



Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

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

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

*EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS SENSORES HÍBRIDOS PARA LA GENERACIÓN DE PRODUCTOS  
GEOESPACIALES EN EL ÁMBITO URBANO*

presentado por

*CAMILA GARMENDIA GARCÍA*

*aurkeztua*

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



Septiembre, 2021 / 2021, IRAILA



## **Resumen**

Tradicionalmente, el LiDAR y la fotogrametría se conciben como fuentes de información independientes ampliamente utilizadas para el mapeo urbano de las ciudades, cada uno con sus ventajas y desventajas. El avance tecnológico permitió la introducción en el mercado de un sistema, sensor híbrido CityMapper-2 de la Compañía Leica Geosystems, que permite adquirir de manera simultánea datos LiDAR en conjunto con imágenes aéreas. El objetivo del presente trabajo es evaluar el potencial de los datos capturados con este sensor en la Ciudad de Pamplona, para generar distintos productos geoespaciales como nubes de puntos, modelos digitales de elevaciones, mallas 3D, mallas 2.5D y ortofotos verdaderas. La metodología propuesta consiste en analizar las diferencias de productos generados mediante el software Agisoft Metashape con productos de referencia generado a través del software nFrames. Se establecen diferentes comparaciones, a partir de la selección de las mejores pruebas, para destacar el aporte de cada fuente de información a los productos obtenidos. Los resultados evidencian que en zonas urbanas la combinación con información LiDAR otorga mayor calidad al producto generado, en especial para zonas que presentan oclusiones con calles muy estrechas, zonas donde hay sombras y donde hay mucha presencia de árboles.

**Palabras claves:** Sensores Híbridos, Leica CityMapper-2, Fotogrametría Aérea, DIM, LiDAR, Ciudades 3D.

## **Abstract**

Traditionally, LiDAR and photogrammetry are conceived as widely used independent sources of information for urban mapping of cities, each with its advantages and disadvantages. The technological advance achieved the introduction in the market of a system, the CityMapper-2 hybrid sensor from the Leica Geosystems Company, which allows simultaneous acquisition of LiDAR data in conjunction with aerial images. The objective of this work is to evaluate the potential of the data captured with this sensor in the City of Pamplona, to generate different geospatial products such as point clouds, digital elevation models, 3D meshes, 2.5D meshes and true orthophotos. The proposed methodology consists of analyzing the differences of products generated by Agisoft Metashape software with reference products generated through nFrames software. Different comparisons were found, based on the best test, to highlight the report of each source of information to the products obtained. The results show that in urban areas the combination with LiDAR information gives higher quality to the generated product, especially for areas that present occlusions with very narrow streets, areas where there is shadow and where there are a lot of trees.

**Keywords:** Hybrid Sensors, Leica CityMapper-2, Aerial Photogrammetry, DIM, LiDAR, 3D Cities

## Agradecimientos

*Quiero agradecer a mi tutor de Trabajo Final, Ing. Jesús Álvarez Mozos, por su acompañamiento y dirección para que este trabajo pudiese desarrollarse.*

*A la empresa Tracasa Instrumental por permitirme llevar a cabo mis prácticas y facilitarme lo necesario para la realización de este proyecto. Y en especial, agradecer al Ing. Víctor García Morales, tutor de prácticas, por la ayuda y el acompañamiento recibido. También expresar mi gratitud al equipo de la empresa en particular a Santiago, Jesús y Juan.*

*A la Fundación Carolina, por su confianza y por brindarme la oportunidad mediante su programa de becas para estudiar este Máster.*

*Y ¡a mi familia y amigos por estar siempre presente!*

## ÍNDICE

Resumen .....	i
Abstract .....	i
Agradecimientos .....	ii
1. Preámbulo .....	1
2. Introducción .....	2
2.1 Los datos espaciales como fuente para las ciudades 3D .....	2
2.1.1 Estado de situación en otras ciudades del mundo .....	5
2.2 Fotogrametría y LiDAR como fuentes de información.....	7
2.3 Sensores híbridos .....	9
2.4 Objetivos .....	10
3. Materiales y métodos.....	11
3.1 Captura de datos.....	11
3.2 Área de estudio .....	17
3.3 Material utilizado .....	17
3.4 Metodología .....	18
3.4.1 Orientación interna y externa .....	19
3.4.2 Productos.....	21
3.4.3 Estudios/Pruebas Metashape .....	25
3.4.4 Esquema de procesamiento de productos de referencia con nFrames .....	28
3.4.5 Análisis .....	29
4. Resultados.....	36
4.1 Nube de puntos.....	36
4.1.1 Precisión vertical - Nube puntos.....	36
4.1.2 Perfiles.....	37
4.1.3 Distancias entre nubes.....	39
4.2 Modelos Digitales de Superficies (DSM).....	40
4.2.1 Precisión vertical - DSM.....	40
4.2.2 Comparación Nº1: DSM-Metashape (N + O) vs DSM-(LiDAR).....	40
4.2.3 Comparación Nº2: DSM-nFrames (N) vs DSM-nFrames(N + LiDAR) .....	43
4.3 Ortofotos Verdaderas .....	44
4.3.1 Control de Calidad Visual.....	44
4.3.2 Control Geométrico .....	46
4.4 Malla .....	48
5. Conclusiones .....	52
5.1 Conclusiones generales .....	52
5.2 Conclusiones específicas .....	52

6. Referencias.....	54
7. Anexo .....	58
1.1 Reseña de puntos de control utilizados para la orientación absoluta:.....	58
• Punto N1A.....	58
• Punto N1b .....	58
• Punto N9a .....	59
• Punto N9b .....	59
• Punto T8a.....	60
• Punto T8b.....	61
• Punto 1 y 2 .....	61
2.1 Comparación – Nube de puntos .....	62
3.1 Comparación - DSM.....	63
3.1.1 Comparación Nº1: DSM-Metashape (N + O) vs DSM-(LiDAR).....	63
3.1.2 Comparación Nº2: DSM-nFrames (N) vs DSM-nFrames (N + LiDAR) .....	66
4.1 Comparación - Ortofotos Verdaderas .....	66
4.1.1 Control calidad visual .....	66
5.1 Comparación – Encuestas Mallas .....	68
5.1.1 Comparativa 1 – Modelos con Textura.....	68
5.1.2 Comparativa 2 – Modelos con Textura.....	69
5.1.3 Comparativa 3 – Modelos 3D Sombreados.....	69
5.1.4 Comparativa 4 – Modelos 2.5D.....	70
5.1.5 Comparativa 5 – Modelos 2.5D.....	70

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1.</b> Información contenida en un modelo 3D de edificios. Fuente: (YANG et al., 2010) .....	3
<b>Figura 2.</b> Niveles de detalles (Level Of Detail – LOD). Fuente: (ESRI, 2021a) .....	3
<b>Figura 3.</b> Integración GIS+BIM. Fuente: (Sangkwan, 2020) .....	4
<b>Figura 4.</b> Visor de la Ciudad Berlín en 3D .....	5
<b>Figura 5.</b> Visor de la Ciudad Helsinki en 3D .....	5
<b>Figura 6.</b> Visor de plataforma Ciudad 3D en Buenos Aires .....	6
<b>Figura 7.</b> Visor de plataforma 3D para las ciudades de Suiza .....	6
<b>Figura 8.</b> Visor 3D del proyecto realizado en New York por la TUM .....	7
<b>Figura 9.</b> Visualizador de imágenes oblicuas para la ciudad de Vilnius .....	7
<b>Figura 10.</b> Comparación captura información LiDAR -izquierda- vs DIM(Fotogrametría) -derecha-. Fuente: (Mandlbürger et al., 2017).....	9
<b>Figura 11.</b> Productos estándar a partir de datos híbridos. Fuente: (Bacher, 2021).....	9
<b>Figura 12.</b> Contribución sensor híbrido. Fuente: (Bacher, 2021) .....	10
<b>Figura 13.</b> Delimitación de Área donde se generaron productos (polígono gris) y Zona de captura de datos (Línea punteada) .....	11
<b>Figura 14.</b> Sensor híbrido Leica CityMapper 2. ....	12
<b>Figura 15.</b> Diferencias entre CityMapper-2H (color verde) vs CityMapper-2S (color azul) vs CityMapper-2L (color amarillo). Fuente: (Leica, 2021) .....	12
<b>Figura 16.</b> Configuración de captura de imágenes. Fuente: Elaboración propia.....	13
<b>Figura 17.</b> Ejemplo de imagen capturada con cámara forward (delantera) en dirección de vuelo N-S y en dirección de vuelo S-N. Fuente: Elaboración propia .....	14
<b>Figura 18.</b> Ejemplo de imagen capturada con cámara left (izquierda) en dirección de vuelo N-S y en dirección de vuelo S-N. Fuente: Elaboración propia .....	14
<b>Figura 19.</b> Configuración plan de vuelo (líneas de pasada del avión). Fuente: Elaboración propia.....	15
<b>Figura 20.</b> Geometría de adquisición de una imagen. ....	16
<b>Figura 21.</b> Huella de las imágenes capturadas. A) Vista Norte (azul oscuro), B) Vista Este (verde), C) Vista Trasera (celeste), D) Vista Oeste (amarillo), E) Vista Nadiral (gris). Fuente: Elaboración propia.....	16
<b>Figura 22.</b> Imágenes capturadas con Citymapper2: A) Vista Norte, B) Vista Este, C) Vista Trasera, D) Vista Oeste, E) Vista Nadiral. Edificio Baluarte. Pamplona. Fuente: Elaboración propia .....	16
<b>Figura 23.</b> Área de estudio .....	17
<b>Figura 24.</b> Esquema de trabajo y productos generados en Metashape. Fuente: Elaboración propia.....	18
<b>Figura 25.</b> Alineación de las cámaras nadirales – Izquierda- vs Alineación de las cámaras oblicuas y nadirales -Derecha-. Fuente: Elaboración propia.....	20
<b>Figura 26.</b> Puntos de apoyo medidos.....	20

<b>Figura 27.</b> Parámetros de orientación absoluta estimados y error de los marcadores medidos.....	21
<b>Figura 28.</b> Nube de puntos densa .....	22
<b>Figura 29.</b> Malla 2.5D.....	23
<b>Figura 30.</b> Malla 3D, modelo de malla de alambre -izquierda- vs modelo de malla sólido -derecha- .....	23
<b>Figura 31.</b> Modelo de teselas 3D .....	23
<b>Figura 32.</b> Diferencias entre DEM vs DSM. Fuente: (ESRI, 2021a).....	24
<b>Figura 33.</b> Modelo digital de elevación .....	24
<b>Figura 34.</b> Ortofoto verdadera .....	25
<b>Figura 35.</b> Proceso en lote de las distintas pruebas ejecutadas .....	25
<b>Figura 36.</b> Esquema de trabajo Tracasa Instrumental.....	28
<b>Figura 37.</b> Visualización en ArcGISPro de edificio Baluarte restituído en 3D o a partir de las imágenes y una estación fotogramétrica .....	29
<b>Figura 38.</b> Clasificación de nube de puntos en TerraScan en función de los planos de referencia (Plano 1, Plano 2, Plano3) .....	29
<b>Figura 39.</b> Model Builder elaborado para automatizar cálculo de distancia para cada nube de puntos.....	30
<b>Figura 40.</b> Comparaciones para establecer entre nubes de puntos.....	30
<b>Figura 41.</b> Evaluación de RMSE en Z entre DSMs.....	30
<b>Figura 42.</b> Distribución de 4 puntos de apoyo distribuidos en la zona de estudio .....	31
<b>Figura 43.</b> Comparaciones establecidas con los Modelos digitales de superficies .....	31
<b>Figura 44.</b> Comparaciones establecidas entre malla 2.5D y malla 3D .....	32
<b>Figura 45.</b> Comparaciones entre ortofotos .....	33
<b>Figura 46.</b> Distribución puntos de apoyo .....	34
<b>Figura 47.</b> Ubicación de elementos medidos en campo .....	34
<b>Figura 48.</b> Ubicación de tejados digitalizados en las distintas OV .....	35
<b>Figura 49.</b> Resumen de análisis a realizar .....	35
<b>Figura 50.</b> Perfil 1 entre Nube Metashape (N) – Color verde- y Nube nFrames (N+LiDAR) –Color azul .....	37
<b>Figura 51.</b> Perfil 2 entre Nube Metashape N – Color verde - y Nube nFrames (N+LiDAR) –Color azul - .....	37
<b>Figura 52.</b> Perfil 3 entre Nube Metashape N – Color verde - y Nube nFrames (N+LiDAR) –Color azul – .....	38
<b>Figura 53.</b> Perfil 3 entre Nube Metashape N – Color verde - y Nube nFrames (N+LiDAR) –Color azul – .....	38
<b>Figura 54.</b> Perfil 4 entre Nube Metashape (N+O) – Color marrón- y Nube nFrames (N+O+LiDAR) –Color azul - .....	38
<b>Figura 55.</b> Perfil 5 entre Nube Metashape (N+O) – Color marrón- y Nube nFrames (N+O+LiDAR) –Color azul - .....	38



<b>Figura 56.</b> Perfil 6 entre Nube Metashape (N+O) – Color marrón- y Nube nFrames (N+O+LiDAR) –Color azul – .....	39
<b>Figura 57.</b> Distancia de nube Metashape (N+O) a nube de referencia nFrames (N+O+LiDAR) .....	39
<b>Figura 58.</b> Cálculo de distancia de nube Metashape (N+O) a nube de referencia nFrames (N+O+LiDAR). .....	40
<b>Figura 59.</b> Diferencias de altura observados para el raster $DSM_{LiDAR} - DSM_{P1}$ .....	41
<b>Figura 60.</b> Histograma de raster de diferencia entre $DSM_{LiDAR}$ y $DSM_{P1}$ .....	41
<b>Figura 61.</b> Histograma de diferencia entre $DSM_{LiDAR}$ y $DSM_{P3}$ .....	41
<b>Figura 62.</b> Perfil 1 – izquierda - y Perfil 2 - derecha- .....	42
<b>Figura 63.</b> Comparativa de perfil 1 del Edificio Baluarte entre $DSM_{LiDAR}$ , $DSM_{P1}$ y $DSM_{P3}$ .....	42
<b>Figura 64.</b> Comparativa de perfil 2 del Edificio Baluarte entre $DSM_{LiDAR}$ , $DSM_{P1}$ y $DSM_{P3}$ .....	43
<b>Figura 65.</b> Diferencias de altura observados para el raster $DSM_{LiDAR} - DSMP3$ .....	43
<b>Figura 66.</b> Histograma de diferencia entre $DSM_{nFrames} (N + LiDAR)$ y $DSM_{nFrames} (N)$ .....	44
<b>Figura 67.</b> Ejemplo de diferencias de altura observados para el raster $DSM_{nFrames} (N + LiDAR)$ y $DSM_{nFrames} (N)$ en lugares con sombra, con presencia de vegetación o en bordes de edificación .....	44
<b>Figura 68.</b> Ejemplo de diferencias de altura observados para el raster $DSM_{nFrames} (N + LiDAR)$ y $DSM_{nFrames} (N)$ en lugares como patios internos de edificios, bordes de edificación y de vegetación. ....	44
<b>Figura 69.</b> Comparación visual 1 entre Ortofotos Verdaderas (O.V).....	45
<b>Figura 70.</b> Comparación visual 2 entre Ortofotos Verdaderas (O.V).....	46
<b>Figura 71.</b> Comparación visual 3 entre Ortofotos Verdaderas (O.V).....	46
<b>Figura 72.</b> Resultados comparativa 1 .....	48
<b>Figura 73.</b> Resultados comparativa 2.....	49
<b>Figura 74.</b> Resultados comparativa 3.....	50
<b>Figura 75.</b> Resultados comparativa 4.....	51
<b>Figura 76.</b> Reseña Punto N1a.....	58
<b>Figura 77.</b> Reseña Punto N1b.....	58
<b>Figura 78.</b> Reseña Punto N9a.....	59
<b>Figura 79.</b> Reseña Punto N9b.....	59
<b>Figura 80.</b> Reseña Punto T8a .....	60
<b>Figura 81.</b> Reseña Punto T8b .....	61
<b>Figura 82.</b> Reseña Punto 1 y 2.....	62
<b>Figura 83.</b> Distancia de nube Metashape (N) a nube de referencia nFrames (N +LiDAR).....	62
<b>Figura 84.</b> Cálculo de distancia de nube Metashape (N) a nube de referencia nFrames (N+ LiDAR). .....	63

<b>Figura 85.</b> DSM LIDAR .....	63
<b>Figura 86.</b> DSM P1 Metashape .....	64
<b>Figura 87.</b> DSM P3 Metashape .....	64
<b>Figura 88.</b> Raster de diferencia entre DSMLiDAR y DSMP1 .....	64
<b>Figura 89.</b> Histograma de diferencia entre DSM <sub>LiDAR</sub> y DSM <sub>P1</sub> .....	65
<b>Figura 90.</b> Raster de diferencia entre DSMLiDAR y DSMP3 .....	65
<b>Figura 91.</b> Histograma de diferencia entre DSM <sub>LiDAR</sub> y DSM <sub>P1</sub> .....	65
<b>Figura 92.</b> Raster de diferencia entre DSMnFrames (N + LiDAR) y DSMnFrames (N)66	
<b>Figura 93.</b> Comparación visual 4 entre Ortofotos Verdaderas (O.V).....	66
<b>Figura 94.</b> Comparación visual 5 entre Ortofotos Verdaderas (O.V).....	67
<b>Figura 95.</b> Comparación visual 6 entre Ortofotos Verdaderas (O.V).....	68
<b>Figura 96.</b> Comparación 1 entre Modelos con Textura.....	68
<b>Figura 97.</b> Comparación 2 entre Modelos con Textura.....	69
<b>Figura 98.</b> Comparativa 3 entre Modelos 3D Sombreados .....	69
<b>Figura 99.</b> Comparativa 4 entre Modelos 2.5D .....	70
<b>Figura 100.</b> Comparativa 5 entre Modelos 2.5D .....	70
<b>Figura 101.</b> Resultados comparativa 5.....	70

## **ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Diferencia entre tipo de cámara y dirección de vistas .....	14
<b>Tabla 2.</b> Programas utilizados .....	17
<b>Tabla 3.</b> Parámetros de calibración de la cámara nadiral y oblicua .....	19
<b>Tabla 4.</b> Pruebas realizadas en Metashape.....	27
<b>Tabla 5.</b> Coordenadas X, Y, Z (ETRS-89 y alturas elipsoidales) de los GCPs.....	31
<b>Tabla 6.</b> Posibles errores para detectar.....	33
<b>Tabla 7.</b> Coordenadas Puntos de apoyo.....	34
<b>Tabla 8.</b> Características principales de los resultados obtenidos con Metashape en las distintas pruebas.....	36
<b>Tabla 9.</b> Distancia a plano horizontal N <sup>o</sup> . 1 .....	36
<b>Tabla 10.</b> Distancia a plano horizontal N <sup>o</sup> . 2 .....	36
<b>Tabla 11.</b> Distancia a plano vertical N <sup>o</sup> . 3 .....	36
<b>Tabla 12.</b> Medición de coordenada Z en los DSMs generados y RMSE de medición .	40
<b>Tabla 13.</b> Cálculo de distancia entre Puntos de apoyo en las distintas OV .....	47
<b>Tabla 14.</b> Error de medida [m] en cada OV .....	47
<b>Tabla 15.</b> Comparación de medidas en las distintas OV.....	47
<b>Tabla 16.</b> Error de medida [m] en cada OV .....	47
<b>Tabla 17.</b> Superficie de tejados en distintas OV .....	47
<b>Tabla 18.</b> Error de medida [m] en cada OV .....	47



## **1. Preámbulo**

El creciente avance de la tecnología en técnicas y algoritmos para el procesamiento de imágenes, así como en el desarrollo de nuevos sensores aéreos, incentivó a que tanto instituciones públicas como privadas consideren indispensable obtener información aérea precisa para su uso y explotación principalmente en entornos urbanos.

Desde hace algunos años, tanto la tecnología LiDAR como la fotogrametría digital se convirtieron en técnicas de vanguardia para la obtención de productos geoespaciales en formato 2.5D y en 3D. Hoy en día, la integración de datos de múltiples sensores es una nueva tendencia en aplicaciones para el mapeo aéreo 3D, dado que así lo demuestra el rápido crecimiento del mercado de sistemas de mapeo híbrido. En particular, la compañía Leica Geosystems introdujo un nuevo concepto para la adquisición de información geoespacial para las áreas urbanas conocido como “Leica CityMapper”. Un sistema que permite la adquisición simultánea de imágenes nadirales y oblicuas, en conjunto con una nube de puntos (LiDAR) georreferenciada y con información relacionada a la intensidad de retorno de cada punto (Pepe et al., 2019; Toschi et al., 2018).

En este marco, el desarrollo del presente trabajo viene motivado por el estudio realizado por la autora durante las prácticas externas en la empresa Tracasa Instrumental. En dichas prácticas se abordó la utilización de la información recopilada en un vuelo realizado con el sensor CityMapper-2 en la Ciudad de Pamplona durante el año 2020, con el fin de explotar las potencialidades para la generación y evaluación de productos geoespaciales.

## 2. Introducción

### 2.1 Los datos espaciales como fuente para las ciudades 3D

Los datos espaciales en dos dimensiones (2D) y en tres dimensiones (3D) representan un factor clave para comprender con la mayor veracidad posible el estado actual de las ciudades y simular posibles escenarios de actuación ante determinadas situaciones (Jovanović et al., 2020). El rápido crecimiento de la población conlleva a que las áreas urbanas se expandan cada vez con mayor frecuencia y rapidez, por ello resulta imprescindible contar con información geográfica actualizada y de calidad.

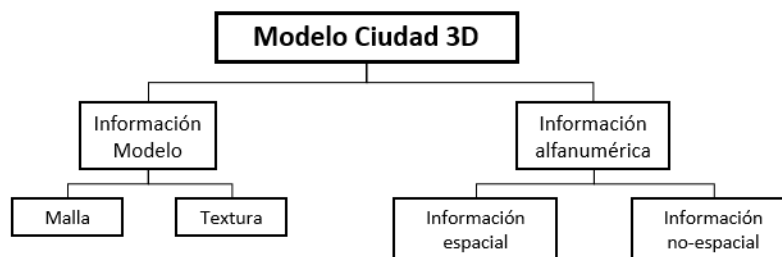
Las ortofotos a gran escala proporcionan, de manera rápida, una fuente importante de información para el seguimiento y actualización de cartografía en los dinámicos entornos de crecimiento que tiene lugar en grandes áreas pobladas (Mihajlovic, 2016). La representación de datos en 2D continúa siendo útil para diversos campos de aplicación, pero estos pueden carecer de detalles necesarios para resolver los problemas complejos relacionados con la planificación, diseño e ingeniería de infraestructura. De hecho, una representación en 2D de la infraestructura podría provocar una interpretación errónea del entorno físico (Zambuni & Benoit, 2013).

Por lo tanto, la tercera dimensión se está convirtiendo en un elemento decisivo para la gestión urbanística. El uso del GIS 3D ofrece un sistema interactivo al tiempo que proporciona una de las mejores interpretaciones visuales de datos que respaldan los procesos de planificación y decisión para urbanistas. Como resultado, el modelo GIS en 3D expresa las características del terreno de una manera intuitiva que mejora la gestión y análisis de cualquier proyecto gracias a la visualización 3D (Al-Rawabdeh et al., 2014). En las últimas décadas, la modelización 3D llevada a cabo para las áreas urbanas aparentaba tener un predominante uso meramente visual (Biljecki et al., 2015), sin embargo, el avance de la tecnología y la aparición de nuevas técnicas y metodologías para reconstruir un escenario tridimensional tornaron a las ciudades 3D indispensables y necesarias para la gestión eficiente y sostenible de las mismas (Toschi et al., 2017).

Los modelos de ciudades en 3D pueden ayudar a los planificadores, desarrolladores urbanos, funcionarios gubernamentales y otros participantes a comprender la visión realista de edificios, árboles, carreteras, terrenos, infraestructuras y entornos vecinos existentes. El análisis del flujo de tráfico, los patrones de peatones, la zonificación, el uso del suelo y las restricciones especiales pueden permitir a los planificadores hacer planes más útiles, sostenibles y con una visión de futuro para el desarrollo de las ciudades. También son muy útiles en diseño urbano, análisis de ubicación de sitios, planificación de instalaciones de emergencia, planificación de nuevas ciudades, gestión del crecimiento urbano y regulación de la expansión urbana (Chen, 2011).

Por lo tanto, los modelos urbanos 3D representan una importante fuente de información geoespacial para soportar varias aplicaciones para la gestión de "ciudades inteligentes", como por ejemplo la evaluación ambiental y energética, catastro 3D, modelización de ruido y contaminación, y también para la gestión de desastres (Toschi et al., 2017).

Para la mayoría de las aplicaciones de modelos de ciudades en 3D, no solo los aspectos relativos a la geometría son relevantes, sino también aquellos relacionados con la semántica de los objetos (Gröger & Plümer, 2012). Un modelo semántico de ciudad en 3D se refiere a un modelo que contiene un conocimiento sobre una situación urbana determinada a partir de la integración geométrica, con los atributos y relaciones topológicas, espaciales que se derivan a partir de su vinculación (Billen et al., 2014).



**Figura 1.** Información contenida en un modelo 3D de edificios. Fuente: (YANG et al., 2010)

En la actualidad, no es concebible gestionar un territorio, un entorno urbano o una infraestructura, sin contemplar la unificación, vinculación e integración de datos procedentes de distintos modelos para simular y conocer qué pasaría, dónde y cómo (ESRI, 2021b). Es así, que la planificación y la gestión urbana requiere y necesita la integración de información contenida en diferentes modelos para mejorar y ayudar a la toma de decisiones. En este contexto, el concepto de gemelo digital se torna relevante. Un gemelo digital es una representación digital realista de objetos físicos, procesos y de sistemas de entornos naturales o construidos del mundo real. Añaden valor tras permitir mejorar los conocimientos que respaldan la toma de decisiones. El gemelo digital debe representar la realidad física en un nivel de precisión adecuado a su propósito. Su grado de realismo dependerá de tres elementos esenciales que son la calidad de los datos utilizado para su creación, la fidelidad de los algoritmos para representar el modelo digital, y la calidad de visualización del gemelo (Bolton & Enzer, 2018). Cuanto más se enriquece y se vincula el modelo de una ciudad con información relacionada, más funcional, útil y fundamental se vuelve su gemelo digital.

Con el fin de obtener información interoperable, el *Open Geospatial Consortium* (OGC) en 2008 definió un estándar oficial denominado CityGML. El mismo es un modelo de datos abiertos y un formato basado en XML para el almacenamiento e intercambio de modelos de ciudades virtuales en 3D, y su objetivo es alcanzar una definición común de las entidades, atributos y relaciones básicas de un modelo de ciudad en 3D. La información se puede almacenar en cinco niveles de detalle (Level Of Detail - LOD) consecutivos, donde los objetos y sus relaciones se vuelven más detallados conforme aumenta el LOD (CityGML | OGC, 2021). Concretamente estos niveles son:



- **LOD 0:** Modelo digital del terreno (MDT 2.5D), que está compuesto de mallas reticuladas, masas de puntos o líneas de ruptura. Idóneo para realizar modelos a escalas globales o generales
- **LOD 1:** Representa un modelo a escala urbana en la que los edificios son representados por bloques. Este nivel genera datos del perfil urbano propuesto y su impacto en el entorno inmediato.
- **LOD 2:** Representa un modelo a escala urbana donde los edificios pueden diferenciar las superficies de paredes verticales de los tejados.
- **LOD 3:** Representa detalles arquitectónicos como ventanas, puertas, columnas para definir el exterior de los edificios.
- **LOD 4:** Completa el nivel anterior añadiendo al modelo detalles del interior del edificio como habitaciones, puertas interiores, escaleras y mobiliario.

**Figura 2.** Niveles de detalles (Level Of Detail – LOD). Fuente: (ESRI, 2021a)

Todo esto se relaciona con el concepto *Building Information Modeling* (BIM), que es una metodología de trabajo colaborativa para la creación y gestión de un proyecto de construcción. Es una evolución de los sistemas de diseño tradicionales basados en el plano, ya que incorpora información geométrica (3D), de tiempos (4D), de costes (5D), ambiental (6D) y de mantenimiento (7D) (ESRI, 2021b).

Los modelos BIM requieren una interacción cada vez más profunda con los datos geográficos y las herramientas GIS y dentro de los proyectos GIS la metodología BIM encaja perfectamente, ya que los modelos BIM incorporan gran cantidad de información que un sistema GIS puede gestionar a la perfección. La actual transformación digital dentro del sector relativo a la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC) buscan y persiguen la generación de un gemelo digital que tenga en cuenta todo el ciclo de vida de los proyectos de edificación e infraestructuras es decir desde la planificación, diseño, construcción hasta la operación y mantenimiento (ESRI, 2021b).

Tanto BIM como GIS proporcionan herramientas eficientes para documentar, editar, administrar y visualizar información espacial y no espacial, y son capaces de representar el mundo real y modelar datos a diferentes escalas y niveles de detalle. BIM se centra en el entorno construido para proyectos de escala local, y se inicia durante la fase de adquisición del ciclo de vida de la instalación. GIS tiene un enfoque mucho más amplio dado que puede organizar múltiples tipos de información e integrar información espacial y no espacial. Por otro lado, en BIM se puede modelar geometría 3D muy sofisticada, mientras que en GIS se admite una geometría menos sofisticada. BIM ofrece integración básica de bases de datos, mientras que GIS se puede integrar completamente con bases de datos relacionales. Los sistemas de coordenadas locales se utilizan generalmente en BIM, mientras que los GIS utilizan sistemas de coordenadas regionales, nacionales o globales (Ellul et al., 2018).

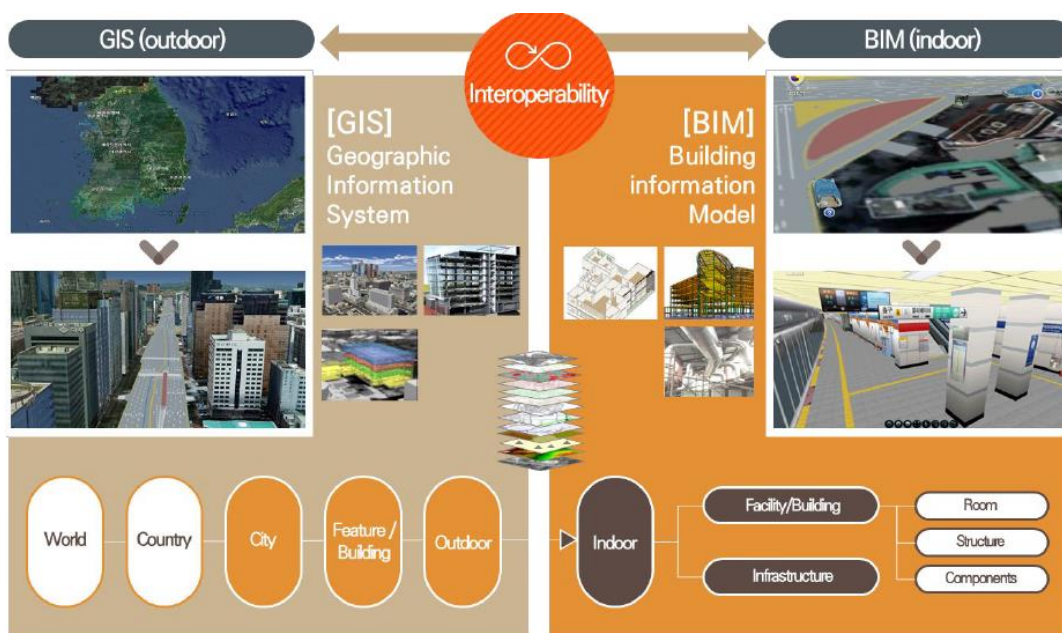


Figura 3. Integración GIS+BIM. Fuente: (Sangkwan, 2020)

Por lo tanto, contar con información cartográfica de calidad, actualizada e interoperable se considera fundamental para el desarrollo de una región (construcción de infraestructuras), su desarrollo urbanístico, la aplicación de políticas medioambientales y la monitorización del cumplimiento de las políticas adoptadas.

