno de los ramales del embalse para las comparativas realizadas entre los datos del LiDAR topobatimétrico y los modelos de elevación generados a partir de los vuelos históricos.

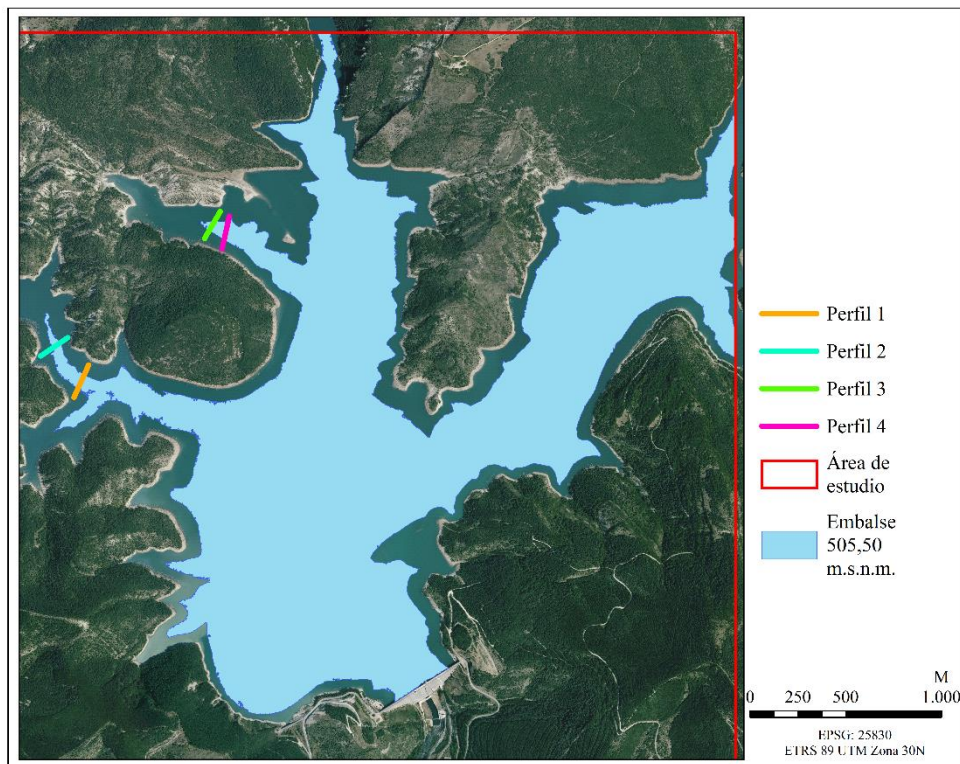


Figura 26.- Cortes de perfil para obtención de datos batimétricos del vuelo LiDAR.

4.- Resultados

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos para el área de estudio del trabajo a partir del desarrollo metodológico presentado en los anteriores apartados para los diferentes años de aplicación y resultados obtenidos.

4.1.- Modelos Digitales de Elevación obtenidos

Centrados en el más antiguo de los vuelos empleados, el vuelo de baja altura de 1967, los resultados de los modelos obtenidos muestran en comparación a otros modelos, distorsiones en algunas zonas como es el caso del área noroccidental y norte a orillas del embalse donde nos encontramos con diferencias entre el modelo obtenido y la verdad del terreno cercanas a los 40 metros. Estas distorsiones se dan en zonas con una masa forestal densa en las cuales, a pesar de una elevada densidad de puntos de control con información de cotas, la aplicación de la técnica de SfM no nos ha devuelto una buena precisión en los resultados debido a la dificultad de búsqueda de puntos de enlace entre los diferentes fotogramas consecuencia del detalle y nitidez de los fotogramas de estos vuelos.

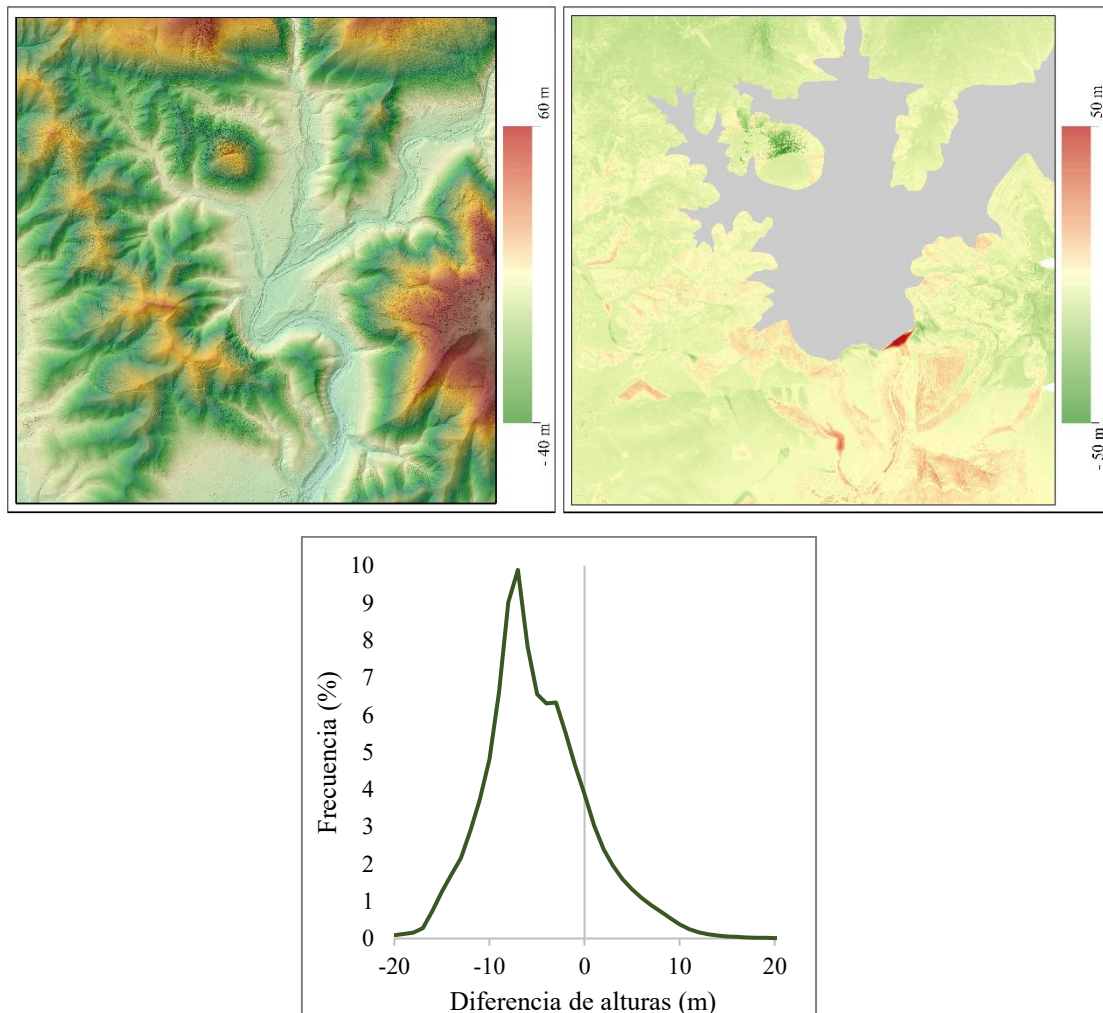


Figura 27.- Año 1967. Sup.-izda.: MDE 1967, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) MDE 1967, abajo: histograma de la diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) - MDE 1967.

Estos resultados del vuelo de 1967, se reflejan en el histograma de la **Figura 27** en el que se representan los valores de altura del área de estudio a excepción del área inundada por el embalse. Se puede apreciar un predominio en rasgos generales, de los valores negativos reflejando unas mayores cotas en el modelo histórico que en el modelo de verdad de superficie con unas diferencias en torno a los 8 metros.

En todos los casos, la diferencia más elevada que revelan estos modelos, se corresponde con la zona de la presa del embalse, con valores de diferencia por encima de los 50 metros en los modelos previos a la construcción del embalse.

A continuación, en la **Figura 28** se presentan los resultados derivados del procesado del vuelo de 1986. En estos, se puede ver como a excepción de zonas en las que se han detectado cambios en el terreno, predominan los valores en torno a los 5 metros positivos de diferencia reflejando mayores cotas en el modelo de superficie (LiDAR 2017) que en el obtenido con la aerotriangulación del vuelo histórico de 1986.

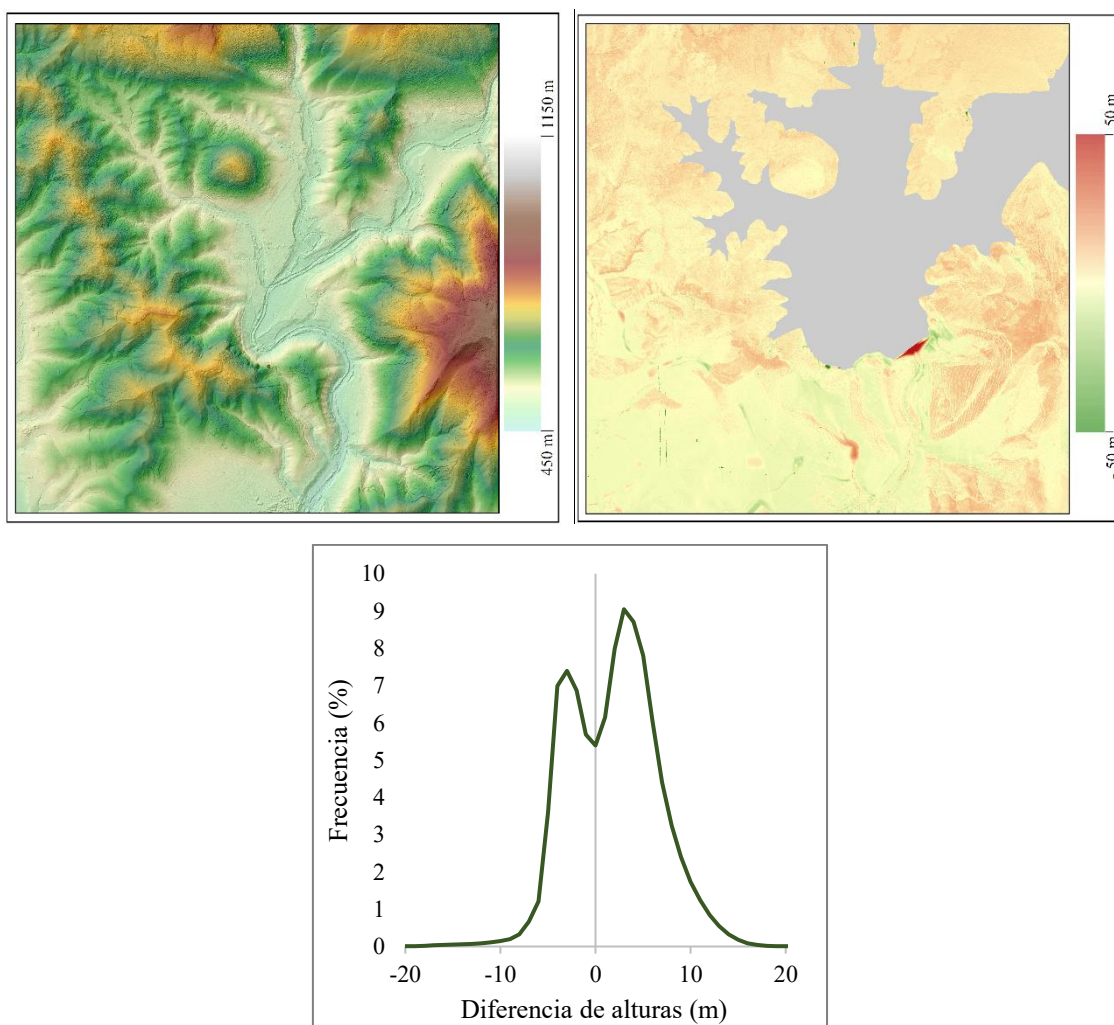


Figura 28.- Año 1986. Sup.-izda.: MDE 1986, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) - MDE 1986, abajo: histograma de la diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) - MDE 1986.

En el modelo derivado del vuelo de 1996 (**Figura 29**) se aprecia una mayor aproximación del modelo obtenido a la verdad de elevación viendo suavizada la representación de colores

reflejando unas diferencias muy cercanas al 0 representadas en un histograma suavizado y una mayor simetría, aunque tendiendo hacia unas diferencias negativas con respecto a la verdad de la elevación reflejando un predominio de alturas más elevadas en el modelo histórico que en LiDAR.

