

# UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura



## TRABAJO FIN DE MÁSTER

COMPARACIÓN DE SISTEMAS LÁSER ESCÁNER MÓVIL PARA LA  
EXTRACCIÓN DE ACTIVOS EN INFRAESTRUCTURAS

Alumno:

**D. Arturo Jesús Zazo Ferreras**

Tutor:

**D. Diego González Aguilera**

Ávila, a 12 de julio de 2024



## Contenido

Resumen .....	6
Abstract .....	6
Contexto del Trabajo .....	7
1 Objetivos .....	12
2 Instrumentación y Medios Materiales .....	12
2.1 Leica MMS TRK 700EVO.....	12
2.2 Riegel VUX 1 - ALS .....	14
2.3 Trimble Gedo IMS Scan.....	16
2.4 Cloud Compare .....	20
2.5 Trimble Business Center .....	21
2.6 Terrascan .....	23
2.7 TopoDoT .....	23
2.8 Microstation .....	24
2.9 QGIS.....	24
2.10 Revit .....	25
2.11 TwinMotion.....	25
3 Metodología .....	26
3.1 Caso 1. Mobile Mapping Terrestre (MMS).....	27
3.1.1 Área de Estudio .....	27
3.1.2 Estudio del Entorno.....	28
3.1.3 Planificación de la adquisición de datos .....	29
3.1.4 Adquisición de datos .....	31
3.1.5 Procesamiento y ajuste .....	33
3.1.6 Reporte de los ajustes .....	37
3.2 Caso 2. Mobile Mapping Aéreo (ALS) .....	40
3.2.1 Área de Estudio .....	40
3.2.2 Estudio del Entorno.....	41
3.2.3 Planificación de la adquisición de datos .....	42
3.2.4 Adquisición de datos .....	43
3.2.5 Procesamiento, ajuste y exportación .....	44
3.3 Tratamiento de Nube de Puntos y Extracción de objetos.....	47



3.4	Digitalización 3D .....	50
3.5	Cartografía vegetal y estudios de crecimiento. ....	52
3.6	Modelo BIM.....	54
3.7	Animación .....	55
4	Resultados esperables.....	56
4.1	Procesamiento de datos .....	56
4.2	Topografía e Inspección .....	56
4.3	Digitalización 3D .....	58
4.4	Análisis de defectos.....	59
4.5	Modelado 3D.....	60
4.6	Renderizado.....	61
5	Conclusiones .....	62
6	Futuras líneas de investigación .....	63
7	Bibliografía.....	66



## Indice de Figuras

Fig. 1	Flujograma del dato interoperable. Fuente: Elaboración propia.....	8
Fig. 2	Construyendo el Gemelo Digital Ferroviario. Fuente: Elaboración propia .....	9
Fig. 3.	Digitalización poste catenaria. Fuente: Elaboración propia .....	10
Fig. 4.	Esquema sistema mobile mapping. Fuente: Trimble Inc. ....	10
Fig. 5	Vista frontal Leica TRK700 Evo. Fuente: Leica y Elaboración propia .....	13
Fig. 6.	Montaje Leica TRK700 Evo en coche. Fuente: Elaboración propia .....	14
Fig. 7.	Sistema Láser Móvil VUX e integración en sistema VP1. Fuente: Riegel.....	15
Fig. 8.	LiDAR Aéreo. Integración en helicóptero tripulado. Fuente: Elaboración propia. ....	16
Fig. 9.	Trimble Gedo IMS con escaner GX50. Fuente: Trimble Railways GmbH. ....	18
Fig. 10.	Ecosistema de trabajo Trimble Gedo Scan Office. Fuente: Elaboración propia.....	19
Fig. 11.	CloudCompare.org. Fuente: Cloud Compare.....	20
Fig. 12.	Trimble Business Center. Clasificación Exterior. Fuente: Trimble Inc. ....	22
Fig. 13.	Seccion tipo de via doble en balasto. Fuente: ADIF .....	26
Fig. 14.	Caso 1. MMS. Ámbito de actuación. Vía en Balasto. Red de Cercanías. Fuente: Elaboración propia .....	27
Fig. 15.	Caso 1. MMS. Perspectiva activos de infraestructura. Fuente: Elaboración propia .	28
Fig. 16.	Caso 1. MMS. Antenas GNSS de referencia (ERGNSS). Fuente: Elaboración propia .....	29
Fig. 17..	Caso 1. MMS. Ámbito actuación y Estaciones de Referencia GNSS. Fuente: Elaboración propia .....	30
Fig. 18.	Flujo de trabajo Leica Pegasus Field y Pegasus Office. Fuente: Leica .....	30
Fig. 19.	Vehículo bimodal con TRK700Evo. Fuente: Elaboración propia.....	31
Fig. 20.	Visualización nube de puntos por Intensidad. Fuente: Elaboración propia .....	32
Fig. 21.	Gráfico semafórico resultante del cálculo de las trayectorias. Fuente: Elaboración propia.....	35
Fig. 22.	Ajuste a puntos de enlace entre pasadas. Fuente: Elaboración propia .....	36
Fig. 23.	Caso 2. ALS. Ámbito Actuación. Vía en balasto. LAV. Fuente: Elaboración propia	40
Fig. 24.	Caso 2. ALS. Perspectiva de la Infraestructura Ferroviaria. Fuente: Elaboración propia .....	41
Fig. 25	Caso 2. ALS. Antena GNSS para el proyecto. Fuente: Visor Redes GNSS .....	42



Fig. 26. Caso 2. ALS. Instalación en helicóptero AS350/355. Fuente: Elaboración propia .	43
Fig. 27. Caso 2. ALS. Detalles de instalación LiDAR y antena GNSS. Fuente: Elaboración propia.....	44
Fig. 28. Red ERGNSS. Fuente: IGN.....	45
Fig. 29. Trimble Applanix InFusion + Arquitectura. Fuente: Trimble Inc. ....	45
Fig. 30. Flujograma procesamiento para Líneas Ferrocarril. Fuente: Elaboración propia.....	47
Fig. 31. Vectorización en cruzamientos desvíos ferroviarios. Manual vs algoritmo implementado. Fuente: Elaboración propia .....	48
Fig. 32. Clasificación nube de puntos tras clasificación ASPRS. Fuente: Elaboración propia .....	49
Fig. 33. Coincidencia Carril - Nube de puntos con Trimble Gedo Analyst. Fuente: Elaboración propia.....	50
Fig. 34. Extracción de carril por intensidad. fuente: Elaboración propia.....	51
Fig. 35. Voxelización Poste catenaria con TopoDot. Fuente: Elaboración propia .....	51
Fig. 36. Digitalización y dimensionamiento poste catenaria. Fuente: Elaboración propia ....	52
Fig. 37. Representación esquemática de la vegetación vs ferrocarril. Fuente: IRS .....	53
Fig. 38. Afeción de vegetación sobre la vía. Fuente: Terrasolid .....	53
Fig. 39. Twinmotion. Creación video .....	55
Fig. 40. Inspección Geométrica de túnel. Fuente: Elaboración propia .....	56
Fig. 41. Estudio de Gálibos. Fuente: Trimble Gedo Scan Analyst.....	57
Fig. 42. Inspección desvío con LiDAR Trimble GX50. Fuente: Elaboración propia .....	57
Fig. 43. Topografía de elementos de vía y acotaciones de catenaria. Fuente: Elaboración propia .....	58
Fig. 44. Sección túnel desde Cloud Compare. Fuente: Elaboración propia .....	58
Fig. 45. MMS. Inspección de catenaria. Fuente: Elaboración propia .....	59
Fig. 46. ALS. Inspección de volumen y acopio de balasto. Fuente: Elaboración propia .....	60
Fig. 47. Modelo 3D. Vista general. Elaboración propia.....	60
Fig. 48. Modelo 3D. Vista detalle con componentes. Fuente: Elaboración propia .....	61
Fig. 49. Vista Renderizada entrada túnel. Fuente: Elaboración propia .....	61