La integración de datos provenientes de diversos tipos de fuentes es un tema fundamental para la obtención de modelos de ciudad completos, actualizados y



detallados, que permitan analizar en profundidad la ciudad, visualizarla y dar soporte a cualquier tipo de aplicación.

### 2.1.1 Estado de situación en otras ciudades del mundo

Se presentan a continuación algunos ejemplos del estado de desarrollo de Ciudades 3D en diferentes ciudades del mundo.

**Berlín, Alemania:** El modelo de ciudad en 3D es un proyecto del Departamento de Economía, Tecnología e Investigación del Senado y Socio de Berlín para Negocios y Tecnología. Alrededor de 550.000 edificios que cubren 890 km<sup>2</sup> de espacio urbano fueron fotografiados desde el aire y medidos para crear el modelo. El modelo de datos abiertos permite a los usuarios consultar los datos CityGML originales para todo el modelo de ciudad, así como secciones de la ciudad, y utilizarlos para sus propios fines. Los edificios individuales, por ejemplo, se pueden seleccionar y descargar a través de una interfaz de servicio en una variedad de formatos de datos 3D (VirtualCitySystems, 2021b).

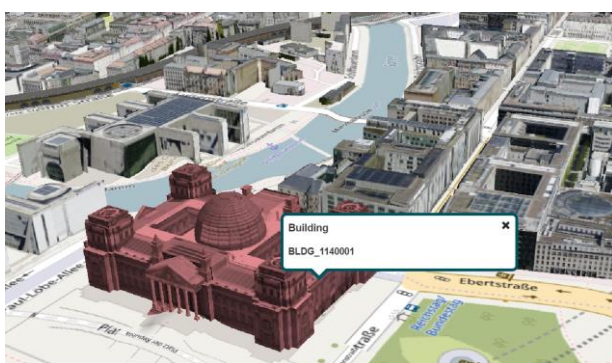


Figura 4. Visor de la Ciudad Berlín en 3D

**Helsinki, Finlandia:** Hay dos modelos de ciudad de Helsinki en 3D disponibles: un modelo semántico de información de la ciudad (VirtualCitySystems, 2021c) y un modelo de malla de realidad visualmente de alta calidad (VirtualCitySystems, 2021a).

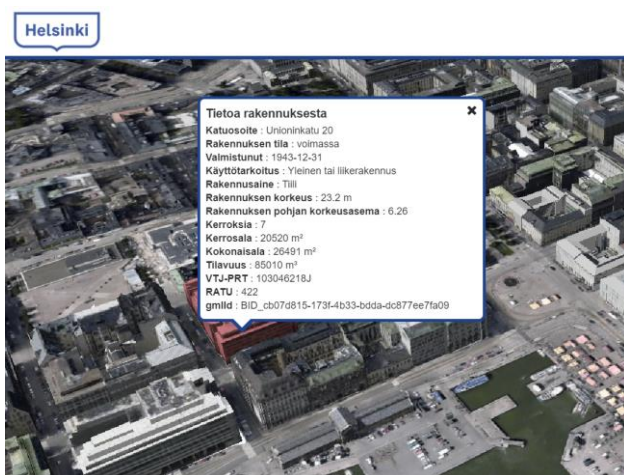


Figura 5. Visor de la Ciudad Helsinki en 3D

**Buenos Aires, República Argentina:** Cuenta con una plataforma llamada CIUDAD 3D, que muestra de manera precisa la capacidad constructiva, el derecho para el desarrollo urbano y el hábitat sustentable (plusvalía urbana) de un proyecto y alturas máximas para construir en cada barrio de la ciudad (GobiernoBA, 2021). Esta iniciativa sienta sus bases en los datos abiertos generados, agrupados y publicados por el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. Los mismos se complementaron con información obtenida de un relevamiento fotográfico aéreo que permitió obtener imágenes digitales en alta

resolución de la totalidad del conjunto urbano. Esas imágenes han sido sometidas a un procesamiento fotogramétrico, permitiendo determinar las alturas de los edificios y, por lo tanto, las características morfológicas de la ciudad, vectorizando la información del tejido de Buenos Aires y arrojando información acerca de sus diferentes tipologías edilicias. La información se encuentra licenciada bajo la Atribución 2.5 Argentina de Creative Commons, lo cual significa que cualquier persona puede utilizar, compartir, redistribuir y adaptar el contenido.



Figura 6. Visor de plataforma Ciudad 3D en Buenos Aires

**Suiza:** El modelo digital para el país de Suiza consta de aprox. 70 millones de objetos 3D. Además de cada edificio en Suiza y el Principado de Liechtenstein, los puentes, teleféricos, bosques, árboles individuales y nombres geográficos también están representados en 3D. Las vistas 3D del visor de mapas suizo también se pueden integrar en otros portales web (Geo.admin.ch, 2021).

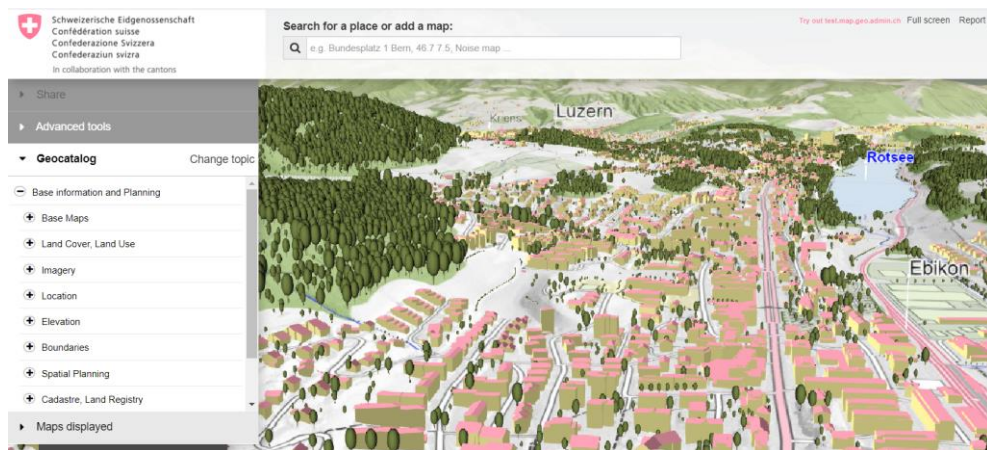
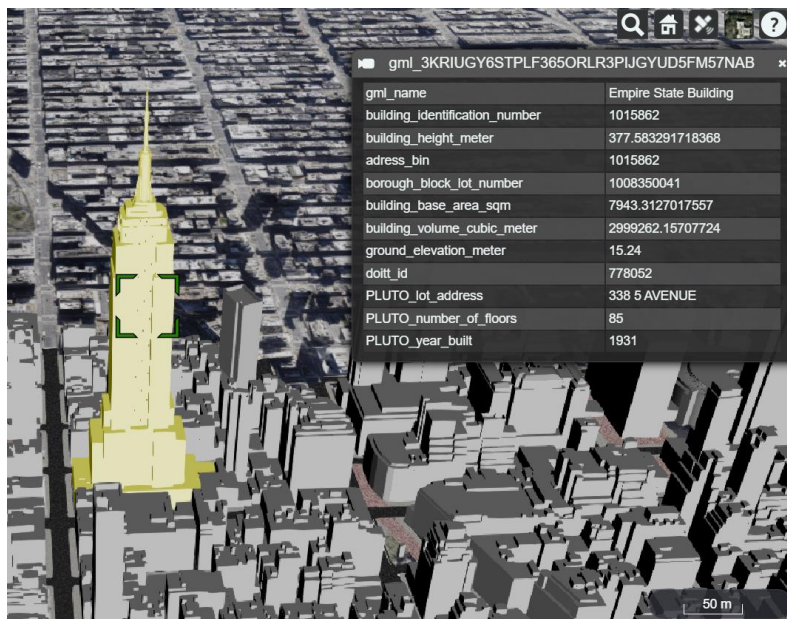


Figura 7. Visor de plataforma 3D para las ciudades de Suiza

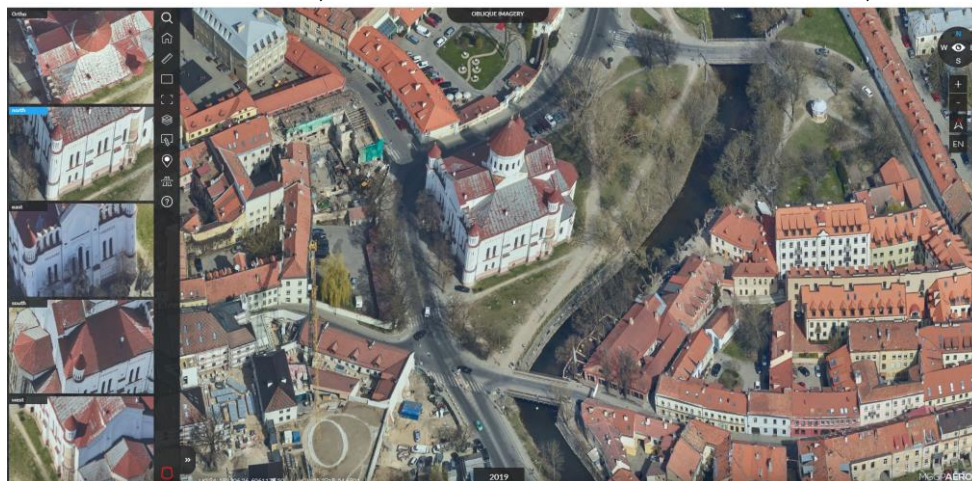
**New York, EEUU:** El proyecto se llevó a cabo en el contexto de las tesis de maestría de Barbara Burger, Berit Cantzler y Christof Beil dentro del programa de maestría Geodesia y Geoinformación en la Universidad Técnica de Munich (TUM). El trabajo de Burger y Cantzler proporcionó la base del modelo de ciudad, que comprende todos los edificios, parcelas de tierra, carreteras, parques, el modelo de terreno digital y cuerpos de agua de la Ciudad de Nueva York en LOD 1. Sobre esta base, Beil desarrolló aún más el modelo de ciudad, centrándose en la representación de objetos del espacio de la calle, como calzadas, aceras o plazas, así como en nuevos modelos de construcción en LOD 2 (TUM, 2021).



**Figura 8.** Visor 3D del proyecto realizado en New York por la TUM

Este modelo semántico digital de ciudad en 3D se generó íntegramente a partir de datos abiertos generados de acuerdo con el estándar internacional CityGML del OGC y se encuentra disponible para descarga.

**Vilnius, Lituania:** Un visualizador interesante en particular (MGGPAERO, 2021) ofrece la oportunidad de visualizar y probar la configuración de observación de distintas tomas de imágenes oblicuas, también cuenta con otras opciones y herramientas tales como observar a la ciudad en modelo 3D, establecer comparaciones entre dos tipos de vista, realizar mediciones, establecer conexiones wms, entre otros.



**Figura 9.** Visualizador de imágenes oblicuas para la ciudad de Vilnius

## 2.2 Fotogrametría y LiDAR como fuentes de información

El desarrollo de la tecnología láser en conjunto con los sistemas de navegación global (GNSS) y las unidades de medición inercial (IMU) de alto rendimiento permitió la eclosión del LiDAR (Light Detection And Ranging). A día de hoy esta tecnología es uno de los pilares en la reconstrucción de superficies tridimensionales en entornos urbanos junto con la reconstrucción 3D por fotogrametría y técnicas de correspondencia de imágenes (Toschi et al., 2017). El LiDAR y la fotogrametría se conciben como técnicas para el mapeo topográfico 3D en áreas extendidas. Por más que ambas se basen en

diferentes principios de reconstrucción (medición polar frente a triangulación de rayos), tienen el mismo propósito, la reconstrucción en 3D de la superficie de la Tierra y los objetos naturales e infraestructuras presentes sobre esta (Glira et al., 2019).

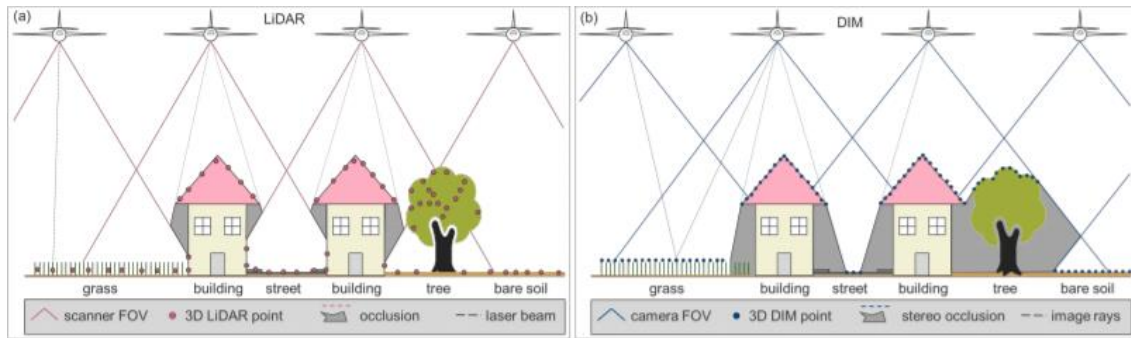
El LiDAR se concibe como un sensor activo que es capaz de capturar información independientemente de las condiciones de luz y proporcionar una alta fiabilidad y precisión en altura. Además, estos sensores, gracias a su capacidad de detectar retornos múltiples, pueden penetrar el dosel de la vegetación y también mejorar su capacidad para determinar el suelo. Por lo tanto, es una tecnología clave para obtener nubes de puntos y modelos digitales del terreno a una alta resolución (Gehrke et al., 2008; Toschi et al., 2018).

La fotogrametría, según la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), se define como el arte, ciencia y tecnología capaz de obtener información fiable de objetos físicos o del medio ambiente, a través de procesos de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos. Los conceptos fundamentales de fotogrametría se introdujeron por primera vez en Europa a finales de siglo XIX y hasta mediados de la década de 1990 la fotogrametría se consideró el método más común para generar y representar modelos 3D precisos y detallados del terreno (Abdullah & Seppi, 2021). El objetivo principal es la reconstrucción de un espacio tridimensional, denominado espacio objeto, a partir de imágenes bidimensionales, que constituyen el espacio imagen. Por lo tanto, si se dispone de dos (o más) fotografías del mismo objeto tomadas desde puntos de vista significativamente diferentes, se puede obtener de forma sencilla coordenadas tridimensionales de cualquier punto del objeto presente en las dos imágenes (Hernández Lopez, 2006). Teóricamente, las imágenes ópticas con su alta resolución espacial permiten la extracción de nubes de puntos 3D con una resolución geométrica precisa y fiable (Toschi et al., 2017).

Los avances alcanzados en fotogrametría y en la comunidad de la visión por computador, particularmente aquellos relacionados con el desarrollo de innovadores algoritmos basados en *Dense Image Matching* (DIM), han proporcionado la oportunidad para reconstruir escenas en 3D a partir de imágenes y presentarse como una fuente alternativa para la generación de modelos digitales de elevación de alta resolución (Toschi et al., 2018). La técnica DIM, permite establecer correspondencias píxel a píxel entre pares de imágenes (coincidencia estéreo densa) o desde vistas múltiples para poder reconstruir la escena 3D (Nocerino et al., 2020). La calidad del modelo generado, a partir de la nube de puntos obtenidos por DIM, mejora cuando se utilizan imágenes nadirales en conjunto con imágenes oblicuas especialmente en entornos urbanos (Toschi et al., 2018; Zhang et al., 2018).

Estos avances han contribuido a que técnicas como *Structure-from-Motion* (SfM) y *Multi View Stereo* (MVS) se tornen exitosas por su capacidad para procesar conjuntos de datos con numerosas imágenes y entregar resultados 3D (tanto dispersos como densos) con un nivel de detalle y precisión variable según las aplicaciones (Remondino et al., 2017). SfM es un procedimiento para estimar simultáneamente la geometría (estructura) de ambas escenas 2D y las posiciones de las cámaras (movimiento) (Ullman, 1979), mientras que el enfoque MVS es utilizado para incrementar la densidad de puntos a partir de la nube de puntos generada en el proceso SfM (Skarlatos & Kiparissi, 2012).

Además, el crecimiento del sector de cámaras aéreas oblicuas está demostrando su potencial de detalle para la reconstrucción de fachadas y extracción de huellas de edificios (Haala & Rothemel, 2015), así como presentarse como una fuente alternativa para la reconstrucción de complejos escenarios urbanos (Haala & Cavegn, 2016).



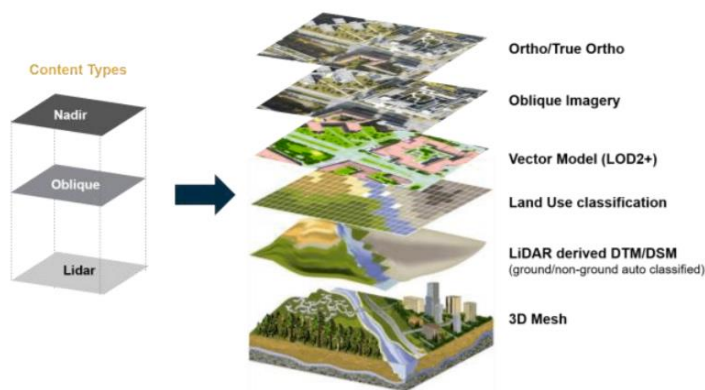
**Figura 10.** Comparación captura información LIDAR -izquierda- vs DIM(Fotogrametría) -derecha-.  
 Fuente: (Mandlburger et al., 2017)

Ambos sistemas tienen sus ventajas y desventajas, las nubes de puntos generadas a partir de imágenes pueden resultar poco fiables para algunas áreas, ya que, por ejemplo, si existen oclusiones o mucha sombra, por más que las imágenes se adquieran con un alto grado de solape y se utilicen técnicas DIM la extracción de puntos será poco fiable (Lemmens, 2020). El LiDAR, por el otro lado, genera solo nubes de puntos 3D sin ninguna relación entre los puntos individuales y, resultando a menudo difíciles de clasificar e interpretar.

Más allá de las diferencias existentes entre estos dos grupos, los mismos permiten la obtención de productos típicos derivados de los datos del sensor, a partir de las imágenes generalmente se generan grandes mosaicos de ortofotos y a partir de datos LiDAR normalmente se obtienen DTM / DSM (Bacher, 2021).

### 2.3 Sensores híbridos

La necesidad de obtener información aérea precisa para la planificación y gestión de las ciudades en entornos dinámicos ha motivado la irrupción y el desarrollo de un sistema que permita, a partir de un mismo vuelo, generar información geoespacial detallada como ortofotos, nube densa de puntos, mallas, modelos 3D e inclusive gemelos digitales (Leica, 2021).



**Figura 11.** Productos estándar a partir de datos híbridos. Fuente: (Bacher, 2021)

Ante esta perspectiva, en 2016 se consolidó en el mercado el primer sensor híbrido aéreo conocido como Leica CityMapper, siendo el mismo capaz de adquirir datos de manera simultánea, desde la misma plataforma, combinando múltiples sensores y utilizando el mismo sistema GNSS/IMU. En particular, la combinación de LiDAR y sistemas multicámaras (de visión nadiral y oblicuas) en la misma plataforma aérea, están brindando nuevas oportunidades para la elaboración de la cartografía y mapeo de áreas urbanas, ofreciendo una mejor calidad de productos geoespaciales (Toschi et al., 2018).

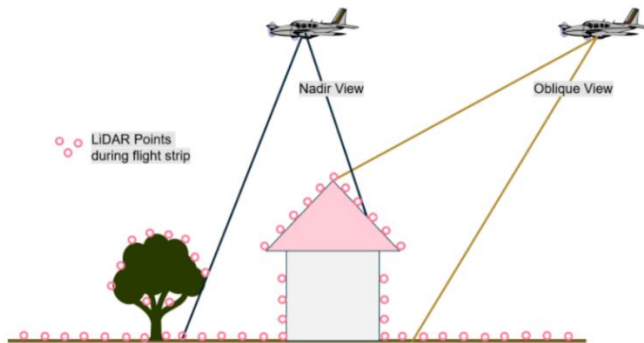


Figura 12. Contribución sensor híbrido. Fuente: (Bacher, 2021)

Bajo este contexto, el presente trabajo de investigación pretende responder a la pregunta de ¿es posible mejorar la calidad y precisión de los productos que se generen en entornos urbanos a partir de la combinación de ambas fuentes de información? Es así que, para ello, se analizará la información capturada con el sensor híbrido Leica CityMapper-2 y se contrastará qué productos se benefician del uso de ambas fuentes. Se intentará determinar las debilidades de cada fuente de información y evaluar si a partir de la sinergia entre ellas, los productos resultantes presentan mayor calidad y confiabilidad.

## 2.4 Objetivos

El objetivo general del presente trabajo consiste en evaluar el potencial de los datos capturados con el sensor híbrido CityMapper-2 para la generación de diferentes productos geoespaciales que permitan, a partir de la utilización de imágenes e información LiDAR, la caracterización del espacio urbano de manera bidimensional y tridimensional en un sector de la ciudad de Pamplona.

Para alcanzarlo, se persiguen los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar y describir las principales características del sensor CityMapper-2 sobre el área de vuelo;
- Desarrollar distintas metodologías para la obtención de nubes de puntos, malla 3D, DEM y ortofotos contemplando variaciones en las fuentes de información y parámetros de entrada que se empleen dentro del software fotogramétrico Metashape;
- Definir y evaluar los mejores resultados obtenidos para cada producto generado a partir de valoraciones cuantitativas y visuales, para intentar determinar el grado de aporte de cada fuente de información considerada en el procesamiento.
- Comparar los resultados obtenidos con productos de referencia generados por Tracasa Instrumental con el software nFrames.
- Evaluar si la integración de datos LiDAR en conjunto con imágenes aéreas es beneficiosa o no para el mejor aprovechamiento de cada producto.

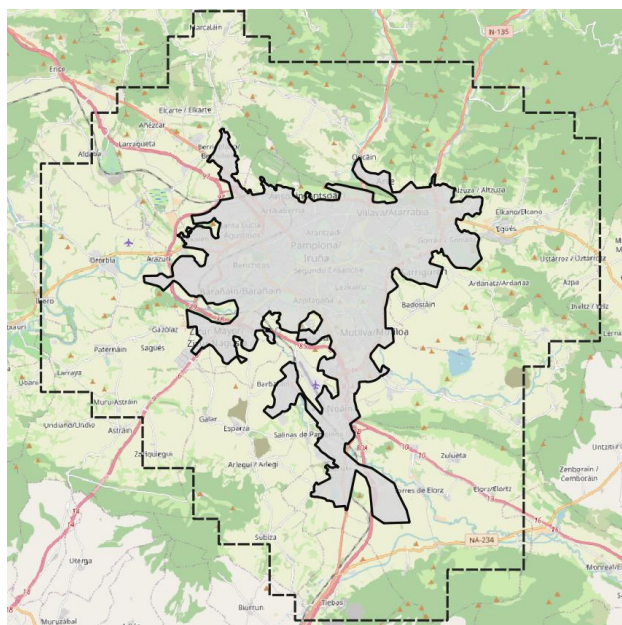
### 3. Materiales y métodos

En este apartado se describen las características más importantes de los datos con los que se trabaja y se mencionan las especificaciones principales del software y hardware utilizado para el soporte de los análisis realizados. Además, se delimita la zona de estudio, y se detalla la metodología empleada para generar los productos alcanzados, así como la comparación que se establecerá para definir la calidad de representación en función de las fuentes de información utilizadas.

#### 3.1 Captura de datos

El Ayuntamiento de Pamplona necesita para la gestión diaria de la ciudad una cartografía urbana de precisión en formato GIS que le permita afrontar los retos actuales de movilidad, smart cities, catastro, desde una mirada más integral y dinámica. Para ello se debe partir del aprovechamiento de nuevas tecnologías disponibles integrando información actualizada y de calidad, dado que actualmente se cuenta con una cartografía del casco urbano de Pamplona de más de diez años de antigüedad en formato CAD la cual no permite una explotación adecuada en los GIS. Por ello, en virtud del convenio realizado en Junio 2021 entre el Gobierno de Navarra y el Ayuntamiento de Pamplona, se contrata a Tracasa Instrumental para la ejecución de un proyecto de 3 años de duración y con miras a la producción de una ortofoto verdadera, generación de DEMs y de una cartografía de detalle escala 1/500 con modelo de datos BTU (Base Topográfica Urbana).

El 3 y 4 de septiembre 2020, Tracasa Instrumental contrata por encargo de la Dirección General de Obras Públicas e Infraestructuras del Gobierno de Navarra la ejecución de un vuelo en donde se capturaron datos LiDAR e imágenes fotogramétricas con el sensor híbrido CityMapper-2 de Leica Geosystems para la Comarca de Pamplona. Los principales productos que se generaron y publicaron en el portal de IDENA fueron una ortofoto verdadera con una resolución de 8cm y DTMs/DSMs con un paso de malla de 12.5cm.



**Figura 13.** Delimitación de Área donde se generaron productos (polígono gris) y Zona de captura de datos (Línea punteada)

CityMapper se comercializó en 2016 y es el primer ejemplo comercial a nivel mundial de solución de mapeo híbrido que integra en un único sistema imágenes oblicuas y

nadirales, así como un sensor LiDAR. La nueva versión mejorada es CityMapper-2 que se lanzó al mercado en 2020.

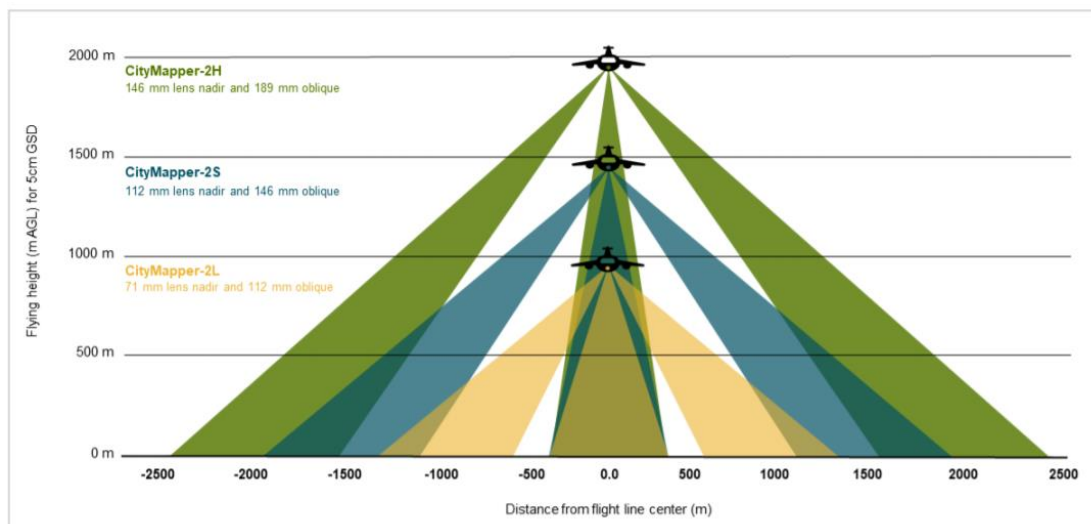


**Figura 14.** Sensor híbrido Leica CityMapper 2.

Vista superior sensor–izquierda-, Vista inferior sensor –derecha-. Fuente: (Leica, 2021)

Para satisfacer los requisitos y condiciones de altura de vuelo para el plan de vuelo a desarrollar, el sensor permite tres configuraciones para las distancias focales de las cámaras, CityMapper-2L (low), CityMapper-2S (standard) y CityMapper-2H (high).

Las cámaras que incorpora, Leica MFC150 y MFC150-NIR, utilizan tecnología CMOS y están equipadas con la tecnología de compensación de movimiento de avance (FMC) de Leica Geosystems, que permite la captura de imágenes de alta calidad incluso en condiciones de iluminación difíciles que requieren exposiciones más prolongadas sin reducir la eficiencia. Las distancias focales de las distintas cámaras utilizadas para cada configuración de altura se detallan en la Figura 15.



**Figura 15.** Diferencias entre CityMapper-2H (color verde) vs CityMapper-2S (color azul) vs CityMapper-2L (color amarillo). Fuente: (Leica, 2021)

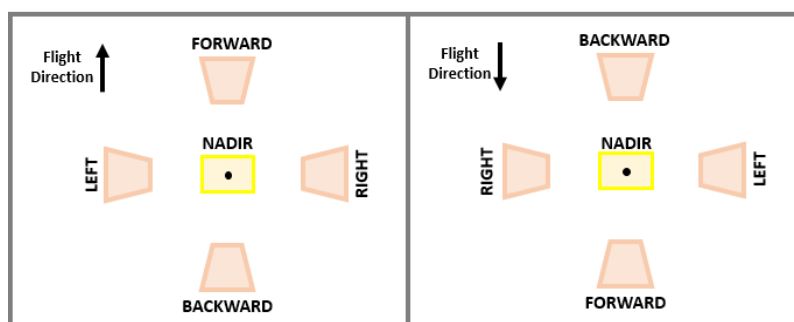
Específicamente, el vuelo se realizó con CityMapper-2H, sus características más importantes son:

- **Sistema óptico:**
  - **2 Cámaras Nadirales (RGB & NIR) de 150 MP:**
    - **RGB:**
      - Leica D69.146/4.8 con 146 mm de distancia focal.
      - 20.7° FOV across track.



- 15.6° FOV along track.
  - **NIR:**
    - Leica D69.70/4.0-NIR con 71 mm de distancia focal.
    - 41.2° FOV across track.
    - 31.5° FOV along track.
  - **4 Cámaras Oblicuas (RGB)**, delantera, trasera, izquierda, derecha de 150 MP con una inclinación de 45°. Leica D69.189/5.6 con 189 mm de distancia focal.
    - **Izquierda/Derecha:**
      - 45° ±6.0° FOV across track.
      - 16.1° FOV along track.
    - **Delantera/Trasera:**
      - 16.1° FOV across track.
      - 45° ±6.1° FOV along track.
  - Chip CMOS de iluminación trasera (BSI).
  - Compensación mecánica de movimiento de avance (FMC).
  - Lentes de baja distorsión personalizadas.
- **Sensor LiDAR:**
  - Unidad LiDAR: Leica Hyperion2+
    - Frecuencia de repetición de pulsos de 2 MHz.
    - Múltiples pulsos en el aire sin compuerta (MPiA).
    - Precisión de rango de 3 cm.
    - Patrón de escaneo oblicuo.
    - Distribución uniforme de puntos en el conjunto de datos.