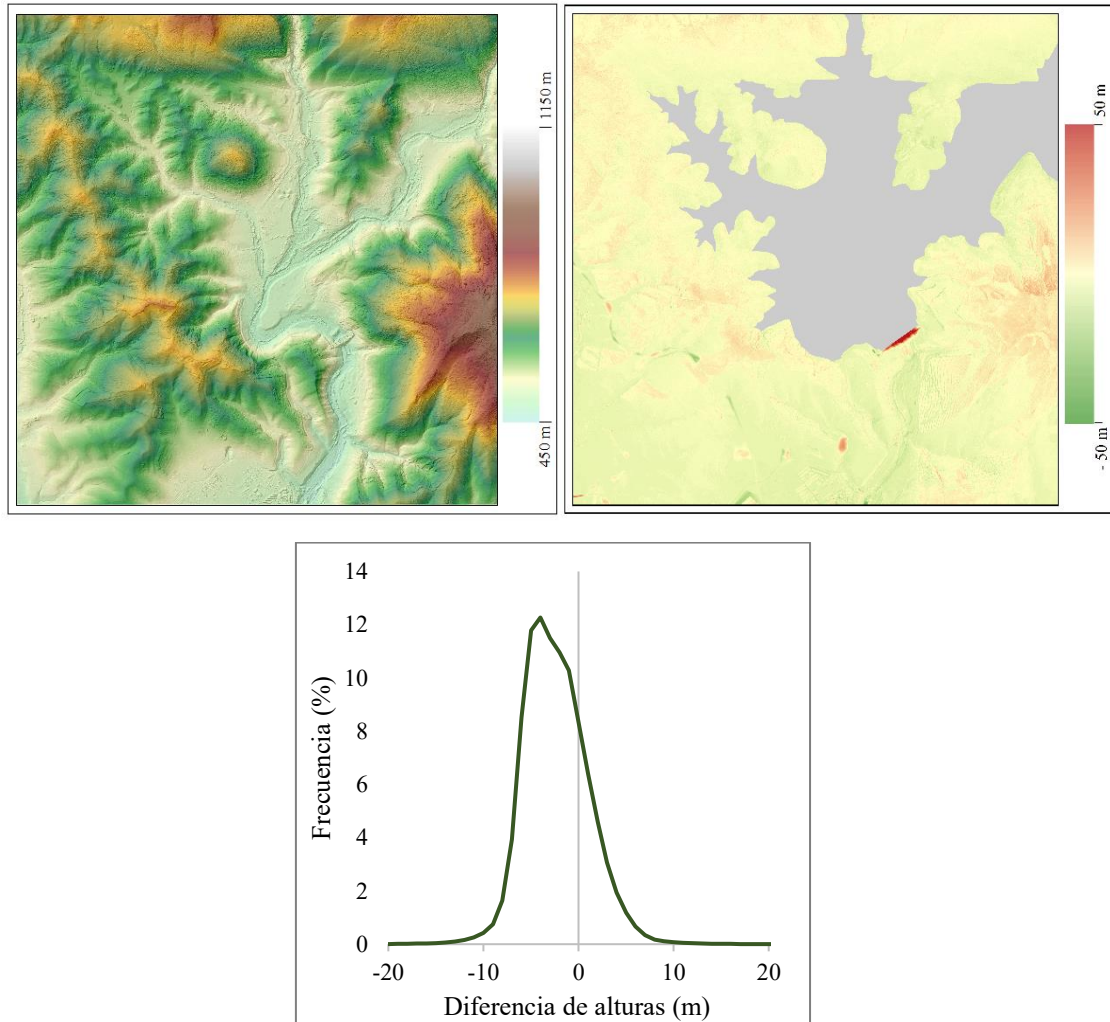


Figura 29.- Año 1996. Sup.-izda.: MDE 1996, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) - MDE 1996, abajo: histograma de la diferencia verdad superficie (LiDAR 2017) - MDE 1996.

Por último, en el análisis de estos modelos, se presenta el derivado del vuelo fotogramétrico digital del año 2018. En este, se puede apreciar una gran cercanía a la verdad de superficie con un histograma con todos los valores muy cercanos al 0. Dado que al igual que en el año 2017 cuando se realizó la toma de los datos LiDAR, la presa ya se encontraba en funcionamiento, no se aprecian diferencias en la zona de la presa. Por ello, para el cálculo de los valores representados en este histograma, no se ha tenido en cuenta la zona cubierta por la lámina de agua.

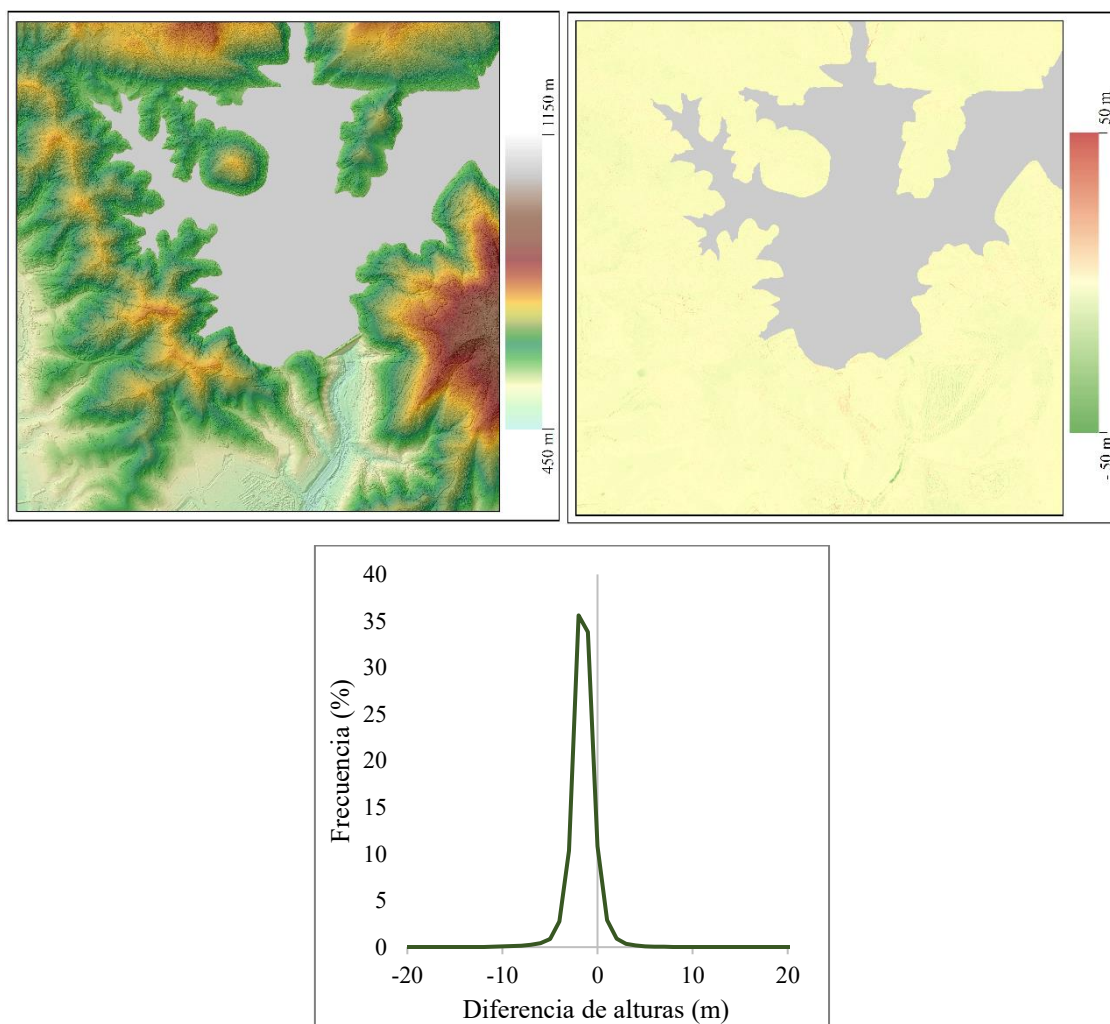


Figura 30.- Año 2018. *Sup.-izda.: MDE 2018, sup.-dcha.: diferencia MDE-verdad superficie, abajo: histograma de diferencia de alturas 2018-verdad superficie.*

Con esta serie multitemporal de modelos de elevación generados, se han podido analizar diferentes áreas en las que se puede cuantificar un cambio en las superficies de la zona. Así, en el área sur del embalse se ha identificado un área en la que, partiendo del modelo de 1967, las elevaciones se han ido suavizando siguiendo los diferentes modelos generados hasta reflejar una igualdad de superficies entre el modelo LiDAR y el fotogramétrico del año 2018 tal y como puede verse delimitado en color rojo en la **Figura 31**. Este cambio, cotejado con el análisis de las ortofotos generadas, se corresponde con un desmonte para la construcción de una infraestructura viaria y una instalación deportiva de gran superficie.

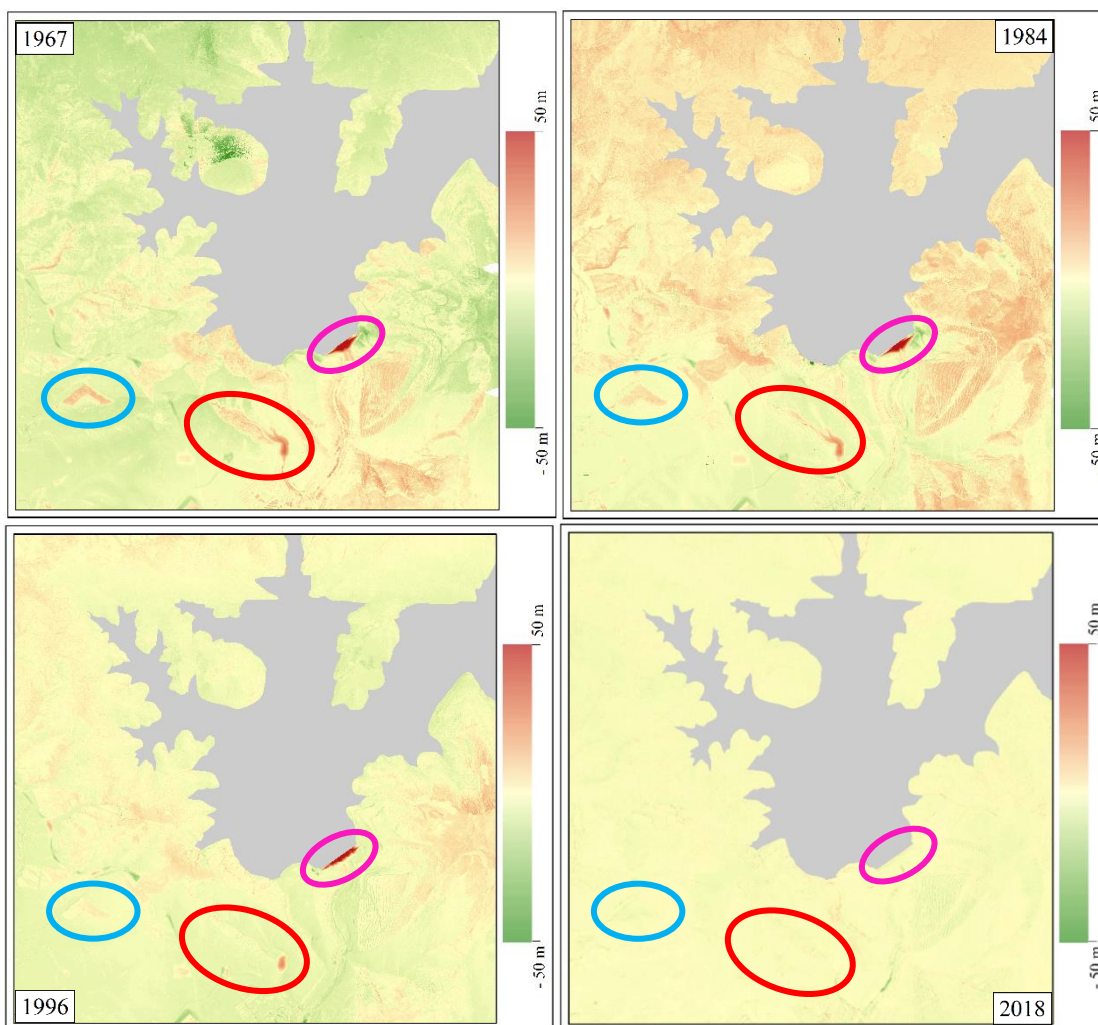


Figura 31.- Evolución geomorfológica (rojo), de vegetación (azul) y de la presa (rosa). Zonas a partir de diferencias con modelo LiDAR. Arriba-izda: 1967, arriba-dcha: 1986, abajo-izda: 1996 y abajo-dcha: 2018.

En esta **Figura 31** se puede apreciar también, la evolución de una masa vegetal arbórea en la zona delimitada por contorno azul. Esta área, en el primer año de estudio, 1967, estaba formada por vegetación herbácea, la cual, mediante el análisis de las ortofotos generadas ha podido comprobarse como ya en 1986 estaba proliferando la vegetación arbórea coincidiendo con las diferencias obtenidas en las comparativas de los modelos digitales de elevaciones presentados. También en color rosa se define el área en el que, entre los modelos de los años 1967 y 1986 se puede apreciar la diferencia con la presa la cual ya en el modelo de 1996 presenta menores diferencias debido a su proceso de construcción. Ya para el modelo del año 2018, aparece representada como zona sin cambio dado que en la comparativa con el 2017, año de toma de datos LiDAR, la presa ya se encontraba en pleno funcionamiento.

A continuación, en la **Figura 32** se representan de forma conjunta las frecuencias de cada valor de cota para los diferentes modelos obtenidos. En éste, se puede apreciar como el modelo más ajustado a la verdad de elevación es el derivado del vuelo fotogramétrico de 2018. En el caso de los vuelos históricos, a mayor antigüedad de estos, menor ajuste al modelo LiDAR tomado como referencia de verdad de las elevaciones.

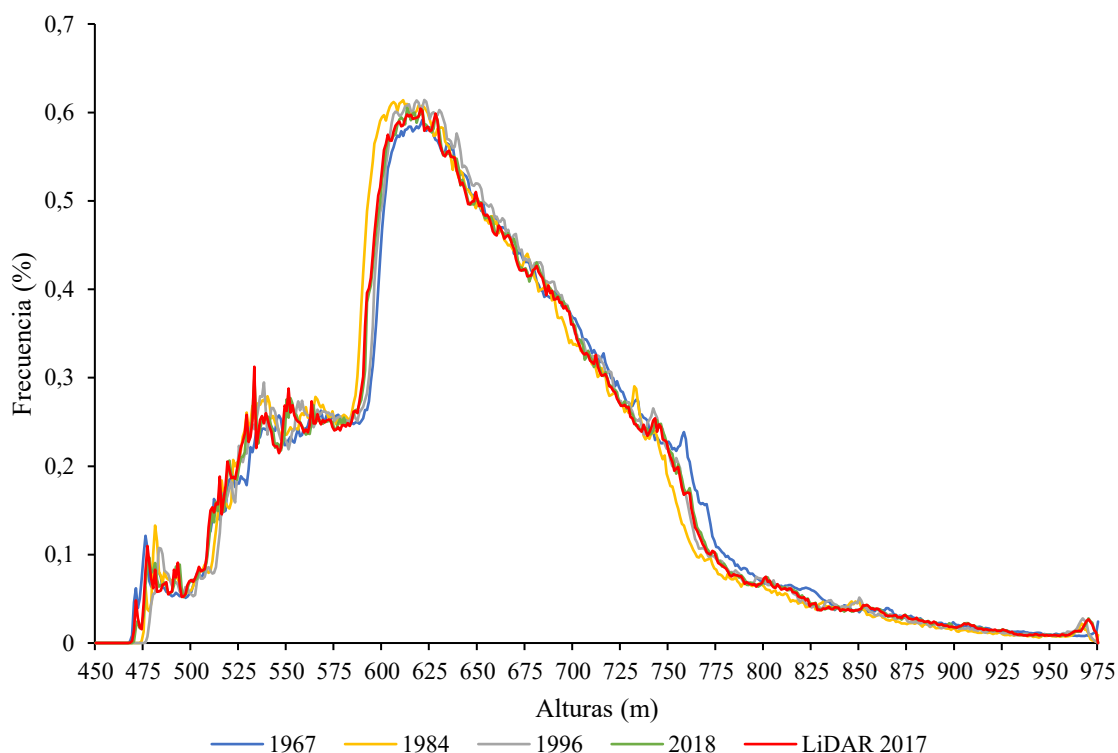


Figura 32.- Histogramas de elevación de los Modelos Digitales de Elevación obtenidos y el tomado como verdad de superficie.