## Índice de Tablas

Tabla 1. Principales características de la instrumentación empleada. Fuente: Elaboración propia .....	19
Tabla 2. Detalles de la adquisición de datos. Fuente: Elaboración propia .....	26
Tabla 3. Resumen ajuste trayectoria y enlaces Cloud-to-Cloud. Fuente: Elaboración propia ..	38
Tabla 4. Resumen ajuste Cloud-to-Cloud y Puntos Control Terrestre. Fuente: Elaboración propia.....	39
Tabla 5. Clases para puntos LiDAR. Fuente: ASPRS .....	49
Tabla 6. Formatos convencionales de archivos para sistemas mobile mapping. Fuente: Elaboración propia .....	56
Tabla 7. Comparativa de Capacidades y Recursos por sistema. Fuente: Elaboración propia ..	64
Tabla 8. Relación entre Actividades Generales y Aplicaciones Específicas. Fuente: Elaboración propia.....	65



## Resumen

Este Trabajo Fin de Máster explora comparativamente los sistemas láser escáner móvil para la extracción de activos en infraestructuras ferroviarias, evaluando dos métodos principales: el escaneo láser aerotransportado y el terrestre móvil. El estudio se enfoca en la eficacia de estas tecnologías para capturar y digitalizar datos ferroviarios, aplicando ambos métodos a distintas condiciones y objetivos de infraestructura.

La investigación destaca la importancia del análisis metodológico en la digitalización y extracción de activos, crucial para el mantenimiento y la operación segura de infraestructuras ferroviarias. Desde una perspectiva aérea, se examina la influencia de la vegetación en la gestión de activos y la extracción de carriles y catenaria, mientras que el enfoque terrestre se centra en la precisión de la captura de datos y el modelado BIM (Building Information Modeling).

Este análisis compara la precisión, eficiencia operativa de ambos métodos, proporcionando una visión detallada sobre las capacidades y limitaciones de cada sistema. Los resultados ofrecen recomendaciones prácticas para la implementación de estas tecnologías en la digitalización de activos ferroviarios, contribuyendo significativamente al campo de la ingeniería de infraestructuras mediante una evaluación exhaustiva de tecnologías avanzadas de escaneo láser.

## Abstract

This Master's Thesis comparatively explores mobile laser scanner systems for asset extraction in railway infrastructures, evaluating two main methods: airborne laser scanning and mobile terrestrial scanning. The study focuses on the efficacy of these technologies in capturing and digitizing railway data, applying both methods to different conditions and infrastructure objectives.

The research highlights the importance of methodological analysis in the digitalization and extraction of assets, crucial for the safe maintenance and operation of railway infrastructures. From an aerial perspective, the influence of vegetation on asset management is examined, while the terrestrial approach focuses on data capture precision and BIM (Building Information Modeling).

This analysis compares the accuracy, operational efficiency, and costs of both methods, providing detailed insights into the capabilities and limitations of each system. The results offer practical recommendations for implementing these technologies in the digitalization of railway assets, significantly contributing to the field of infrastructure engineering through an exhaustive evaluation of advanced laser scanning technologies.



## Contexto del Trabajo

En la digitalización de las infraestructuras del transporte y su interrelación con el entorno que le rodea, así como de los activos que la componen, es un camino arduo y lleno de desafíos a nivel de ingeniería, tratamiento de datos y su transformación en información de valor para la representación cartográfica, control dimensional y cálculos precisos. ¿Pero, qué entendemos por digitalización y digitalizar? Según la R.A.E<sup>1</sup>, **Digitalizar** tiene dos acepciones, por un lado, “*registrar datos de forma digital*” y una segunda acepción, “*convertir o codificar en números dígitos, datos o informaciones de carácter continuo como una imagen fotográfica, un documento o un libro*”. Vinculado a la digitalización nos encontramos con otro término que es la **Transformación Digital**, que, según la definición que realizó Hewlett Packard, la podemos entender como “*el proceso que integra la tecnología digital en todos los aspectos del negocio y que requiere de cambios fundamentales en el ámbito de la tecnología, la cultura, las operaciones y la entrega de valor*”. Por último, tendríamos el **Gemelo Digital**, entendiendo este como la “*réplica digital de activos físicos, procesos, espacios, sistemas y dispositivos que se pueden usar por para varios propósitos. Por una parte, tenemos el sistema u objeto real y por otro, una réplica virtual que contiene toda la información del sistema físico, basado en sus características técnicas y sus datos de funcionamiento, recopilados por distintos sensores.*”. En la aplicación de este concepto, el IfM<sup>2</sup> de la Universidad de Cambridge define el “**Gemelos Digitales de Infraestructura**, como un **modelo informático** que refleja y simula un activo o un sistema de activos y su entorno **circundante**. Los modelos de gemelos digitales pueden ayudar a organizar datos y ponerlos en **formatos interoperables** para que puedan ser utilizados para optimizar el uso de la infraestructura.

*La representación puede proporcionar información sobre su diseño actual, estado, condición y su historia, y también puede compartir estos datos, con niveles definidos de acceso, para informar mejores decisiones sobre qué infraestructura futura construir y cómo gestionar la infraestructura actual y futura”*

A la vista de estas estos tres conceptos: digitalizar, transformación y gemelo digitales, podemos concluir que en esta transformación de la realidad física en una realidad digital existe una relación bidireccional entre el entorno físico y el entorno digital, de tal forma que cualquier

---

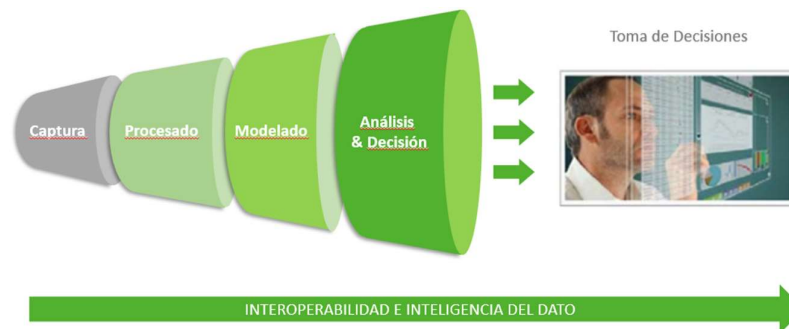
<sup>1</sup> Real Academia Española

<sup>2</sup> <https://www.ifm.eng.cam.ac.uk/>

cambio en el entorno físico se transformará en digital, el cual producirá una acción, a su vez con el entorno físico mediante intervenciones planificadas. Constituyendo un círculo sin fin de interacciones mutuas, favoreciendo la toma de decisiones y evaluación de las acciones.