A modo de resumen, el sistema fotogramétrico está formado por 6 cámaras fotogramétricas de medio formato, cinco de similares características, con capacidad para capturar información en las bandas RGB, una con orientación nadiral y cuatro con una inclinación de 45° en las vistas delantera, trasera, derecha e izquierda. El sexto sensor captura información en la banda del infrarrojo cercano con una orientación nadiral y con una distancia focal diferente. La captura de datos LiDAR se lleva a cabo con sensor Hyperion2+.



**Figura 16.** Configuración de captura de imágenes. Fuente: Elaboración propia

Las cámaras que tiene el sensor Citymapper-2 (Nadiral, Backward, Forward, Left, Right) son diferentes a la dirección de “vista” (Nadiral, Norte, Sur, Este, Oeste) dado que esta última está influenciada por la dirección del ángulo de pasada (por ejemplo, dirección Norte-Sur; o Sur- Norte) del avión al momento de capturar las imágenes.

En la Tabla 1 se puede apreciar de acuerdo con el tipo de cámara y la dirección de vuelo, la vista que le correspondería a cada cámara.

Tabla 1. Diferencia entre tipo de cámara y dirección de vistas

Dirección(°)	Cámara	Vista	Dirección(°)	Cámara	Vista
0-180	Nadiral	Nadiral	180-0	Nadiral	Nadiral
0-180	Forward	Norte	180-0	Forward	Sur
0-180	Backward	Sur	180-0	Backward	Norte
0-180	Left	Oeste	180-0	Left	Este
0-180	Right	Este	180-0	Right	Oeste

Asimismo, se ilustran con dos ejemplos el tipo de vista para las cámaras forward y left, diferenciadas por la dirección de vuelo. En este caso, la vista para las cámaras Forward pueden ser Norte o Sur, mientras que para la cámara Left puede ser Oeste u Este.

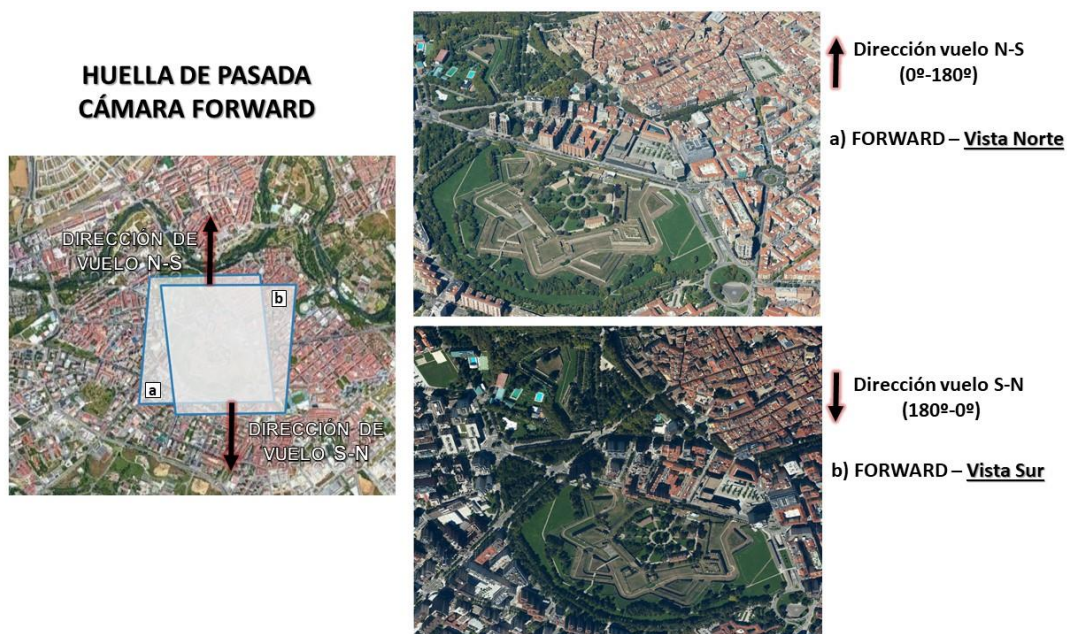


Figura 17. Ejemplo de imagen capturada con cámara forward (delantera) en dirección de vuelo N-S y en dirección de vuelo S-N. Fuente: Elaboración propia

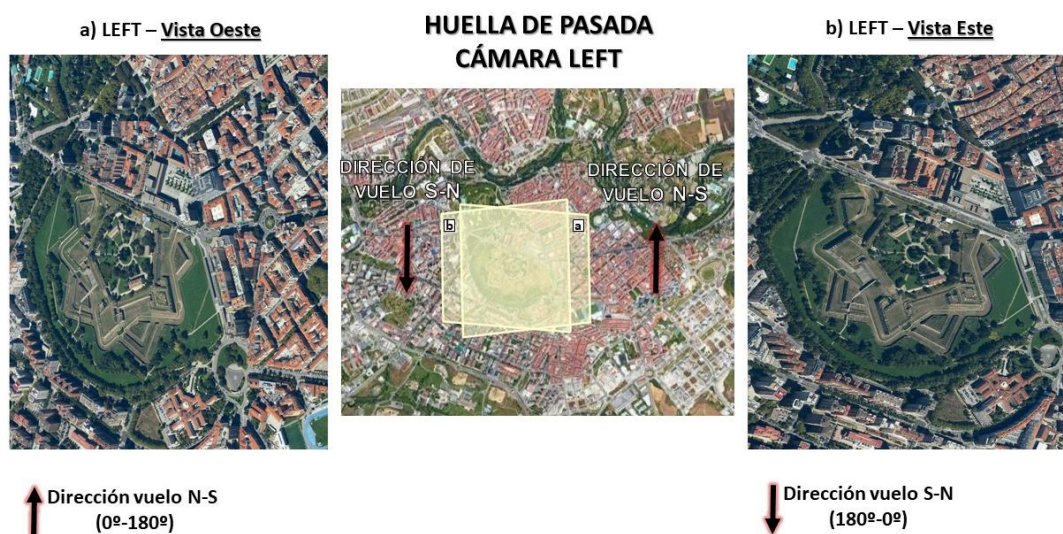


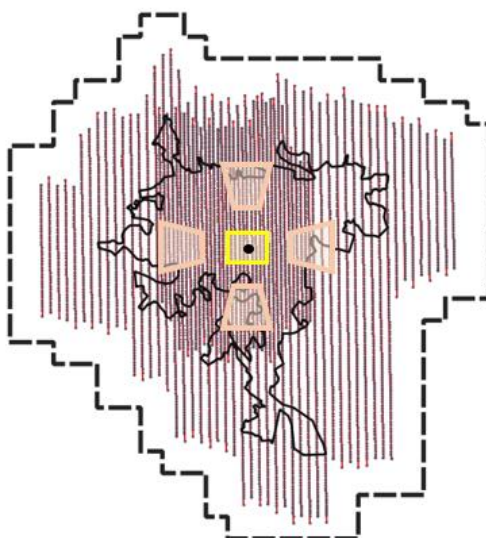
Figura 18. Ejemplo de imagen capturada con cámara left (izquierda) en dirección de vuelo N-S y en dirección de vuelo S-N. Fuente: Elaboración propia

En este caso, la información relativa a la vista de cada una de las imágenes es información procesada a partir de los datos de la cámara y ángulo de pasada de vuelo.

Es importante tener en cuenta esta consideración para la etapa de procesamiento posterior de las imágenes capturadas, dado que dependiendo de los requerimientos de los productos a generar serán las vistas a considerar. Las imágenes capturadas con las cámaras Forward y Backward pueden tener vista Norte o Sur y las imágenes capturadas con las cámaras Right y Left pueden tener vista Este u Oeste.

### Especificaciones vuelo

La dirección del vuelo fue Norte-Sur, y para cada posición establecida el sistema capturó de manera simultánea: 1 imagen nadiral y 4 imágenes oblicuas con diferentes orientaciones (cámara delantera, trasera, derecha e izquierda). Se realizaron 70 pasadas en donde se capturaron a un total de 30.330 imágenes, lo que equivale a 6.066 imágenes por vista de toma.



**Figura 19.** Configuración plan de vuelo (líneas de pasada del avión). Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 19, el solape longitudinal en todo el vuelo fotogramétrico fue del 80%, mientras que el solape transversal fue del 80% en la zona urbana (centro donde las líneas están más próximas) y del 60% en el resto del área de estudio.

La captura de datos LiDAR se realizó con una precisión en X,Y,Z de 5 cm. El solape medio entre pasadas fue de 5 puntos/m<sup>2</sup>, resultando una densidad en la zona urbana (solape transversal del 80%) de 50 puntos/m<sup>2</sup> mientras que el resto del proyecto fue de 25 puntos/m<sup>2</sup>.

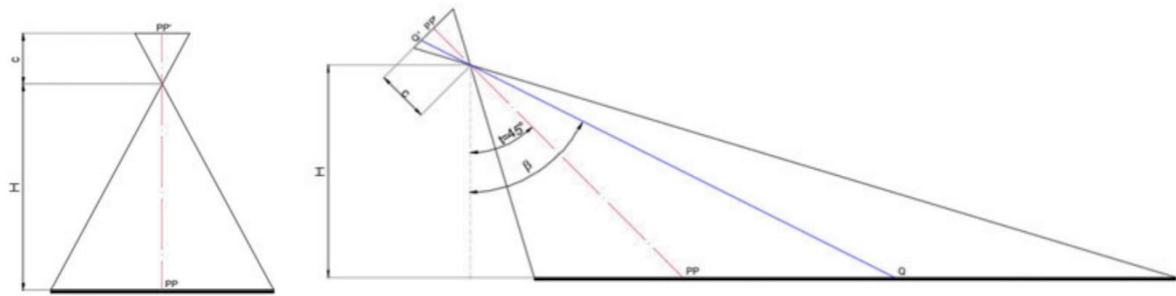
El GSD medio de las imágenes nadirales fue de 7.5 cm y de 8.5 cm en las oblicuas.

El *Ground Sample Distance* (GSD) es un índice importante en la descripción del sistema imagen y se corresponde con el tamaño del píxel proyectado sobre el terreno. Para las imágenes nadirales se puede obtener como (IGN, 2021):

$GSD = m_m \cdot \Delta x$ ; siendo  $m_m$  la escala de vuelo y  $\Delta x$  el tamaño de píxel imagen.

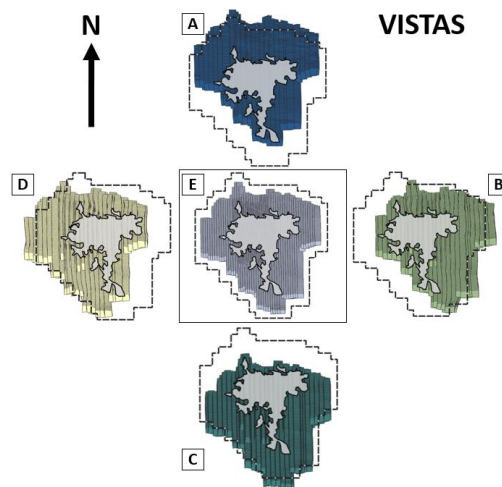
Mientras que, para las imágenes oblicuas se puede calcular como (Höhle, 2013):

$GSD = \text{tamaño píxel} \cdot \frac{H}{f} \cdot \frac{\cos(\beta - t)}{\cos \beta}$ ; siendo H la altura de vuelo, f la distancia focal,  $\beta$  el ángulo entre la línea directa de la lente a un objetivo y la vertical; y t el ángulo de inclinación de la cámara considerada.



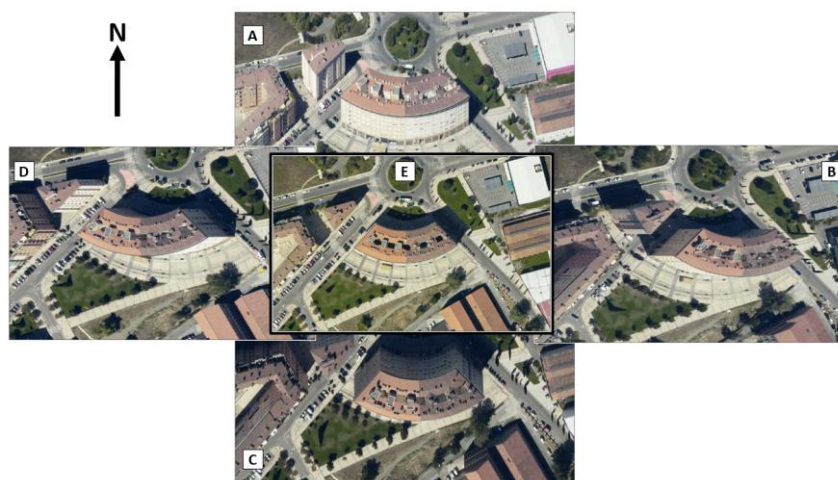
**Figura 20.** Geometría de adquisición de una imagen. Imagen nadiral (izquierda), Imagen oblicua (derecha). Fuente: (Pepe et al., 2019)

En la Figura 21, se observa que la huella de las imágenes oblicuas supera el área de vuelo por la geometría de adquisición de estas, dado que se considera un ángulo de inclinación de  $45^\circ$  para cada una de estas cámaras.



**Figura 21.** Huella de las imágenes capturadas. A) Vista Norte (azul oscuro), B) Vista Este (verde), C) Vista Trasera (celeste), D) Vista Oeste (amarillo), E) Vista Nadiral (gris). Fuente: Elaboración propia

Para comprender mejor la geometría de adquisición de las imágenes se presenta a continuación un ejemplo de distintas tomas adquiridas con Citymapper-2 para un mismo sector con Vista Nadiral, Norte, Sur, Este y Oeste.



**Figura 22.** Imágenes capturadas con Citymapper2: A) Vista Norte, B) Vista Este, C) Vista Trasera, D) Vista Oeste, E) Vista Nadiral. Edificio Baluarte. Pamplona. Fuente: Elaboración propia

### 3.2 Área de estudio

El área de estudio se corresponde con un conjunto de manzanas que se encuentran en el centro de la ciudad de Pamplona, al norte de la Ciudadela, y que están comprendidas entre la Avenida del Ejército, Avenida Pio XII, Calle Navas de Tolosa, y Calle Yanguas y Miranda (Figura 23).

Para la caracterización de los análisis la zona presenta variedad de construcciones a distinta altura y con diversas formas y estructuras, así como también otros elementos como árboles, farolas, automoviles o murallas. Cabe destacar que se localizan edificios conocidos como Baluarte, y el Hotel Tres Reyes.



**Figura 23.** Área de estudio

### 3.3 Material utilizado

Para llevar adelante el trabajo se han utilizado diversos softwares algunos para el procesamiento fotogramétrico, otros para para el manejo de información geoespacial, visores, transformadores de coordenadas, y para manejar principalmente nube de puntos, los cuales se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Programas utilizados

<u>Nombre</u>	<u>Descripción</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ArcGISPro (ESRI)</li> <li>• QGIS</li> <li>• Global Mapper</li> </ul>	<i>SW GIS:</i> Para visualización, edición y análisis de información ráster, vectorial y de información alfanumérica.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agisoft Metashape</li> <li>• sureAerial de la empresa nFrames(comprado por ESRI)</li> </ul>	<i>SW Fotogramétrico:</i> Para generación de productos geospaciales
<ul style="list-style-type: none"> <li>• TerraScan de TerraSolid SW</li> <li>• Cloud Compare</li> <li>• Geobide (GeoConverter, lasConverter)</li> </ul>	<i>SW Manejo nube de puntos:</i> Para clasificación de nube de puntos, generación de perfiles, filtro de nube de puntos, cálculo de distancias, transformación de coordenadas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sure Editor de la empresa nFrames(comprado por ESRI)</li> </ul>	<i>Visores:</i> Para visualización de productos generados con nFrames

Para el procesamiento fotogramétrico se ha utilizado un equipo que cuenta con las siguientes características:

- Procesador:
  - AMD Ryzen Threadripper 3960X
  - 24-Core Processor
- Tarjeta gráfica: MSI GeForce RTX 2080 ti gaming trio 11Gb GDDR6
- ROG Zenith II Extreme
- Samsung 970 evo plus

### 3.4 Metodología

Agisoft Metashape es una solución de software patentada que realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales 3D para ser utilizados en aplicaciones GIS, documentación del patrimonio cultural y producción de efectos visuales, así como para mediciones indirectas de objetos de varias escalas (Agisoft Metashape, 2021).

Se realizaron varias pruebas para la obtención de Nube de puntos densa, Malla 3D, Modelo Texturado, Modelo Digital de Superficie (DSM) y Ortofoto Verdadera contemplando diferentes parámetros de entrada (Imágenes Nadirales y Oblicuas; Imágenes Nadirales; Nube de puntos LiDAR) y, de procesamiento para cada producto (especificado en detalle más adelante).

El proceso para obtener un modelo tridimensional pasa principalmente por tres etapas. La primera se corresponde con la orientación de las cámaras, con el objetivo de crear una nube de puntos dispersa y consecutivamente la nube de puntos densa, la segunda con la creación de la malla tridimensional, y la tercera, la aplicación de la textura sobre la malla.

La metodología seguida para la generación de distintos productos con este software se resume en el siguiente esquema:

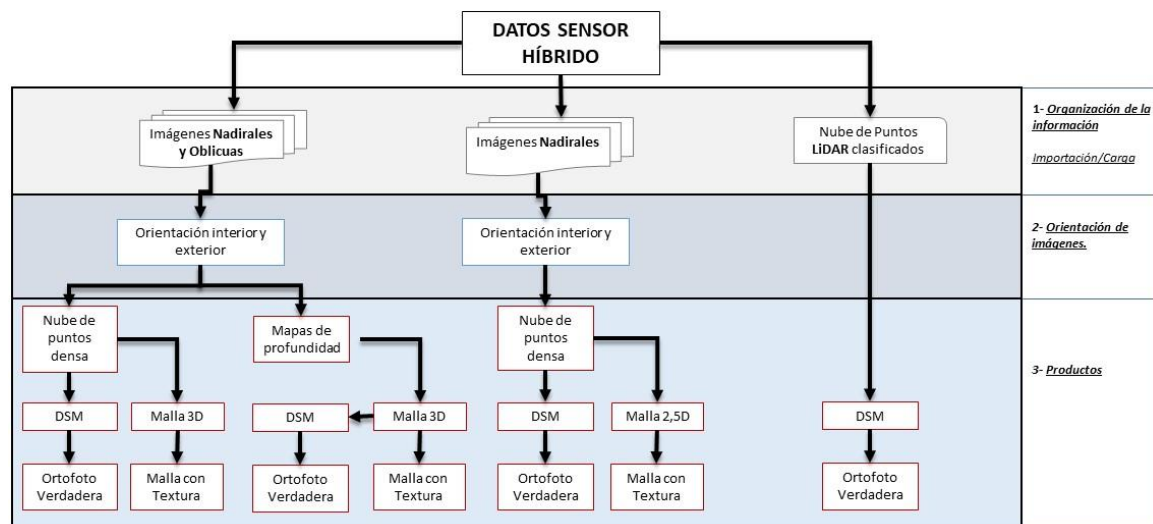


Figura 24. Esquema de trabajo y productos generados en Metashape. Fuente: Elaboración propia

Los datos necesarios para la consecución de este objetivo fueron:

- Imágenes del vuelo en formato JPG.
- Certificado de calibración de cámaras, donde se detallan los datos del sensor empleado.
- Posición (X, Y, Z) y actitud (Omega, phi, kappa) de los fotocentros de las imágenes a partir de la aerotriangulación realizada por Tracasa en el SW Match-AT de Inpho
- Puntos de apoyo en el sistema de referencia ETRS89 – proyección UTM 30N y reseña de ubicación.
- Nube de puntos LiDAR clasificada.

Como punto de partida, se identificaron y seleccionaron en QGIS las imágenes de cada cámara (Nadir, Forward, Backward, Right, Left) que se correspondieran con la zona de estudio, diferenciando aquellas que tuvieran un solape longitudinal y transversal del 80%, con las que tuvieran un solape transversal aproximado del 60%. Para poder realizar diversas pruebas en el software elegido, se añadieron al proyecto las imágenes en diferentes lotes (*Chunks*) y se procedió a realizar el esquema general básico de trabajo definido en la Figura 24.

### 3.4.1 Orientación interna y externa

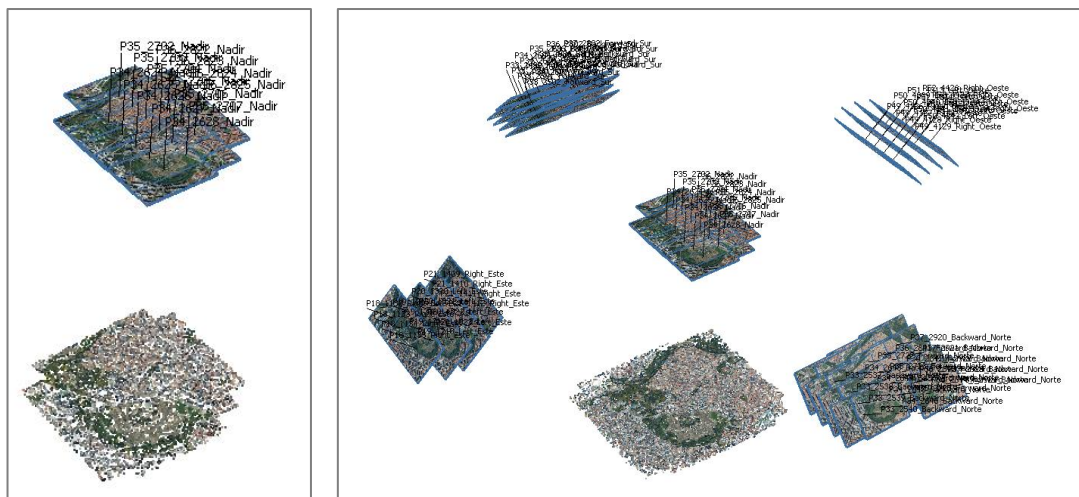
Para lograr estudiar y definir con precisión la forma, dimensión y posición de un objeto en el espacio mediante el empleo de varias fotografías es necesario la reconstrucción de un espacio tridimensional a partir de la transformación del sistema de referencia de las imágenes (Hernández Lopez, 2006). En este sentido, el primer paso consistió en llevar a cabo la orientación interna de las imágenes para transformar el sistema de coordenadas píxel (fila, columna) al sistema de coordenadas de la cámara expresadas en mm y referidas a un sistema cartesiano 3D cuyo origen se encuentra en el centro de proyección de la cámara (Quirós Rosado, 2014). Para ello se cargaron para cada una de las cámaras, los parámetros de calibración del sensor, es decir el tamaño de píxel (mm) y la distancia focal (mm). Este último es igual para las cámaras oblicuas y, diferente para la cámara nadiral. Al introducir estos valores, el SW detectó automáticamente el valor de la focal en píxeles.

**Tabla 3.** Parámetros de calibración de la cámara nadiral y oblicua

<b>Cámara</b>	<b>Tamaño de píxel (mm)</b>	<b>Distancia focal (mm)</b>	<b>Distancia focal (píxeles)</b>
Nadiral	0.00376 * 0.00376	146	38829.7872
Oblicua	0.00376 * 0.00376	189	50265.9574

Cabe destacar que Tracasa Instrumental disponía de información relativa a la posición y ángulos de los focos de cada una de las imágenes porque llevó adelante un proceso de aerotriangulación con el SW Match-AT de Inpho. Es por ello que, para facilitar el proceso de alineación posterior, se importaron al proyecto desde un archivo “.csv” las coordenadas X, Y, Z en el sistema de referencia ETRS89 – proyección UTM 30N y los ángulos de rotación omega, phi, y kappa.

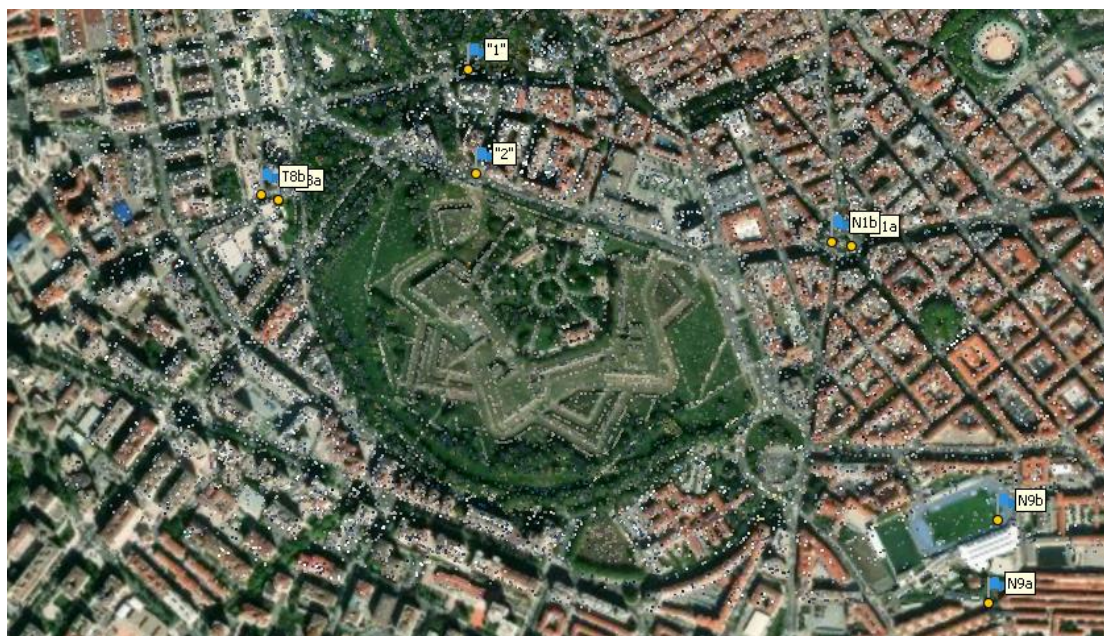
Siguiendo el flujo de trabajo, mediante la alineación de fotos (orientación relativa) se determinaron las posiciones de las cámaras al igual que en el momento en que se capturaron. En esta fase se logran relacionar geoméricamente las imágenes a partir de la identificación de puntos homólogos o *tie points* en cada fotografía, para posteriormente reconstruir los haces y generar el modelo estereoscópico (Quirós Rosado, 2014).



**Figura 25.** Alineación de las cámaras nadirales – Izquierda- vs Alineación de las cámaras oblicuas y nadirales -Derecha-. Fuente: Elaboración propia

Luego, se procedió a realizar la orientación absoluta para nivelar, escalar y trasladar el modelo obtenido en la orientación relativa a su verdadera posición en el espacio. Para ello, es necesario contar con al menos 3 puntos de apoyo (*Ground Control Points, GCP*), es decir puntos con coordenadas conocidas que se toman en campo para la zona de análisis (Quirós Rosado, 2014).

Tracasa Instrumental poseía la reseña de puntos de apoyo medidos en el área con una antena GPS GS14 en coordenadas ETRS89, proyección UTM30 Norte sobre el Elipsoide GRS1980. De éstos se seleccionaron 8 GCPs, los cuales se importaron desde la pestaña de referencia en un fichero “.csv” y se midieron manualmente sobre las imágenes en donde se visualizaban con claridad, a partir de la introducción de marcadores (Figura 26). El error en la medición de los puntos de apoyo fue de 0.01m.



**Figura 26.** Puntos de apoyo medidos

Como resultado de esta etapa (Figura 27) se obtuvieron los parámetros de orientación exterior, es decir la posición X, Y, Z y los ángulos Omega, Phi, Kappa que se visualizan en la pestaña superior de valores estimados. También, se pueden observar los valores iniciales referidos a las coordenadas y ángulos de los focoscentros importados previamente y, los errores entre los valores iniciales y los estimados.



Referencia												
Cámaras	Este est (m)	Norte est (m)	Alt. est (m)	Precisión (m)	Error (m)	Omega est (deg)	Phi est (deg)	Kappa est (deg)	Precisión (deg)	Error (deg)	Proyecciones	Error (pix)
✓ P18_1132_Right_Este	607302.566025	4741330.669136	3282.537027	10.000000	0.410220	0.836	-44.858	91.124	10.000	0.006	3570	0.311
✓ P18_1133_Right_Este	607304.001867	4741183.376010	3281.728692	10.000000	0.344275	0.862	-44.847	91.155	10.000	0.005	4228	0.262
✓ P18_1134_Right_Este	607304.771356	4741038.148112	3280.722082	10.000000	0.538339	0.848	-44.844	91.134	10.000	0.008	3771	0.256
✓ P18_1135_Right_Este	607305.539619	4740888.557087	3279.411111	10.000000	0.726433	0.867	-44.844	91.150	10.000	0.014	3482	0.314
✓ P19_1215_Left_Este	607498.280877	4741237.371912	3285.563415	10.000000	0.671521	0.926	-44.862	91.251	10.000	0.008	3411	0.377
✓ P19_1216_Left_Este	607503.100370	4741088.421753	3287.268359	10.000000	0.710527	0.913	-44.845	91.231	10.000	0.009	3382	0.365
✓ P19_1217_Left_Este	607507.474840	4740940.163783	3290.053241	10.000000	0.803686	0.946	-44.858	91.264	10.000	0.012	3803	0.334
✓ P19_1218_Left_Este	607511.433521	4740794.831114	3293.341275	10.000000	1.060638	0.950	-44.855	91.268	10.000	0.019	3798	0.355
✓ P20_1320_Left_Este	607681.821391	4741266.129903	3290.704045	10.000000	0.831441	0.932	-44.870	91.257	10.000	0.010	3356	0.397
✓ P20_1321_Left_Este	607682.133498	4741119.258616	3289.696781	10.000000	0.781209	0.949	-44.880	91.274	10.000	0.008	3317	0.325
✓ P20_1322_Left_Este	607683.326827	4740969.418408	3287.446879	10.000000	0.953944	0.940	-44.862	91.255	10.000	0.013	3400	0.343
✓ P20_1323_Left_Este	607685.651982	4740821.692137	3284.355596	10.000000	1.109445	0.932	-44.875	91.241	10.000	0.018	3460	0.374
Marcadores	Este est (m)	Norte est (m)	Alt. est (m)	Precisión (m)	Error (m)	Proyecciones		Error (pix)				
✓ "1"	610287.363969	4741231.941257	496.055866	0.005000	0.010051	51	0.627					
✓ "2"	610300.915259	4741047.620338	496.538129	0.005000	0.010415	63	0.431					
✓ N1a	610965.637255	4740919.898006	502.916313	0.005000	0.014603	49	0.500					
✓ N1b	610929.930185	4740927.276181	502.612052	0.005000	0.017643	35	0.515					
✓ N9a	611205.347327	4740290.121468	503.757607	0.005000	0.004571	2	2.131					
✓ N9b	611222.482482	4740437.489286	509.506820	0.005000	0.003407	5	0.871					
✓ T8a	609951.259800	4741001.268296	493.560966	0.005000	0.011336	21	0.612					
✓ T8b	609922.040729	4741008.910176	493.412218	0.005000	0.014580	32	0.589					
<b>Error total</b>												
Puntos de apoyo					0.011766		0.575					
Puntos de control de calidad												

**Figura 27.** Parámetros de orientación absoluta estimados y error de los marcadores medidos

### 3.4.2 Productos

Una vez determinada la orientación interna y externa de cada una de las cámaras se procedió a ajustar la configuración de los parámetros que indica el programa para obtener diferentes productos.