En la **Tabla 8** se muestran los tamaños de píxel de salida para cada modelo de elevación presentados anteriormente. No obstante, todos los modelos generados fueron almacenados para las comparativas multitemporales con un tamaño de píxel de 2 metros.

Tabla 8.- Tamaño de píxel obtenido para los modelos de elevación generados (cm).

1967	1986	1996	2018
21,4	23,2	63,2	200,0

En un análisis comparativo entre los modelos digitales de elevación de los diferentes años de estudio, al igual que en los anteriores resultados presentados, se puede apreciar cómo estas diferencias presentan cambios en toda el área, muchos de estos ocasionados por las características y procesado de estos vuelos. No obstante, se pueden identificar cambios concretos como los presentados anteriormente en las diferencias con el modelo LiDAR de referencia en la **Figura 31**. A continuación, en la **Figura 33** se presentan los resultados de las diferencias de los modelos de elevación entre los años de vuelo empleados en el desarrollo de este trabajo.

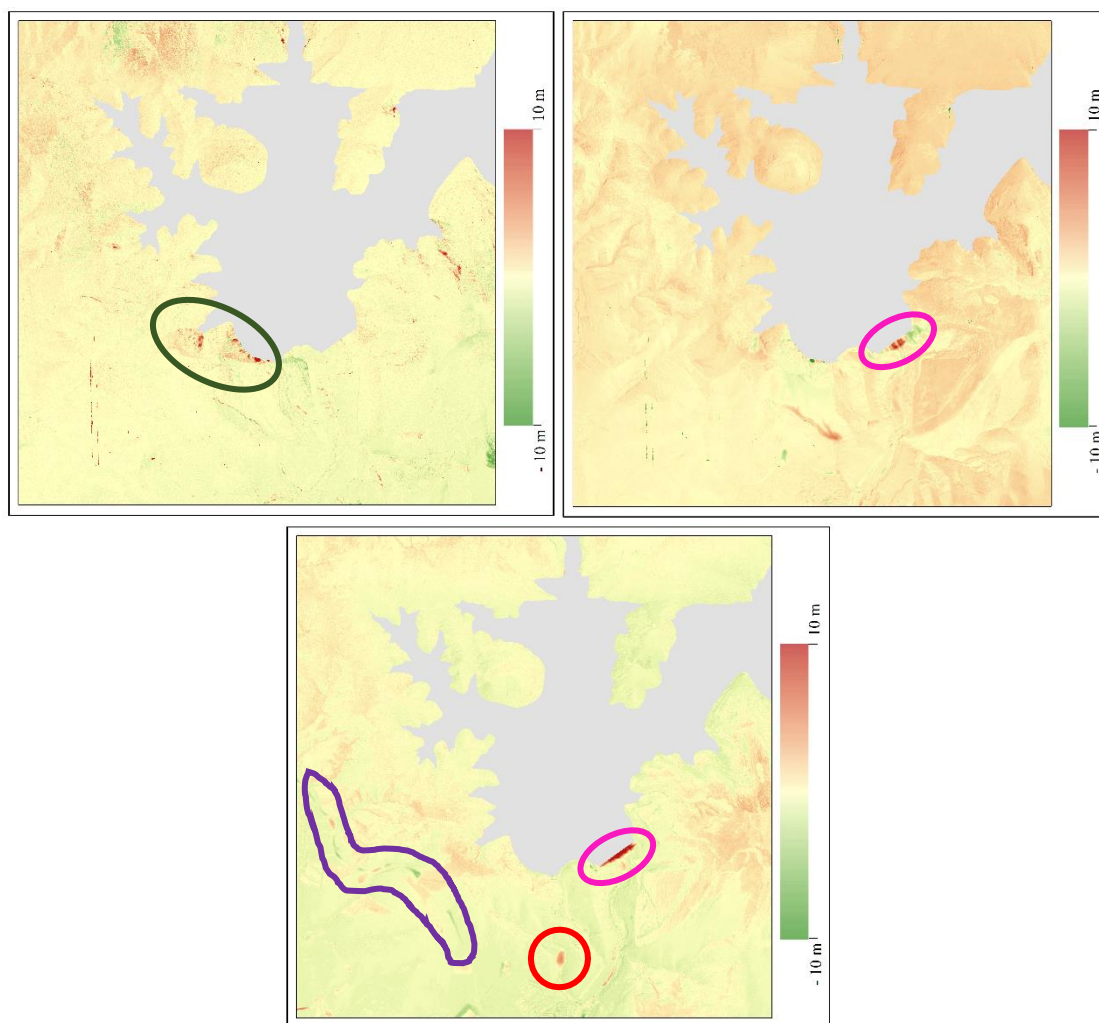


Figura 33.- Arriba-izda: 1986 - 1967, arriba-dcha: 1996 - 1986, abajo: 2018 – 1996.

En primer lugar, en las diferencias entre los modelos de 1986 y 1967, los primeros vuelos empleados, se pueden ver cambios en la vegetación en las orillas noroccidentales del embalse señaladas en color verde.

Ya en las diferencias entre los vuelos de 1996 y 1986 se puede apreciar en la zona de la presa señalizada en color rosa, como la construcción de esta infraestructura empezaba a presentar diferencias en estas comparativas entre modelos de elevación.

Por último, el modelo de diferencias entre 2018 y 1996 es el que mayores diferencias presenta; En primer lugar, en color rosa, se puede apreciar la diferencia de la presa ya en funcionamiento, en color rojo, la construcción de infraestructuras deportivas analizada anteriormente en la **Figura 31** y por último, la construcción de una carretera al oeste del área de estudio delimitada en color morado.

Todos estos cambios analizados entre estos modelos derivados del procesado de estos vuelos, han sido comprobados mediante un análisis fotorinterpretativo de las ortofotografías generadas durante estos procesos.

4.2.- Comparativas con puntos de control

A partir de los datos obtenidos de los diferentes puntos presentados en el proceso metodológico en la **Figura 22**, en este apartado, se presentan los resultados de diferencias de alturas para los distintos puntos digitalizados en zonas con vegetación y sin vegetación en las que a partir del análisis de fotointerpretación no se han apreciado cambios.

4.2.1.- Suelo

En la **Figura 34**, se muestran mediante un gráfico de dispersión, las alturas para los puntos digitalizados en las zonas consideradas suelo en las que aparentemente no ha habido cambios entre los distintos años de estudio. En el **Anexo 1** se presenta la tabla completa con los valores de la totalidad de los puntos extraídos y sus diferencias con el modelo tomado como verdad de superficie. En estas zonas catalogadas como suelo, el modelo de 2018 es el que más se ajusta al modelo de referencia junto al derivado del vuelo histórico de 1996 representando una buena precisión y cercanía a la verdad del terreno al igual que, a excepción de algún punto, el modelo de 1986. Por el contrario, muchos de los puntos extraídos del modelo de 1967 se alejan del modelo de referencia.

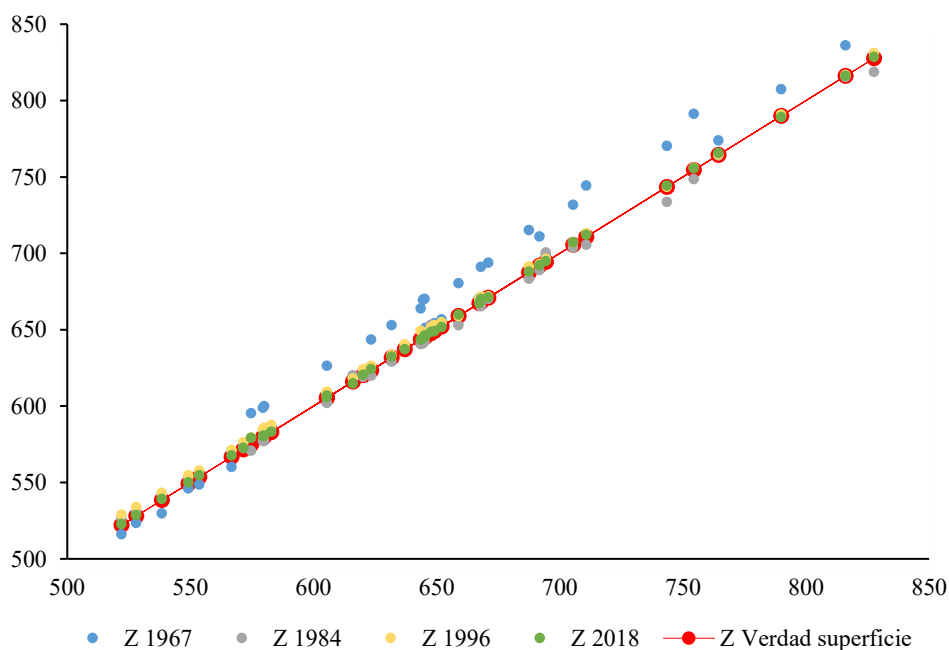


Figura 34.- Diagrama de dispersión de puntos considerados suelo obtenidos de modelos derivados de vuelos fotogramétricos y los derivados del MDS LDAR de 2017.

A partir de estos datos extraídos como referencia de variabilidad entre unos modelos de elevación y otros, en la **Tabla 9** se presentan los errores cuadráticos medios (RMSE) de estas diferencias como error medio para la totalidad del área de estudio teniendo en cuenta los puntos para estas zonas digitalizadas como suelo para cada año de vuelo histórico de estudio.

Tabla 9.- Errores cuadráticos medios para zonas de suelo entre el modelo considerado verdad de superficie y los diferentes años de estudio (m).

1967	1986	1996	2018
11,23	8,01	3,53	1,47

4.2.2.- Vegetación arbórea

A continuación, en la **Figura 35** se representan mediante un gráfico de dispersión las alturas de los puntos digitalizados en las zonas consideradas vegetación en las que aparentemente a partir de un análisis fotointerpretativo no se han apreciado cambios entre los distintos años de estudio para los modelos derivados de vuelos históricos y el modelo digital de elevación derivado del vuelo con sensor LiDAR tomado como verdad. Al igual que en los puntos del terreno en zonas catalogadas como suelo, son los vuelos de 2018 y de 1996 los que mayores precisiones presentan. En contraposición, los derivados de los vuelos de 1986 y 1967, son los menos precisos.

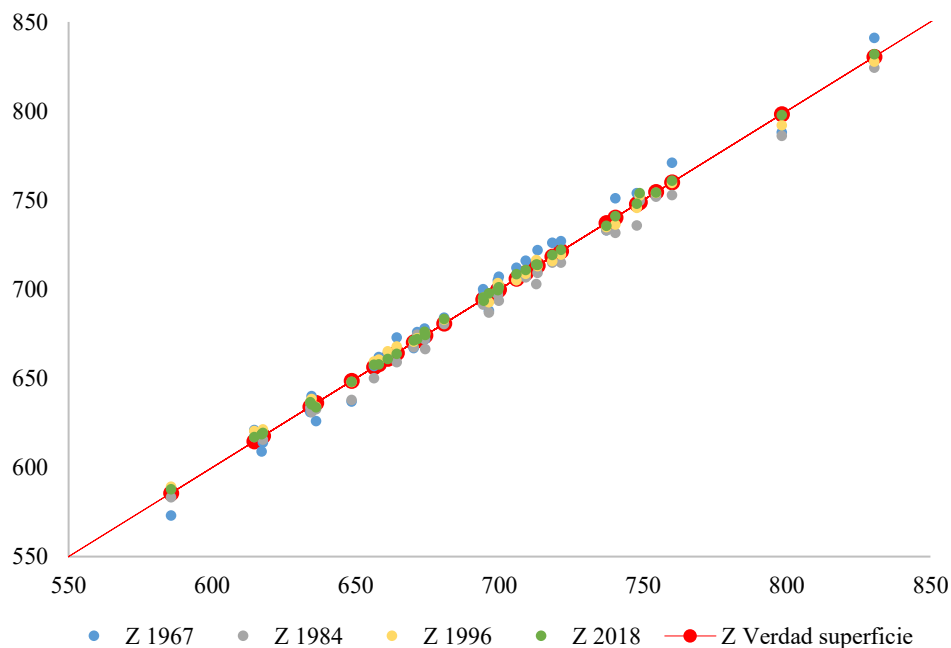


Figura 35.- Diagrama de dispersión de puntos considerados vegetación obtenidos de modelos derivados de vuelos fotogramétricos y los derivados del MDS LDAR de 2017.

A partir de los datos extraídos de estos puntos, en la **Tabla 10**, se muestran los errores cuadráticos medios calculados para la totalidad de estas superficies cubiertas por vegetación arbórea derivada de los controles de los 40 puntos digitalizados.

Tabla 10.- Errores cuadráticos medios para zonas de vegetación arbórea entre el modelo considerado verdad superficie y los diferentes años de estudio (m).

1967	1986	1996	2018
17,63	8,31	3,42	1,54

4.3.- Productos derivados y análisis de resultados

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos derivados de los modelos digitales de elevación generados a partir de los diferentes datos de partida empleados.