La información, debe ser información de valor, con criterios de interoperabilidad entre todos los agentes intervinientes en la cadena de valor en el ciclo de vida del activo, desde su concepción, construcción, operación y mantenimiento hasta su desmantelamiento u obsolescencia.

Por tanto, la creación de este gemelo digital consta de dos grandes fases diferenciadas, por un lado, una fase de captura de información de la realidad existente (ya sea geométrica, dimensional, sensorica o numérica) y una fase de tratamiento de dicha realidad para transformarla en una realidad digital, a través del procesamiento y modelado de la información, a partir de la cual efectuar análisis rigurosos que sustenten la toma de decisiones.



**Fig. 1** Flujograma del dato interoperable. Fuente: Elaboración propia

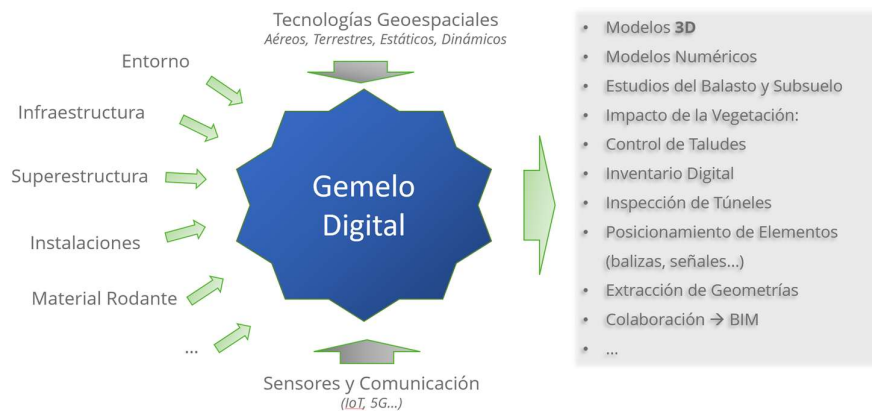
Desde el punto de vista de las infraestructuras del transporte, este flujo de información se retroalimenta de forma escalonada y entrelazada entre las distintas fases dentro del ciclo de vida del activo, desde la concepción hasta la operación en mantenimiento. Bajo la perspectiva temporal, tendríamos que las fases de viabilidad y diseño de la infraestructura tendría unas duraciones<sup>3</sup> medias estimadas de 2-3 años, la fase de construcción de 3-4 años y una fase de operación y mantenimiento de decenas de años hasta su desmantelamiento. Actualmente, esta progresión y transferencia de información, ya sea documental y/o gráfica, entre los diversos agentes intervinientes se está viendo impulsada por la implantación de la forma de trabajo colaborativo del BIM.

<sup>3</sup> Se mencionan duraciones estimadas medias. Se ha de tener en cuenta que estas duraciones dependerán de cada infraestructura y condicionantes sociales, políticos, económicos.

Como se ha mencionado, todo este proceso se inicia con una fase de captura de información del entorno, y en el caso que nos ocupa, del entorno de la infraestructura del transporte y concretamente, de las infraestructuras ferroviarias.

Esta información procede de diversas fuentes, desde información en papel hasta información nativa digital, y en base a la madurez y grado de desarrollo del usuario dicha información dispone de un determinado nivel de valor. La evolución de las fuentes de información, podemos estructurarlas como documentación, planos CAD en dos dimensiones, información multimedia, modelados 3D, interconexión de información y modelos en entornos digitales, modelados inteligentes, difusión de datos. Discurriendo, por tanto, en tres grandes fases: captura de datos, cartografía de la información y difusión de la información.

Aplicando este esquema dentro del sector ferroviario y la generación del Gemelo Digital Ferroviario, se deberá integrar dos fuentes de información. Por un lado, la proveniente de tecnologías geoespaciales (aéreas o terrestres, estáticas o dinámicas) junto con información de sensores y comunicaciones, con el fin de crear una base sólida para la extracción de información fiable y, por ende, la computación y creación de resultados que avalen la toma de decisiones.



**Fig. 2 Construyendo el Gemelo Digital Ferroviario. Fuente: Elaboración propia**

Centrándonos en las tecnologías geoespaciales, la captura de la información del entorno de las infraestructuras ferroviarias se puede realizar a través de sensores que capten la realidad (cámaras fotográficas, cámaras 360, termografía, LiDAR...) junto con sensores de posición (GNSS, IMU, Odómetros...), los cuales podemos combinar en sistemas integrados de forma que podamos aunar toda la información en un único conjunto de datos, precisos y georreferenciados, optimizados para la extracción de información así como su difusión. Esta

información masiva se procesa mediante programas de código abierto o propietario, a través de los cuales y mediante diversos algoritmos de detección de elementos, clasificación, segmentación podamos convertirla en información interoperable con otros sistemas.

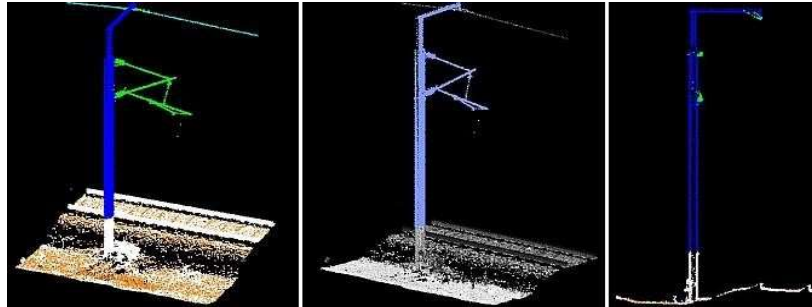


Fig. 3. Digitalización poste catenaria. Fuente: Elaboración propia

Los sistemas mobile mapping terrestre, se componen principalmente de dos grandes componentes. Por un lado, los ubicados fuera del vehículo, tales como, soporte rígido para el dispositivo, el dispositivo sí (integrando GNSS, cámaras, láseres e IMU), GAMS (segunda antena GNSS), DMI (odómetro digital). Y, por otro lado, los ubicados dentro del vehículo como baterías, unidad de alimentación, unidad de control, cable de comunicaciones (o wifi), Tablet.

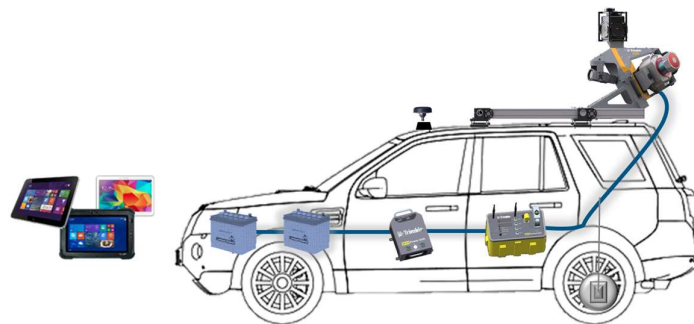


Fig. 4. Esquema sistema mobile mapping. Fuente: Trimble Inc.

Las unidades LiDAR, suelen disponerse en configuraciones de uno o dos escáneres. En los casos de dos escáneres la disposición más habitual se corresponde con una configuración en mariposa, con inclinación. De esta forma se dispone de una mayor información superficial del entorno capturado, a la vez que se disminuye la separación entre las líneas de escaneado a igualdad de velocidad de circulación durante la captura.