#### 1. NUBE DE PUNTOS DENSA

La nube de puntos densa generada se basa en los parámetros de orientación interior y exterior calculado para cada una de las imágenes, y en los mapas de profundidad obtenidos por correspondencia estéreo densa (*dense stereo matching*). Estos últimos, son un primer cálculo que realiza Agisoft, a través de sus algoritmos de restitución, estableciendo un mapa o curvas de nivel de la profundidad a la que se encuentran los objetos o zonas a restituir. Se calculan por pares de imágenes superpuestas teniendo en cuenta las posiciones estimadas de las cámaras y son útiles para filtrar mediciones de profundidad incorrectas en las regiones superpuestas (Agisoft, 2021).

Los parámetros más importantes que se deben considerar para crear la nube de puntos densa son:

- **Calidad:** Especifica la calidad deseada para la generación de mapas de profundidad.
- **Modos de filtrado de profundidad:** Son algoritmos de filtrado que tienen como objetivo resolver valores atípicos entre los puntos que en general están influenciados por factores como imágenes ruidosas o mal enfocadas. El modo de filtrado puede ser suave, agresivo, moderado o estar deshabilitado, y su configuración dependerá de la existencia o no de detalles importantes que se distingan en la escena a ser reconstruida.

Los mejores resultados se obtuvieron calculando con una calidad "Alta", dado que el SW no permitió ejecutarlo con la máxima calidad, a menos que se redujera la cantidad de imágenes utilizadas en el procesamiento.

Algunos de los formatos en que se pueden exportar son: Wavefront OBJ (\*.obj), Stanford PLY (\*.ply), XYZ Point Cloud (\*.txt), ASPRS LAS (\*.las), LAZ (\*.laz).



Figura 28. Nube de puntos densa

## 2. MALLA/MESH 3D -2.5D

Una malla poligonal (polymesh o mesh) es una superficie creada mediante un método tridimensional generado por sistemas de vértices posicionados en un espacio virtual con datos de coordenadas propios (Wikipedia, 2021).

Metashape permite reconstruir el modelo de malla poligonal en función de la información de nube de puntos (Nube densa, Nube dispersa, Nube de puntos importada desde origen externo) o en función de los mapas de profundidad. Con la creación del mallado se busca transferir la información que contiene la nube de puntos a un modelo tridimensional basado en polígonos.

Los parámetros más importantes que se deben considerar para crear la nube de puntos densa son:

- *Origen de datos:* Nube de puntos dispersa, nube de puntos densa, mapas de profundidad
- *Tipo de superficie:* Arbitrario 3D o Bajo relieve / Terreno 2.5 D.

El tipo de malla 3D se configura para representar superficies complejas y para ésta es útil contar con imágenes oblicuas tomadas a lo largo de todas las direcciones para conseguir una mejor representación del objeto, por ejemplo, en zonas urbanas para bordes y las fachadas de edificios.

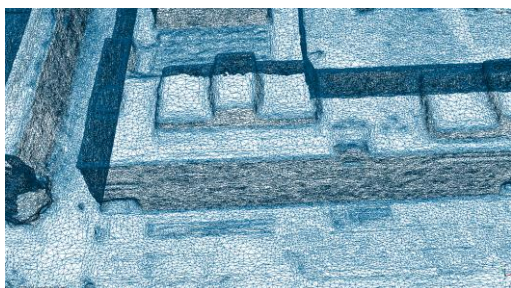
En el modelo 2.5D la geometría de las fachadas queda definida por la elevación existente entre el suelo y el tejado, tomando un solo valor de la coordenada Z para cualquier punto X, Y definido en ese entorno.

- *Calidad:* Puede ser extra alta, alta, media, baja, mínima. Especifica la calidad de reconstrucción deseada de los mapas de profundidad, siempre que se seleccionen como de fuente de entrada.
- *Número de caras:* Alta, media, baja, personalizada. Especifica el número máximo de polígonos en la malla final.
- *Interpolación:* Puede ser habilitada (por defecto), extrapolada o deshabilitada. La interpolación permite rellenar agujeros que se puedan generar en la superficie del modelo.

Se puede exportar la malla 3D en formato COLLADA (\*.dae) y leerlo en la geodatabase del software ArcGIS.



**Figura 29.** Malla 2.5D



**Figura 30.** Malla 3D, modelo de malla de alambre -izquierda- vs modelo de malla sólido -derecha-

### 3. TEXTURA

La función de textura permite crear diferentes tipos de texturas para envolver un modelo. Esta construcción es un mapa de textura de color (mapa difuso) basado en las imágenes alineadas del modelo o transferido desde otro modelo con el mapa de textura de color ya generado.

Los parámetros más importantes que se deben considerar para generar la textura son:

- *Modo de mapeo:* El modo de mapeo de texturas determina cómo se empaquetará la textura del objeto. La selección adecuada del modo de mapeo de texturas ayuda a obtener un empaque de textura óptimo y, en consecuencia, mejor calidad visual del modelo final. El modo predeterminado es el mapeo genérico que permite parametrizar las texturas a geometrías arbitrarias
- *Modo de mezcla:* Selecciona la forma en que se combinarán los valores de píxeles de diferentes fotos en la textura final. El modo “mosaico” – Implica un enfoque de dos pasos: por un lado, hace una combinación de componentes de baja frecuencia a través de una superposición de imágenes para evitar el problema de línea de costura mientras que la componente de alta frecuencia se toma de una sola imagen, de la que presenta una buena resolución para el área de interés.
- *Tamaño de textura:* Especifica el tamaño (ancho y alto) del atlas de textura en píxeles y determina el número de archivos para exportar la textura.

El modelo de tesela permite visualizar el modelo 3D con un mayor nivel de resolución, dado que permite texturizar al modelo partir de la resolución original de las imágenes.



**Figura 31.** Modelo de teselas 3D

Los formatos más comunes de exportación de modelos teselados son: Cesium 3D Tiles (\*.zip), Scene Layer Package (\*.slpk), PhotoMesh Layer (\*.zip), Agisoft Tiled Model (\*.tls), Agisoft Tile Archive (\*.zip), Open Scene Graph (\*.osgb)

#### 4. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

Un modelo digital de elevaciones (DEM) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994). El Modelo Digital de Superficie (DSM) representa las elevaciones sobre el nivel del mar de las superficies reflectantes de árboles, edificios y otras características elevadas sobre el suelo desnudo.



Figura 32. Diferencias entre DEM vs DSM. Fuente: (ESRI, 2021a)

DEM/DSM se puede rasterizar desde una nube de puntos densa, una nube de puntos dispersa, mapas de profundidad o una malla.

Los parámetros más importantes que se deben considerar para generar el DEM/ DSM son:

- *Tipo de proyección:* Geográfica, Plana, Cilíndrica
- *Origen de datos:* Mapas de profundidad, nube de puntos densa, malla.
- *Interpolación:* Puede ser habilitada (por defecto), extrapolada o deshabilitada
- *Resolución (m)*
- *Tamaño pixel (px)*

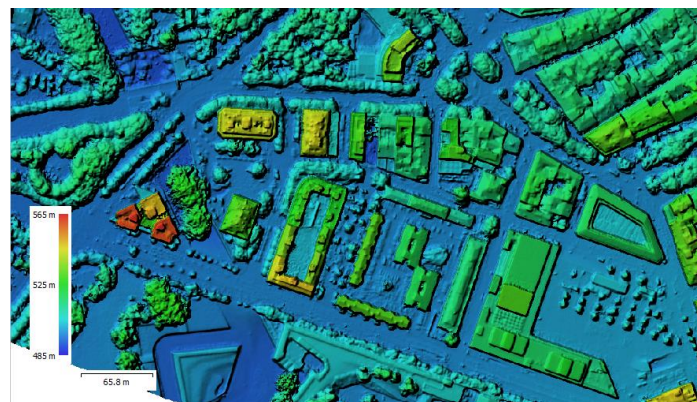


Figura 33. Modelo digital de elevación

Algunos de los formatos en que se pueden exportar son GeoTIFF elevation data (\*.tif), Arc/Info ASCII Grid (\*.asc), Band interleaved file format (\*.bil), XYZ file format (\*.xyz).

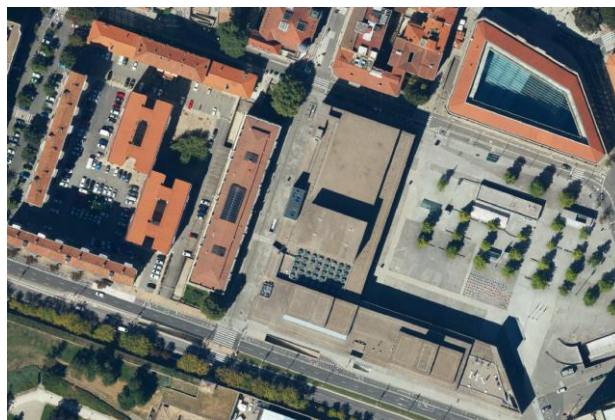
#### 5. ORTOFOTO

Se obtiene mediante una ortorectificación de las imágenes originales. La rectificación es una técnica fotogramétrica que permite cambiar la proyección cónica de una fotografía a una proyección ortogonal y su principal ventaja es la obtención de una escala uniforme. Para generar una ortofoto se hace necesario la utilización de un modelo de elevaciones. Una ortofoto tradicional se realiza sobre la base de un modelo del terreno

DTM, la cual presenta problemas para la representación y medición de elementos elevados dado que los objetos se distorsionan de su verdadera ubicación. La ortofoto verdadera supera tales deficiencias tras realizar la reproyección de las imágenes de origen sobre un DSM, el cual incluye todos los elementos de altura presente (Quirós Rosado, 2014).

Los parámetros más importantes que se deben considerar para generar la ortofoto en Metashape son:

- *Tipo de proyección:* Geográfica, Plana, Cilíndrica
- *Superficie:* DEM, Malla
- *Modo de mezcla:* Mosaico (por defecto) implementa un enfoque con división de datos en varios dominios de frecuencia que son mezclados de forma independiente.
- *Tamaño de pixel (m)*

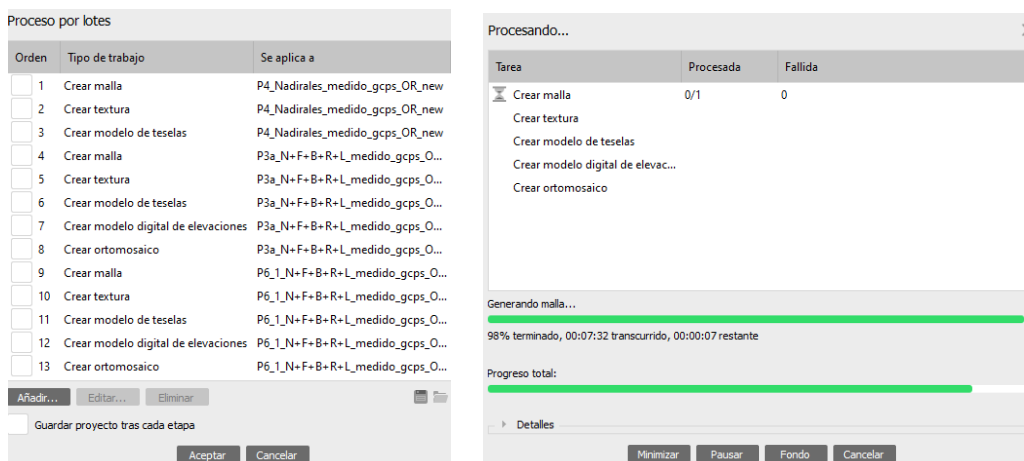


**Figura 34.** Ortofoto verdadera

Algunos de los formatos en que se pueden exportar son TIFF/GeoTIFF (\*.tif), JPEG 2000 (\*.jp2), JPEG (\*.jpg), PNG (\*.png), BMP (\*.bmp).

### 3.4.3 Estudios/Pruebas Metashape

Se utilizó la herramienta de proceso en lote de Agisoft Metashape para automatizar el flujo de trabajo de las pruebas a ejecutar.



The screenshot displays two windows from the Agisoft Metashape software. The 'Proceso por lotes' (Batch Processing) window on the left contains a table with 13 rows of tasks. The 'Procesando...' (Processing) window on the right shows a progress bar for the task 'Generando malla...' (Generating mesh...), which is 98% complete. Below the progress bar, it indicates '98% terminado, 00:07:32 transcurrido, 00:00:07 restante'.

Orden	Tipo de trabajo	Se aplica a
<input type="checkbox"/>	1 Crear malla	P4_Nadiraes_medido_gcps_OR_new
<input type="checkbox"/>	2 Crear textura	P4_Nadiraes_medido_gcps_OR_new
<input type="checkbox"/>	3 Crear modelo de teselas	P4_Nadiraes_medido_gcps_OR_new
<input type="checkbox"/>	4 Crear malla	P3a_N+F+B+R+L_medido_gcps_O...
<input type="checkbox"/>	5 Crear textura	P3a_N+F+B+R+L_medido_gcps_O...
<input type="checkbox"/>	6 Crear modelo de teselas	P3a_N+F+B+R+L_medido_gcps_O...
<input type="checkbox"/>	7 Crear modelo digital de elevaciones	P3a_N+F+B+R+L_medido_gcps_O...
<input type="checkbox"/>	8 Crear ortomosaico	P3a_N+F+B+R+L_medido_gcps_O...
<input type="checkbox"/>	9 Crear malla	P6_1_N+F+B+R+L_medido_gcps_O...
<input type="checkbox"/>	10 Crear textura	P6_1_N+F+B+R+L_medido_gcps_O...
<input type="checkbox"/>	11 Crear modelo de teselas	P6_1_N+F+B+R+L_medido_gcps_O...
<input type="checkbox"/>	12 Crear modelo digital de elevaciones	P6_1_N+F+B+R+L_medido_gcps_O...
<input type="checkbox"/>	13 Crear ortomosaico	P6_1_N+F+B+R+L_medido_gcps_O...

**Figura 35.** Proceso en lote de las distintas pruebas ejecutadas

Se muestran en la Tabla 4 los análisis más significativos realizados en Metashape en función de la configuración de parámetros que se realizó para obtener diversos productos utilizando imágenes aéreas y la nube de puntos LiDAR.

En la tabla cada prueba se puede distinguir por el tipo y cantidad de datos con el que se procesó. Además, se distinguen en detalle los parámetros configurados referidos a la calidad de procesamiento y al origen de datos tenido en cuenta por ejemplo para la obtención de mallas y DEM. Las diferencias entre las mallas 3D, de igual manera que para los DEMs, radica en si se tuvo en cuenta la nube de puntos densas o los mapas de profundidad para su creación.

Es importante aclarar que Metashape no permite establecer un flujo de trabajo híbrido para la vinculación entre la correlación de la nube de puntos obtenida de las imágenes con los puntos LiDAR. Es por esto que se valoran alternativas para su comparación con los benchmarks de nFrames.

**Tabla 4.** Pruebas realizadas en Metashape

Flujo de Trabajo/ Pruebas	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
<b>Tipo de Imágenes</b>	Nadirales + Oblicuas	Nadirales + Oblicuas	Nadirales + Oblicuas	Nadirales	Nadirales + Oblicuas
<b>Cantidad de Imágenes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nadirales: 15</li> <li>• Vista Norte: 21</li> <li>• Vista Sur:19</li> <li>• Vista Este:16</li> <li>• Vista Oeste:16</li> </ul> Total: 87		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nadirales: 15</li> <li>• Vista Norte: 21</li> <li>• Vista Sur:19</li> <li>• Vista Este:16</li> <li>• Vista Oeste:16</li> </ul> Total: 87	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nadirales: 15</li> </ul> Total: 15	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nadirales: 9</li> <li>• Vista Norte: 8</li> <li>• Vista Sur: 9</li> <li>• Vista Este:8</li> <li>• Vista Oeste:8</li> </ul> Total: 42
<b>Alineación (Or. Relativa)</b>	- Precisión: Máxima; - Preselección genérica: Sí; - Preselección de referencia: Origen; - Puntos clave por foto: 40,000; - Emparejamiento guiado: No				
<b>Nube de puntos densa</b>	- Calidad: Alta; - Nivel de filtrado: Moderado		- Calidad: Alta; - Nivel de filtrado: Leve	- Calidad: Extra Alta; - Nivel de filtrado: Moderado	- Calidad: Extra Alta; - Nivel de filtrado: Moderado
<b>Malla 3D</b>	- Origen de datos: Nube de puntos densa; - Tipo de superficie: Arbitrario; - Interpolación: Habilitada por defecto		- Origen de datos: Mapas de profundidad; - Tipo de superficie: Arbitrario; - Interpolación: Habilitada por defecto	- Origen de datos: Nube de puntos; - Tipo de superficie: Terreno 2.5 D; - Interpolación: Habilitada por defecto	- Origen de datos: Mapas de profundidad; - Tipo de superficie: Arbitrario; - Interpolación: Habilitada por defecto
<b>DEM</b>	- Origen de datos: Nube de puntos densa - Interpolación: Extrapolada	Importación DSM (a partir de puntos LiDAR clase 2 y clase 6)	- Origen de datos: Malla - Interpolación: Extrapolada	- Origen de datos: Nube de puntos densa; - Interpolación: Extrapolada	- Origen de datos: Malla; - Interpolación: Extrapolada
<b>Ortomosaico</b>	- Modo de mezcla: Mosaico; - Superficie: MDE		- Modo de mezcla: Mosaico - Superficie: Malla	- Modo de mezcla: Mosaico; - Superficie: MDE	- Modo de mezcla: Mosaico; - Superficie: Malla

### 3.4.4 Esquema de procesamiento de productos de referencia con nFrames

El área de cartografía de Tracasa Instrumental llevó a cabo la publicación de la ortofoto verdadera de Pamplona con un tamaño de píxel de 7cm utilizando para su generación el software SURE Aerial de nFrames. Esta versión está diseñada para trabajar con conjuntos de datos de imágenes aéreas capturados con cámaras nadirales de gran tamaño, cámaras oblicuas y sistemas híbridos con sensores LiDAR adicionales. No tiene limitación en la resolución de imagen y permite la producción de mallas 3D, ortofotos verdaderas, nubes de puntos y modelos de superficies digitales en hardware de estación de trabajo común y en entornos de clúster (NFrames, 2021).

Para SURE Aerial, las imágenes son los principales datos de entrada, junto a los archivos de orientación correspondientes y de manera opcional los datos LiDAR. Hay dos formas en las que SURE usa las imágenes de entrada para generar los productos de salida:

- Reconstrucción geométrica de superficies 3D
- Generación de nubes de puntos de colores, ortofotos verdaderas y mallas con textura

El proceso de aerotriangulación da como resultado datos de orientación de la imagen que consisten en la posición de la cámara, la rotación y los parámetros de la cámara interior (longitud focal, punto principal, parámetros de distorsión).

Las imágenes representan, en conjunto con los parámetros de las orientaciones de cada una de las ellas, el insumo necesario para crear un proyecto SURE. La precisión alcanzada en las orientaciones determinará fuertemente la calidad de los resultados, por lo que hay que asegurarse de contar con orientaciones de calidad para conseguir mayor precisión geométrica y bordes más nítidos.

Las nubes de puntos LiDAR están pensadas como un complemento de los datos de imagen y resultan particularmente útiles en situaciones en las que la geometría de la superficie es difícil de reconstruir solo a partir de imágenes, debido a restricciones fotogramétricas (es decir, un punto 3D de fotogrametría requiere al menos 2 líneas vista sin redundancia, mientras que un punto LiDAR 3D solo requiere 1 línea de vista) (Wenzel et al., 2013).

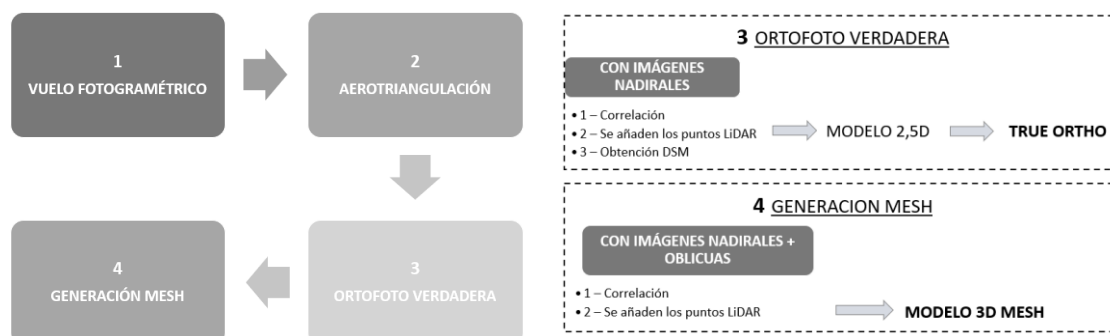


Figura 36. Esquema de trabajo Tracasa Instrumental

En primer lugar, la empresa realizó la aerotriangulación de las 30.330 imágenes, en donde se midieron más de 50 puntos de apoyo. Para la producción de la Ortofoto Verdadera y la obtención del modelo de elevaciones 2.5D se emplearon imágenes nadirales y la nube de puntos LiDAR. Para la elaboración del modelo se utilizaron técnicas de correlación densa (*Dense Matching*) de las imágenes fotogramétricas nadirales y, los datos LiDAR capturados de forma simultánea se utilizaron para completar el modelo en zonas en las que la correlación no pudo obtener un buen resultado.



Además, Tracasa Instrumental llevó a cabo la publicación de un modelo digital del terreno y de superficie (DTM y DSM) a partir de los datos LiDAR con un paso de malla de 12.5 cm sobre el ámbito del proyecto. Para ello, fue necesario la clasificación de la nube de puntos LiDAR, donde se emplearon técnicas de Inteligencia Artificial (IA) para la clasificación automática. En particular, se aplicaron modelos de clasificación de redes neuronales, con muestras de clasificación muy precisas para entrenar el modelo, derivadas también de una clasificación manual muy costosa.

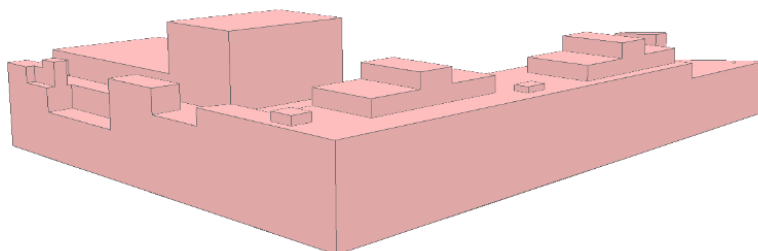
Por último, Tracasa Instrumental obtuvo un modelo 3D mesh de la zona de estudio, a partir de la correlación de las imágenes nadirales y oblicuas, y también sumando la nube de puntos LiDAR.

### 3.4.5 Análisis

Se procede a realizar un análisis para los productos más relevantes de las pruebas realizadas respecto a los productos de referencia. A continuación, se explicita la manera en que se comparan y valoran.

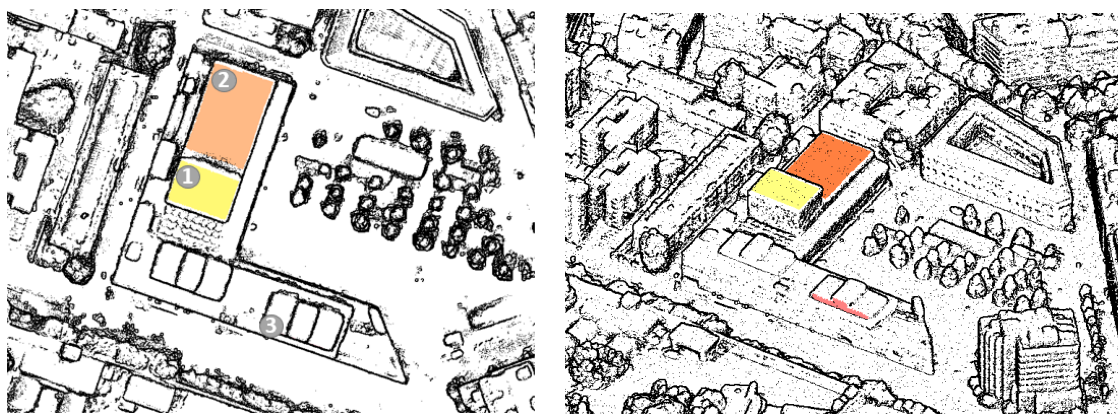
#### a) Análisis nube de puntos densa

En este apartado se valora el grado de ajuste de las nubes generadas en cada programa (Agisoft y nFrames) mediante el cálculo de la distancia perpendicular a planos de referencia en coordenadas ortométricas. Estos planos se consideran válidos para el análisis dado que se obtienen mediante un proceso de restitución fotogramétrica utilizando como insumo a las imágenes nadirales para completar todas las caras del edificio Baluarte.



**Figura 37.** Visualización en ArcGISPro de edificio Baluarte restituido en 3D o a partir de las imágenes y una estación fotogramétrica

Inicialmente, se seleccionan del edificio restituido los planos de interés y luego, como se muestra en la Figura 38 por cada nube de puntos y por cada perfil de estudio se realizó una clasificación de puntos en el software TerraScan para lograr distinguir los puntos que correspondiesen a cada plano. Se consideran dos planos horizontales (Plano 1 y Plano 2), y un plano vertical (Plano 3).



**Figura 38.** Clasificación de nube de puntos en TerraScan en función de los planos de referencia (Plano 1, Plano 2, Plano3)

Se exportan de TerraScan las nubes de puntos clasificadas y se calculan las distancias a los planos seleccionados con la herramienta Near 3D de ArcGISPro. Además, se elabora un proceso mediante la herramienta “Model Builder” de ArcGISPro para automatizar el tratamiento de los datos “.las” y calcular las distancias a cada plano.

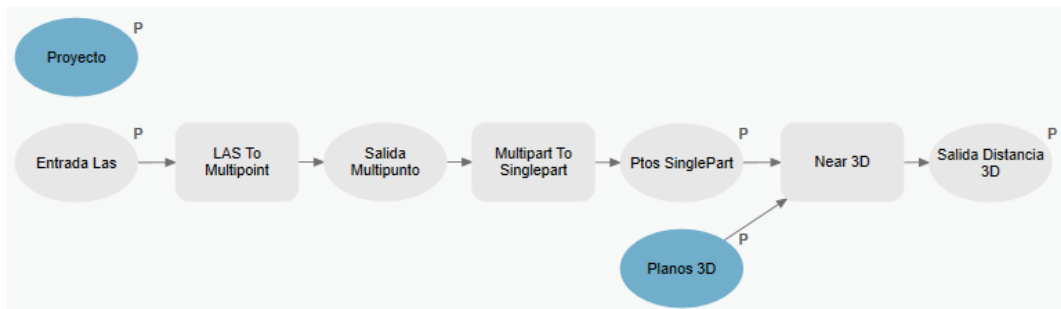


Figura 39. Model Builder elaborado para automatizar cálculo de distancia para cada nube de puntos

En la Figura 40 se muestran las comparaciones a establecer entre las nubes de puntos para cada plano. Se determinará la media y el error cuadrático medio (RMSE) de las distancias de cada nube al plano.

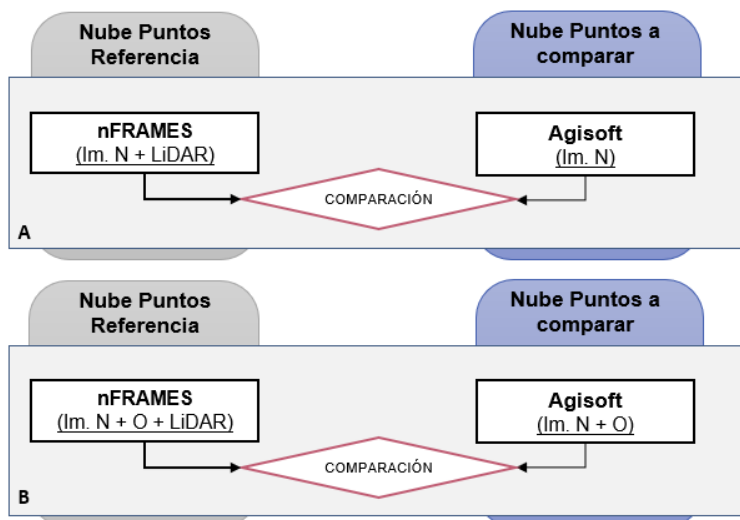


Figura 40. Comparaciones para establecer entre nubes de puntos

Asimismo, se generan perfiles para comparar y visualizar las distintas casuísticas que existen en la zona de estudio tales como zonas abiertas con presencia de vegetación, edificios regulares y no regulares, también de poca y gran altura, y automóviles.

b) *Análisis modelo digital de superficie*

**Precisión vertical entre DSMs**

Se evalúa la precisión vertical de los DSM (Figura 41) teniendo en cuenta 4 puntos de apoyo medidos en la zona de estudio y diferentes a los contemplados en la orientación absoluta de las imágenes. El ajuste de la altura se valora a partir del cálculo del RMSE de la coordenada Z para los DSM considerados.

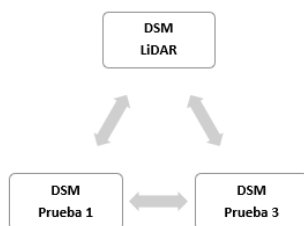


Figura 41. Evaluación de RMSE en Z entre DSMs

La distribución y coordenadas (X, Y, Z) de los GCPs considerados se observan en la Figura 42 y en la Tabla 5.



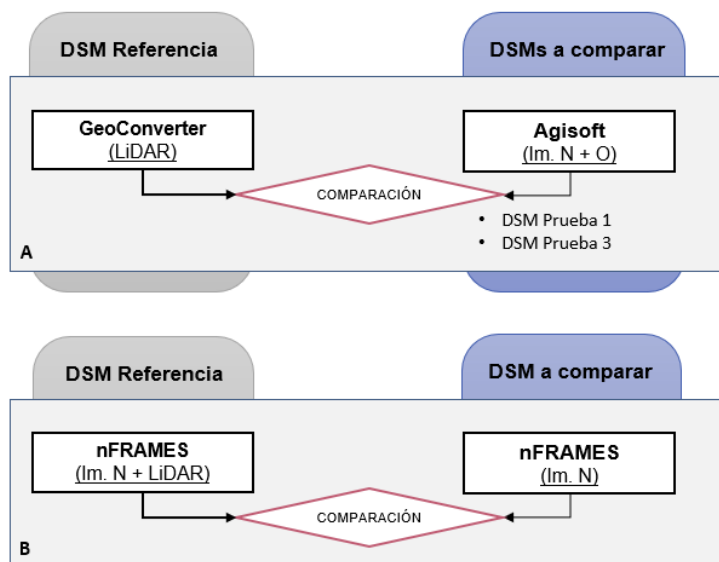
**Figura 42.** Distribución de 4 puntos de apoyo distribuidos en la zona de estudio

**Tabla 5.** Coordenadas X, Y, Z (ETRS-89 y alturas elipsoidales) de los GCPs

Id	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	610496,033	4740968,151	497,513
2	610750,752	4740882,518	501,866
3	610643,56	4741129,241	497,343
4	610265,095	4741219,207	495,869

Se intenta determinar que el DSM LiDAR tiene un mejor ajuste de altura para usarlo de referencia en el próximo análisis.