4.3.1.- Mapas de pendiente

En estos modelos de pendiente derivados de los vuelos históricos, todos ellos previos a la construcción del embalse, se puede apreciar de forma clara la superficie en la que se localiza el vaso del embalse con un fondo sin pendiente a excepción del cauce natural del río. En el área sur

y suroeste de la zona se puede ver como también en los mapas de pendiente obtenidos para toda la serie de años, predominan las pendientes llanas siendo en estas zonas en las que se muestra igualdad o escaso cambio en los mapas comparativos de pendiente entre los diferentes años y el derivado del modelo LiDAR.

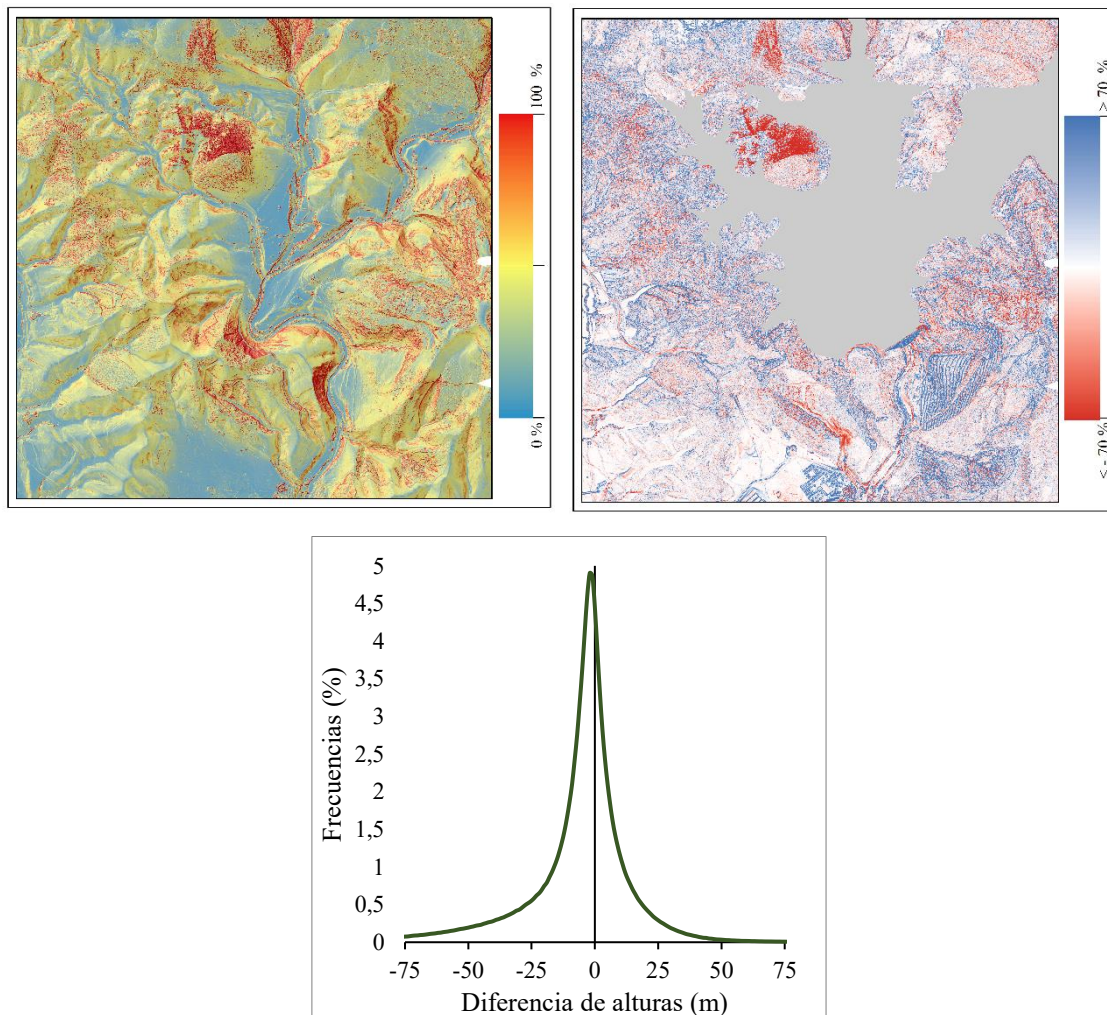


Figura 36.- Productos de pendiente año 1967. Sup.-izda.: Pendiente 1967, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – pendiente 1967, abajo: histograma de verdad de superficie - diferencia de pendiente 1967.

En concreto, para este primer modelo de 1967 presentado en la **Figura 36**, se pueden apreciar zonas con grandes diferencias entre mapas de pendiente. Estas diferencias derivan de las zonas en las que en los modelos de elevación se presentaban errores como consecuencia de las dificultades del software para la búsqueda de puntos homólogos. Como se ha presentado antes para los modelos de elevación, estas áreas se localizan en la mitad norte del área de estudio.

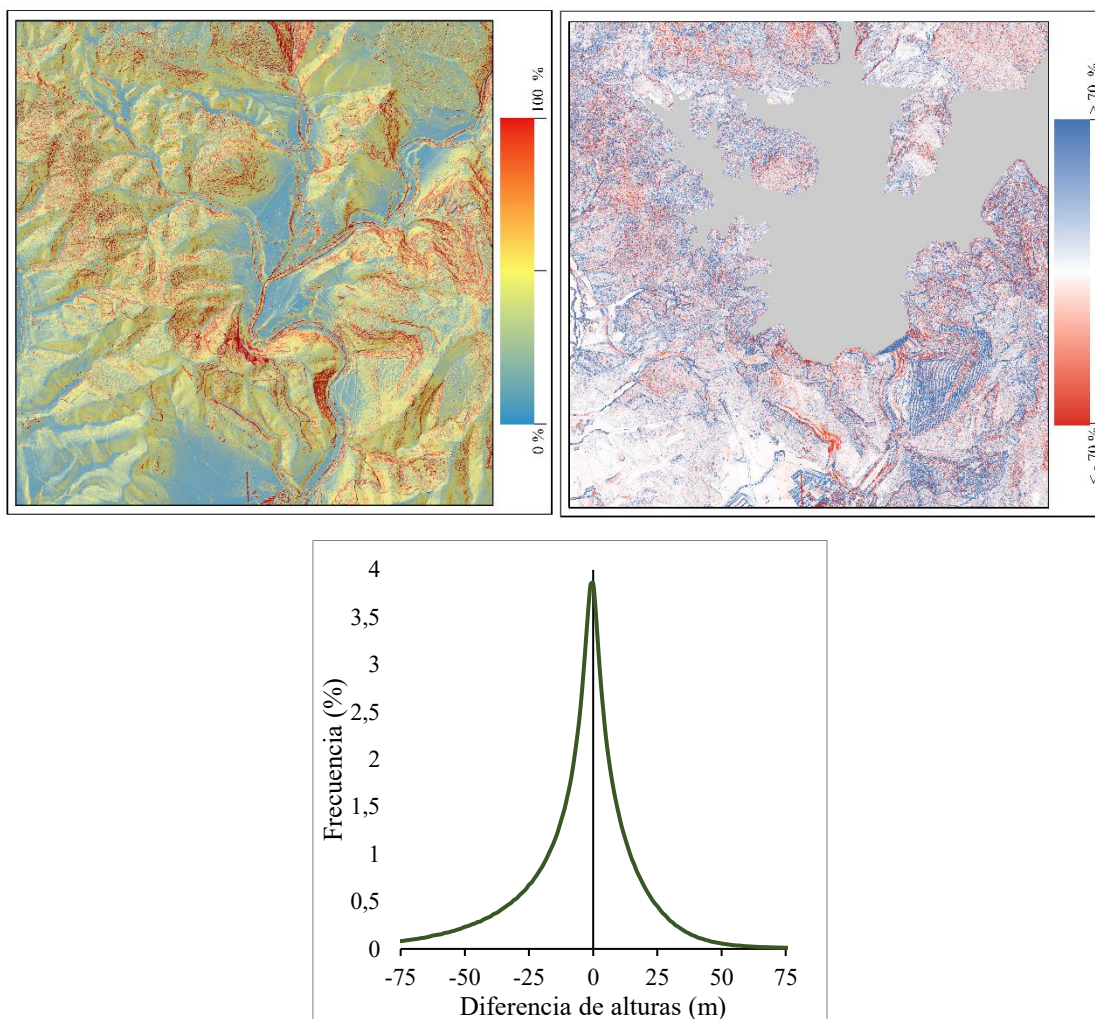


Figura 37.- Productos de pendiente año 1986. Sup.-izda.: Pendiente 1986, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – pendiente 1986, abajo: histograma de verdad de superficie - diferencia de pendiente 1986.

A medida que estos productos de pendiente presentados derivan de modelos de elevación obtenidos a partir de aerotriangulaciones de vuelos más modernos, las diferencias de pendiente entre modelos se han ido suavizado. Esto, se puede ver ya en los productos de 1986 presentando un histograma con inferiores frecuencias y mayor simetría.

Esta tendencia de suavizado se ve ya claramente representada en los modelos obtenidos para el año 1996 donde las diferencias entre los productos de pendiente son más bajas. Con una distribución de los valores en histogramas similares a los del anterior año de estudio, las frecuencias de distribución presentan de nuevo valores más bajos.

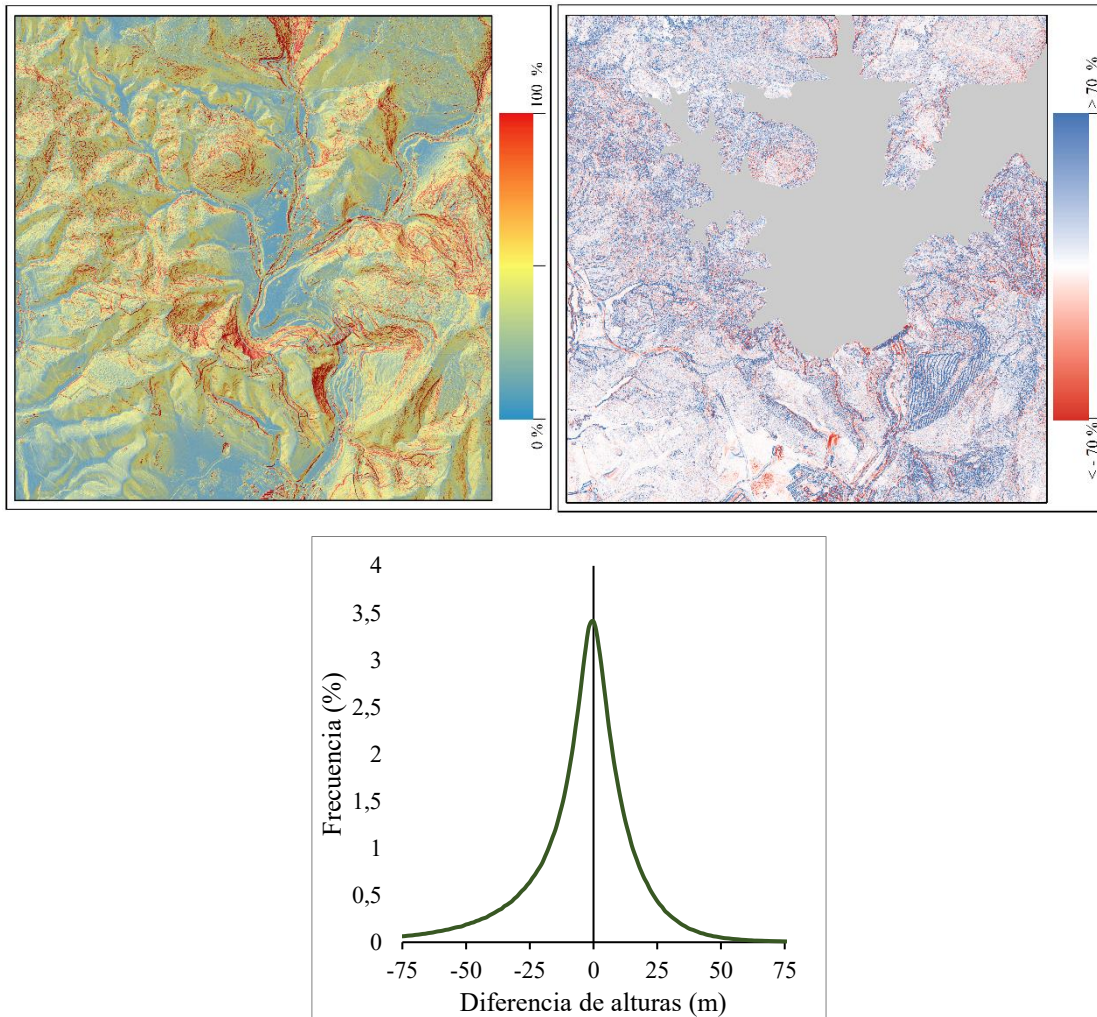


Figura 38.- Productos de pendiente año 1996. Sup.-izda.: Pendiente 1996, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – pendiente 1996, abajo: histograma de verdad de superficie - diferencia de pendientes 1996.

Por último, la comparativa de los modelos de pendiente obtenidos a partir del procesado del vuelo fotogramétrico digital, derivan en un mapa con un predominio de los valores positivos distribuidos en la totalidad del área de estudio reflejando la representación de pendiente superiores en el vuelo de 2018.