Entre los primeros resultados directos que se obtienen de los sistemas mobile mapping y de la integración, coordinación de toda la información sensorica, se encuentran: nube de puntos, nube de puntos coloreada, imágenes esféricas, imágenes direccionales, trayectorias, videos 360°.

La densidad de la nube de puntos obtenida depende de varios factores, entre los que podemos destacar: número de escáneres, velocidad de captura, velocidad de rotación del escáner y frecuencia de medición, número de pulsos del escáner.

En el caso de sistemas aerotransportados, la distribución suele ser similar a los sistemas terrestres, pero con la peculiaridad de que todos los sitios de anclaje, soporte y alimentación no solo deben ser seguros, sino que deben cumplir con la regulación aeronáutica. Principalmente los instalados en helicópteros.

En base a los requerimientos de cada trabajo o proyecto (precisiones, condiciones de operación, medios disponibles, entregables...), se debe seleccionar el sistema o conjunto de sistemas que reúnan las condiciones establecidas en las prescripciones técnicas y a partir de los productos iniciales directos generados, proceder a la Digitalización (CAD), creación de modelos BIM, creación de entregables Ad-Hoc y difusión de los datos y resultados.



# 1 Objetivos

La obtención de información útil a partir del volumen de datos capturados por los sistemas láser escáner móviles, sea cual sea el soporte empleado para su desplazamiento (coche, dresina, barco, quad...) presenta grandes desafíos dentro del sector de la Ingeniería, especialmente en aquellas aplicaciones vinculada a la geometría precisa y de detalle.

A través del presente trabajo, se pretende comparar dos sistemas de captura masiva de información, y la generación y extracción de información útil y aplicable al sector de las infraestructuras, con un especial foco en las infraestructuras ferroviarias. Estas infraestructuras ferroviarias, tienen una serie de características que dificultan disponer de banco de datos suficientes para la realización de estos estudios. Entre los factores limitantes, nos encontramos, la disponibilidad de las vías y su gestión administrativa, la coordinación con la circulación ferroviaria, la disponibilidad de medios auxiliares (humanos y materiales), vehículos especiales...

Desde esta perspectiva, los objetivos principales se centran en:

- Evaluación de dos sistemas de captura masiva de datos, uno terrestre y otro aéreo, y su aplicabilidad al entorno ferroviario.
- Extracción de activos ferroviarios lineales (p.ej. carril, catenaria...), digitalización de activos, en base a los requerimientos de precisión que demanda el ferrocarril.
- Modelización de superestructura ferroviaria para integración BIM.

## 2 Instrumentación y Medios Materiales

### 2.1 Leica MMS TRK 700EVO

El sistema Leica Pegasus TRK 700EVO es un sistema de cartografía móvil (o mobile mapping) que combina e integra sensores enfocados en la georreferenciación y posicionamiento (GNSS, Inerciales, Odómetro), así como sensores dedicados a la captura de masiva de datos e información (cámaras de alta resolución, LiDAR), PCU de control y baterías, así como plataforma de montaje giratorio-inclinable. Complementariamente, a estos sensores integrados, se le puede incorporar otro tipo de sensores externos mediante los puertos COM de comunicaciones.

El sistema facilita la captura de datos en campo de una manera rápida y precisa, combinando las fotografías y las nubes de puntos georreferenciadas con diferentes propósitos. Siendo independiente de vehículo utilizado para la captura, pues tiene la versatilidad de poder instalarse en varias configuraciones, ya sea sobre baca de vehículo, anclado sobre estructura en vagones, dresinas, etc.

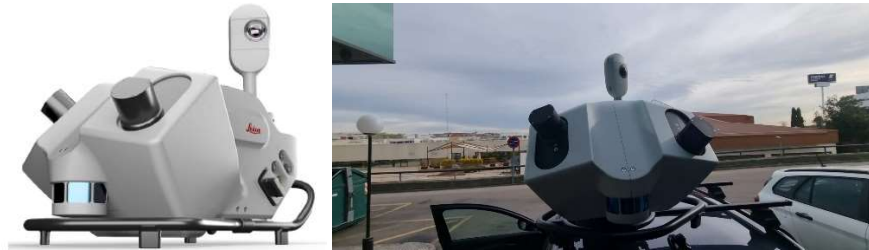


Fig. 5 Vista frontal Leica TRK700 Evo. Fuente: Leica y Elaboración propia

La información queda almacenada en discos duros intercambiables SSD, para ser posteriormente procesada acorde a las especificaciones de cada proyecto. El procesamiento, tratamiento, generación y difusión de los datos y resultados se efectúa a través del software propietario del fabricante, creando entregables tanto en formato nativo como en formatos abiertos e interoperables. En la fase captura, la gestión de los sensores y captura masiva de información se gestiona a través del programa Leica Pegasus FIELD, permitiendo una captura autónoma y planificación de rutas en campo. En la fase posterior de integración de todos los datos, pos-procesamiento y publicación, se trabaja con el programa Leica Pegasus OFFICE.

El **geoposicionamiento** preciso, se efectúa a través de una antena GNSS principal que puede ser complementada con una antena GNSS secundaria. Esta configuración de doble antena sirve ayuda a la inicialización de los inerciales y su dirección, en aquellos casos donde las circunstancias de entorno sean dificultosas y dificulten el seguimiento del protocolo estándar de medición, pues la disposición de múltiples antenas ayuda a mitigar los problemas de bloqueo o rebote en la recepción de señales GNSS en determinados entornos. Adicionalmente, incluye un sistema **inercial** preciso para calcula posición y orientación del sistema TRK mientras se encuentra en movimiento en entornos con señal GNSS débil o inexistente (áreas boscosas, cañones urbanos, túneles.)



Fig. 6. Montaje Leica TRK700 Evo en coche. Fuente: Elaboración propia

La combinación de estos sistemas, permiten conseguir una georreferenciación precisa absoluta, a nivel de centímetros, lo que permite su uso en aplicaciones de cartografía de detalle.

El Leica Pegasus TRK700Evo dispone de **dos láseres escáner integrados** en configuración inclinada, permitiendo una captura de hasta 2 millones de puntos por segundo creando un patrón cruzado de la nube de puntos, lo cual redundo en una mayor cobertura y densidad de puntos.

Como complemento a estos sensores, se dispone de dos perfilómetros de menor alcance que forman parte del sistema de **SLAM**, los cuales aportan datos detallados del entorno que ayudan al sistema a entender mejor su ubicación y a construir un mapa más preciso del entorno.

## 2.2 Riegel VUX 1 - ALS

Para el escaneo, el sensor LiDAR utilizado ha sido el RIEGL VP1 VUX. Este sistema es una solución de escaneo láser compacta y flexible que combina su tamaño con el peso específico a transportar en un helicóptero tripulado. Además, integra un sistema inercial (IMU) de última generación, así como un sistema GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite). Con la unión de ambos sistemas, se obtienen datos de gran precisión.

Adicionalmente, este sistema contiene dos cámaras con una unidad de control de disparo, donde graba una marca de tiempo para cada imagen y luego permite, en la fase de procesamiento de datos, la combinación de la imagen con las nubes de puntos producidas.