**Ráster de diferencias entre DSMs**



**Figura 43.** Comparaciones establecidas con los Modelos digitales de superficies

En la Figura 43 se distinguen dos conjuntos de comparaciones a realizar, caso A y caso B. En el primero se comparan las pruebas realizadas en Agisoft (DSM Prueba 1 y DSM Prueba 3) con el DSM LiDAR tomado como referencia de elevación. El DSM de la Prueba 1 se obtiene teniendo en cuenta la nube de puntos densa de la correlación de

imágenes nadirales y oblicuas, mientras que el DSM de la prueba 3 toma como origen a la malla 3D de la correlación de imágenes nadirales y oblicuas (Tabla 4). En el segundo caso, se valora el aporte del LiDAR a las imágenes nadirales y se verifica si las diferencias de altura son similares a las evaluadas en el caso A.

Para la comparación del caso A se utiliza un DSM de referencia que se generó con el software Geoconverter y para lo cual se tuvo en cuenta toda la nube de puntos LiDAR correctamente clasificada por Tracasa Instrumental. El mismo es considerado como DSM de referencia dado que no se cuenta con el DSM de nFrames que contemple la correlación de Imágenes Nadirales + Oblicuas + LiDAR.

Se valoran las diferencias de elevaciones entre los DSM de la Prueba 1 y Prueba 3 de Agisoft, con el DSM de referencia, haciendo la resta entre los rasters. Se configuran distintas opciones de visualización para localizar las zonas en donde se producen estas diferencias y se calculan histogramas con la variación de altura obtenida. Además, se intenta mediante cortes de perfil destacar que DSM (Prueba 1 o Prueba 3) se ajusta mejor al DSM de referencia. Esto último, para en caso de no contar con datos LiDAR, conocer qué opción es más válida para generar un DSM lo más ajustado a una zona urbana compleja.

La comparación establecida para el caso B, se realiza a partir de la diferencia entre los DSM de nFrames que contemplan la correlación entre imágenes nadirales (con y sin LiDAR). Este análisis se realiza en una zona próxima al área de estudio (abarcando la zona de la Ciudadela y el Barrio Iturrama) dado que no se cuenta con DSM sobre la extensión de interés considerada en este trabajo.

c) *Análisis malla 2.5D y malla 3D*

Se elaboró una encuesta en Google Forms para determinar los mejores resultados a nivel visual de los aspectos de la malla generados en 3D y en 2.5D a partir de la percepción de los encuestados.

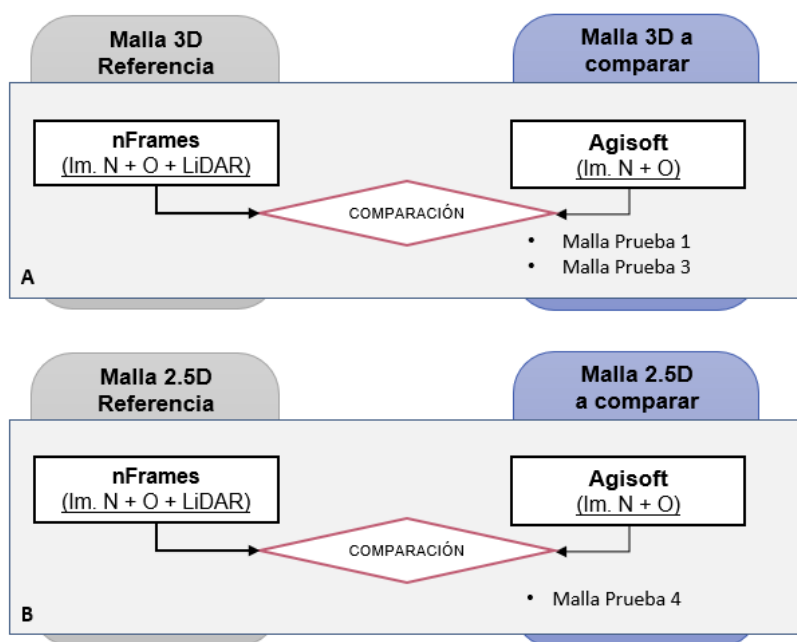
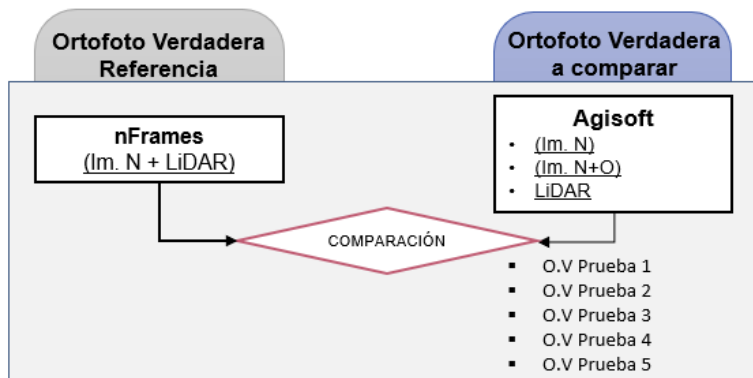


Figura 44. Comparaciones establecidas entre malla 2.5D y malla 3D

Se determinará mediante la media de las respuestas obtenidas las principales valoraciones para las comparaciones que se establecen en la Figura 44.

Se contemplan diferentes aspectos tales como el color del modelo generado, la definición de los elementos lineales, la sensación de profundidad, la homogeneidad de ciertos elementos como por ejemplo en la superficie de las fachadas, percepción a nivel general de la representación del mejor modelo. La encuesta se difundió entre personas con formación técnica en SIG y teledetección, recibándose 60 respuestas.

d) *Análisis de ortofotos verdaderas*



**Figura 45.** Comparaciones entre ortofotos

Se realizará una comparativa visual y un control geométrico en las distintas ortofotos verdadera (O.V) generadas.

1. Control visual

Se establecerán, para cada ortofoto verdadera, los errores más frecuentes mediante un análisis visual de las mismas y prestando atención al ajuste de los elementos existentes tanto a nivel del suelo como a nivel de elementos con altura como construcciones, y vegetación tomando como referencia la ortofoto verdadera generada en nFrames.

**Tabla 6.** Posibles errores para detectar

<b>GEOMETRÍA</b>
• Casa/ Edificio deformado
• Vía deformada
• Contornos Aserrados en vías u edificios
<b>RELIEVE</b>
• Corrimiento de ortofoto
<b>REFLEJOS</b>
• Reflejos en techos
• Reflejos en vías
<b>RADIOMETRIA</b>
• Diferencia de color entre fotogramas
<b>CONTINUIDAD</b>
• Diferencia de continuidad entre zonas de solape
<b>OTROS</b>
• Elementos fantasmas

2. Control geométrico

Para evaluar el ajuste a nivel del terreno se comparará, a partir de puntos de verificación establecidos, la precisión geométrica obtenida para determinar el RMSE (error medio cuadrático) de las longitudes a medir en las diversas ortofotos. Se tendrán en cuenta:

- **Distancia entre puntos de apoyo**

Se presenta, la distribución y coordenadas de los puntos de apoyo (ETRS89, proyección UTM30N) considerados para el control geométrico en las ortofotos.

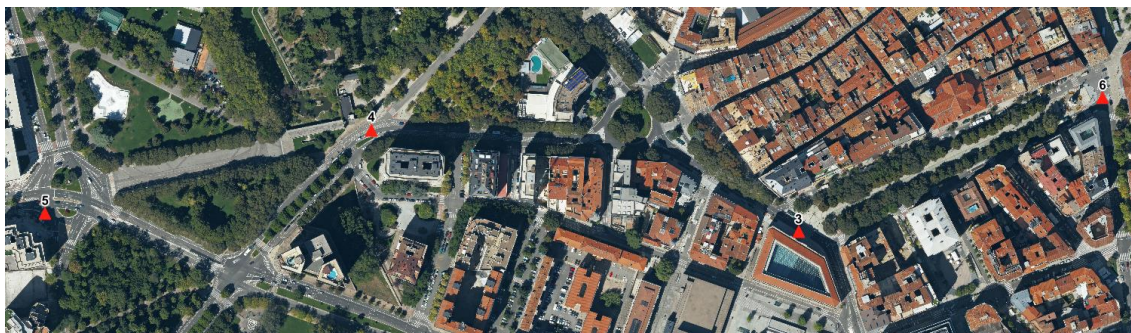


Figura 46. Distribución puntos de apoyo

Tabla 7. Coordenadas Puntos de apoyo

ID	X	Y
3	610643,560	4741129,241
4	610265,095	4741219,207
5	609976,022	4741145,533
6	610912,781	4741247,442

- **Elementos lineales medidos en campo y digitalizados ortofotos**

Asimismo, se medirán elementos lineales en la zona de estudio para contrastar con las distancias obtenidas a partir de la distancia métrica que ofrezca la imagen.



Figura 47. Ubicación de elementos medidos en campo

Para evaluar el ajuste a nivel de construcciones:

- Se digitalizarán polígonos en los tejados, y se cuantificará mediante el RMSE la diferencia de superficie.



**Figura 48.** Ubicación de tejados digitalizados en las distintas OV

*Aclaraciones*

Debido a la cantidad de comparaciones a establecer para cada producto, se seleccionaron en un análisis previo, las mejores pruebas obtenidas en Metashape.

Se intentan comparar los resultados con los productos de referencia elaborados por Tracasa con SureAerial de nFrames. En ciertos casos, como se mencionó anteriormente algunos productos del flujo de trabajo de Tracasa no estaban disponibles por lo que se buscaron soluciones alternativas para su comparación con Metashape.

**Figura 49.** Resumen de análisis a realizar

Productos	Análisis	Métricas
Nube de puntos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ajuste vertical de las nubes de puntos a planos de referencia obtenidos por restitución fotogramétrica.</li> <li>2. Vista de perfil.</li> <li>3. Distancias entre nubes de puntos.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Media, RMSE</li> </ol>
DSM	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ajuste vertical de los DSM</li> <li>2. Ráster de diferencias</li> <li>3. Vista de perfil</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. RMSE</li> <li>2. Histogramas</li> </ol>
Mallas 3D, Mallas 2.5D	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Encuestas de valoración</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. % de respuestas obtenidas</li> </ol>
Ortofotos Verdaderas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Control visual</li> <li>2. Control geométrico (a nivel suelo, y a nivel de construcciones)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. RMSE</li> </ol>

## 4. Resultados

Se resumen, en la Tabla 8, las características más importantes alcanzadas para los productos obtenidos a lo largo del flujo de trabajo que proporciona Metashape.

**Tabla 8.** Características principales de los resultados obtenidos con Metashape en las distintas pruebas.

Estudios	Nube de puntos densa	DSM	Malla	Ortofoto
Prueba 1	62.893.071 puntos	15 cm/pixel	12.578.235 caras	7 cm/pixel
Prueba 2	60.962 puntos	15 cm/pixel	-----	7 cm/pixel
Prueba 3	62.893.071 puntos	15 cm/pixel	30.413.736 caras	7 cm/pixel
Prueba 4	62.893.071 puntos	15 cm/pixel	45.260.820 caras	7 cm/pixel
Prueba 5	306.067.286 puntos	15 cm/pixel	919.222 caras	7 cm/pixel

### 4.1 Nube de puntos

Tal y como se ha comentado en la metodología, la valoración de la precisión vertical de cada nube se determina mediante el ajuste a los planos de referencia, y por otro, de forma visual, mediante la creación de vistas en perfil.

#### 4.1.1 Precisión vertical - Nube puntos

**Tabla 9.** Distancia a plano horizontal N<sup>o</sup>. 1

PLANO HORIZONTAL N.º 1	Cantidad de puntos	Media [m]	RMSE [m]
<i>Metashape (N+O)</i>	22.568	0,023	0,033
<i>Metashape (N)</i>	109.073	0,065	0,069
<i>nFrames (N+O+LiDAR)</i>	16.564	0,162	0,166
<i>nFrames (N+LiDAR)</i>	107.663	0,035	0,040

**Tabla 10.** Distancia a plano horizontal N<sup>o</sup>. 2

PLANO HORIZONTAL N.º 2	Cantidad de puntos	Media [m]	RMSE [m]
<i>Metashape (N+O)</i>	48.942	0,065	0,078
<i>Metashape (N)</i>	197.045	0,037	0,040
<i>nFrames (N+O+LiDAR)</i>	38.241	0,070	0,095
<i>nFrames (N+LiDAR)</i>	107.663	0,059	0,063

**Tabla 11.** Distancia a plano vertical N<sup>o</sup>. 3

PLANO VERTICAL N.º 3	Cantidad de puntos	Media [m]	RMSE [m]
<i>METASHAPE (N + O)</i>	4.477	0,106	0,132
<i>nFrames(N+O+LiDAR)</i>	1.569	0,130	0,152

El ajuste de cada nube de puntos analizada varía de acuerdo con el plano seleccionado, y el error es mayor en ambas nubes cuando el plano de referencia se orienta de manera vertical (Tabla 11). Por lo general, la dispersión de los puntos se produce tanto por encima del plano de referencia como por debajo. Cabe aclarar que no se analizaron las nubes de puntos nadirales en el plano vertical 3 dado que no contaban con información para ese plano.

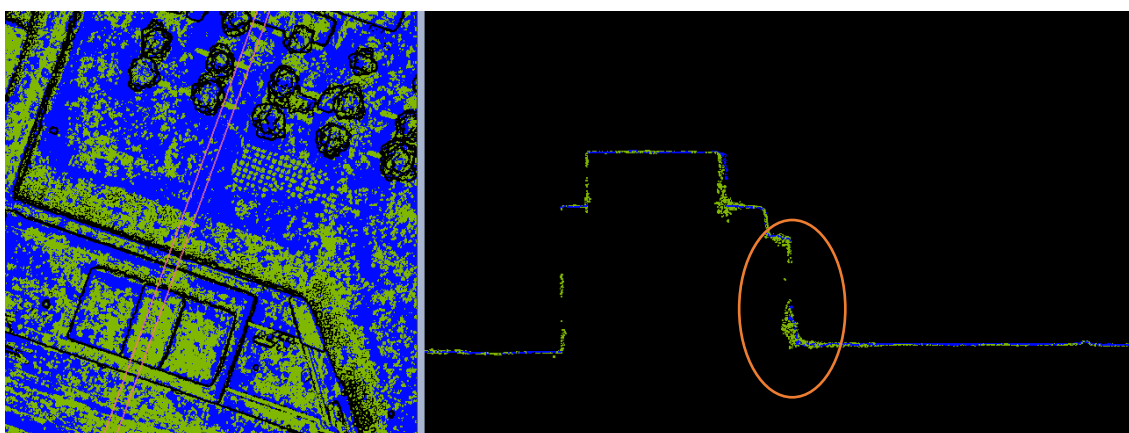


A su vez, el ajuste de los puntos a los planos horizontales 1 y 2 no produjo unos datos consistentes y claros. La adición de los datos LiDAR a las imágenes nadirales redujo los errores en el plano 1 pero no en el plano 2. De forma similar, la adición de las imágenes oblicuas a las nadirales (en Metashape) causó una reducción del error en el plano 1 pero lo incrementó en el 2. El proceso con mayor cantidad de datos de entrada (nFrames(N+O+LIDAR)) produjo curiosamente los peores resultados, peores que el procesado usando N+O en Metashape y peores que el basado en N+LiDAR en nFrames.

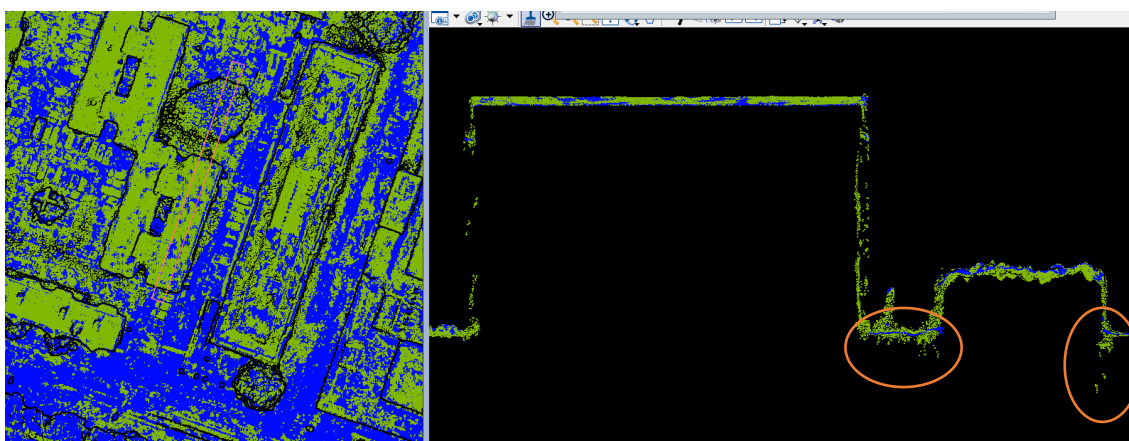
Con respecto a la cantidad de puntos analizados, esta varía por los parámetros seleccionados en cada caso y por la clasificación manual realizada. En este caso, la nube de Metashape presenta mayor cantidad de puntos que la de nFrames, en especial, cuando la correlación se realiza con imágenes nadirales dado que la precisión para generarlo fue con calidad extra alta.

#### 4.1.2 Perfiles

Se estudia la disposición de la información contenida en las nubes de puntos mediante la generación de perfiles.



**Figura 50.** Perfil 1 entre Nube Metashape (N) – Color verde- y Nube nFrames (N+LiDAR) –Color azul



**Figura 51.** Perfil 2 entre Nube Metashape N – Color verde - y Nube nFrames (N+LiDAR) –Color azul -

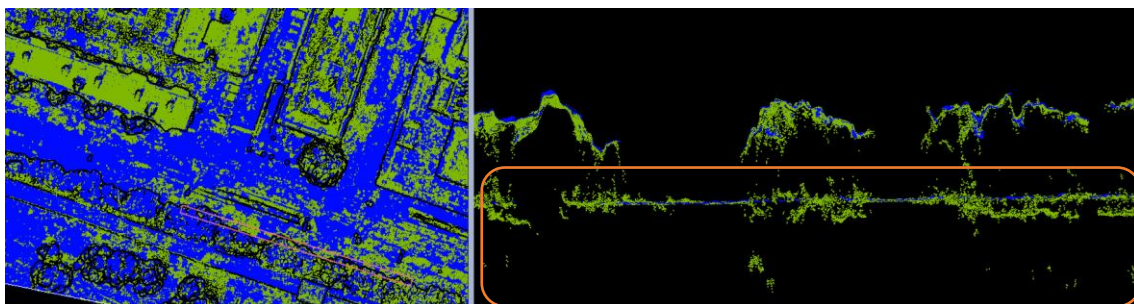


Figura 52. Perfil 3 entre Nube Metashape N – Color verde - y Nube nFrames (N+LiDAR) –Color azul –

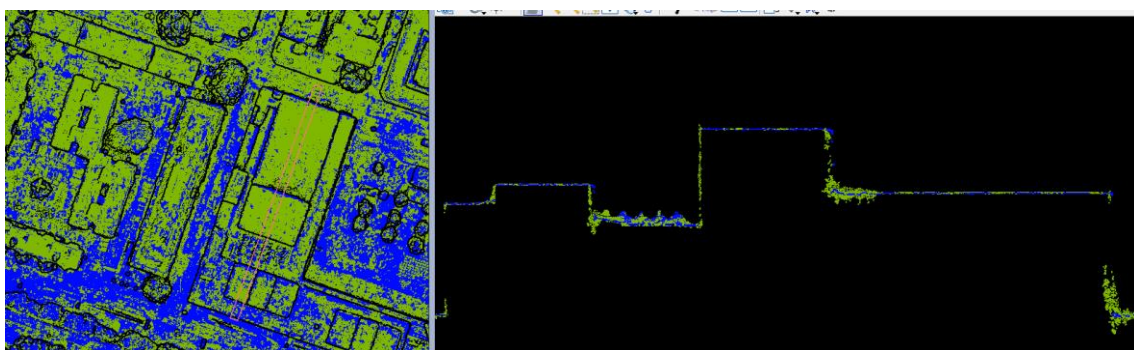


Figura 53. Perfil 3 entre Nube Metashape N – Color verde - y Nube nFrames (N+LiDAR) –Color azul –

En general, se observa que los puntos de cada nube se ajustan entre sí, pero que la obtenida por correlación de imágenes Nadirales en Metashape presenta mayor dispersión que la nube generada en nFrames con imágenes Nadirales e información LiDAR.

Se distingue sobre todo que la disposición es más irregular cuando el tejado de las edificaciones cambia de altura y existe sombra en la imagen, y también que esto último ocasiona que la dispersión se produzca por debajo del plano de referencia del suelo.

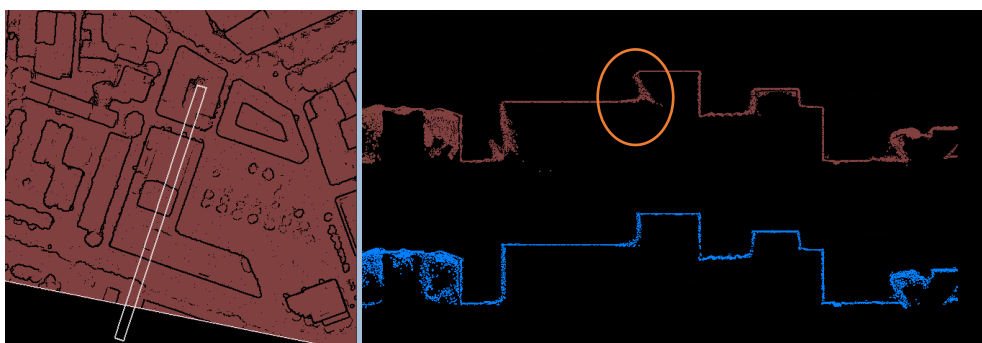


Figura 54. Perfil 4 entre Nube Metashape (N+O) – Color marrón- y Nube nFrames (N+O+LiDAR) –Color azul -

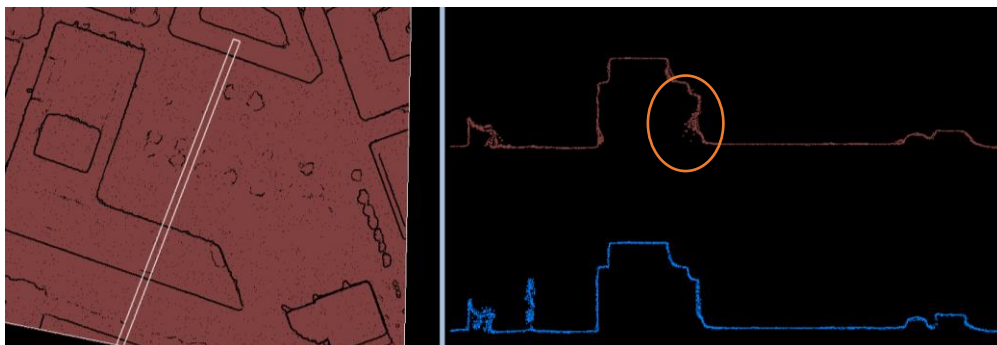
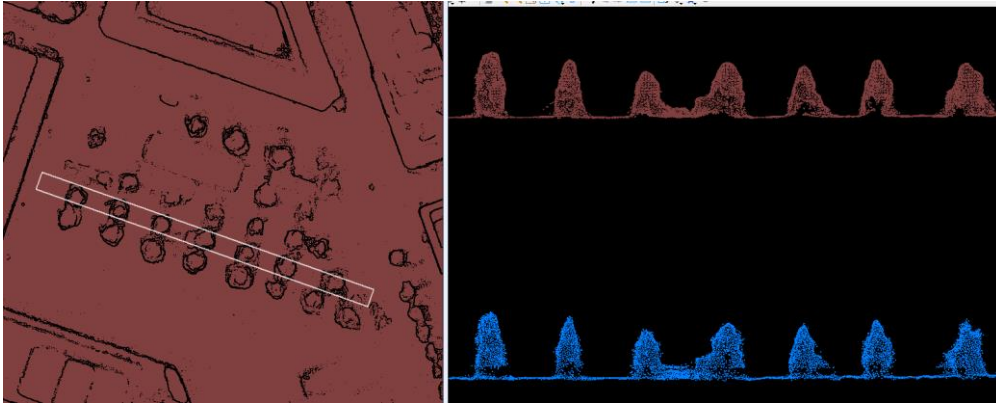


Figura 55. Perfil 5 entre Nube Metashape (N+O) – Color marrón- y Nube nFrames (N+O+LiDAR) –Color azul -



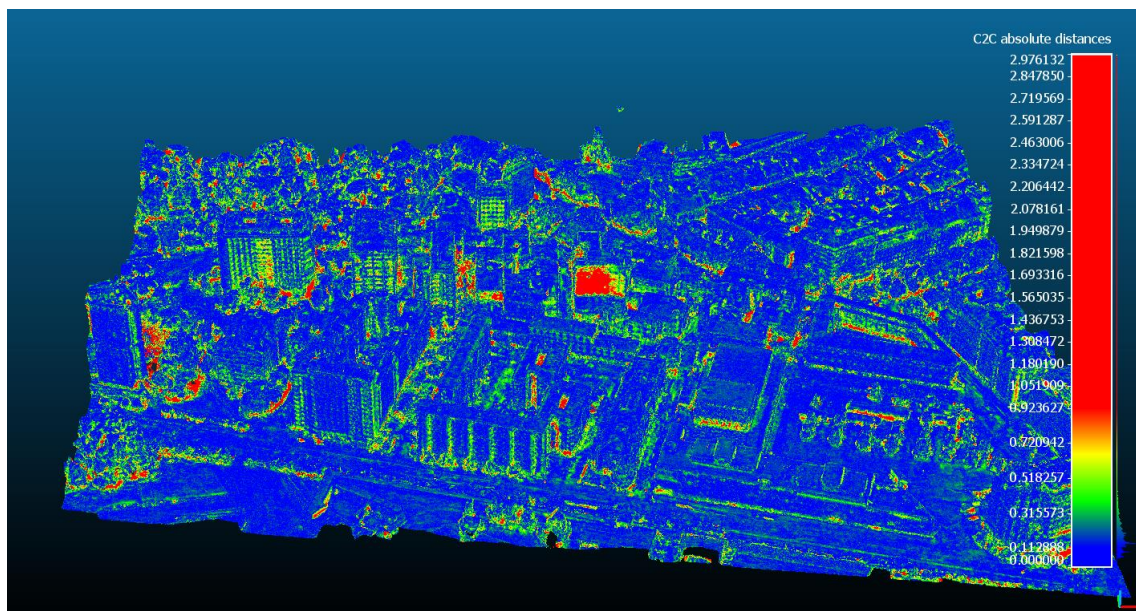
**Figura 56.** Perfil 6 entre Nube Metashape (N+O) – Color marrón- y Nube nFrames (N+O+LiDAR) –Color azul –

Por otra parte, se observan ejemplos en la Figura 54 y Figura 55 donde la nube de puntos de nFrames generada mediante la correlación de imágenes nadirales y oblicuas en conjunto con información LiDAR es más completa y menos dispersa que la nube de Metashape.

No se evidencia una clara relación entre los resultados obtenidos en el primer análisis sobre el grado de ajuste de los planos de referencia a las nubes estudiadas, con los análisis visuales de la información mediante vistas de perfil. Si bien, la nube de Metashape, demuestra que tiene un mejor ajuste para los planos estudiados por alcanzar un menor error, en el análisis visual se observa que para algunos sectores las nubes se representan de una manera más irregular y ruidosa que las de nFrames.

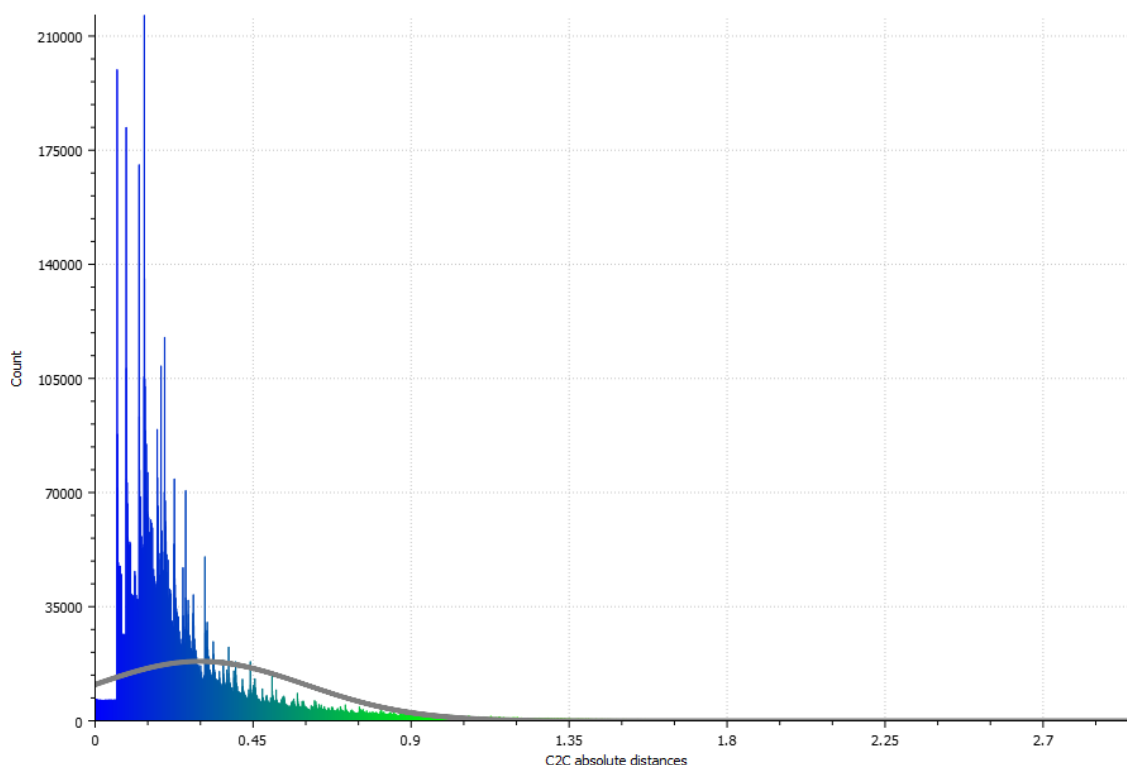
#### 4.1.3 Distancias entre nubes

Además, se determinó mediante el software Cloud Compare la distancia entre la nube de puntos de Metashape (N+O) a la nube de nFrames (N+O+LiDAR) elegida como nube de referencia.



**Figura 57.** Distancia de nube Metashape (N+O) a nube de referencia nFrames (N+O+LiDAR)

Gauss: mean = 0.299448 / std.dev. = 0.300730 [4620 classes]



**Figura 58.** Cálculo de distancia de nube Metashape (N+O) a nube de referencia nFrames (N+O+LiDAR).

Como se visualiza en la Figura 57, las máximas variaciones ocurren principalmente en las fachadas de los edificios (planos verticales), en las plantas bajas de los mismos, y en zonas que bordean a la vegetación. Las nubes de puntos consideradas tienen entre sí una distancia media de 0.29m y una desviación estándar de 0.30m.