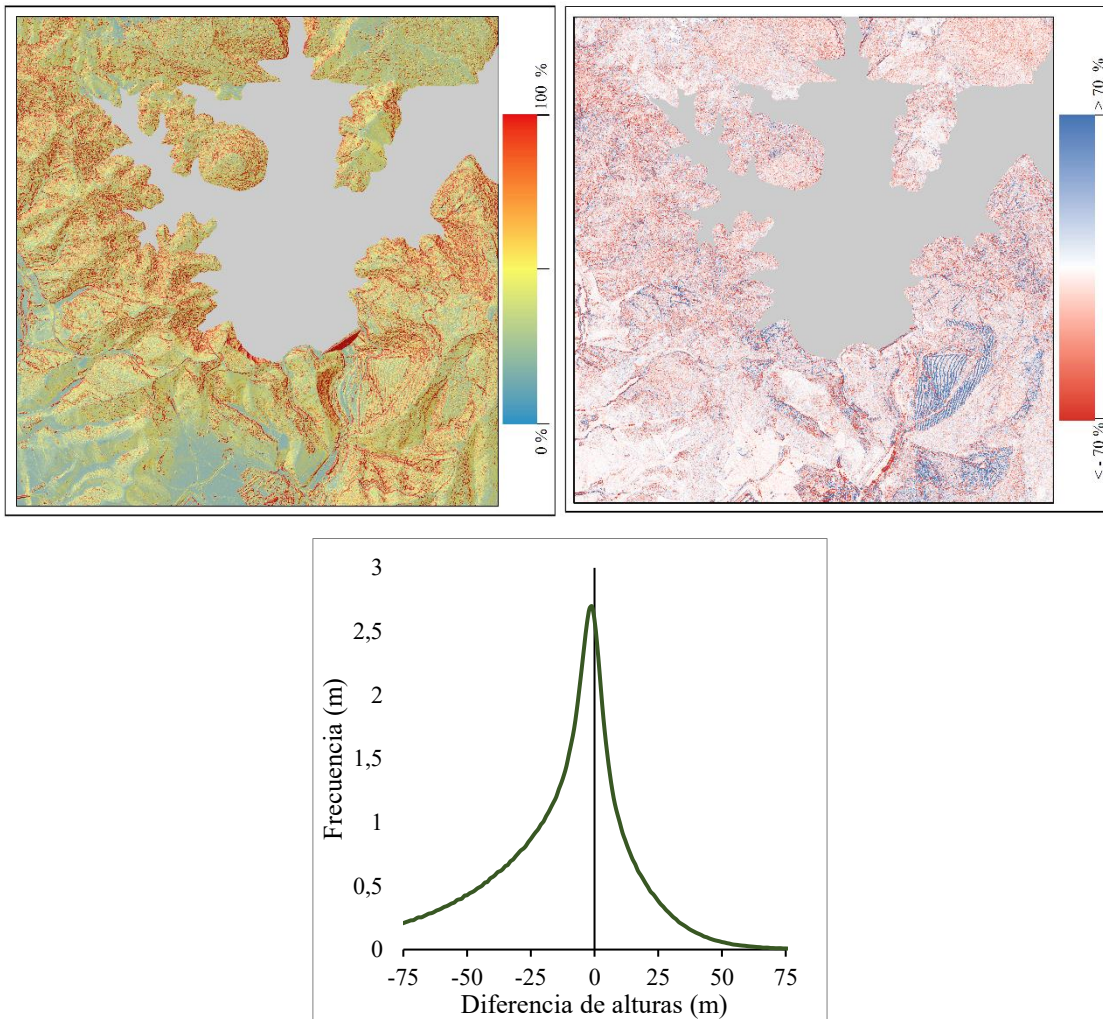


Figura 39.- Productos de pendiente año 2018. Sup.-izda.: Pendiente 2018, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – pendiente 2018, abajo: histograma de verdad de superficie - diferencia de pendientes 2018.

4.3.2.- Mapas de orientación

Los productos de diferencia de los mapas de orientación, muestran resultados similares a los obtenidos con las diferencias entre los mapas de pendiente. Estas diferencias, se van suavizando a medida que se obtienen los resultados de modelos de elevación generados a partir de vuelos más modernos.

En concreto, al igual que en los productos anteriores, es el vuelo de 1967 el que nos refleja unas diferencias mayores entre modelos con zonas claramente condicionadas por distorsiones puntuales en las áreas cubiertas por masas arboladas en la mitad noroeste.

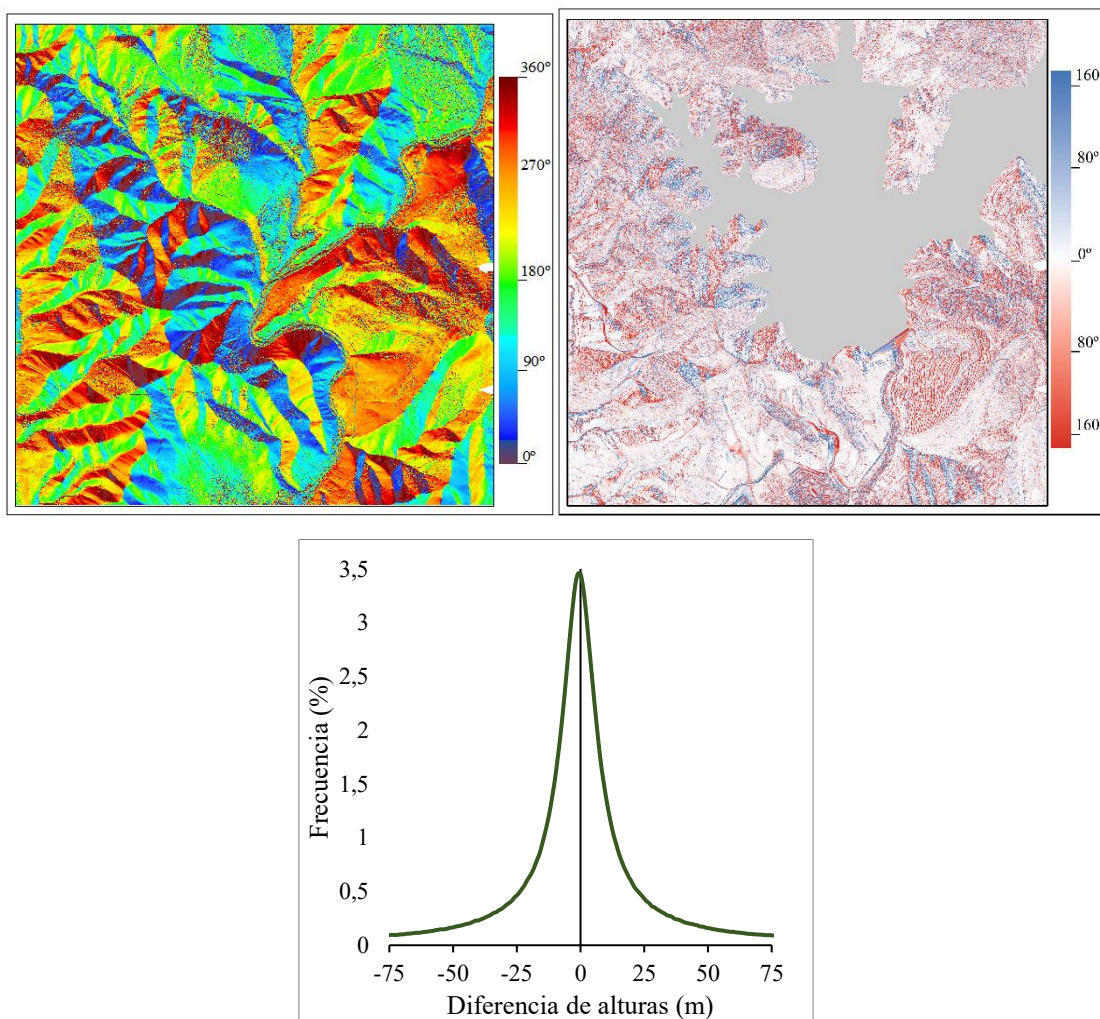


Figura 40.- Productos de orientación año 1967. Sup.-izda.: Orientación 1967, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – orientación 1967, abajo: histograma de diferencia de verdad superficie – orientación 1967.

En el caso de la generación de estos productos derivados, para los vuelos históricos es escasa la diferencia apreciable entre los diferentes modelos generados con distribuciones de histogramas muy similares.

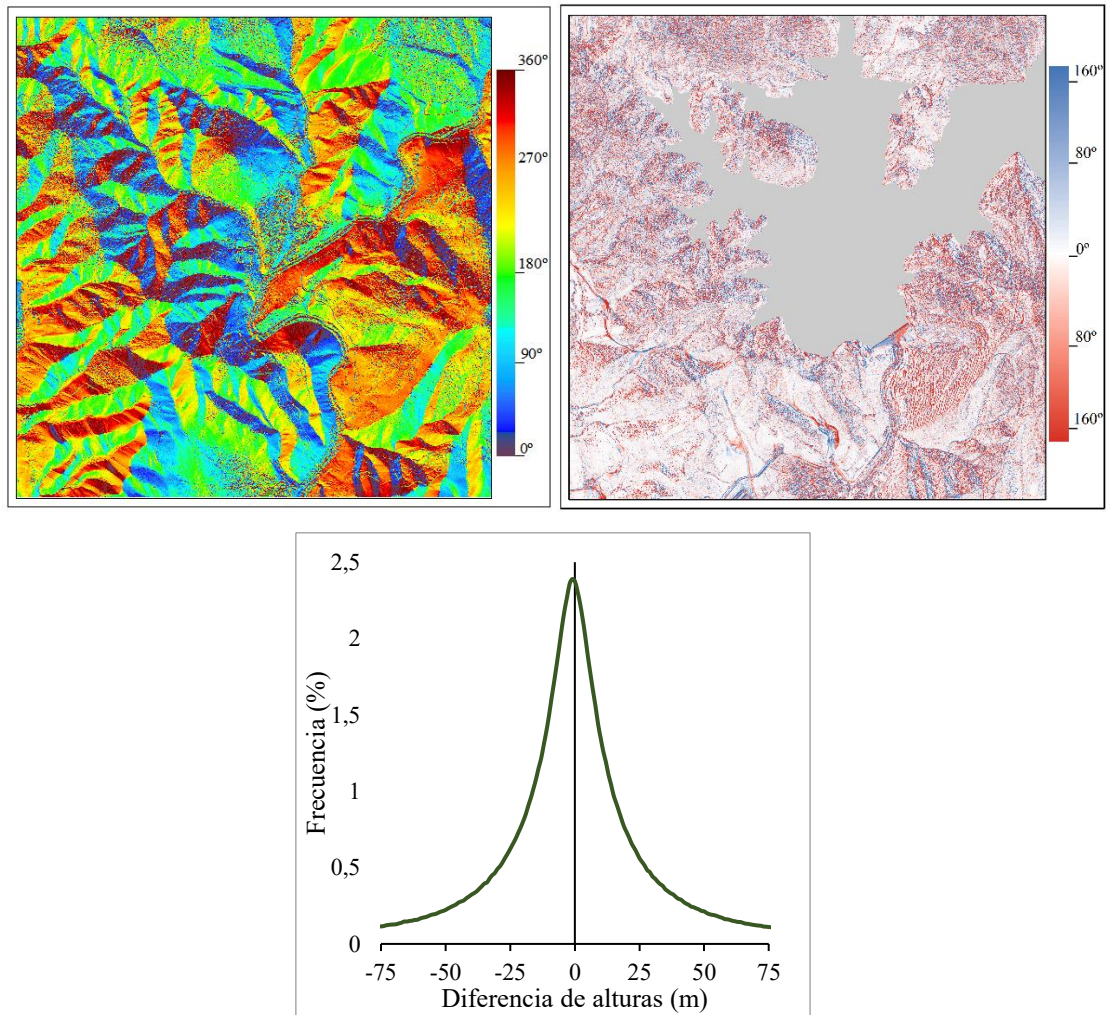


Figura 41.- Productos de orientación año 1986. *Sup.-izda.:* Orientación 1986, *sup.-dcha.:* diferencia verdad superficie – orientación 1986, *abajo:* histograma de diferencia de verdad superficie – orientación 1986.

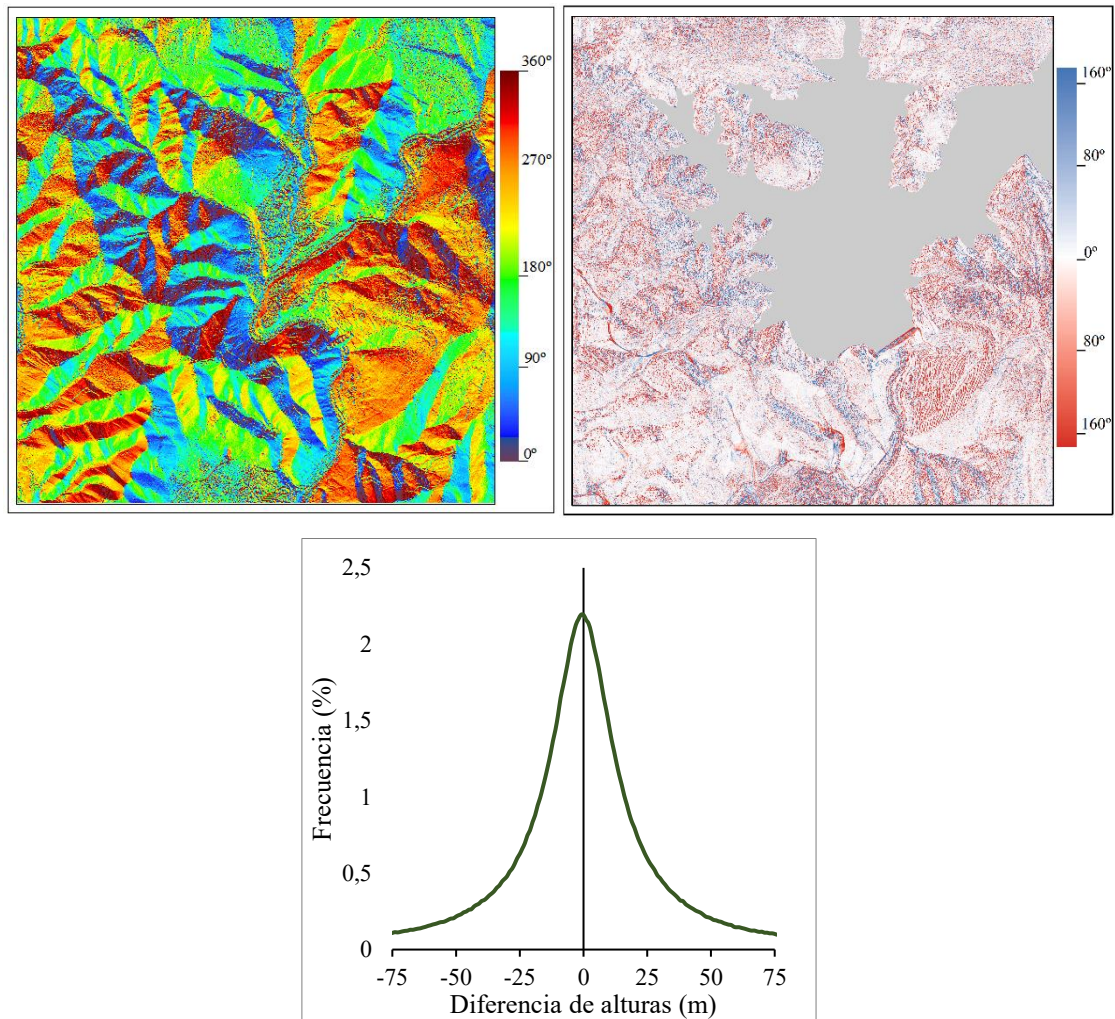


Figura 42.- Productos de orientación año 1996. Sup.-izda.: Orientación 1996, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – orientación 1996, abajo: histograma de diferencia de verdad superficie – orientación 1996.