Fig. 7. Sistema Láser Móvil VUX e integración en sistema VP1. Fuente: Riegel

Este sistema va montado sobre una plataforma desde la que se harán las mediciones. Estas plataformas pueden ser un vehículo, locomotora, helicóptero, entre otros. Para nuestros trabajos se utilizará sobre un helicóptero.

### Beneficios del Sistema

Los siguientes son algunos de los beneficios de este sistema láser:

- La velocidad de la recopilación masiva de datos, utilizando la detección remota combinada con la simplicidad de los procesos de cálculo, ofrece resultados precisos más rápido que cualquier otra tecnología;
- Se trata de una técnica no intrusiva que permite obtener datos georreferenciados masivos y precisos, evitando la exposición al peligro de los técnicos, como es el caso de los corredores ferroviarios;
- Cobertura aérea de alta resolución y precisión, que permite la definición de los elementos del terreno, es decir, la definición geométrica de las características más relevantes que caracterizan su orografía, como ondas, trayectorias, zanjas de drenaje, entre otras estructuras;
- Las zonas de sombra son prácticamente nulas, ya que el levantamiento es aéreo (realizado desde arriba)
- La tasa de puntos adquiridos por segundo (500.000 pts/seg), ofrece al equipo una gran capacidad de penetración en zonas de vegetación densa, obteniendo siempre información a nivel del suelo. Solo en situaciones muy específicas, donde la densidad de la vegetación cubre el 100% del nivel del suelo, no es posible caracterizar el terreno;

- El software de proceso utilizado permite ejecutar algoritmos de clasificación de la nube de puntos, permitiendo la clasificación de puntos relacionados con la vegetación, posibilitando así una caracterización total del terreno.



**Fig. 8. LiDAR Aéreo. Integración en helicóptero tripulado. Fuente: Elaboración propia.**

## 2.3 Trimble Gedo IMS Scan

El sistema Trimble Gedo IMS Scan es un dispositivo móvil dinámico que permite la captura precisa de datos relativos a la vía como al entorno. Su principal función es proporcionar una documentación detallada y exhaustiva del estado actual de la de la vía, tanto a nivel de geometría interna como condiciones de entorno. Condiciones indispensables de cara a las actividades de mantenimiento, rehabilitación y planificación de actuaciones futuras sobre la infraestructura ferroviaria

El Trimble Gedo IMS Scan está compuesto por un escáner láser montado sobre una plataforma de transporte ferroviario. Este sistema se distingue por su capacidad para capturar datos tridimensionales de alta resolución en entornos ferroviarios complejos, así como valores submilimétricos de ancho y peralte. Algunas de las características técnicas más destacadas incluyen:



- **Escáner Láser:** El sistema utiliza un escáner láser de última generación capaz de capturar millones de puntos por segundo, proporcionando una nube de puntos tridimensional con alta densidad y precisión.
- **Posicionamiento Preciso:** Integra un sistema de posicionamiento inercial (**IMS**) que, en combinación con datos **GNSS**, permite una georreferenciación exacta de los datos capturados. Este posicionamiento preciso es crucial para la alineación y el análisis detallado de la infraestructura ferroviaria. El sistema IMS puede ser combinado tanto con datos GNSS como con datos más precisos a partir de **estaciones totales**.
- **Velocidad de Captura:** El Trimble Gedo IMS Scan puede operar a velocidades ferroviarias normales, lo que permite la captura de datos sin interrumpir el tráfico ferroviario, optimizando así los tiempos de inspección y reduciendo costos operativos.

### **Procedimiento de Captura de Datos**

El proceso de captura de datos implica varios pasos metodológicos:

- **Preparación del Equipo:** Antes de la captura, se realiza una calibración y verificación del equipo para asegurar la precisión de los datos. Esto incluye la configuración del escáner láser y el sistema de posicionamiento.
- **Captura de Datos en Campo:** Desplazamiento a velocidades máximas de paso de hombre sobre la plataforma ferroviaria (4-5Km/h), capturando datos tridimensionales en tiempo real. Durante este proceso, se monitoriza constantemente la calidad de los datos y se realizan ajustes en caso de ser necesario. Los datos son capturados de posicionamiento y LiDAR son capturados simultáneamente. En la integración y desplazamiento, se aplica el filtro de Kalman.



Fig. 9. Trimble Gedo IMS con escaner GX50. Fuente: Trimble Railways GmbH.

- **Procesamiento de Datos:** Una vez capturados, los datos se procesan utilizando el programa propietario Trimble Gedo Scan Office, especializado para generar la nube de puntos tridimensional. Este procesamiento incluye la filtración de ruido, la alineación precisa de los datos georreferenciados, la evaluación de la calidad geométrica de la vía, estudios de gálibos, entre otros.
- **Análisis e Interpretación:** Finalmente, los datos procesados se analizan e interpretan para extraer información relevante sobre el estado y las características de la infraestructura ferroviaria y de su entorno.
- **Exportación de Resultados:** Los resultados evaluados y generados, pueden ser exportados en formato abiertos e interoperables, como DXF, PDF, ASCII, LAS, entre otros.

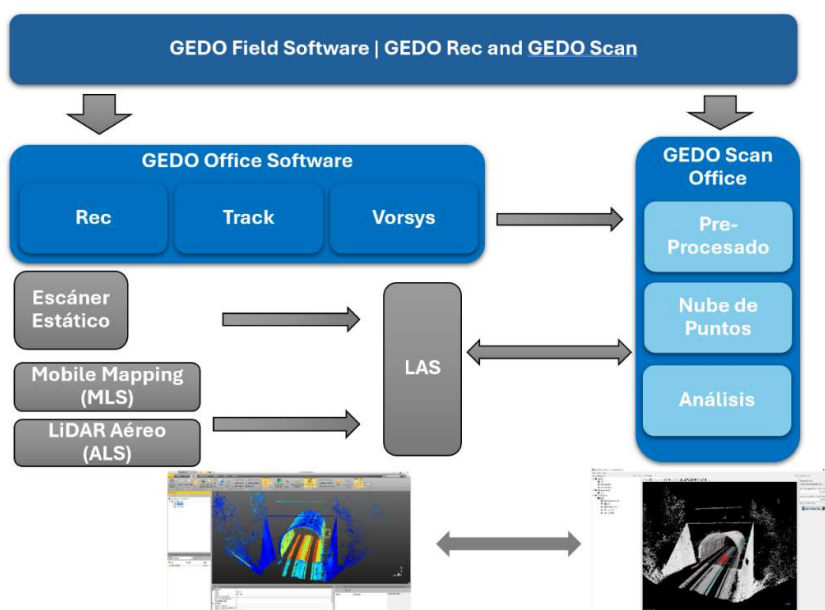


Fig. 10. Ecosistema de trabajo Trimble Gedo Scan Office. Fuente: Elaboración propia

GedoScan Office facilita la importación y procesamiento de datos LIDAR, mientras que el módulo Gedo Analyst ofrece herramientas para el análisis detallado y la generación de informes.