## 4.2 Modelos Digitales de Superficies (DSM)

### 4.2.1 Precisión vertical - DSM

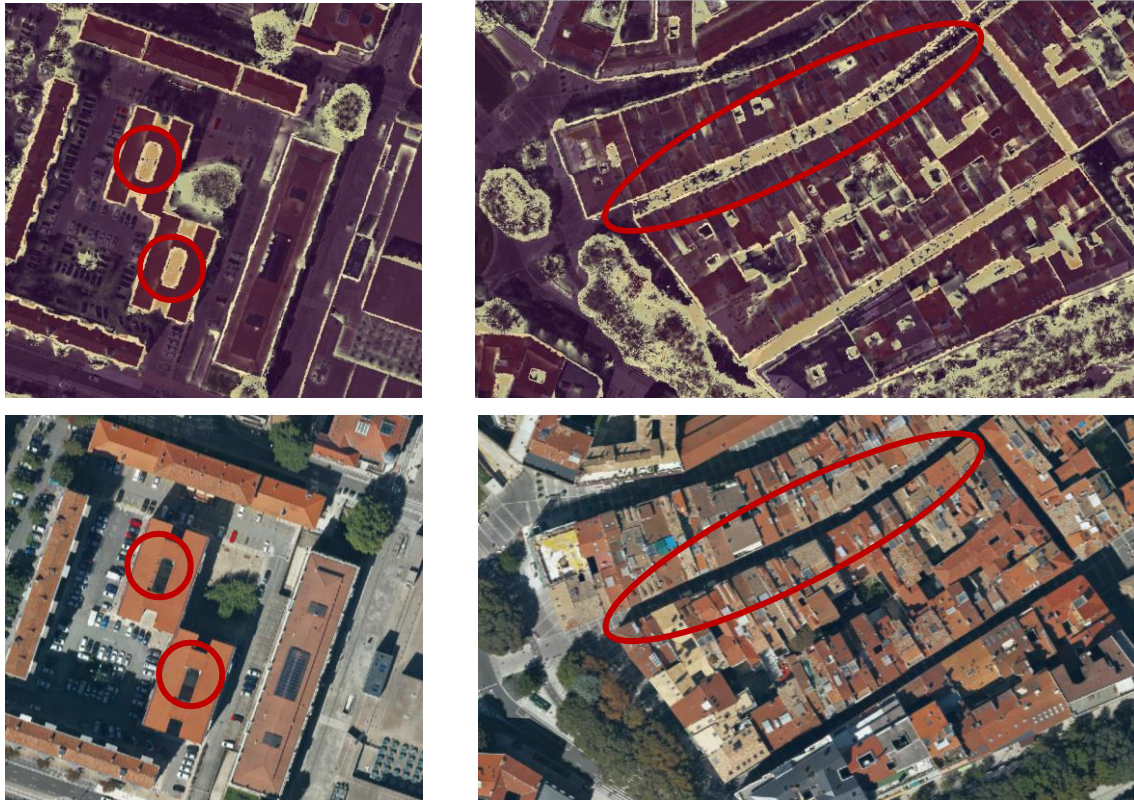
**Tabla 12.** Medición de coordenada Z en los DSMs generados y RMSE de medición

Id	DSM - P1 [m]	DSM - P3 [m]	DSM - LiDAR [m]
1	497,685	497,582	497,554
2	501,838	501,865	501,905
3	497,409	497,564	497,421
4	495,899	495,969	495,906
<b>RMSE</b>	0,0943	0,1261	<b>0,0518</b>

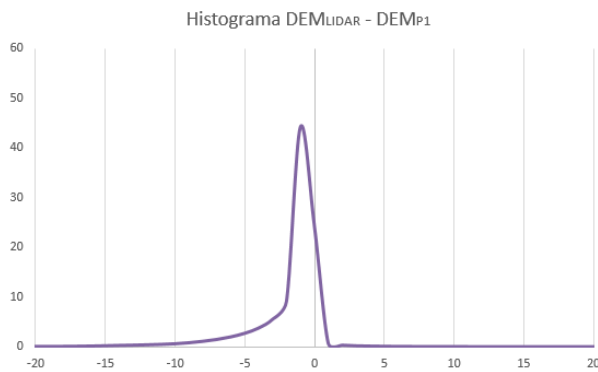
Los resultados que se observan en la Tabla 12, demuestran que el DSM generado mediante la nube de puntos LiDAR, proporciona un mejor ajuste con respecto a la precisión vertical que los modelos DSM Prueba 1 y Prueba 3 de Metashape. Por este motivo, se tomará al mismo como modelo de elevación de referencia para el próximo análisis.

### 4.2.2 Comparación N°1: DSM-Metashape (N + O) vs DSM-(LiDAR)

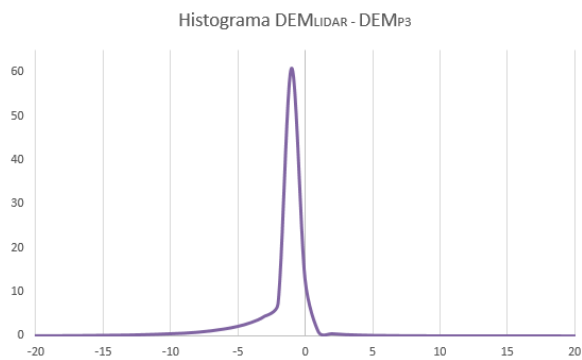
Se analizan las diferencias de la información de altura que proporciona por un lado la información LiDAR, y por otro, el conjunto de imágenes nadirales y oblicuas. Para ello, se contrastarán los datos mediante la obtención de un ráster que ofrezca la diferencia entre DSM (LiDAR) - DSM (N + O).



**Figura 59.** Diferencias de altura observados para el raster  $DSM_{LIDAR} - DSM_{P1}$



**Figura 60.** Histograma de raster de diferencia entre  $DSM_{LIDAR}$  y  $DSM_{P1}$



**Figura 61.** Histograma de diferencia entre  $DSM_{LIDAR}$  y  $DSM_{P3}$

Las pruebas 1 y 3 de Metashape se distinguen por sus datos de partida. En la primera se genera el DSM a partir de la nube de puntos densa, mientras que en el segundo se hace a partir de la malla 3D. Para ambos casos, las mayores discrepancias de altura en los DSMs obtenidos se visualizan para las zonas donde hay mayor presencia de

vegetación como, por ejemplo, los árboles ubicados en las proximidades de la Ciudadela, del Jardín de la Taconera y del Paseo Sarasate.

Asimismo, se visualizan diferencias en aquellas áreas donde las imágenes capturadas presentan sombras, como los bordes de edificios, patios interiores, calles estrechas del casco antiguo de Pamplona, etc. En estas zonas los algoritmos utilizados para detectar la coincidencia de puntos homólogos entre imágenes presentan mayores dificultades por las oclusiones y la insuficiente iluminación.

### Perfil DSM

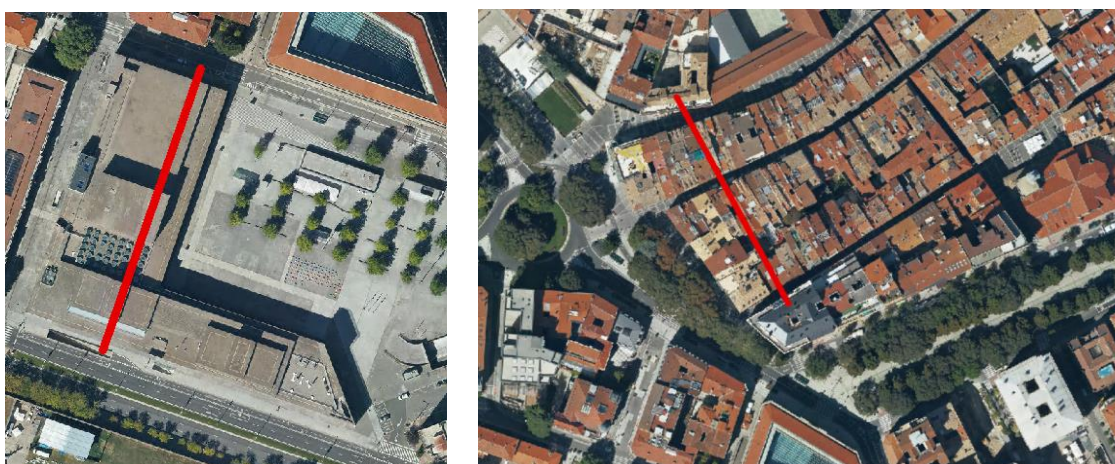


Figura 62. Perfil 1 – izquierda - y Perfil 2 - derecha-

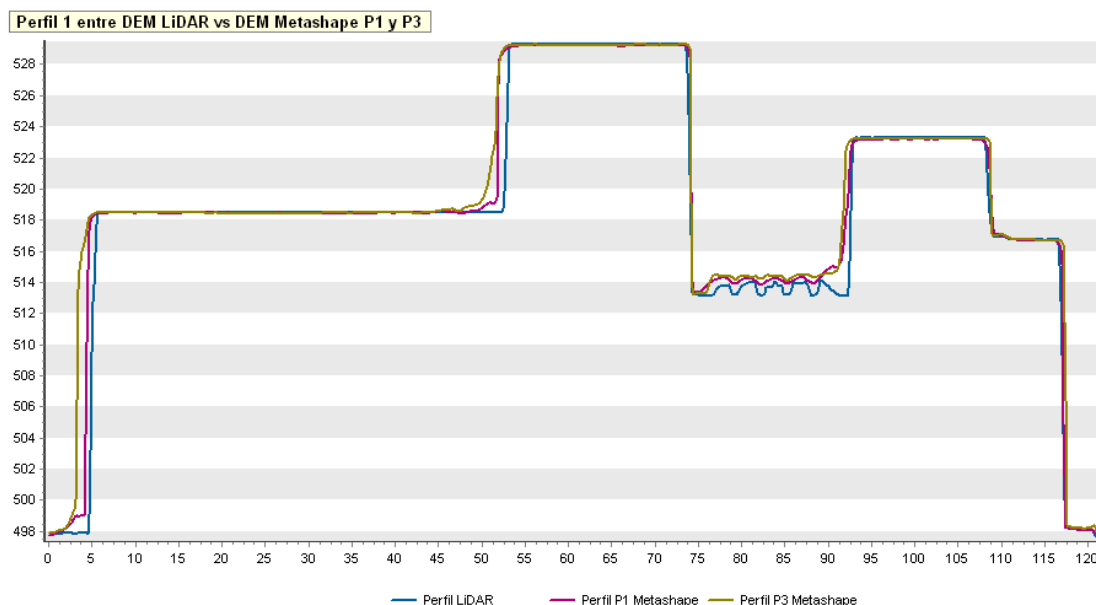
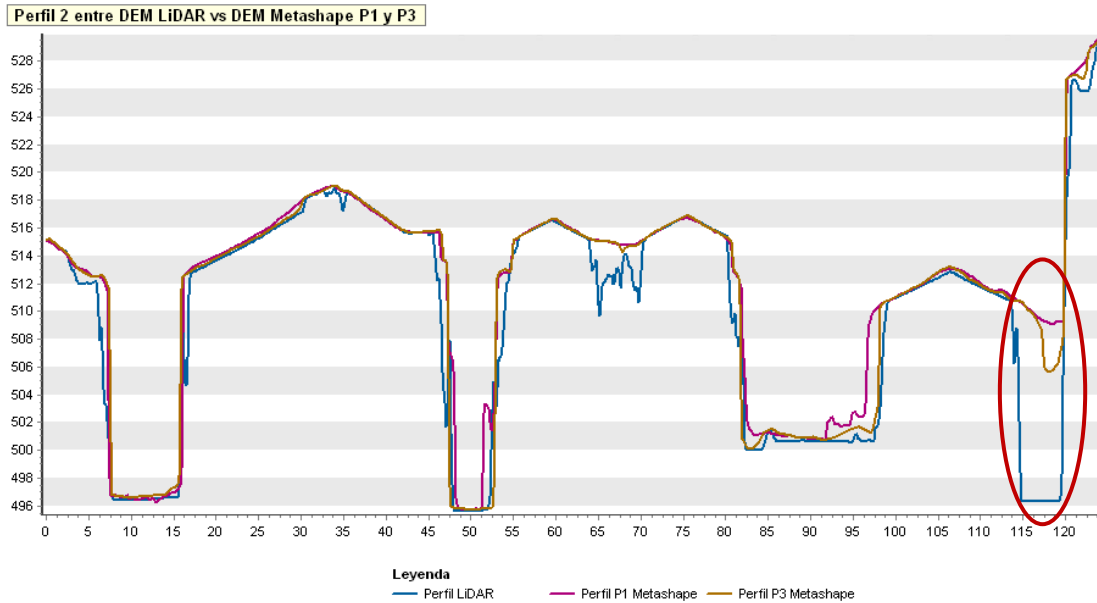


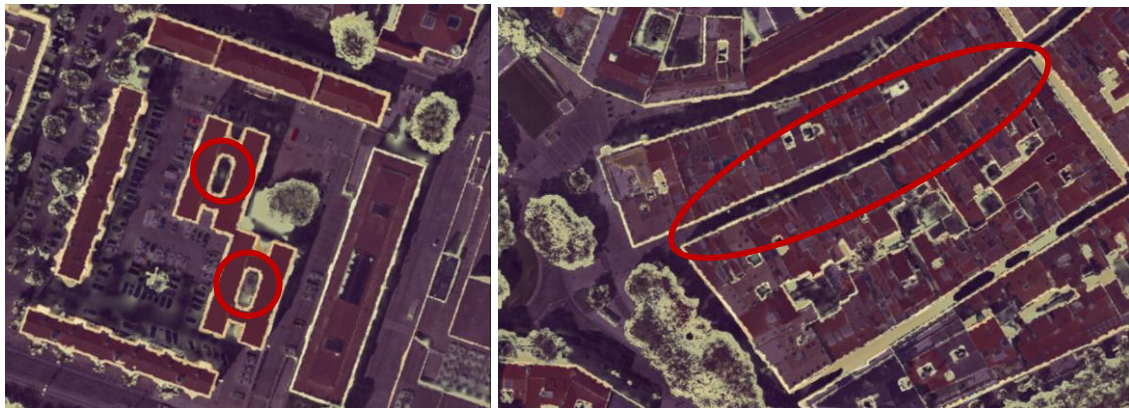
Figura 63. Comparativa de perfil 1 del Edificio Baluarte entre  $DSM_{LiDAR}$ ,  $DSM_{P1}$  y  $DSM_{P3}$

Considerando el  $DSM_{LiDAR}$  como referencia, se observa en el corte de perfil de la Figura 63 que los DSMs de Metashape tienen un menor ajuste para las fachadas verticales más altas en las que se producen sombras en las imágenes.

Si bien en este caso la Prueba 1 se ajusta mejor al  $DSM_{LiDAR}$  que la Prueba 3, se puede apreciar en el siguiente ejemplo (Figura 64) que existen menores diferencias de altura de la Prueba 3 con el LiDAR para los patios interiores de las edificaciones y las calles estrechas.



**Figura 64.** Comparativa de perfil 2 del Edificio Baluarte entre DSM<sub>LiDAR</sub>, DSM<sub>P1</sub> y DSM<sub>P3</sub>



**Figura 65.** Diferencias de altura observados para el raster DSMLiDAR – DSMP3

#### 4.2.3 Comparación N°2: DSM-nFrames (N) vs DSM-nFrames(N + LiDAR)

Se estudia, además, la diferencia de elevación entre los DSMs de nFrames generados a partir de imágenes nadirales por un lado, y por otro incluyendo imágenes nadirales e información LiDAR en una zona próxima a la anterior (Barrio Iturrama y Ciudadela).

Los resultados demuestran que los valores obtenidos en el ráster de diferencia son similares al primer caso estudiado y que las zonas con mayores discrepancias son consonantes tanto si se consideran imágenes nadirales en conjunto con imágenes oblicuas como solamente imágenes nadirales. Las diferencias de elevación en los histogramas son  $\pm 2m$ .

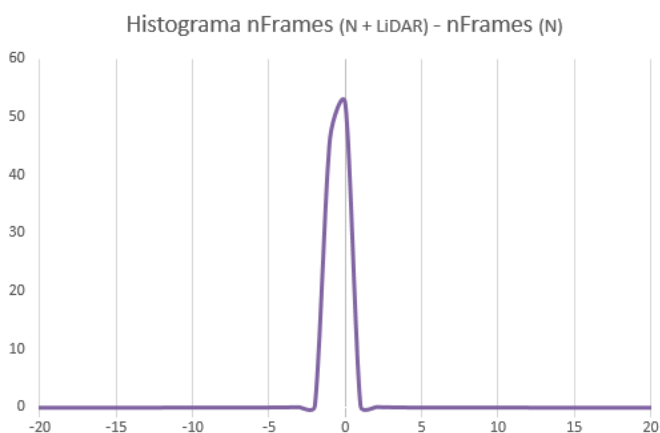


Figura 66. Histograma de diferencia entre DSMnFrames (N + LiDAR) y DSMnFrames (N)

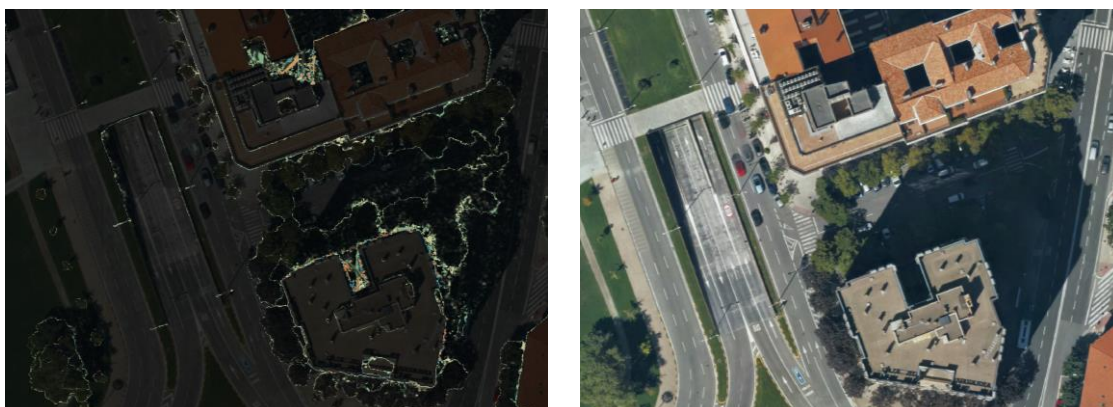


Figura 67. Ejemplo de diferencias de altura observados para el raster DSMnFrames (N + LiDAR) y DSMnFrames (N) en lugares con sombra, con presencia de vegetación o en bordes de edificación



Figura 68. Ejemplo de diferencias de altura observados para el raster DSMnFrames (N + LiDAR) y DSMnFrames (N) en lugares como patios internos de edificios, bordes de edificación y de vegetación.

### 4.3 Ortofotos Verdaderas

Para valorar y comparar la calidad de las ortofotos verdaderas generadas, se lleva adelante en una primera instancia un control de calidad visual en donde se identifican distintos problemas derivados de su creación. Además, se intenta cuantificar el error mediante la medición de puntos de apoyo, y de elementos lineales para conocer cuánto se ajusta la ortofoto a nivel del terreno y, mediante la digitalización de tejados descubrir el error y ajuste para los elementos en altura.

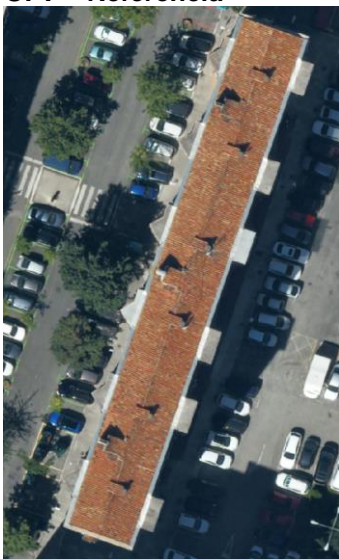
#### 4.3.1 Control de Calidad Visual

A continuación, se presentan las casuísticas más importantes que se derivan de la observación y análisis de cada ortofoto, y el resto se pueden encontrar en el Anexo.

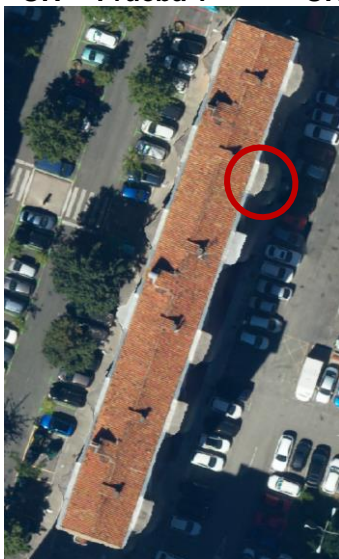


1. Problema Geometría. Edificación deformada (Balcones)

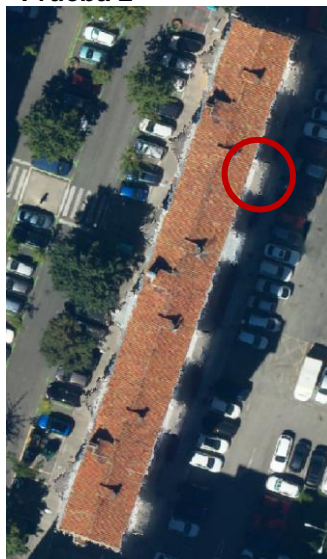
O.V – Referencia



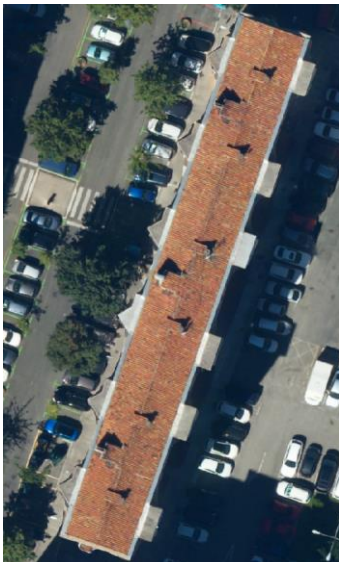
O.V – Prueba 1



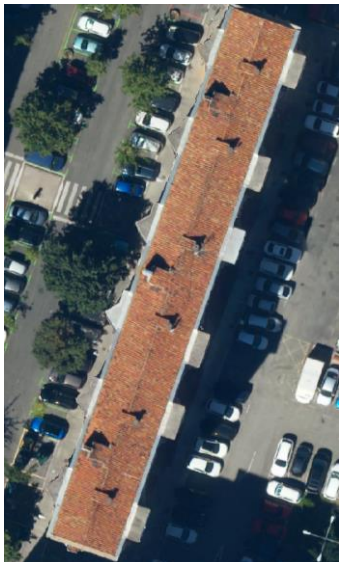
O.V – Prueba 2



O.V – Prueba 3



O.V – Prueba 4



O.V – Prueba 5



Figura 69. Comparación visual 1 entre Ortofotos Verdaderas (O.V)

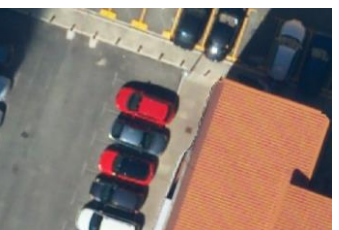
Se observa al compararlas que los balcones de la Prueba 1 y Prueba 2, no arrojan buenos resultados dado que sus límites se representan con una mala definición, y no rectos, mientras que los balcones de la Prueba 3, Prueba 4, Prueba 5 se aproximan mejor a la O.V. de referencia.

2. Problema Geometría. Contornos / Bordes aserrados en edificios/ Elementos fantasmas

O.V – Referencia



O.V – Prueba 1



O.V – Prueba 2



O.V – Prueba 3



O.V – Prueba 4



O.V – Prueba 5

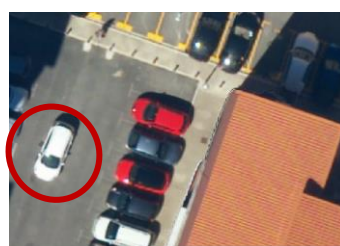
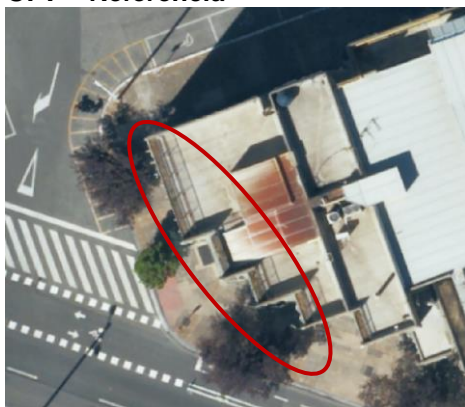


Figura 70. Comparación visual 2 entre Ortofotos Verdaderas (O.V)

Los resultados obtenidos en la Prueba 2, demuestran que el mismo presenta dificultades para representar de manera correcta los contornos y siluetas de las edificaciones en altura. Por otro lado, en la ortofoto de referencia se visualiza un auto “fantasma” que solo está contemplado en los resultados de la Prueba 5.

### 3. Problema Continuidad. Problemas de continuidad

O. V – Referencia



O.V – Prueba 1



O.V – Prueba 3



O.V – Prueba 4



Figura 71. Comparación visual 3 entre Ortofotos Verdaderas (O.V)

En este caso, todas las pruebas muestran dificultades para la representación del contorno de la edificación, presentando mayores problemas en el Sector Oeste.

#### 4.3.2 Control Geométrico

Se precinden de los análisis de control de calidad geométrica las pruebas 2 y 5. La primera, porque los resultados alcanzados mediante el control visual demostraron que la ortofoto generada es de poca calidad para futuros trabajos de cartografía, y la segunda porque el área de estudio generada es inferior a la de las demás y no existen puntos de control o mediciones en la zona.

##### A. Distancia entre puntos de apoyo

Se presenta, los cálculos de distancias entre los puntos establecidos y sus correspondientes errores.

**Tabla 13.** Cálculo de distancia entre Puntos de apoyo en las distintas OV

	Medida [m]	Med. OV Ref [m]	Med. OV P1 [m]	Med. OV P3 [m]	Med. OV P4 [m]
<b>Distancia 4-5</b>	298,314	298,244	298,225	298,264	298,301
<b>Distancia 3-6</b>	294,026	294,035	294,093	294,005	294,053
<b>Distancia 3-4</b>	389,011	389,035	389,088	389,11	389,115

**Tabla 14.** Error de medida [m] en cada OV

RMSE OV [m]	RMSE P1 [m]	RMSE P3 [m]	RMSE P4 [m]
0,043	0,078	0,065	0,062

Los cálculos de distancia entre los puntos de apoyo reflejan que la medida realizada en la ortofoto de referencia cuenta con menor error de ajuste, seguido de la Prueba 4, Prueba 3 y Prueba 1.

### **B. Elementos lineales medidos en campo y digitalizadas en ortofotos**

**Tabla 15.** Comparación de medidas en las distintas OV

ID	Medida [m]	Med. OV Ref [m]	Med. OV P1 [m]	Med. OV P3 [m]	Med. OV P4 [m]
1	22,870	22,851	22,958	22,911	22,898
2	1,510	1,528	1,533	1,544	1,527
3	6,960	6,944	6,859	6,857	6,866
4	8,100	8,006	7,942	7,971	7,970
5	3,360	3,365	3,297	3,243	3,338
6	3,980	3,969	3,992	3,943	4,004
7	3,585	3,570	3,522	3,546	3,581

**Tabla 16.** Error de medida [m] en cada OV

RMSE OV [m]	RMSE P1 [m]	RMSE P3 [m]	RMSE P4 [m]
0,04	0,09	0,08	0,06

Todas las ortofotos tienen un buen nivel de ajuste a nivel de suelo, menor a 10 cm dado que este asociado con el tamaño de píxel de las ortofotos analizadas (7cm). La ortofoto verdadera de referencia presenta mejor ajuste a las mediciones de campo realizadas, mientras que la ortofoto de la Prueba 1 tiene menor ajuste.

### **C. Comparación de tejados digitalizados en ortofotos**

**Tabla 17.** Superficie de tejados en distintas OV

id	Sup. Ref OV [m <sup>2</sup> ]	Sup. P1 [m <sup>2</sup> ]	Sup. P3 [m <sup>2</sup> ]	Sup. P4 [m <sup>2</sup> ]
1	5,123	4,178	5,084	4,881
2	11,916	9,663	12,406	12,117
3	6,430	5,533	6,295	6,470
4	137,481	136,476	138,609	139,474
5	38,106	39,119	39,249	39,489

**Tabla 18.** Error de medida [m] en cada OV

RMSE P1 [m]	RMSE P3 [m]	RMSE P4 [m]
1,327	0,753	1,094

La Prueba 1 de Metashape presenta menor ajuste en cuanto a la representación de sus construcciones, como tejados y balcones, ya que presenta mayor error cuadrático correspondiente a las áreas digitalizadas y evaluadas en la ortofoto verdadera.

#### 4.4 Malla

Se presentan los principales resultados extraídos de la encuesta llevada a cabo en la plataforma Google Forms con un total de 60 respuestas. En la misma se intentó determinar, a partir de la percepción visual de los encuestados, cuál es el modelo que representa y se asemeja más a la realidad del sector urbano estudiado.

Los modelos que principalmente se comparan son los resultados de la Prueba 1 y Prueba 3 de Metashape frente al obtenido por nFrames. La prueba 1 utiliza como origen de los datos a la nube de puntos densa, mientras que la Prueba 3 a los mapas de profundidad.