El mapa de pendiente presentado en la **Figura 43**, correspondiente con el vuelo empleado del año 2018, sí presenta menores diferencias debido a la mayor precisión del modelo de superficies del que deriva. Éste, se trata de un modelo derivado de un vuelo fotogramétrico digital con un procesado digital más moderno y preciso.

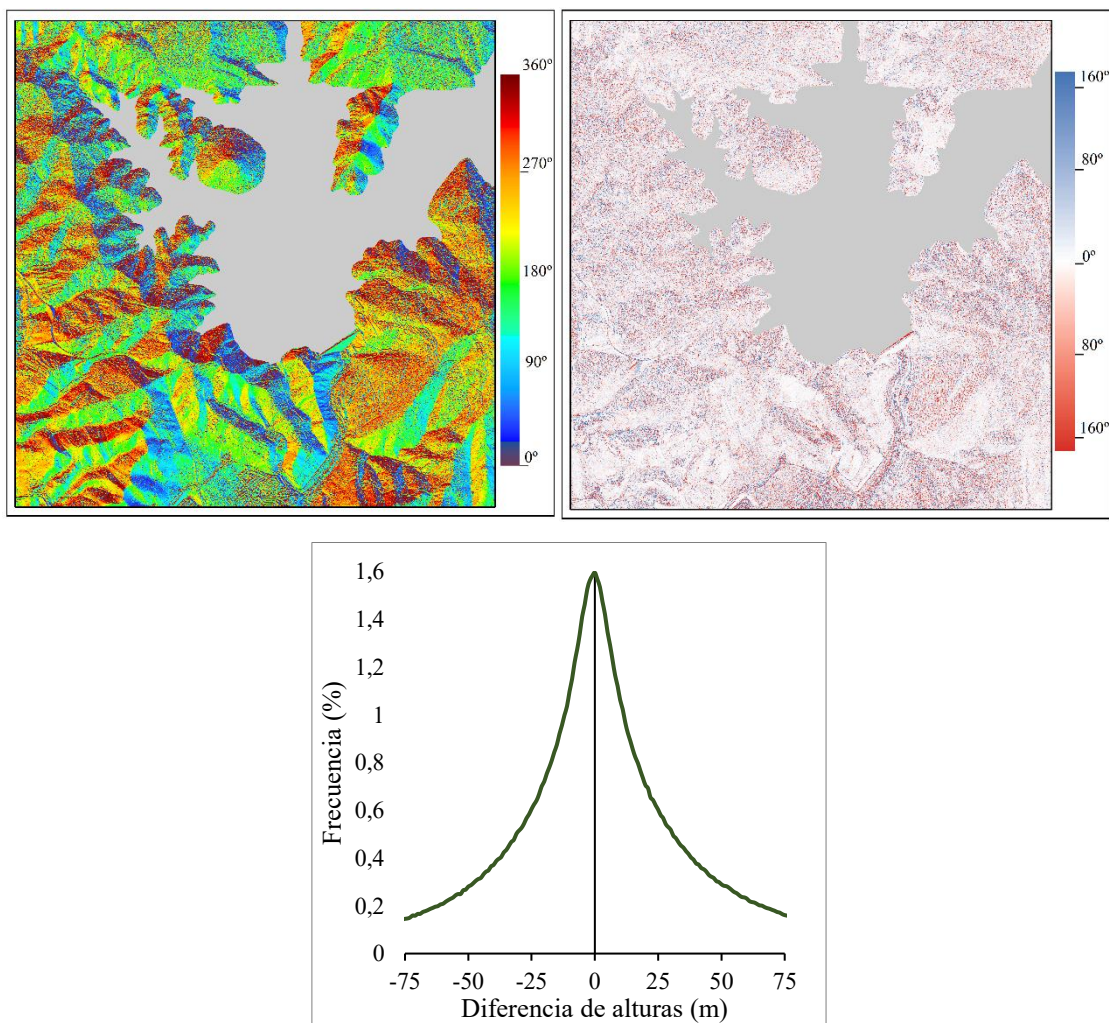


Figura 43.- Productos de orientación año 2018. Sup.-izda.: Orientación 2018, sup.-dcha.: diferencia verdad superficie – orientación 2018, abajo: histograma de diferencia de verdad superficie – orientación 2018.

En la **Tabla 11** se presentan los valores de media y desviación estándar para los resultados de diferencia, pendiente y orientación para las zonas no inundadas por el embalse de la totalidad del área de estudio para toda la serie temporal de análisis.

Tabla 11.- Media (μ) y desviación estándar (σ) de las diferencias de alturas, pendiente, orientación y curvaturas para los años de estudio.

Variable	1967-2017		1986-2017		1996-2017		2018-2017	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Z_{diff}	3,05	5,48	2,85	5,39	-2,08	4,01	-1,60	4,37
Pendiente_{diff}	-23,29	109,95	9,97	104,48	13,09	37,15	-2,36	29,95
Orientación_{diff}	-36,82	110,61	-4,66	99,54	-4,62	91,27	0,14	76,24

Para los estadísticos calculados para el modelo de diferencias de alturas, los valores de media son más elevados en los modelos derivados de los vuelos más recientes. Esto mismo ocurre con la

desviación estándar a excepción del vuelo de 1996, ligeramente más baja que la del vuelo más moderno correspondiente al año 2018.

En el caso de los productos de pendiente y orientación derivados de estos modelos, igualmente, los valores más bajos de media y desviación estándar los encontramos en los modelos más recientes.

4.4.- Comparativas con datos batimétricos

A continuación, en la **Figura 44** se presenta un gráfico de dispersión de los valores de los puntos de los que se dispone de información batimétrica (**Figura 24**) en relación con los valores obtenidos para estos puntos extraídos de los modelos derivados de los vuelos históricos.

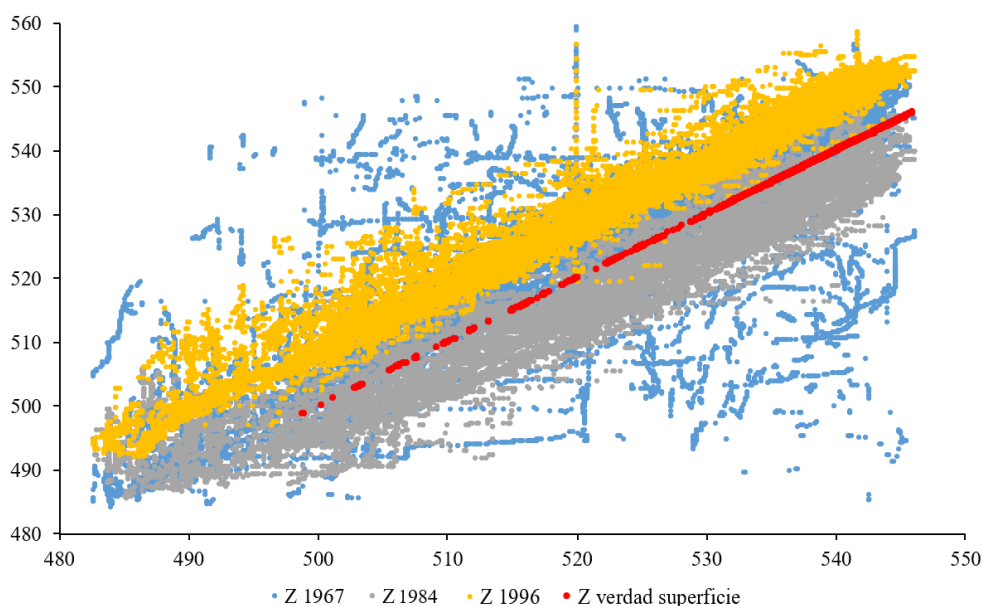


Figura 44.- Scatter plot de puntos de fondo del embalse obtenidos de modelos derivados de vuelos fotogramétricos y los puntos de información batimétrica del embalse.

Este diagrama de dispersión representa como, para estos puntos de los que se dispone de puntos con información batimétrica del embalse, los valores altimétricos obtenidos del modelo de 1986 afloran cotas más bajas que las reales mientras que el modelo de 1996, cotas más elevadas con unas diferencias en muchos puntos por encima de los 30 metros. Por su parte, el modelo de 1967 es el que mayor variabilidad presenta en sus datos con diferencias por encima y por debajo de la línea de tendencia definida por los datos de cotas batimétricas de 2018.

A partir de estas diferencias para la totalidad de puntos con información batimétrica del embalse para el área de estudio, se ha calculado el error cuadrático medio para cada año tomando como referencia las Z obtenidas a partir de la información de la batimetría del embalse (Schneider & Vidal, 2011) (**Tabla 12**).

Tabla 12.- Error cuadrático medio puntos área embalse (m).

1967	1986	1996
10,02	5,94	9,94

Estos resultados afloran lo ya observado en el diagrama de dispersión, una alta fiabilidad para el vuelo de 1986 con una distribución de puntos cercana a la línea de tendencia de los valores de sonda reales y un mayor error para los otros modelos con grandes distorsiones en puntos concretos para los modelos de elevación generados en el área del embalse.

4.5.- Resultados LiDAR batimétrico

Debido al bajo nivel del embalse en las fechas de la captura de datos y las pendientes más abruptas de las orillas del vaso en estas cotas de llenado ganando profundidad en pocos metros, son pocas las zonas de las que se pudieron extraer datos batimétricos. No obstante, como se presenta a continuación, para los ramales de estudio del embalse especificados en la **Figura 26** se obtuvieron puntos de retorno correspondientes al fondo siempre por debajo de los 3 metros de profundidad, datos acordes a las especificaciones e indicaciones del vuelo a cerca de la obtención de datos batimétricos de este disponibles en la web de descarga de los datos (Gobierno de Navarra, 2017).

La obtención de estos datos en estos ramales tan aislados del embalse también se debe a que, en estas zonas, la lámina de agua presenta un comportamiento más estancado sin oleajes ni ondulaciones de la superficie.

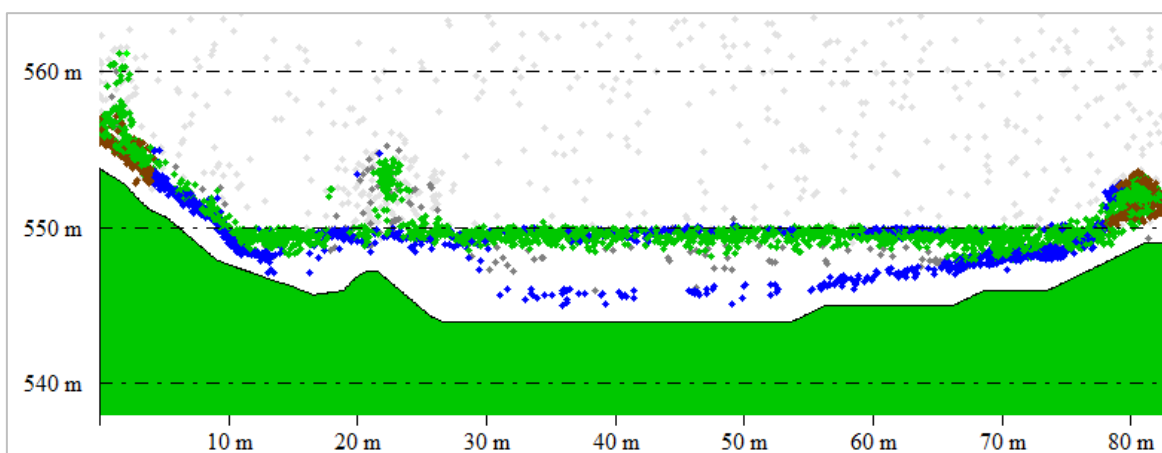


Figura 45.- Perfil 1 corte LiDAR topobatimétrico.

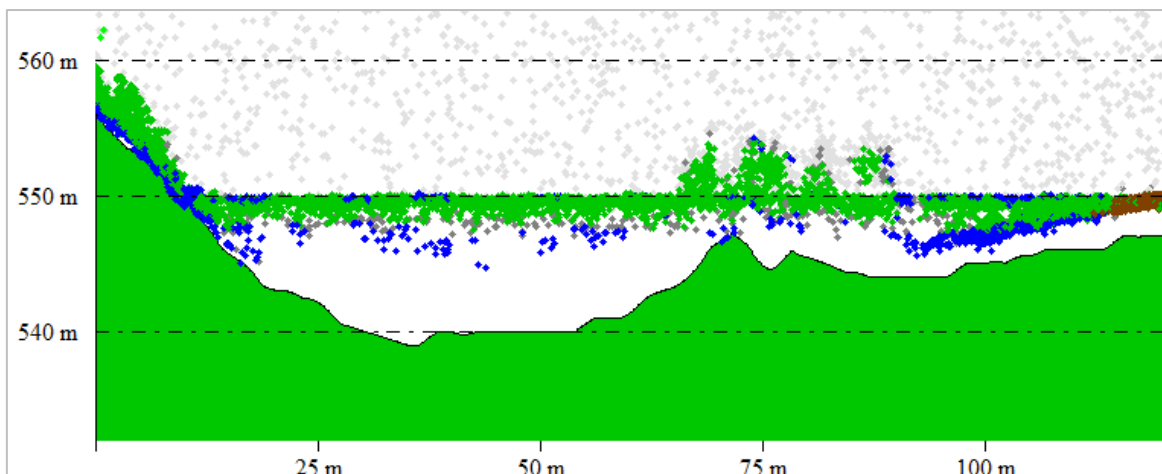


Figura 46.- Perfil 2 corte LiDAR topobatimétrico.