Tabla 1. Principales características de la instrumentación empleada. Fuente: Elaboración propia

Datos MMS	Leica TRK 700EVO	Riegel VUX1-LR	Trimble GX50
Rango	0.30 - 182m	5m - 820m	0.6 - 80m
Campo de Vista	360º	Hasta 330º	345º/360º
Precisión (mm)	0.2mm; 1σ @10m	10mm	2mm @ 30m
PRF (Frecuencia de repetición de pulso) (KHz)	2 000	50 - 1 500	1 000
Frecuencia de Escaneo (Hz)	200 Hz	Hasta 534 Hz	Hasta 240Hz
Peso (Kg)	29	3.5	8.3
Máx. pts/s	2 000 000	750 000	1 000 000
Numero de Retornos	5, máx. 15	1	1
Número de Cabezales	Máx. 2	1	Máx. 2

## 2.4 Cloud Compare

Cloud Compare (<https://www.cloudcompare.org/>) es una herramienta de procesamiento de nubes de puntos de código abierto que proporciona una amplia gama de funcionalidades para el análisis y comparación de datos 3D. Su capacidad para manejar nubes de puntos masivas lo hace ideal para aplicaciones de cartografía móvil. Cloud Compare permite la comparación directa entre diferentes nubes de puntos, facilitando la detección de cambios y la evaluación de deformaciones en infraestructuras ferroviarias. Las herramientas de segmentación y filtrado avanzadas ayudan a aislar áreas de interés específico, lo que es particularmente útil en el análisis detallado de componentes ferroviarios. Además, su interfaz intuitiva y la posibilidad de personalización mediante plugin extienden su funcionalidad, adaptándose a diversas necesidades de análisis geoespacial. CloudCompare es compatible con múltiples formatos de archivo, lo que facilita la importación y exportación de datos entre diferentes plataformas y dispositivos.



Fig. 11. CloudCompare.org. Fuente: Cloud Compare

### Funcionalidades Principales

- **Procesamiento de Datos Brutos:** La gestión de datos LiDAR comienza con el procesamiento de los datos brutos obtenidos mediante escaneos LiDAR. CloudCompare facilita la importación de estos datos en diferentes formatos (p.ej. LAS, LAZ, PLY) y proporciona herramientas para su visualización inicial y evaluación. El filtrado de datos es una etapa crucial, y CloudCompare ofrece diversos métodos para eliminar puntos erróneos o ruido que pueda afectar la precisión del análisis
- **Visualización de Nubes de Puntos:** CloudCompare permite la visualización interactiva de nubes de puntos en 3D, ofreciendo diversas opciones de renderizado y visualización que facilitan el análisis visual de los datos.
- **Registro y Alineación:** El programa incluye herramientas para el registro y alineación de nubes de puntos, lo que es esencial para la integración de múltiples conjuntos de



datos LiDAR y la creación de modelos 3D coherentes. El programa emplea algoritmos de registro basados en características (p.ej. ICP - Iterative Closest Point) para alinear las nubes de puntos con alta precisión.

- **Filtrado y Limpieza:** CloudCompare proporciona filtros avanzados para la eliminación de ruido y la limpieza de nubes de puntos, mejorando la calidad de los datos y facilitando su análisis posterior.
- **Segmentación y Clasificación:** Las herramientas de segmentación permiten dividir la nube de puntos en diferentes regiones o clases (p.ej., vegetación, edificación, suelo...), limpieza de las nubes de datos, lo que es útil para la identificación de características específicas del terreno o estructuras, así como la organización estructurada de datos o conjuntos de datos.
- **Medición y Análisis:** Una vez procesados y segmentados los datos, el programa ofrece diversas herramientas para la medición y análisis de distancias, áreas y volúmenes, así como para el análisis de la topografía y la morfología del terreno. El programa dispone de capacidades para comparación entre modelos de nubes de puntos diferentes.
- **Comparación de Modelos:** Una de las funcionalidades más destacadas de CloudCompare es la capacidad de comparar diferentes modelos 3D, lo que permite evaluar cambios y deformaciones en el terreno o estructuras a lo largo del tiempo.

## 2.5 Trimble Business Center

Trimble Business Center (<https://geospatial.trimble.com/>) es una plataforma de software diseñada para el procesamiento de datos geospaciales obtenidos a partir de diversas fuentes, como GNSS, estaciones totales, UAVs y LiDAR. Desarrollado por Trimble Inc., este programa ofrece una amplia gama de herramientas para la edición, análisis y visualización de datos, facilitando la integración de diferentes tipos de información geoespacial en un entorno unificado. La capacidad de TBC para manejar grandes volúmenes de datos y su compatibilidad con una variedad de formatos de archivo lo convierten en una herramienta esencial para profesionales en los campos de la topografía, ingeniería civil y geomática.

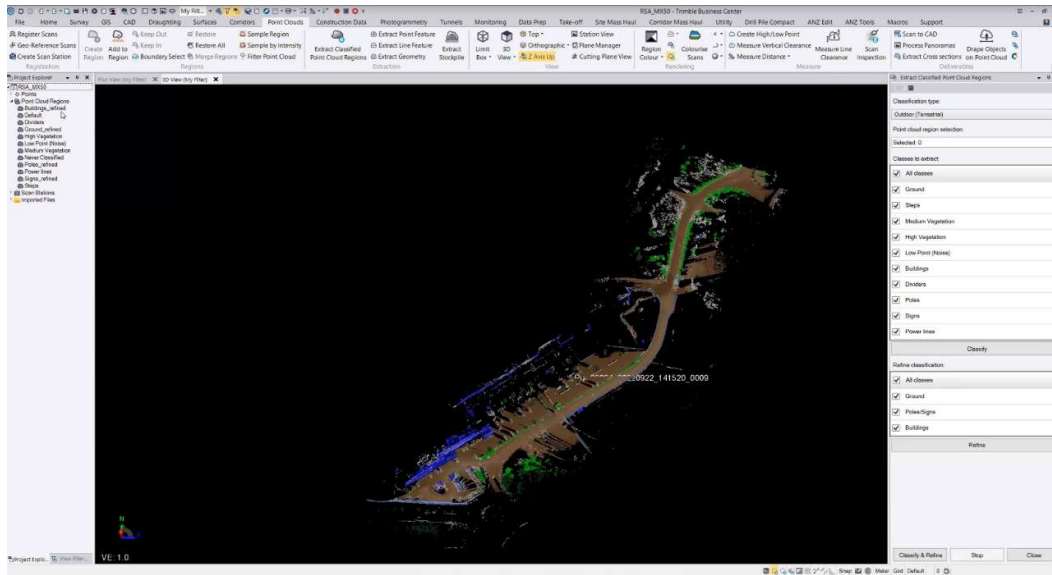


Fig. 12. Trimble Business Center. Clasificación Exterior. Fuente: Trimble Inc.

### Características Principales

- **Procesamiento y Ajuste de Datos GNSS:** TBC permite el procesamiento avanzado de datos GNSS, incluyendo el ajuste de redes y el post-procesamiento de observaciones estáticas y cinemáticas.
- **Integración de Datos Multisensor:** El software soporta la importación y sincronización de datos provenientes de diferentes sensores, permitiendo una integración fluida de datos LiDAR, imágenes aéreas y mediciones terrestres.
- **Edición y Visualización de Nubes de Puntos:** TBC ofrece herramientas avanzadas para la edición y visualización de nubes de puntos LiDAR, incluyendo la clasificación automática de puntos, filtrado y generación de modelos digitales de terreno (DTM).
- **Análisis y Modelado 3D:** Con TBC, es posible crear y analizar modelos tridimensionales detallados del terreno, estructuras y otros elementos geoespaciales, lo que facilita la toma de decisiones informadas en proyectos de ingeniería y planificación.
- **Aplicación de TBC en la Gestión de Datos LiDAR:** el programa permite procesar grandes nubes de puntos. El software permite la clasificación automática de puntos, diferenciando entre suelo, vegetación, estructuras, carriles, travесas, catenaria. Además, TBC ofrece herramientas para la edición manual de nubes de puntos, lo que permite a los usuarios refinar los datos y eliminar posibles ruidos o errores. A partir de



las nubes de puntos procesadas y clasificadas, TBC facilita la creación de Modelos Digitales de Superficie (MDS) y Modelos Digitales de Terreno (MDT), los cuales se integran dentro de los procesos de ingeniería, estudios de deformaciones, gestión de túneles, diseño de infraestructuras lineales, etc.