#### Comparativa 1 - Modelo 3D con textura

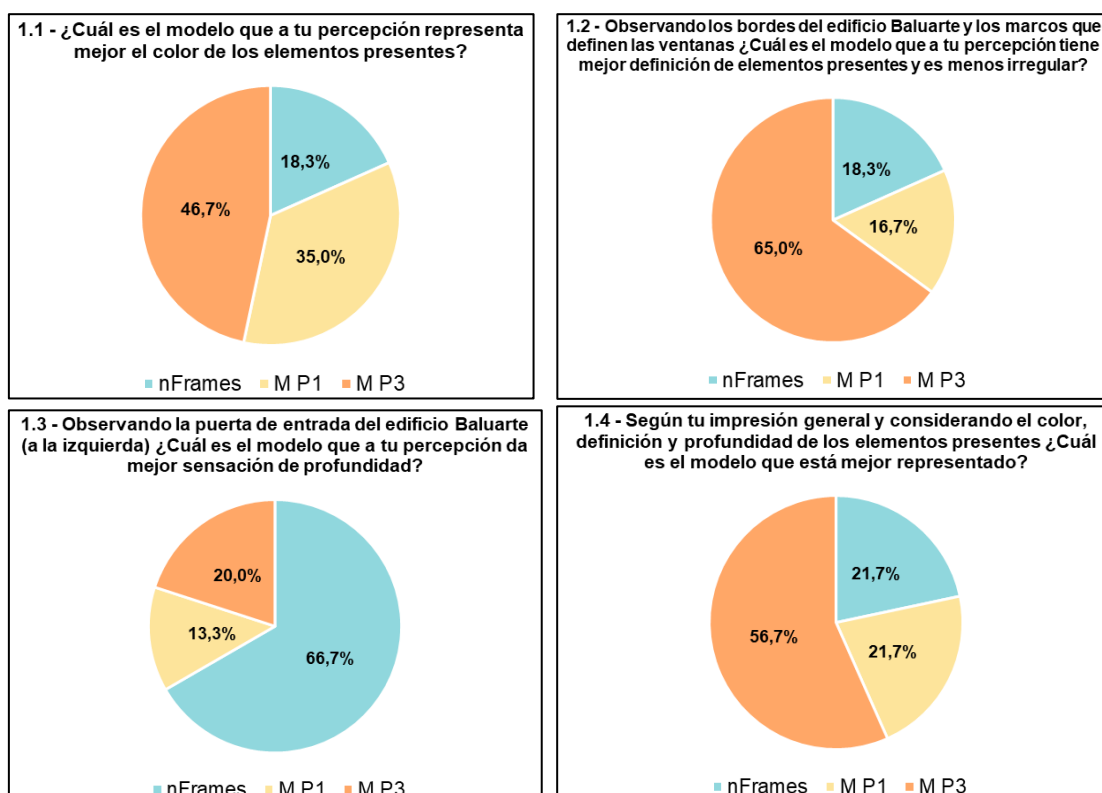
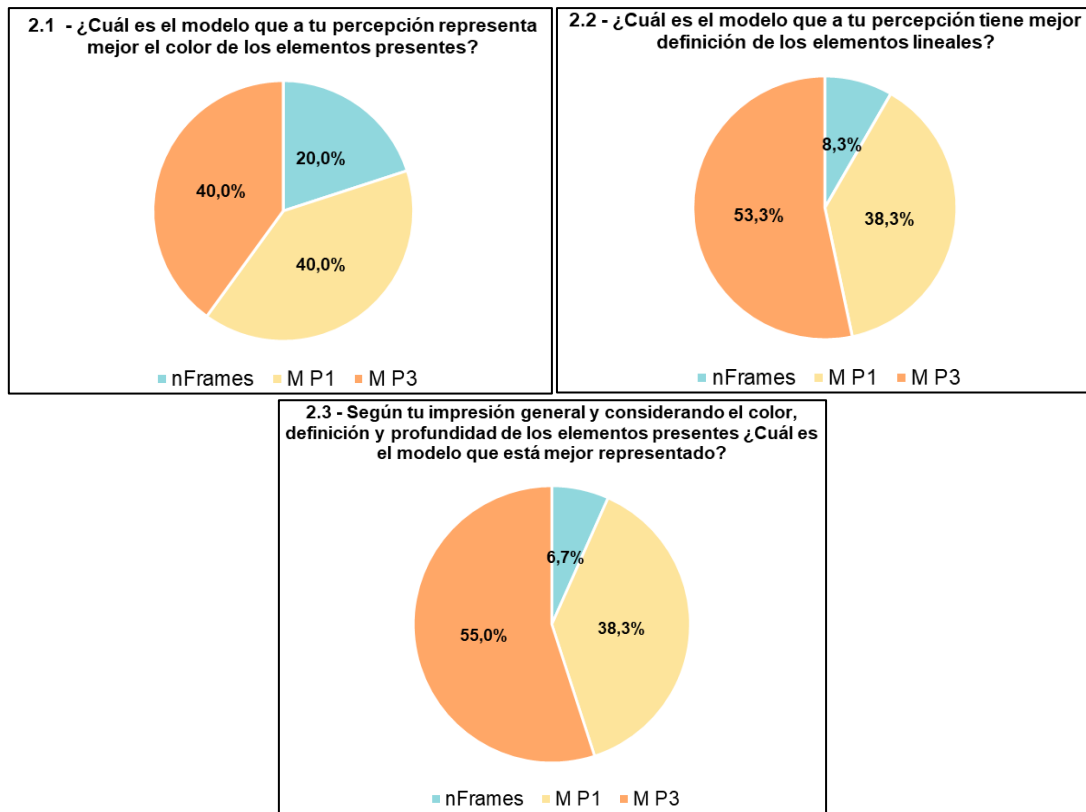


Figura 72. Resultados comparativa 1

Para la generación de modelos 3D texturizados, la información RGB capturada con los sistemas de cámaras es un requisito necesario para poder texturizar el modelo resultante. En este caso, la contribución del sensor oblicuo constituye una gran ventaja, ya que agrega las vistas a las fachadas.

Los resultados de la comparativa 1 señalan que el modelo de Metashape de la Prueba 3, con un 56.7% de votos, como el modelo que está mejor representado considerando el color, marcos que definen las ventanas, la homogeneidad y mejor definición de los objetos presentes. Por otro lado, las respuestas también indican que el modelo de nFrames, con un 66.7% de votos, es el modelo que da la sensación de representar mejor la profundidad de elementos, como por ejemplo en este caso las escaleras del Edificio Baluarte localizado a la izquierda de la imagen analizada (Anexo - 5.1.1 Comparativa 1 – Modelos con Textura).

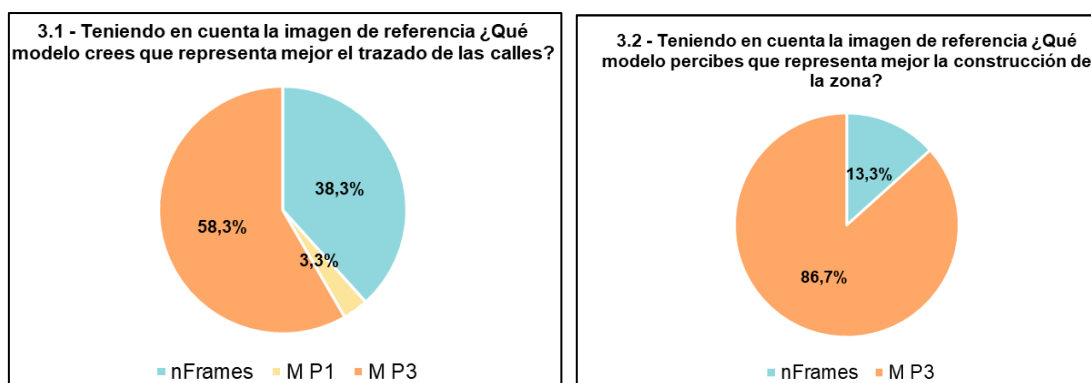
**Comparativa 2 - Modelo 3D con textura**



**Figura 73.** Resultados comparativa 2

En la comparativa 2, de acuerdo al 55%, el mejor modelo 3D con textura representado se percibe como el correspondiente al producto de Metashape Prueba 3. Con respecto al color de los mismos, las respuestas se dividen entre ellos, el 40% es para la Prueba 3, el 40% para la Prueba 1 y el 20% para el modelo de nFrames.

**Comparativa 3 -Modelo 3D sombreado**



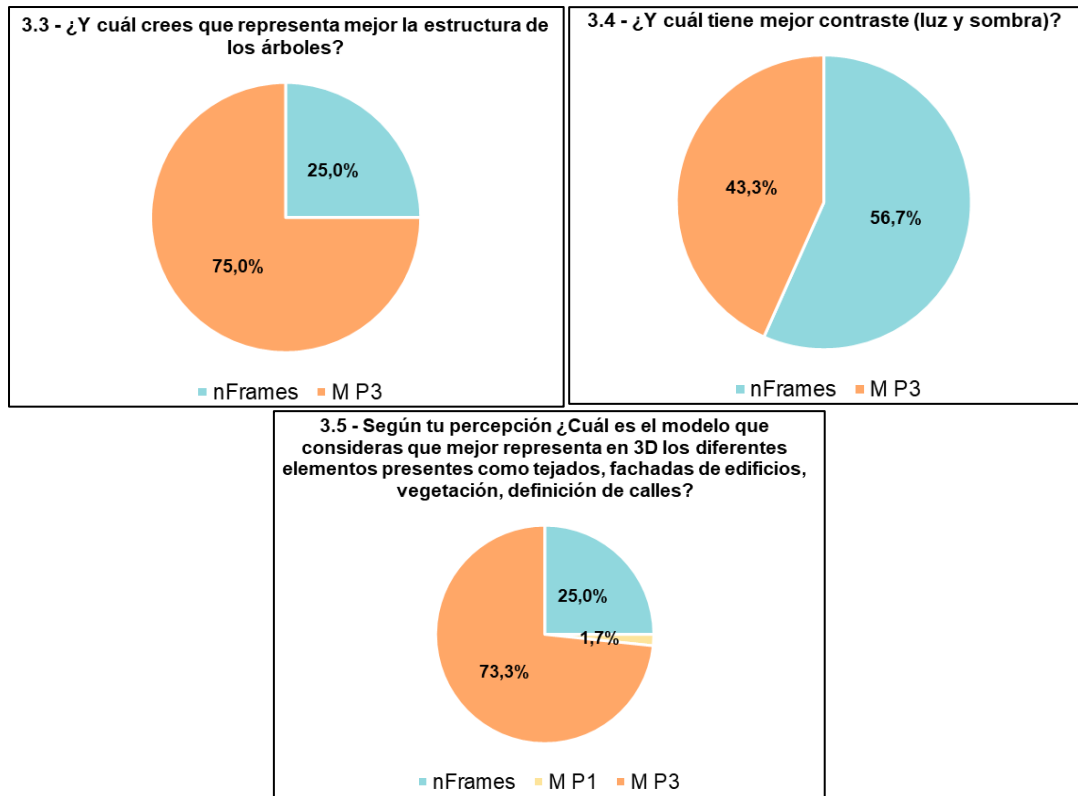
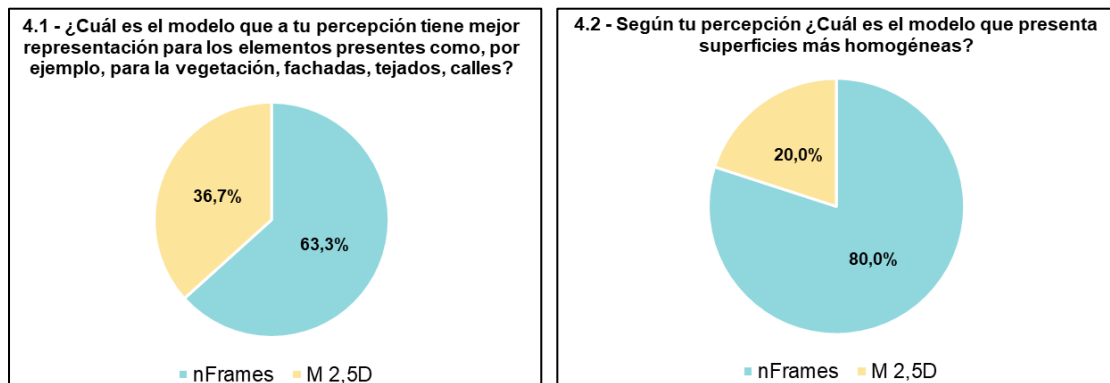


Figura 74. Resultados comparativa 3

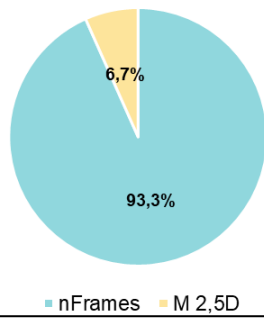
En esta sección las respuestas se dirigieron hacia el modelo de nFrames y la prueba 3 de Metashape, prescindiendo en su mayor medida de la prueba 1.

El 73.3% de los encuestados, apunta a que el modelo que representa mejor a los diferentes elementos presentes en la zona es el de Metashape Prueba 3. Por su parte, el 56.7% de respuestas señalan que el contraste entre luz y sombra es mejor para el modelo de nFrames.

**Comparativa 4 - Modelo 2.5D**



4.3 - ¿Cuál es el modelo que a tu percepción tiene mejor contraste (luz y sombra) para los elementos presentes?



**Figura 75.** Resultados comparativa 4

Los resultados de las comparativas 4 y 5 (Anexo-5.1.5 Comparativa 5 – Modelos 2.5D) para los modelos 2.5D generados, reflejan que el modelo generado por nFrames es mejor frente al de Metashape.

En la mayor parte de las preguntas, el modelo de nFrames es elegido por lo general por encima del 60% de votos como aquel que representa mejor a los elementos presentes de vegetación, fachadas, calles. Además, considerado como aquel que presenta las superficies más homogéneas y con mejor contraste de luz y sombra.

## 5. Conclusiones

### 5.1 Conclusiones generales

El desarrollo del presente trabajo ha permitido obtener diferentes productos geoespaciales tales como nubes de puntos, mallas 3D, mallas 2.5D, modelos digitales de elevaciones y ortofotos verdaderas mediante la utilización de información capturada con el sensor híbrido CityMapper-2.

Para conocer y valorar los aportes de cada fuente de información utilizada (imágenes o LiDAR) al producto final, se establecieron diferentes comparaciones entre cada uno de los productos generados a través del software Agisoft Metashape con el correspondiente producto de referencia generado por Tracasa Instrumental a través del software nFrames. Las diferentes pruebas realizadas en Agisoft Metashape estuvieron encaminadas a trabajar con distintos tipos de datos y evaluar distintas alternativas de procesado, es decir, comparar los productos generados a partir de la importación y carga de imágenes nadirales; de imágenes nadirales y oblicuas; así como también mediante la importación de nube de puntos LiDAR sobre la zona de estudio.

Para realizar la selección tanto de las imágenes como del bloque de datos LiDAR fue necesario realizar, sobre la zona de estudio, una evaluación de la manera en que se capturó la información mediante la identificación de la huella de pasada del sensor. Además, como se detalló en la metodología se probaron diferentes parámetros para la generación de los productos, radicando la principal diferencia en el origen de los datos considerados. Por ejemplo, para la malla 3D, la Prueba 1 tomaba como origen de los datos a la nube de puntos densa, mientras que la Prueba 3 tomaba como origen a los mapas de profundidad. Otras opciones estuvieron encaminadas a la reducción del solape transversal entre las imágenes, en vez de 80% considerando un 60%, y también a evaluar el nivel de calidad para procesar la información, donde un mayor nivel de calidad implica un mayor tiempo de procesamiento.

A nivel general, se evidencia una mayor completitud y calidad en la información generada para zonas urbanas complejas en los productos de referencia que combinan datos LiDAR con los derivados del sistema de cámaras nadirales y oblicuas. Las debilidades propias de cada subsistema que forma parte del sensor híbrido se ven fortalecidas ante la vinculación de información entre sensores pasivos y activos.

Los diferentes productos que se han generado y comparado, evaluando distintas fuentes de información y procesamiento, se presentan como alternativas a contemplar ante futuras precisiones y exigencias que pueda requerir la solicitud de un trabajo.

### 5.2 Conclusiones específicas

Se extraen para cada producto las siguientes conclusiones:

- Los análisis realizados con los modelos digitales de elevaciones resultan reveladores para comprender el aporte de la información LiDAR. Por un lado, se comprobó que el DSM generado con puntos LiDAR posee un mejor grado de ajuste vertical en los puntos de apoyo evaluados que los comparados con los DSM generados por correlación entre imágenes. Por otra parte, los rasters de diferencias de elevación calculados reflejaron que existen mayores contribuciones del LiDAR principalmente para las zonas urbanas que cuentan con calles muy estrechas, zonas donde hay mucha presencia de vegetación, como así también para zonas con



sombras en las imágenes capturadas, y para patios interiores o ductos de ventilación de los edificios.

Si no se contará con datos LiDAR, el DSM generado en la Prueba 3, que toma como origen a la malla 3D, muestra un resultado óptimo para la caracterización de las alturas en sectores urbanos complejos.

- Las nubes de puntos densas obtenidas se presentan como productos intermedios, los cuales sirven de insumo para obtener DSMs o mallas 2.5D/3D. A partir de los cortes de perfil realizados, se pudo apreciar el aporte de la correlación de imágenes oblicuas principalmente para las fachadas de los edificios. Además, cuando la nube de puntos mostraba una mayor dispersión en cuanto a su disposición sobre fachadas o en zonas con presencia de vegetación, esto se correspondía con sombras en las imágenes. Las comparativas establecidas para determinar el grado de ajuste de cada nube de puntos a planos de referencia obtenidos por restitución fotogramétrica no arrojaron resultados claros, y concisos.
- En las encuestas se pudo establecer la calidad visual de las mallas estudiadas, a partir de la consideración de distintas medidas, como por ejemplo mejor percepción del color, definición de elementos lineales, representación del grado de homogeneidad, profundidad, y elementos presentes como construcciones y árboles.

Se determinó por encima del 60% de votos que el modelo 2.5D de nFrames, obtenido a partir de la correlación de imágenes nadirales en conjunto con datos LiDAR, como aquél que mejor caracteriza los elementos urbanos frente al generado en Metashape por la correlación de imágenes nadirales.

El producto de la prueba 3 de Metashape, tanto para las mallas con y sin textura, resultó el modelo más elogiado por tener una aparente mejor representación tridimensional para la zona urbana de estudio. El mismo fue obtenido tomando como origen a los mapas de profundidad derivados de la correlación de imágenes nadirales y oblicuas. Por su parte el modelo 3D de nFrames, obtenido mediante la correlación de imágenes nadirales y oblicuas más el aporte de LiDAR, fue considerado como el modelo que representa y da mejor sensación de profundidad. Además, se consideró que este último en el modelo sombreado tiene mejor contraste de luz y sombra.

- Ninguna prueba mejoró a la ortofoto de referencia de nFrames, obtenida a partir de la correlación de imágenes nadirales con datos LiDAR. Las diferentes ortofotos verdaderas generadas en Metashape cuentan con un buen nivel de ajuste a nivel de suelo, dado que así lo reflejó tanto el análisis a nivel visual como a través de la determinación de distancias entre puntos de apoyo y elementos lineales medidos en el terreno. Sin embargo, tras analizar el ajuste de las construcciones, se evidenció que las ortofotos de la Prueba 1 y la Prueba 2 eran las que peor ajuste tenían, mientras que la ortofoto derivada de la Prueba 3 demostró un mayor ajuste para la definición de las construcciones, seguida de la Prueba 4.

## 6. Referencias

- Abdullah, Q., & Seppi, J. (2021). Building a 3D World: Common Sources of Elevation Data. *GIM International*.
- Agisoft. (2021). *Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.7*.
- Agisoft Metashape. (2021). <https://www.agisoft.com/>
- Al-Rawabdeh, A., Al-Ansari, N., Attya, H., & Knutsson, S. (2014). GIS Applications for Building 3D Campus, Utilities and Implementation Mapping Aspects for University Planning Purposes. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8(74), 19–28.
- Bacher, U. (2021). 3D Content Generation using Hybrid Aerial Sensor Data. *XLIII*, 297–303.
- Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889. <https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>
- Billen, R., Cutting-Decelle, A.-F., Marina, O., de Almeida, J.-P., M., C., Falquet, G., Leduc, T., Métral, C., Moreau, G., Perret, J., Rabin, G., San Jose, R., Yatskiv, I., & Zlatanova, S. (2014). *3D City Models and urban information: Current issues and perspectives*. <https://doi.org/10.1051/tu0801/201400001>
- Bolton, A., & Enzer, M. (2018). The Gemini Principles. *Centre for Digital Built Britain: University of Cambridge*, 15. <https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/TheGeminiPrinciples.pdf>
- Chen, R. (2011). The development of 3D city model and its applications in urban planning. *Proceedings - 2011 19th International Conference on Geoinformatics, Geoinformatics 2011*, 0–4. <https://doi.org/10.1109/GeoInformatics.2011.5981007>
- CityGML | OGC. (2021). <https://www.ogc.org/standards/citygml>
- Ellul, C., Stoter, J., Harrie, L., Shariat, M., Behan, A., & Pla, M. (2018). Investigating the state of play of geobim across Europe. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W10). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W10-19-2018>
- ESRI. (2021a). Crear mundos espejo. In *The ArcGIS Imagery Book*. <https://learn.arcgis.com/es/arcgis-imagery-book/chapter6/>
- ESRI. (2021b). *Esri y la Transformación Digital en el sector AEC*. <https://storymaps.arcgis.com/stories/5b5acedcf83e467aba116c1a2bf0c6a5>
- Felicísimo, A. (1994). Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales. *Oviedo: Universidad de Oviedo*, 118. <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/index2.html>
- Gehrke, S., Morin, K., Downey, M., Boehrer, N., & Fuchs, T. (2008). Semi-global matching: an alternative to lidar for dsm generation? *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-B1, 1–6.
- Geo.admin.ch. (2021). *Visor Suiza*. <https://map.geo.admin.ch/>
- Glira, P., Pfeifer, N., & Mandlbürger, G. (2019). HYBRID ORIENTATION of AIRBORNE LIDAR POINT CLOUDS and AERIAL IMAGES. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2/W5),

567–574. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-567-2019>

- GobiernoBA. (2021). *Visor Buenos Aires*. <https://ciudad3d.buenosaires.gob.ar/>
- Gröger, G., & Plümer, L. (2012). CityGML - Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12–33. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004>
- Haala, N., & Cavegn, S. (2016). High density aerial image matching: State-of-the-art and future prospects. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41(July), 625–630. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-625-2016>
- Haala, N., & Rothermel, M. (2015). *Image-based 3D Data Capture in Urban Scenarios*. November.
- Hernández Lopez, D. (2006). Introducción a la fotogrametría digital. In *Universidad de Castilla La Mancha*.
- Höhle, J. (2013). Oblique Aerial Images and Their Use in Cultural Heritage Documentation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W2(January), 349–354. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-5-w2-349-2013>
- IGN. (2021). *Grupo A. Temas generales Grupo A.2 Fotogrametría y Teledetección*.
- Jovanović, D., Milovanov, S., Ruskovski, I., Govedarica, M., Sladić, D., Radulović, A., & Pajić, V. (2020). Building virtual 3D city model for smart cities applications: A case study on campus area of the university of novi sad. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/ijgi9080476>
- Leica. (2021). *Leica CityMapper-2 Hybrid Airborne Sensor | Leica Geosystems*. <https://leica-geosystems.com/es-es/products/airborne-systems/leica-citymapper-2>
- Lemmens, M. (2020). Capturing LiDAR and Imagery Simultaneously. How Major Cities May Benefit from a Hybrid Sensor System. *GIM International*.
- Mandlbürger, G., Wenzel, K., Spitzer, A., Haala, N., Glira, P., & Pfeifer, N. (2017). IMPROVED TOPOGRAPHIC MODELS VIA CONCURRENT AIRBORNE LIDAR and DENSE IMAGE MATCHING. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2W4), 259–266. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-259-2017>
- MGGPAERO. (2021). *4D Vilnius*. <https://vilnius.obliview.com/>
- Mihajlovic, D. (2016). *APPLICATION OF LARGE-SCALE ORTHOPHOTO IN THE URBAN CHANGES MeCEO*. October.
- NFrames. (2021). *SURE aerial*. <https://www.nframes.com/products/sure-aerial/>
- Nocerino, E., Stathopoulou, E. K., Rigon, S., & Remondino, F. (2020). Surface reconstruction assessment in photogrammetric applications. *Sensors (Switzerland)*, 20(20), 1–25. <https://doi.org/10.3390/s20205863>
- Pepe, M., Fregonese, L., & Crocetto, N. (2019). Use of SfM-MVS approach to nadir and oblique images generated through aerial cameras to build 2.5D map and 3D models in urban areas. *Geocarto International*, 0(0), 1–22. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1700558>
- Quirós Rosado, E. (2014). Introduction to Photogrammetry and Cartography applied to Civil Engineering. In *Universidad de Extremadura, Cáceres, España*.

[https://mascvuex.unex.es/ebooks/sites/mascvuex.unex.es.mascvuex.ebooks/files/files/file/Fotogrametria\\_9788469713174\\_0.pdf](https://mascvuex.unex.es/ebooks/sites/mascvuex.unex.es.mascvuex.ebooks/files/files/file/Fotogrametria_9788469713174_0.pdf)

- Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., & Menna, F. (2017). A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W5), 591–599. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017>
- Sangkwan, N. (2020). *A pilot project of digital twin for smart city. February.*
- Skarlatos, D., & Kiparissi, S. (2012). COMPARISON of LASER SCANNING, PHOTOGRAMMETRY and SFM-MVS PIPELINE APPLIED in STRUCTURES and ARTIFICIAL SURFACES. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1(September), 299–304. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-I-3-299-2012>
- Toschi, I., Ramos, M. M., Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Moe, K., Poli, D., Legat, K., & Fassi, F. (2017). Oblique photogrammetry supporting 3d urban reconstruction of complex scenarios. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(1W1), 519–526. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-519-2017>
- Toschi, I., Remondino, F., Rothe, R., & Klimek, K. (2018). Combining airborne oblique camera and LiDAR sensors: Investigation and new perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(1), 437–444. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-437-2018>
- TUM. (2021). *Visor New York*. [http://www.3dcitydb.org/3dcitydb-web-map/1.8.2/3dwebclient/?title=NYC\\_Detailed\\_Road\\_Model&shadows=false&terrainShadows=0&latitude=40.74324791682301&longitude=-73.98788672934239&height=393.81226291411065&heading=212.81661879694937&pitch=-54.90142422275028&](http://www.3dcitydb.org/3dcitydb-web-map/1.8.2/3dwebclient/?title=NYC_Detailed_Road_Model&shadows=false&terrainShadows=0&latitude=40.74324791682301&longitude=-73.98788672934239&height=393.81226291411065&heading=212.81661879694937&pitch=-54.90142422275028&)
- Ullman. (1979). *The interpretation of Structure from Motion* (pp. 133–175).
- VirtualCitySystems. (2021a). *Helsinki - Visor Comparativo*. <https://kartta.hel.fi/3d/mesh/>
- VirtualCitySystems. (2021b). *Visor Berlín*. <https://berlin.virtualcitymap.de/#/>
- VirtualCitySystems. (2021c). *Visor Helsinki*. <https://kartta.hel.fi/3d/#/>
- Wenzel, K., Rothermel, M., Haala, N., & Fritsch, D. (2013). SURE – The ifp Software for Dense Image Matching. *Photogrammetric Week 2013, June 2015*, 59–70. <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo13/index.en.html>
- Wikipedia. (2021). *Malla poligonal*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Malla\\_poligonal](https://es.wikipedia.org/wiki/Malla_poligonal)
- YANG, X., WENG, J., XIA, Y., WU, L., & SUI, Z. (2010). *3D building modeling, organization and application on digital city system*. 5.
- Zambuni, R., & Benoit, F. (2013). *Hacia ciudades inteligentes con SIG urbanos en 3D*. <https://www.nosolosig.com/articulos/239-hacia-ciudades-inteligentes-con-sig-urbanos-en-3d>
- Zhang, Z., Gerke, M., Vosselman, G., & Yang, M. Y. (2018). A patch-based method for the evaluation of dense image matching quality. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 70(April), 25–34.

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.04.002>

## 7. Anexo

### 1.1 Reseña de puntos de control utilizados para la orientación absoluta:

Se transformaron las coordenadas ortométricas de los puntos de control a coordenadas elipsoidales mediante el software GeoConverter. Para ello, se tuvo en cuenta el modelo de Geoides EGM08-REDNAP (IGN España).

- Punto N1A

**APOYO N°1.a**

Antena GPS GS14.

Coordenadas ETRS89. Proyección UTM30 Norte. Elipsoide GRS1980. Geoides EGM08-REDNAP. Cota Ortométrica.

PUNTO	X	Y	Z ORTO	CQ3D
1.a	610965,647	4740919,891	452,921	0,012

**ROTONDA PLAZA PRINCIPE DE VIANA**

El punto de apoyo está situado en esquina de tapa de Alumbrado Público (tamaño 49X49). COTA=ACERA=TAPA



Figura 76. Reseña Punto N1a

- Punto N1b

**APOYO N°1.b**

Antena GPS GS14.

Coordenadas ETRS89. Proyección UTM30 Norte. Elipsoide GRS1980. Geoides EGM08-REDNAP. Cota Ortométrica.

PUNTO	X	Y	Z ORTO	CQ3D
1.b	610929,922	4740927,291	452,630	0,017

**ROTONDA PLAZA PRINCIPE DE VIANA**

El punto de apoyo está situado en esquina de tapa de Alumbrado Público (tamaño 49X49). COTA=ACERA=TAPA



Figura 77. Reseña Punto N1b

- Punto N9a

**APOYO N°9.a**

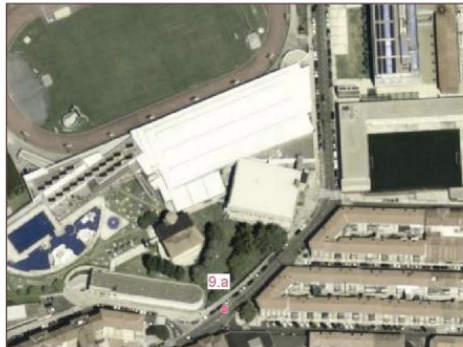
Antena GPS GS14.

Coordenadas ETRS89. Proyección UTM30 Norte.  
 Elipsoide GRS1980. Geoide EGM08\_RED NAP. Cota  
 Ortométrica.

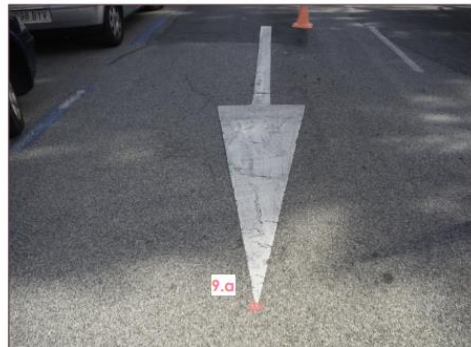
PUNTO	X	Y	Z ORTO	CQ3D
9.a	611205,343	4740290,121	453,774	0,013

**CALLE SANGÜESA 23, CRUCE CON CALLE GOROABE**

El punto de apoyo está situado en punta de flecha  
 direccional  
 COTA=CALZADA



**Figura 78. Reseña Punto N9a**



- Punto N9b

**APOYO N°9.b**

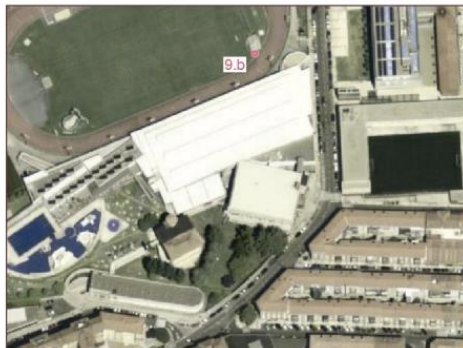
Antena GPS GS14.

Coordenadas ETRS89. Proyección UTM30 Norte.  
 Elipsoide GRS1980. Geoide EGM08\_RED NAP. Cota  
 Ortométrica.

PUNTO	X	Y	Z ORTO	CQ3D
9.b	611222,485	4740437,487	459,520	0,009

**PISTA DE ATLETISMO LARRABIDE**

El punto de apoyo está situado en esquina de tapa de  
 Alumbrado Público (58x58).  
 COTA=HORMIGÓN=TAPA



**Figura 79. Reseña Punto N9b**



- Punto T8a



ID	X (m)	Y (m)	Z (m)	CÓDIGO	CQ 3D (m)
8a	609951.269	4741001.263	443.585	ESQ ARQ	0.016

Detalle



Figura 80. Reseña Punto T8a



- Punto T8b



**Figura 81.** Reseña Punto T8b

- Punto 1 y 2

ID	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	610287,356	4741231,936	446,081
2	610300,924	4741047,615	446,564



Figura 82. Reseña Punto 1 y 2

## 2.1 Comparación – Nube de puntos

Se presenta el cálculo de distancia entre la nube de puntos de Metashape (Nadiraes) a la nube de referencia nFrames(Nadiraes +LiDAR), y la distribución de las distancias en el histograma.