En estas figuras, se pueden apreciar los puntos de retorno por debajo de la lámina de agua en estos dos cortes de ejemplo acorde a la comparativa con el modelo digital de elevación derivado de fotogramas históricos a partir de la técnica SfM presentado en ambas figuras bajo los puntos LiDAR.

4.6.- Ortofotografías

A continuación, se presentan los productos de ortofotografía obtenidos a partir de la aerotriangulación de los fotogramas de los vuelos históricos de los diferentes años empleados en el trabajo para la zona de estudio descrita anteriormente.

Estos productos generados para los diferentes años, se han obtenido con los tamaños de píxel especificados en la **Tabla 13**.

Tabla 13.- Tamaño de píxel de las ortofotos generadas.

Año de vuelo	Tamaño de píxel (cm)
1967	11,5
1986	11,6
1996	31,6
2018	25 - 30

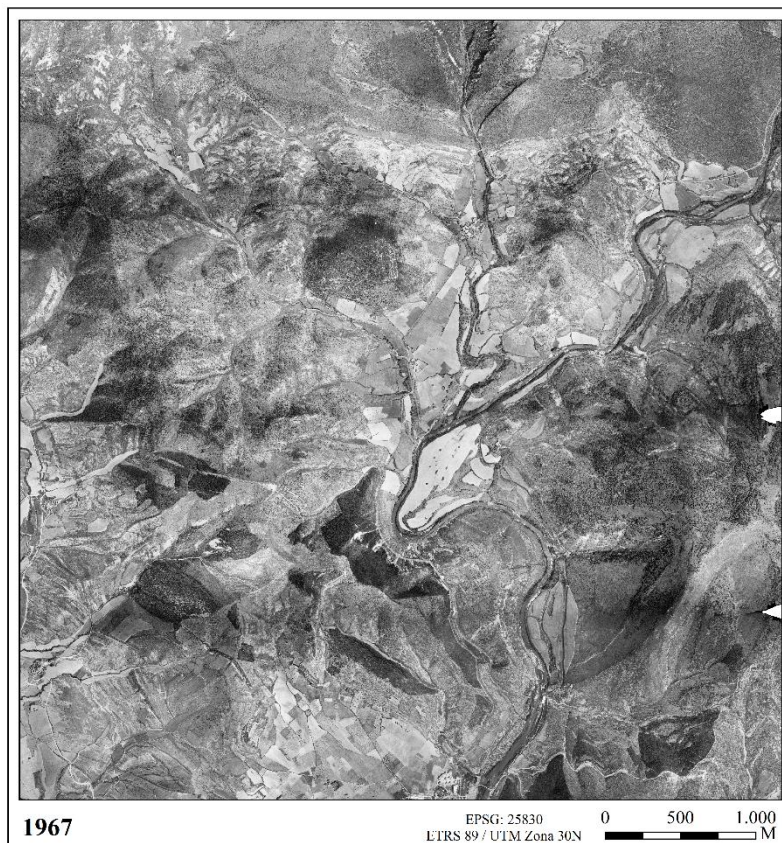


Figura 47.- Ortofoto generada para el vuelo de 1967.



Figura 48.- Ortofoto generada para el vuelo de 1986.

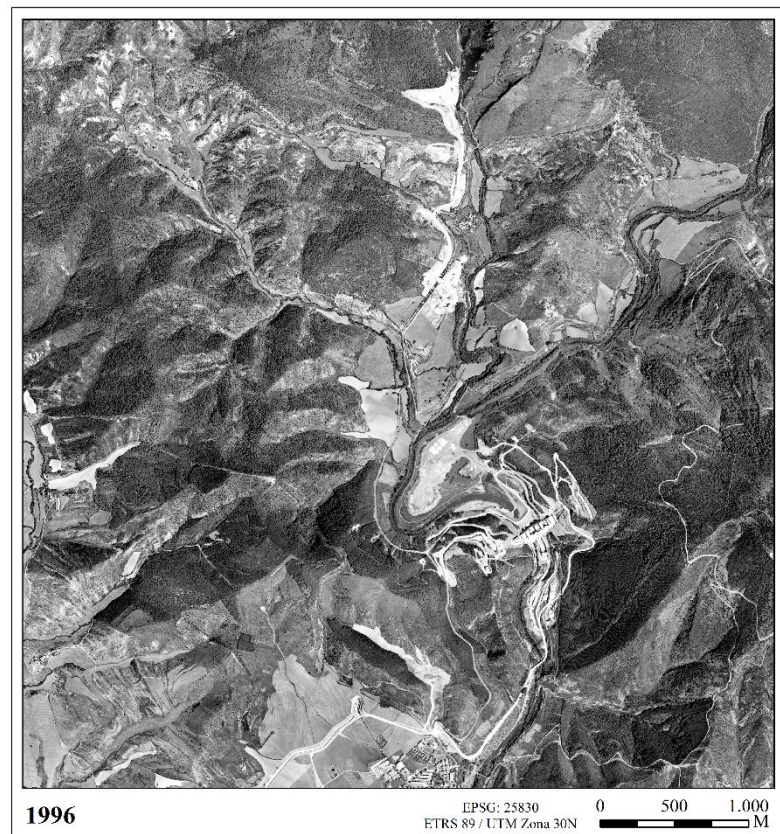


Figura 49.- Ortofoto generada para el vuelo de 1996.

4.7.- Discusión de resultados

Los resultados presentados en los anteriores apartados, reflejan un incremento de los errores a medida que aumenta la antigüedad del vuelo. Al tratarse de errores tomando como referencia los datos LiDAR del año 2017, las diferencias entre los distintos modelos de elevación, podrían ser ocasionadas por cambios en la geomorfología del área de estudio.

Sin embargo, a partir del análisis de estos modelos obtenidos, puede apreciarse como la distribución de las diferencias entre modelos, a rasgos generales, están ocasionadas por errores en el desarrollo de la técnica SfM localizándose en zonas determinadas como consecuencia de distorsiones propias de los fotogramas y la planificación del vuelo. Así, cambios en la superficie como los presentados anteriormente en la **Figura 31** son cuantificables a partir de las comparativas entre estos modelos.

Los errores presentados anteriormente, no establecen una relación directa con las características de los vuelos. Analizando sus características descritas en el apartado metodológico en la **Tabla 2**, se puede comprobar como los tamaños de GSD más pequeños correspondientes con los vuelos de 1967 y 1986 derivan en peores resultados como se ha presentado anteriormente (**Tabla 9** y **Tabla 10**) con errores superiores que los obtenidos en los productos derivados del vuelo de 1996, también vuelo analógico, a pesar de poseer un GSD superior.

Estas mismas diferencias las podemos encontrar en la comparativa entre los vuelos de 1967 y 1986 los cuales, con unas características de vuelo muy similares, devuelven mejores resultados para el vuelo más reciente el cual fue volado con un solape transversal ligeramente superior.

Sin embargo, a partir de estos vuelos con GSD inferior sí que se obtienen nubes de puntos con mayor densidad y modelos de elevación con inferiores tamaños de píxel (**Tabla 8**). Habiéndose realizado el presente estudio con un tamaño de píxel común para todos los modelos generados de dos metros, esta característica no supone ser un condicionante para la elección de los vuelos.

Por su parte, el vuelo de 2018 a pesar de estar volado a una altura superior, por su tamaño de focal nos devuelve un tamaño de píxel igual al de 1996 y un solape longitudinal y transversal inferior. Sin embargo, los errores son inferiores con unos buenos resultados. Esto se debe a la diferencia de su procesado tratándose de un vuelo fotogramétrico digital del que se dispone de todos los parámetros de calibración y orientación de cámara, así como los de posicionamiento GNSS de cada fotograma.

5.- Conclusiones

Como conclusión general tras la aplicación de la técnica SfM a estas series de fotografías aéreas se puede determinar que su fiabilidad permite la utilización de los modelos generados como fuente de datos e información para grandes conjuntos temporales permitiendo su aplicación en estudios de evolución geomorfológica, cambios de masas forestales o de construcción de edificaciones e infraestructuras.

En específico, para los vuelos fotogramétricos empleados, se concluye que;

- Debido a la inexistencia de puntos de apoyo fiables para los vuelos históricos, una aerotriangulación con medición de un alto número de puntos de control con bajos errores, no deriva en mejores resultados como ocurriría si se dispusiera de información de referencia común y fiable para todos los vuelos.
- El GSD (tamaño de píxel sobre el terreno), determinado por la focal y la altura de vuelo, va a condicionar la densidad de puntos y el tamaño de píxel de los modelos derivados de la correlación de estos fotogramas, pero no la precisión de estos modelos.
- Para las comparativas a la escala trabajada con modelos de elevación con un tamaño de píxel de dos metros, los resultados finales obtenidos no están condicionados por el tamaño de GSD y la altura de vuelo.

Así, se determina que los mejores resultados se obtienen a partir de vuelos fotogramétricos digitales con resultados cuyos errores se aproximan a unidades centimétricas alejándose a proporcionar errores métricos cada vez más elevados a medida que aumenta la antigüedad del vuelo, como consecuencia de las características de las cámaras y de las planificaciones más irregulares de estos.

La aerotriangulación de estos vuelos posibilita también la generación de productos de gran utilidad como son las ortofotografías para cada uno de los años de estudio, pudiéndose a partir del análisis fotointerpretativo de estas, confirmar los cambios analizados y cuantificados en los modelos de elevación generados.

Por su parte, el empleo de datos del sensor LiDAR aerotransportado no ha realizado aportaciones de información batimétrica en el presente trabajo. Aun siendo un sensor topobatimétrico a partir del cual en otras zonas fluviales se han obtenido resultados por encima de los siete metros de profundidad, para esta área no ha realizado aportaciones obteniendo retornos exclusivamente en profundidades inferiores a los 3 metros.

6.- Bibliografía

- Aerial Photography - USDA Farm Service Agency.* (2021). <http://www.fsa.usda.gov/programs-and-services/aerial-photography/index>
- Alex, M. A., Víctor, G. M., & Jesús, Á. M. (2020). Comparison of Digital Terrain Models Obtained with LiDAR and Photogrammetry. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 576–585. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5_63
- Arnaud, F., Piégay, H., Schmitt, L., Rollet, A. J., Ferrier, V., & Béal, D. (2015). Historical geomorphic analysis (1932-2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). *Geomorphology*, 236, 163–177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.009>
- Blue Marble Geographics. (2021). *Global Mapper: Combine/ Compare Terrain Layers.* http://www.bluemarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-18-2/Combine_Compare_Terrain_Layers.htm
- Brasington, J., & Smart, R. M. A. (2003). Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3), 231–247. <https://doi.org/10.1002/esp.480>
- Brotóns, M., Sarría, A., Castillo, G., & Bernardo, A. (2010). *Mediante Datos Lidar.* 254–271.
- Cardenal Escarcena, J., Mata, E., Castro, D. E., Luis, J., García, P., Delgado García, J., González Díez, A., Díaz De Terán, J. R., & Olague, I. (2008). Detección y cuantificación de cambios geomorfológicos a partir del análisis de vuelos históricos. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, nº9, 150–165. www.geo-focus.org
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). Structure from Motion in the Geosciences. *Structure from Motion in the Geosciences*, August. <https://doi.org/10.1002/9781118895818>
- Cone, J. (1998). Principles of Geographical Information Systems by Peter A. *New Zealand Geographer*, 54(2), 56–57. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7939.1998.tb02089.x>
- Deng, Y., Wilson, J. P., & Bauer, B. O. (2007). DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(2), 187–213. <https://doi.org/10.1080/13658810600894364>
- Dietrich, J. T. (2014). Application of Structure-from-Motion photogrammetry to fluvial geomorphology. *PhD Thesis, December*, 109.
- Dunne, J. (2015). *Using Aerial Photos to Produce Digital Surface Models, Orthophotos, and Land Cover Maps of a Coastal Area in Puget Sound, WA.*
- ESRI. (2021a). *ArcGIS. Cómo Funciona Orientación.* ArcGIS. Cómo Funciona Orientación. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>
- ESRI. (2021b). *ArcGIS. Cómo funciona pendiente.* ArcGIS. Cómo Funciona Pendiente. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>
- Fabris, M., & Pesci, A. (2005). *Dow-man.* Bacher. <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/3247>
- Fagua, J., Campo, A., & Posada, E. (2011). Desarrollo de dos metodologías para la generación de