- **Personalización y Desarrollo:** El programa brinda la capacidad de personalización y desarrollo de aplicaciones personalizadas, bajo Python. Entre las capacidades más destacadas se encuentra el entrenamiento personalizado Deep Learning de modelo y filtrado avanzado de nubes de puntos y la clasificación de nubes de puntos basado en técnicas de Deep Learning.

## 2.6 Terrascan

Terrascan ([www.terrasolid.com/terrascan](http://www.terrasolid.com/terrascan)) es un software especializado en el procesamiento y análisis de datos LIDAR, ampliamente utilizado en aplicaciones de tratamiento de información masiva de datos LiDAR. Su fortaleza radica en la clasificación automática y manual de puntos, lo que permite la diferenciación precisa de elementos como el suelo, la vegetación y las estructuras artificiales. En el contexto ferroviario, Terrascan facilita la extracción de líneas de ferrocarril y otros elementos críticos de las nubes de puntos. Su capacidad para integrarse con otros sistemas de diseño y análisis, como Microstation, mejora la eficiencia del flujo de trabajo. Además, las herramientas de análisis de Terrascan permiten la detección de anomalías y la evaluación del estado de la infraestructura ferroviaria, contribuyendo a su mantenimiento y mejora continua.

Otra de las capacidades de Terrascan, radica en la capacidad de programación personalizada de flujos de trabajo, favoreciendo la clasificación estructurada y segmentada en base al conjunto de datos y objetivos definidos.

## 2.7 TopoDoT

Topodot (<https://new.certainty3d.com/>) es un software de procesamiento de nubes de puntos especializado en el análisis de datos LIDAR y fotogramétricos. En aplicaciones ferroviarias, Topodot ofrece herramientas precisas para la extracción y análisis de geometrías ferroviarias, incluyendo la identificación de vías, taludes y estructuras adyacentes. Su capacidad para generar



modelos 3D detallados y perfiles transversales facilita la evaluación del estado y la geometría de las infraestructuras ferroviarias. Topodot también permite la comparación de datos en el tiempo, lo que es crucial para el monitoreo y mantenimiento predictivo. Su integración con otros sistemas CAD y SIG mejora la interoperabilidad y el intercambio de datos, optimizando los procesos de planificación y análisis.

Las capacidades de TopoDOT para detectar y extraer automáticamente elementos como vías, señales y estructuras ferroviarias permiten una rápida creación de modelos 3D detallados, lo que mejora la eficiencia y precisión en el diseño y mantenimiento de la infraestructura ferroviaria.

TopoDOT es una aplicación para MicroStation que proporciona herramientas avanzadas para el procesamiento y análisis de datos LIDAR y fotogramétricos. En proyectos ferroviarios, TopoDOT se utiliza para extraer características y crear modelos precisos a partir de nubes de puntos obtenidas mediante sistemas de cartografía móvil.

## 2.8 Microstation

Microstation ([www.bentley.com](http://www.bentley.com)) es un software de diseño asistido por computadora (CAD) que proporciona una plataforma robusta para la creación y gestión de diseños 2D y 3D. Microstation permite la integración y visualización de nubes de puntos, facilitando la creación de modelos detallados de infraestructuras. Su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y su interoperabilidad con otros sistemas de procesamiento y análisis, como Terrascan y Topodot, lo hacen indispensable en proyectos de ingeniería ferroviaria. Las herramientas avanzadas de diseño y análisis de Microstation permiten la creación de planos precisos y la simulación de diferentes escenarios, contribuyendo a la planificación y gestión eficiente de proyectos ferroviarios.

## 2.9 QGIS

QGIS (<https://qgis.org/es/site/>) es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto que soporta la visualización, edición y análisis de datos geoespaciales. En el ámbito de la cartografía móvil ferroviaria, QGIS permite la integración de nubes de puntos con otros datos espaciales, proporcionando una plataforma robusta para el análisis geográfico completo. Las capacidades de QGIS para manejar diferentes formatos de datos y su extensa biblioteca de



plugin lo hacen altamente versátil. Su capacidad para realizar análisis espaciales complejos y generar mapas temáticos permite una comprensión profunda de la disposición espacial y las características del terreno, esenciales para la planificación y gestión de infraestructuras ferroviarias.

## 2.10 Revit

Revit es un software de modelado de información para la construcción (BIM) ampliamente utilizado en la planificación, diseño y gestión de proyectos de construcción e infraestructura. Su principal funcionalidad radica en la capacidad para crear modelos tridimensionales detallados, que incorporan elementos paramétricos con información asociada, facilitando así una comprensión integral de las estructuras a lo largo de su ciclo de vida.

En el contexto del presente trabajo, Revit se emplea para la digitalización y modelización de superestructuras ferroviarias, integrando información geométrica y de diseño que es esencial para la creación de gemelos digitales precisos de infraestructuras ferroviarias. Este modelo puede ser utilizado para simulaciones, análisis estructurales y revisiones de mantenimiento, proporcionando una plataforma robusta para la toma de decisiones informadas en el diseño y gestión de infraestructuras.

## 2.11 TwinMotion

TwinMotion es un software de visualización y renderización en tiempo real que se especializa en la creación de visualizaciones arquitectónicas y urbanísticas de alta calidad. Este programa es particularmente útil para proyectos que requieren visualizaciones dinámicas y detalladas de modelos digitales en 3D. La herramienta permite a los usuarios manipular elementos en tiempo real, ajustar la iluminación, el clima, y la configuración del entorno para generar representaciones realistas de proyectos de ingeniería y arquitectura.

En este estudio, TwinMotion se utiliza para generar representaciones visuales de los datos y modelos obtenidos a través de los sistemas de escaneo láser y BIM.

### 3 Metodología

El proceso de captura se desarrolla de forma estructurada, escalonada y organizada de tal forma que puedan conseguirse los máximos grados de precisión, que el sistema y las condiciones de entorno permitan.

Una vez se disponga de la información bruta, ya ajustada y válida para operar se procederá a su inclusión dentro de los distintos tipos de análisis que se requieren.