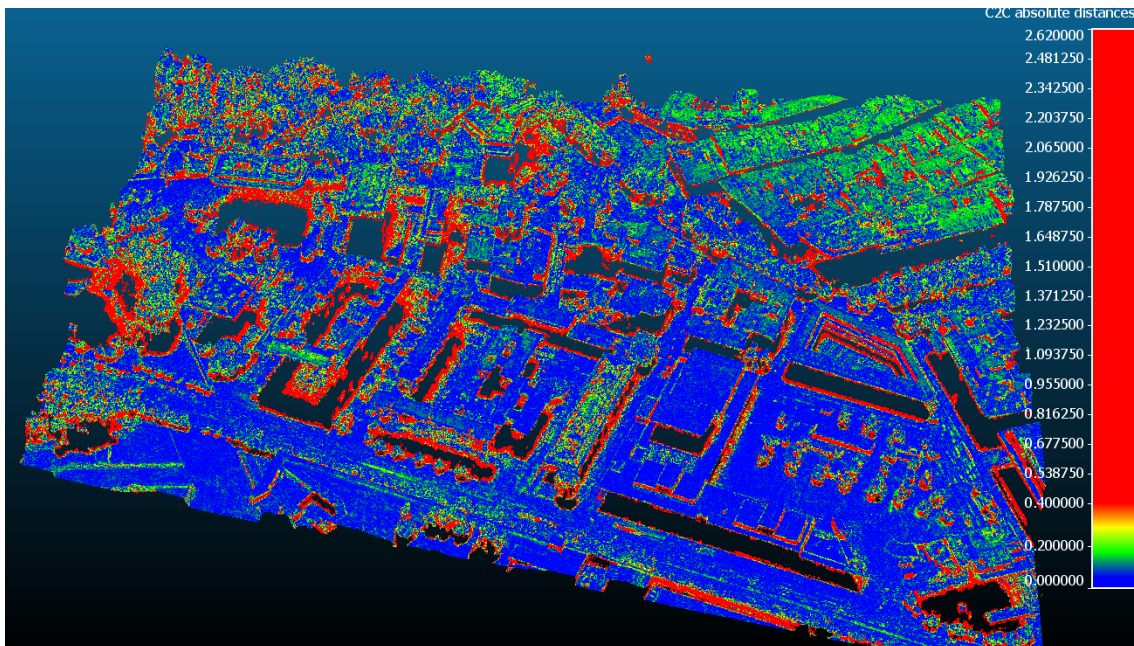
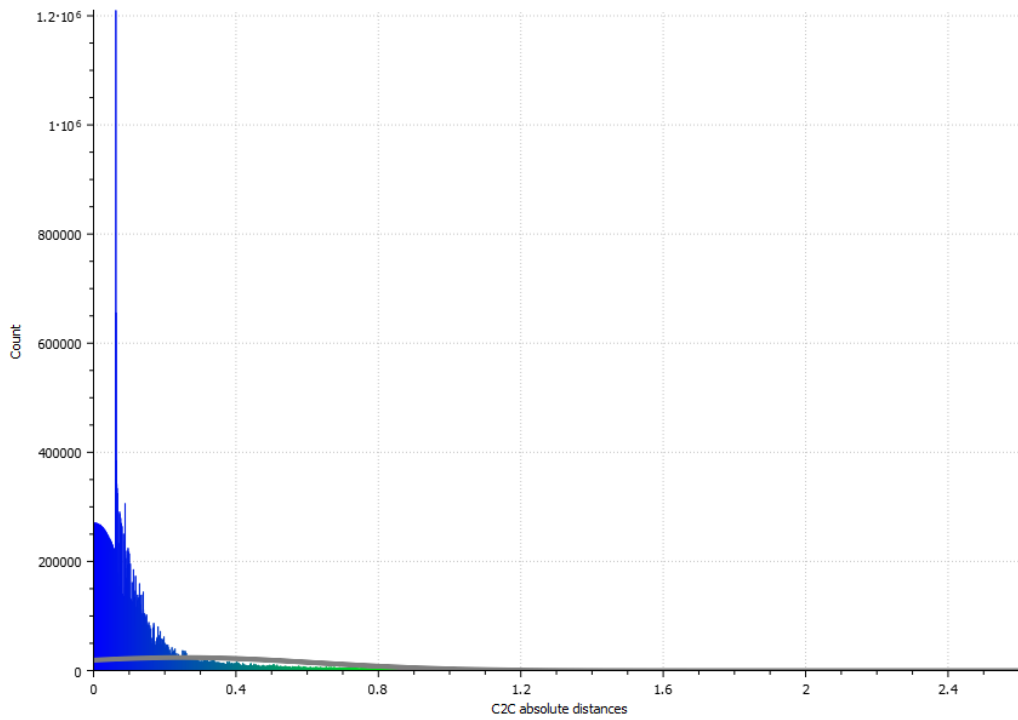


Figura 83. Distancia de nube Metashape (N) a nube de referencia nFrames (N +LiDAR)

Gauss: mean = 0.248947 / std.dev. = 0.371213 [8471 classes]



**Figura 84.** Cálculo de distancia de nube Metashape (N) a nube de referencia nFrames (N+ LiDAR).

### 3.1 Comparación - DSM

#### 3.1.1 Comparación N°1: DSM-Metashape (N + O) vs DSM-(LiDAR)

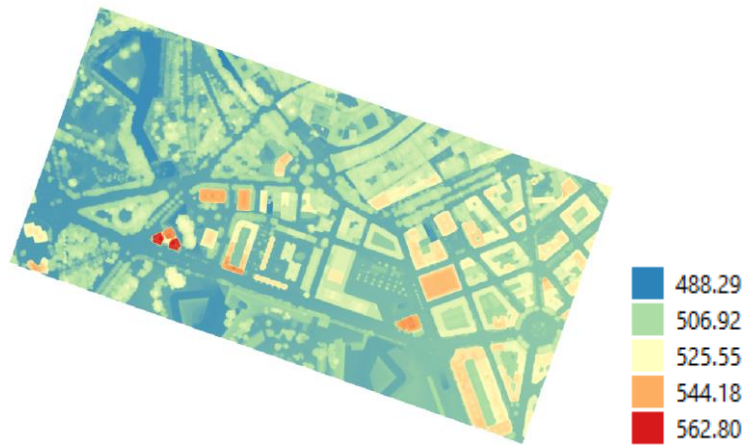
Se presentan los DSM utilizados para la comparación N°1 y los rasters obtenidos al realizar la diferencia entre el DSM LiDAR con el DSM P1 o P3.

#### DSM - LIDAR



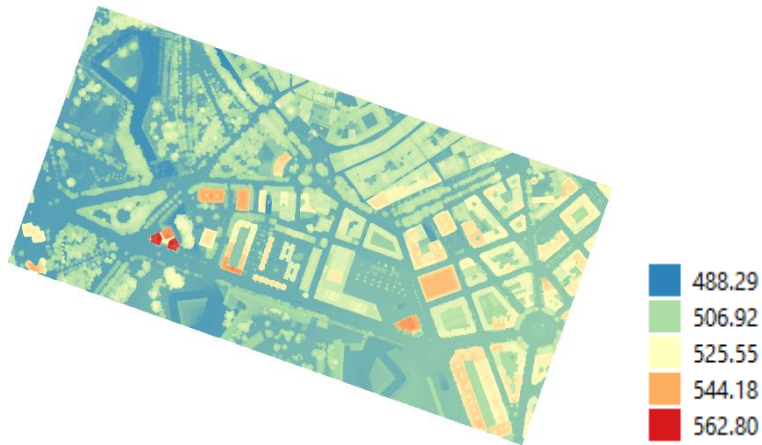
**Figura 85.** DSM LIDAR

**DSM - P1**



**Figura 86.** DSM P1 Metashape

**DSM - P3**

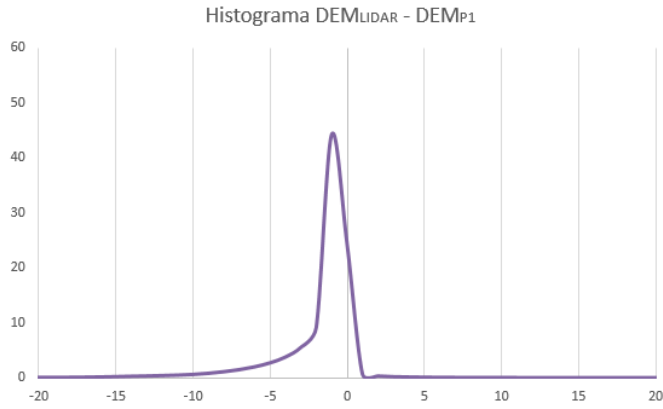


**Figura 87.** DSM P3 Metashape

**a) Raster de diferencia DSM LiDAR – DSM P1**



**Figura 88.** Raster de diferencia entre DSMLiDAR y DSMP1

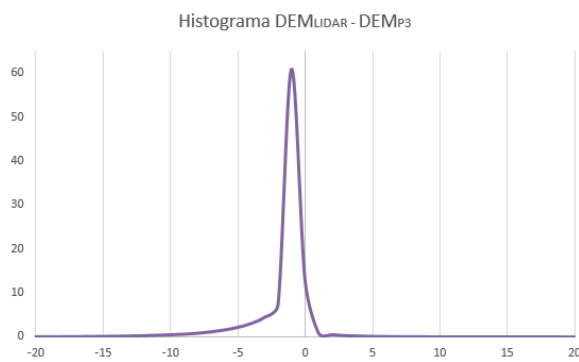


**Figura 89.** Histograma de diferencia entre DSM<sub>LiDAR</sub> y DSM<sub>P1</sub>

**b) Raster de diferencia DSM LiDAR – DSM P3**



**Figura 90.** Raster de diferencia entre DSMLiDAR y DSMP3



**Figura 91.** Histograma de diferencia entre DSM<sub>LiDAR</sub> y DSM<sub>P1</sub>

### 3.1.2 Comparación N°2: DSM-nFrames (N) vs DSM-nFrames (N + LiDAR)

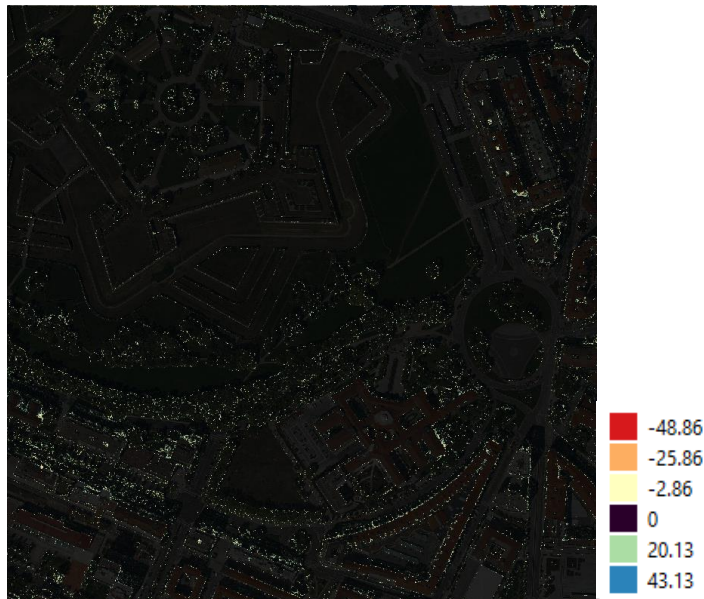


Figura 92. Raster de diferencia entre DSMnFrames (N + LiDAR) y DSMnFrames (N)

## 4.1 Comparación - Ortofotos Verdaderas

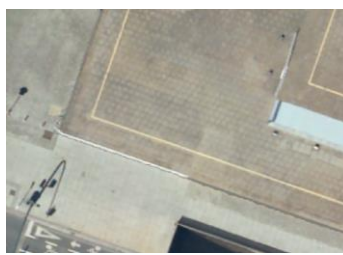
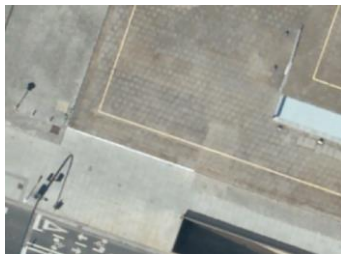
### 4.1.1 Control calidad visual

#### A. Problema Geometría. Contornos / Bordes aserrados en edificios

O.V – Referencia

O.V – Prueba 1

O.V – Prueba 2



O.V – Prueba 3

O.V – Prueba 4

O.V – Prueba 5

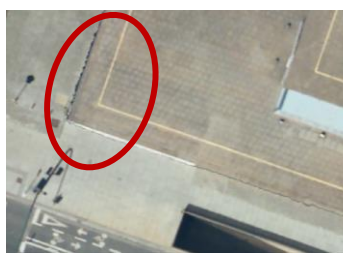
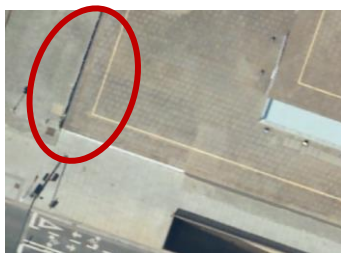


Figura 93. Comparación visual 4 entre Ortofotos Verdaderas (O.V)

En este caso, se observa que los resultados de la Prueba 2, Prueba 3, Prueba 4 y Prueba 5 muestran mayores inconsistencias para representar los límites del edificio, con mayor presencia de contornos aserrados y con bordes oscuros por falta de solape entre las imágenes.

**B. Otros Problemas. Elementos fantasmas**

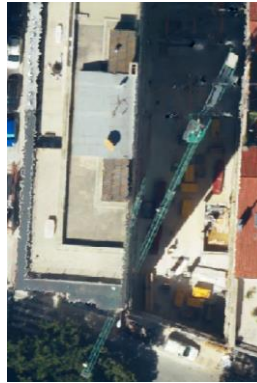
**O.V – Referencia**



**O.V – Prueba 1**



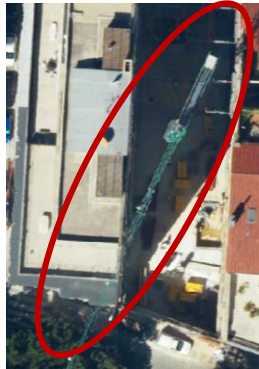
**O.V – Prueba 2**



**O.V – Prueba 3**



**O.V – Prueba 4**



**O.V – Prueba 5**

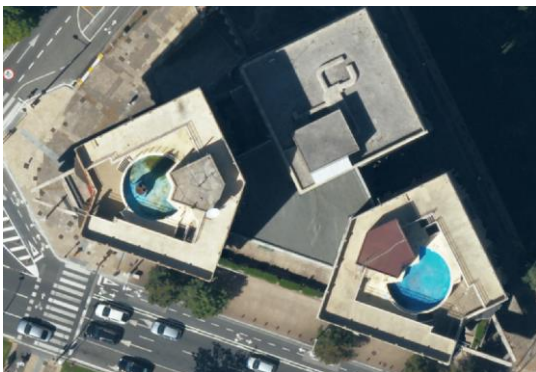


**Figura 94.** Comparación visual 5 entre Ortofotos Verdaderas (O.V)

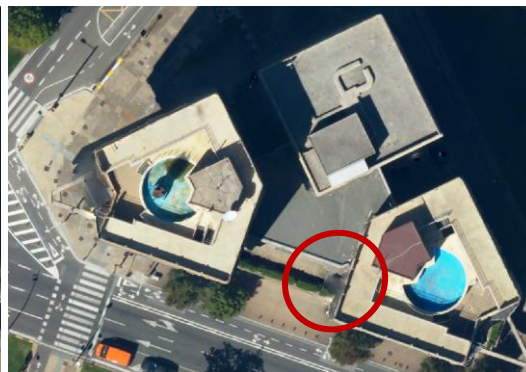
Igual que en los ejemplos anteriores, se presenta la grúa como elemento “fantasma” para todas los casos a excepción de la Prueba 4 donde la grúa se observa de manera continua y no fragmentada.

**C. Problema Continuidad. Problemas de continuidad**

**O.V – Referencia**

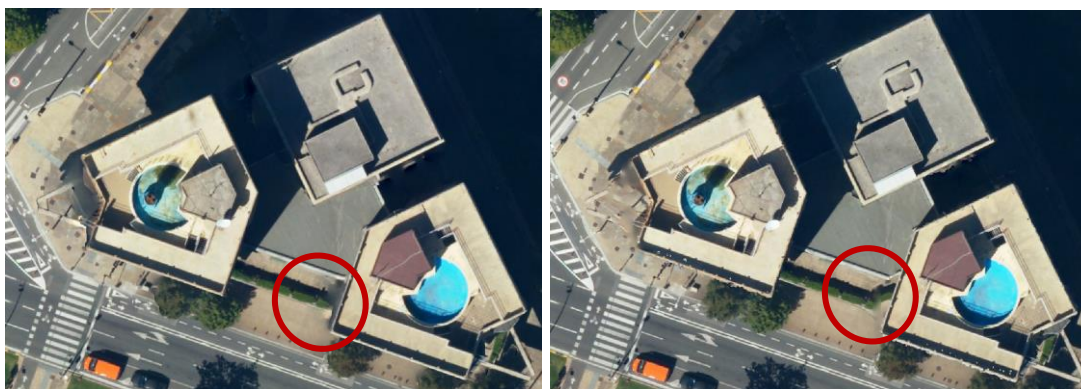


**O.V – Prueba 1**



**O.V – Prueba 3**

**O.V – Prueba 4**



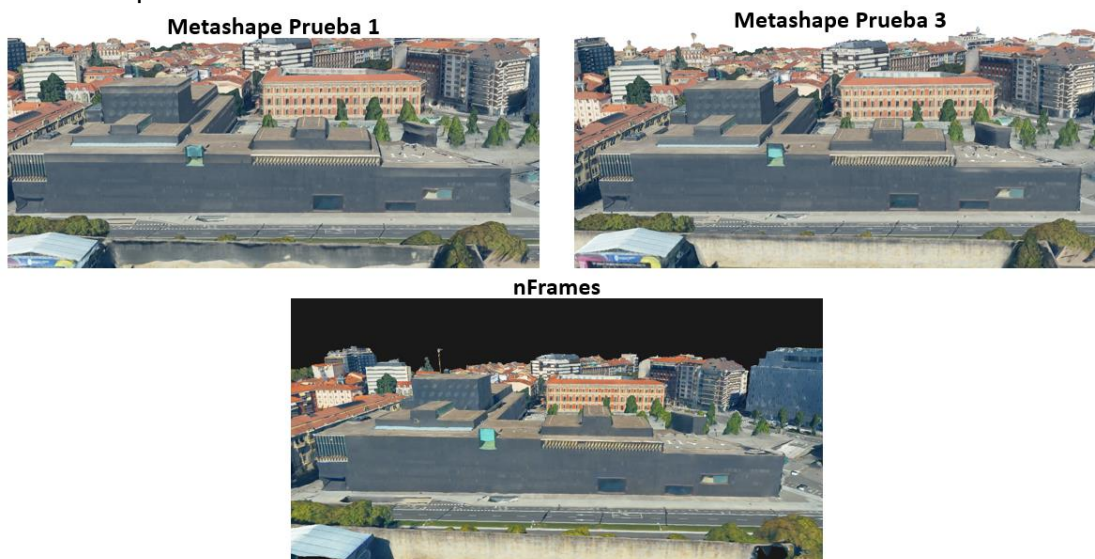
**Figura 95.** Comparación visual 6 entre Ortofotos Verdaderas (O.V)

Al observar, todas las pruebas muestran inconsistencias en cuanto al grado de continuidad de sus elementos, definición de bordes, y con la sombra generada. La Prueba 1 y 4 presentan menos definición en los bordes de las edificaciones, siendo estos menos lineales, rectos y presentándose con cortes aserrados.

## 5.1 Comparación – Encuestas Mallas

Se presentan los modelos evaluados por los participantes de la encuesta, y también los resultados de la comparativa 5.

### 5.1.1 Comparativa 1 – Modelos con Textura



**Figura 96.** Comparación 1 entre Modelos con Textura



5.1.2 Comparativa 2 – Modelos con Textura

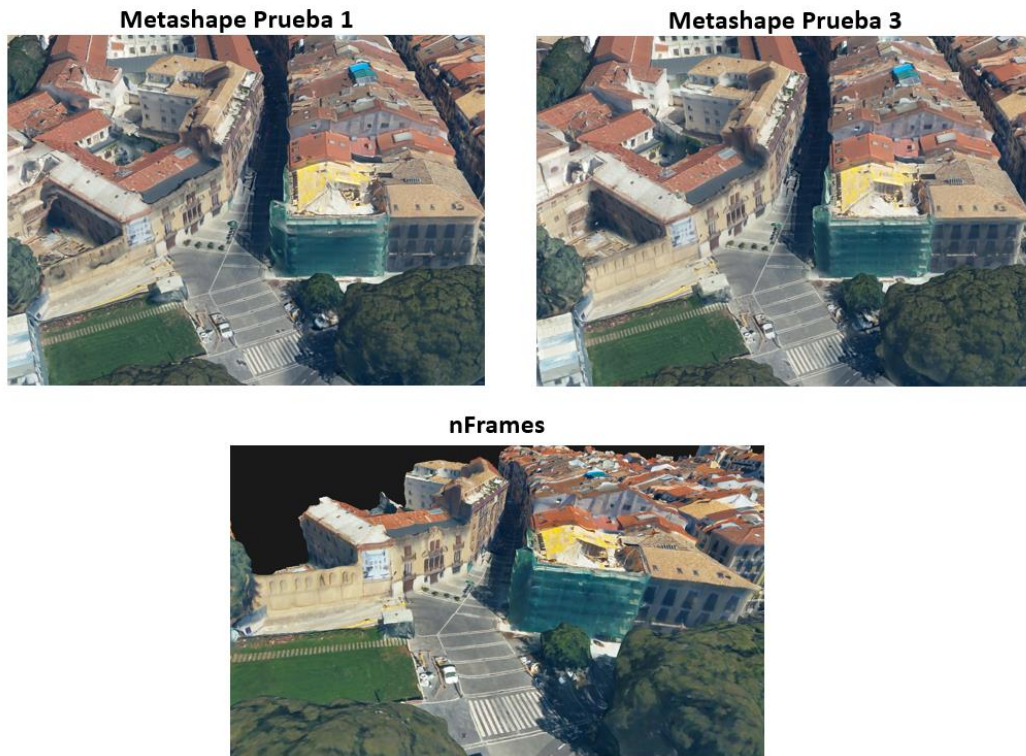


Figura 97. Comparación 2 entre Modelos con Textura

5.1.3 Comparativa 3 – Modelos 3D Sombreados

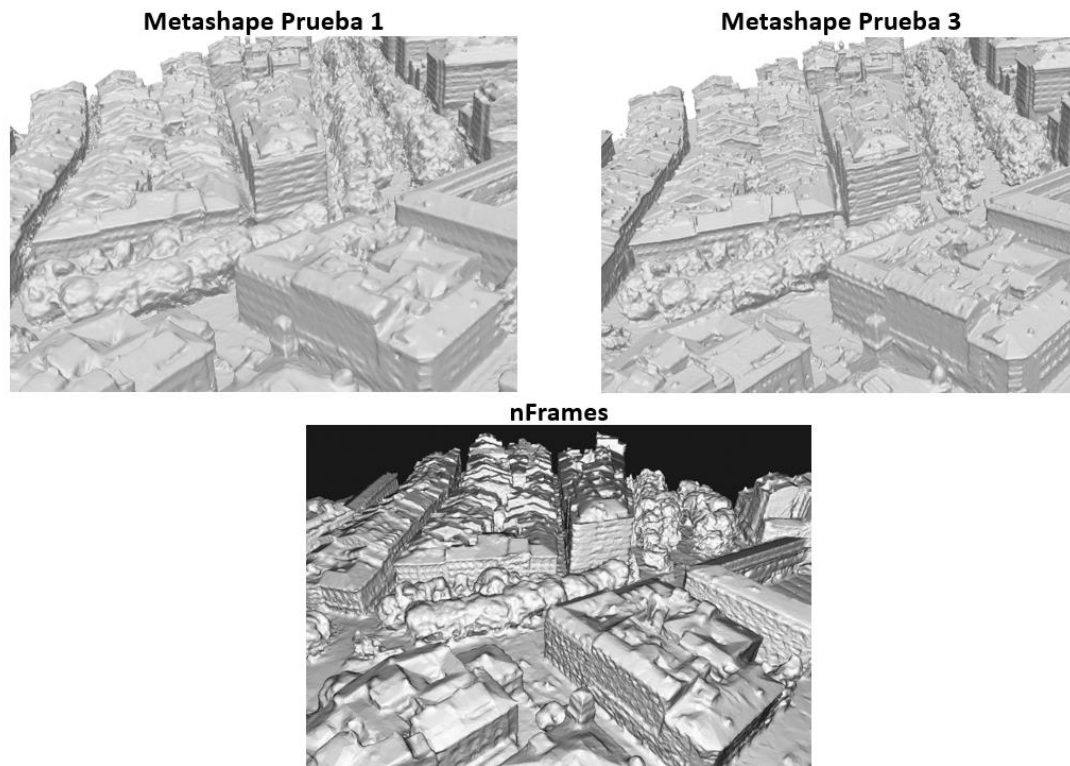


Figura 98. Comparativa 3 entre Modelos 3D Sombreados

5.1.4 Comparativa 4 – Modelos 2.5D

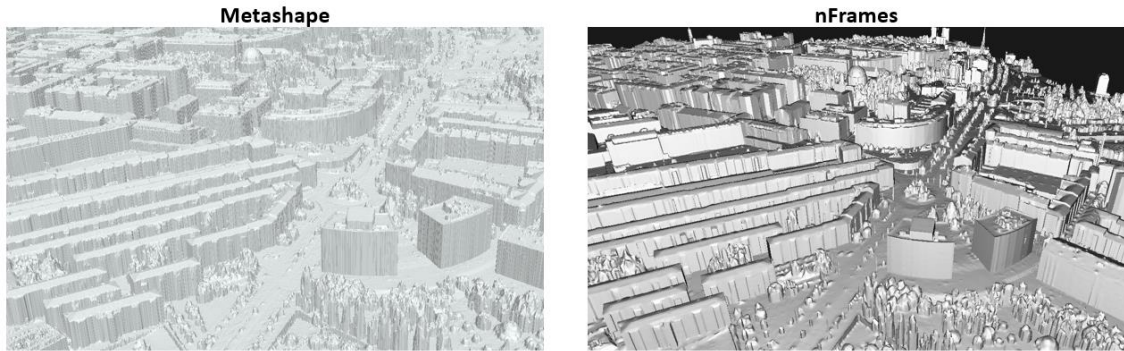


Figura 99. Comparativa 4 entre Modelos 2.5D

5.1.5 Comparativa 5 – Modelos 2.5D

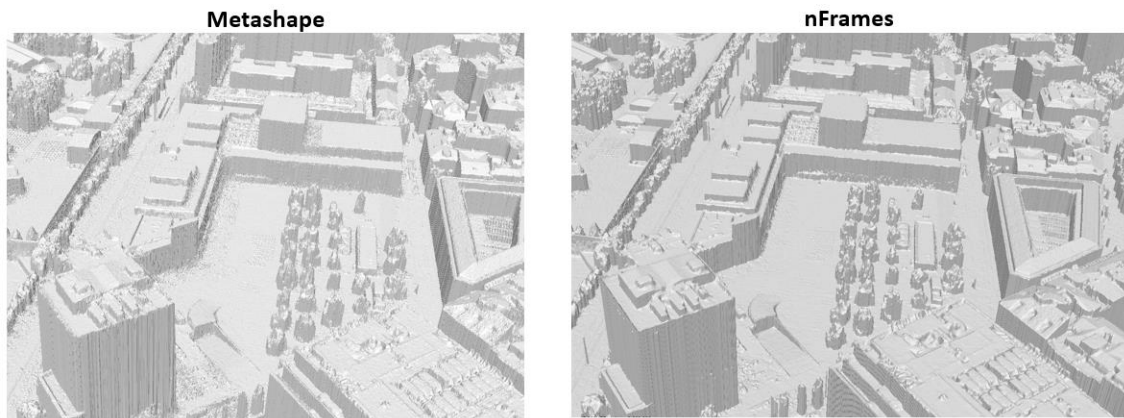


Figura 100. Comparativa 5 entre Modelos 2.5D

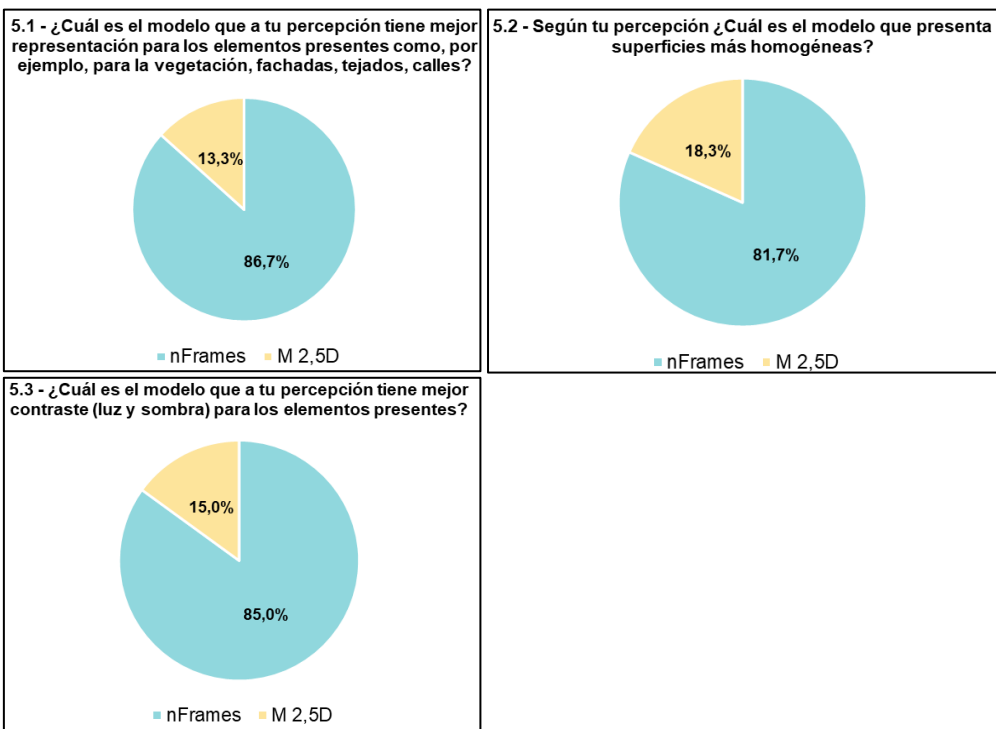


Figura 101. Resultados comparativa 5