- modelos digitales de terreno (MDT) y superficie (MDS) empleando datos LiDAR y programas de licencia. *Análisis Geográfico*, 49(May), 83–95.
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*.
- Fernández, T., Pérez, J. L., López, A., Gómez, J. M., Cardenal, J., & Delgado, J. (2014). Monitorización de laderas inestables mediante técnicas fotogramétricas a partir de vuelos UAV e históricos. *XVI Congreso Nacional de Tecnologías de La Información Geográfica*, 202–212.
- García-Sansegundo, J. (2005). *La estructura geológica en el entorno del Embalse de Itoiz (Navarra)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4995.0244>
- Gil, A. L., Núñez-Casillas, L., Isenburg, M., Benito, A. A., Bello, J. J. R., & Arbelo, M. (2013). A comparison between LiDAR and photogrammetry digital terrain models in a forest area on Tenerife Island. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39(5), 396–409. <https://doi.org/10.5589/m13-047>
- Gobierno de Navarra. (2017). *Especificaciones vuelo LiDAR Navarra 2017*. https://filescartografia.navarra.es/5_LIDAR/_readme.txt
- Gobierno de Navarra. (2021). *Cartoteca y Fototeca de Navarra*.
- Hughes, M. L., McDowell, P. F., & Marcus, W. A. (2006). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74(1–4), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.001>
- IGN. (2021). *Instituto Geográfico Nacional*. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Isenburg, M. (2013). LASzip. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79(2), 209–217. <https://doi.org/10.14358/pers.79.2.209>
- Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Marcial-Pablo, M. D. J., & Enciso, J. (2021). Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: Methodology and accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/ijgi10050285>
- Lane, S. N., James, T. D., & Crowell, M. D. (2000). Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *Photogrammetric Record*, 16(95), 793–821. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.00152>
- LaRocque, P. E., & West, G. R. (1990). ROPME/PERSGA/IHB Workshop on Hydrographic Activities in the ROPME Sea Area and Red Sea (Kuwait City). In *Airborne Laser Hydrography: An Introduction*.
- Leys, K. F., & Werritty, A. (1999). River channel planform change: Software for historical analysis. *Geomorphology*, 29(1–2), 107–120. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00009-4)
- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31–49. <https://doi.org/10.1177/0309133308089496>
- Llena, M., Vericat, D., & Martínez-Casasnovas, J. A. (2018). Application of structure from motion (SfM) algorithms for the historical analysis of changes in fluvial geomorphology. *Cuaternario y Geomorfología*, 32(1–2), 53–73. <https://doi.org/10.17735/cyg.v32i1-2.60410>
- López-Fernández, C., García-Sansegundo, J., Pando, L., Domínguez-Cuesta, M. J., Fernández-

- Viejo, G., & Díaz-Ortiz, T. (2018). Configuración geológico-geotécnica y estabilidad de la ladera oriental de la presa de Itoiz (Navarra, España) Geological-geotechnical configuration and stability of the eastern slope of the Itoiz dam (Navarra, Spain). *Trabajos de Geología*, 36(36), 297. <https://doi.org/10.17811/tdg.36.2016.297-310>
- Méndez, M., & Jiménez, D. (2013). Generation of Digital Elevation Models (DEM) by means of Photogrammetric Techniques using CARTA-2005 Imagery. *Tecnología En Marcha*, 26(506), 10.
- Micheletti, N., Lane, S. N., & Chandler, J. H. (2015). Application of archival aerial photogrammetry to quantify climate forcing of alpine landscapes. *Photogrammetric Record*, 30(150), 143–165. <https://doi.org/10.1111/phor.12099>
- Moreno Brotóns, J., Alonso Sarria, F., Gomariz Castillo, F., & Alonso Bernardo, D. (2010). Análisis y validación de modelos digitales de elevaciones mediante datos LIDAR. *Tecnologías de La Información Geográfica: La Información Geográfica Al Servicio de Los Ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de La Universidad de Sevilla. Sevilla, Tecnología*(2010), 254–271.
- Muñoz-Narciso, E. (2014). Aplicación de fotogrametría digital automatizada en geomorfología: Dinámica morfosedimentaria en ríos de gravas. *Treball de Master*, 1–75.
- Özgür Çelik, M., Alptekin, A., Bünyan Ünel, F., Kuşak, L., & Kanun, E. (2020). The effect of different flight heights on generated digital products: Dsm and Orthophoto. *Mersin Photogrammetry Journal* , 2(1), 1–9.
- Pakoksung, K., & Takagi, M. (2016). Digital elevation models on accuracy validation and bias correction in vertical. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0069-3>
- Rocha, A. (1977). Introducción a La Introducción a La Αποπτωσηξ. *British Journal of Cancer*, 25(3), 1–11. <http://www.revista.unam.mx/vol.7/num7/art55/int55.htm>
- SAIH Ebro. Datos a la carta. (2021). <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/autoservicio/inicio>
- Schneider, P., & Vidal, L. B. (2011). *Estudio de evaluación de la población piscícola de los embalses de Mansilla, Alloz e Itoiz de la Cuenca del Ebro*. 186–188.
- Seitz, S. M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., & Szeliski, R. (2006). A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1, 519–526. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.19>
- Singh, Y. (2021). *Satpalda Geospatial Services. Concepts of Photogrammetry*. <http://www.satpalda.com/blogs/concepts-of-photogrammetry>
- SITNA - Gobierno de Navarra. (2021). *Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra*. <http://idena.navarra.es/portal/descargar>
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2015). Structure from motion photogrammetry in physical geography: <Http://Dx.Doi.Org/10.1177/0309133315615805>, 40(2), 247–275. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>
- Tomás, R., Riquelme, A., & Cano, M. (2016). *Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos INTERMIN Project View project Soil expansivity potential and its interaction with transport infrastructures View project*. <https://www.researchgate.net/publication/309611177>

Wang, C. K., & Philpot, W. D. (2007). Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.003>

Williams, R. (2012). DEMs of Difference. *Geomorphological Techniques*, 2(3.2).

Zubrinic, F., & Reuter, F. (2002). Práctico 14: Planeamiento De Vuelo Fotográfico Para Tomas De Fotografías Verticales. *Carpeta De Trabajos Prácticos*., 155–166.

7.- Anexos

Anexo 1.- Puntos en zonas consideradas suelo: Diferencias de cotas entre el modelo LiDAR de 2017 considerado verdad de la superficie y las cotas obtenidas de los modelos derivados de vuelos fotogramétricos.

Punto	Z Verdad 2017 LiDAR	Z 1967	Z _{diff} 1967- Verdad	Z 1986	Z _{diff} 1986- Verdad	Z 1996	Z _{diff} 1996- Verdad	Z 2018	Z 2018- Verdad superficie
1	549,20	768,17	-13,72	553,21	-5,64	554,54	-5,34	550,07	-0,87
2	553,62	758,16	-14,65	556,65	-5,16	557,84	-4,22	554,54	-0,92
3	522,03	671,20	-12,25	526,17	-6,50	528,89	-6,86	522,65	-0,62
4	528,07	722,13	-11,33	530,88	-5,75	533,87	-5,80	528,65	-0,58
5	566,71	684,73	-13,74	570,51	-5,12	571,25	-4,54	567,57	-0,86
6	538,47	718,74	-13,30	541,98	-4,38	543,06	-4,59	539,06	-0,58
7	658,96	643,29	-11,54	652,97	14,23	658,69	0,27	659,81	-0,85
8	631,75	653,07	-8,63	629,09	9,56	633,36	-1,61	632,34	-0,59
9	670,99	655,14	-10,01	670,08	7,82	671,68	-0,68	671,08	-0,09
10	705,44	616,19	-10,75	703,51	9,50	707,07	-1,63	707,10	-1,66
11	743,51	634,41	-11,01	733,50	17,22	743,39	0,12	744,35	-0,84
12	754,45	580,48	-5,80	748,53	12,15	756,07	-1,61	755,61	-1,15
13	710,81	590,90	-10,92	705,59	11,81	712,99	-2,18	712,04	-1,23
14	620,17	589,90	-10,34	618,86	-1,80	624,02	-3,84	620,42	-0,25
15	649,17	696,46	-8,90	649,97	-2,26	652,85	-3,68	648,92	0,26
16	605,34	675,52	-7,46	607,83	-6,04	608,65	-3,31	605,83	-0,49
17	764,44	647,89	-4,31	763,87	0,69	764,68	-0,23	765,69	-1,25
18	789,94	836,28	-8,59	789,37	-0,78	790,70	-0,76	789,06	0,88
19	816,11	697,23	-5,38	815,19	0,34	816,79	-0,67	816,09	0,03
20	645,37	579,35	-7,74	647,04	-5,80	647,93	-2,57	645,37	-0,01
21	652,01	617,87	-1,89	653,48	-4,18	654,70	-2,70	651,59	0,42
22	615,98	827,43	-11,31	619,97	-3,61	617,89	-1,91	614,82	1,16
23	582,92	673,68	-6,30	586,74	-3,99	587,60	-4,68	583,06	-0,14
24	647,73	584,69	-1,78	653,12	-6,48	651,31	-3,58	648,57	-0,84
25	694,41	700,03	-5,61	700,39	-8,21	696,35	-1,94	694,89	-0,48
26	667,38	798,84	-8,91	670,35	-3,25	670,28	-2,90	667,35	0,03
27	637,12	766,86	-2,42	637,95	-0,93	640,24	-3,12	637,13	-0,01
28	827,69	650,54	-2,81	818,59	13,27	830,97	-3,28	828,53	-0,83
29	643,59	642,80	-5,67	640,42	7,59	649,15	-5,56	643,53	0,05
30	644,43	646,92	-1,55	640,97	9,69	646,16	-1,73	644,32	0,11
31	645,14	654,10	-2,09	642,15	9,51	647,90	-2,76	646,11	-0,97
32	571,61	606,06	-0,72	572,44	2,49	576,11	-4,50	572,65	-1,04
33	691,85	552,67	-3,47	688,99	8	692,99	-1,14	692,14	-0,29
34	668,05	544,71	-6,24	665,24	7,35	671,50	-3,45	669,99	-1,94
35	687,55	557,21	-3,58	683,32	9,45	691,21	-3,66	687,80	-0,25
36	579,99	650,61	-1,44	577,12	8,49	585,61	-5,62	580,62	-0,64

37	579,56	572,86	-6,15	577,08	8,62	584,63	-5,08	580,45	-0,89
38	605,44	530,23	-2,16	602,07	11,85	609,35	-3,91	606,71	-1,27
39	623,40	523,50	-1,47	619,79	10,67	626,28	-2,88	624,19	-0,80
40	574,69	620,74	-0,56	570,77	9,01	579,36	-4,67	579,05	-4,37

Anexo 2.- Puntos en zonas consideradas cubiertas vegetales: Diferencias de cotas entre el modelo LiDAR de 2017 considerado verdad de la superficie y las cotas obtenidas de los modelos derivados de vuelos fotogramétricos.

Punto	Z Verdad		Z _{diff}		Z _{diff}		Z _{diff}		Z _{diff}	
	2017 LiDAR	Z 1967	1967- Verdad	Z 1986	1986- Verdad	Z 1996	1996- Verdad	Z 2018	2018- Verdad	
1	760,05	768,86	-8,81	752,85	13,07	759,62	0,43	760,97	-0,91	
2	713,30	722,44	-9,14	709,19	9,96	713,02	0,28	713,70	-0,40	
3	747,84	753,74	-5,90	735,87	16,89	745,67	2,17	747,98	-0,14	
4	664,30	673,21	-8,91	659,03	9,05	667,87	-3,57	663,84	0,46	
5	634,62	638,74	-4,12	631,02	6,94	638,40	-3,78	635,44	-0,82	
6	740,34	750,36	-10,02	731,62	13,64	736,26	4,07	741,06	-0,72	
7	705,98	711,44	-5,46	705,24	6,89	705,13	0,85	708,55	-2,56	
8	718,44	725,81	-7,37	714,87	6,89	715,77	2,67	719,29	-0,85	
9	699,51	701,53	-2,01	696,87	5,10	699,99	-0,48	699,94	-0,42	
10	656,39	655,81	0,58	650,18	12,02	659,38	-2,99	657,59	-1,20	
11	680,77	683,22	-2,45	680,45	3,43	682,92	-2,15	683,36	-2,59	
12	694,56	697,88	-3,32	693,31	2,67	695,37	-0,81	693,55	1,01	
13	721,38	727,44	-6,06	714,95	5,52	719,39	1,99	722,16	-0,77	
14	674,00	677,04	-3,04	672,10	5,66	675,52	-1,51	676,19	-2,19	
15	694,35	699,53	-5,19	691,42	4,99	694,34	0,01	695,42	-1,07	
16	709,22	717,32	-8,10	706,71	5,52	708,73	0,49	710,74	-1,51	
17	671,45	676,08	-4,63	674,61	0,79	672,62	-1,17	671,97	-0,52	
18	661,12	664,31	-3,19	661,28	2,41	665,16	-4,04	660,90	0,23	
19	614,70	620,92	-6,22	617,14	2,81	620,53	-5,83	616,99	-2,29	
20	674,16	671,01	3,15	666,42	11,07	675,30	-1,15	674,32	-0,17	
21	830,52	841,67	-11,15	824,34	6,13	827,81	2,71	831,95	-1,43	
22	670,22	667,76	2,47	667,57	5,34	670,50	-0,28	671,25	-1,03	
23	634,16	631,12	3,04	633,56	2,13	636,57	-2,41	636,57	-2,41	
24	748,87	751,83	-2,96	749,56	-0,03	752,40	-3,53	753,87	-5,00	
25	877,65	881,13	-3,48	861,90	16,23	868,35	9,31	878,03	-0,38	
26	925,15	933,59	-8,43	910,22	15,50	918,45	6,70	927,13	-1,98	
27	699,45	705,32	-5,87	699,28	2,00	703,50	-4,05	699,53	-0,08	
28	696,35	688,45	7,90	686,86	10,86	692,60	3,75	697,70	-1,35	
29	617,75	614,13	3,62	615,62	6,23	621,45	-3,70	619,30	-1,55	
30	712,85	713,56	-0,71	702,87	14,30	716,38	-3,53	713,88	-1,04	
31	658,06	662,40	-4,33	659,40	0,04	660,57	-2,51	657,90	0,16	
32	487,05	491,18	-4,13	498,99	-11,72	493,48	-6,43	488,02	-0,97	

33	754,58	752,92	1,65	751,95	3,76	754,15	0,42	754,34	0,23
34	699,84	706,27	-6,43	693,50	4,99	702,10	-2,26	701,07	-1,23
35	737,29	732,99	4,31	733,06	3,33	734,85	2,44	735,64	1,65
36	798,37	788,62	9,75	786,02	11,25	791,92	6,45	797,77	0,60
37	636,25	626,26	9,99	632,72	1,26	634,07	2,18	633,72	2,54
38	617,31	609,03	8,27	619,15	-3,89	619,76	-2,46	618,67	-1,37
39	585,70	572,81	12,90	583,23	0,76	589,21	-3,51	587,72	-2,02
40	648,59	638,88	9,71	637,96	9,18	647,87	0,72	648,06	0,53