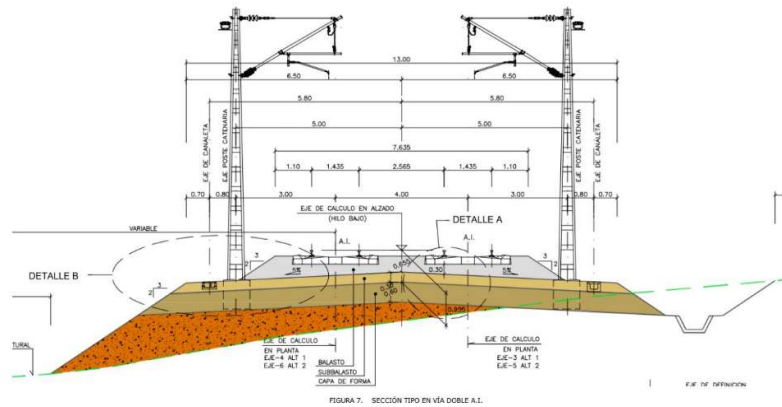


Fig. 13. Sección tipo de vía doble en balasto. Fuente: ADIF

Tabla 2. Detalles de la adquisición de datos. Fuente: Elaboración propia

	Equipo	Plataforma de Captura	Num. Pasadas	Longitud (en Km)	Condiciones de Observación
Terrestre	Leica TRK 700EVO	Vehículo Bivial	2	40	Jornada Nocturna Corte de vía Túneles y Cielo Abierto
Aereo	Riegel VUX1-LR	Helicóptero	1	10	Jornada Diurna Soleado Cielo abierto
Terrestre	Trimble IMS GX50	Carro de Vía	2	1	Jornada Nocturna Corte de vía Túneles y Cielo Abierto

## 3.1 Caso 1. Mobile Mapping Terrestre (MMS)

### 3.1.1 Área de Estudio

#### **MMS. Plataforma Ferroviaria Convencional. Red de Cercanías de Madrid.**

##### **Ámbito Geográfico**

El presente caso centra en una sección de la plataforma ferroviaria perteneciente al administrador de infraestructuras ferroviarias de España, ADIF. El emplazamiento del tramo analizado se encuentra dentro la Red de Cercanías de la Comunidad de Madrid, en su corredor norte.

Esta área de estudio, con una longitud total de 40Km, se corresponde con plataforma ferroviaria de vía doble electrificada, a cielo abierto, que combina diversos activos de interés tales como túneles, pasos superiores, carriles, traviesas, postes de catenaria, hilo de contacto de la catenaria, activos de señalización, etc.

Los datos serán capturados a mediante sistema de cartografía móvil (o mobile mapping, MMS), Leica TRK700Evo embarcado en vehículo bimodal y capacitado para circular por vías férreas.



**Fig. 14. Caso 1. MMS. Ámbito de actuación. Vía en Balasto. Red de Cercanías. Fuente: Elaboración propia**

Así pues, los datos capturados, procesados y analizados combinan tantos datos de infraestructura (plataforma, túneles, viaductos), superestructura (carriles, traviesas...) y de electrificación (hilo de contacto, postes de catenaria). El análisis detallado de la información,

así como la calidad de los resultados y productos finales permitirán establecer el criterio de aplicación en los procesos de diseño y ejecución vinculados a la renovación completa de la vía, incluyendo la sustitución de todos sus elementos como balasto, traviesas, carril y desvíos. A la par que agilizar la fase de ingeniería de la electrificación.

El armamento de la vía se compone de carril UIC54E1 con traviesas polivalentes de hormigón, sobre cama de balasto en toda su amplitud, incluyendo túneles.

### Objetivos

- Implementar un sistema de captura de datos basado en tecnología LiDAR terrestre.
- Extracción de activos ferroviarios específicos (carril, catenaria), digitalización de activos, modelización.

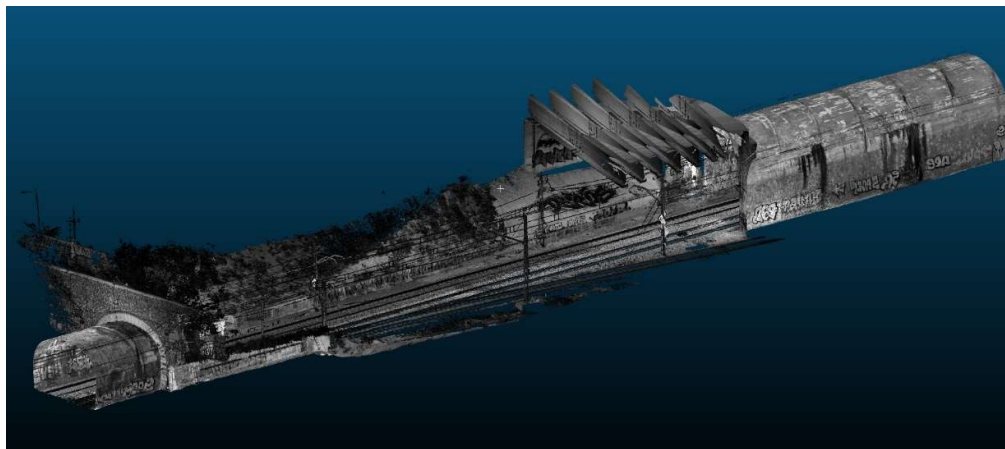


Fig. 15. Caso 1. MMS. Perspectiva activos de infraestructura. Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2 Estudio del Entorno

Para ello, en una primera fase, se realiza previamente un **estudio del entorno**, tanto a nivel global como a nivel particular, a partir del cual determinamos la ubicación de las estaciones de referencia GNSS (ERGNSS) que se encuentran en las cercanías del proyecto y se evalúan las distancias máximas de observación, a partir de las cuales obtendremos las precisiones posicionales absolutas de los datos capturados.

Junto con la determinación de las ubicaciones de los GNSS de referencia, se efectúa un reconocimiento del área a capturar, con el fin de determinar posibles obstáculos y zonas críticas

dentro del proyecto (túneles, cañones urbanos, vegetación, zonas de baja cobertura de señal GNSS...).

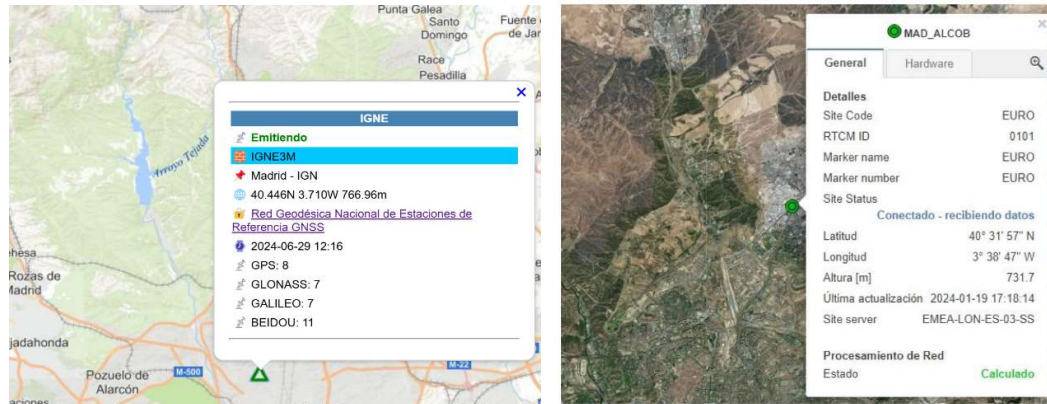


Fig. 16.Caso 1. MMS. Antenas GNSS de referencia (ERGNSS). Fuente: Elaboración propia

En el caso que nos ocupa, observamos que se dispone de una estación de referencia GNSS, perteneciente a la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS (ERGNSS) del Instituto Geográfico Nacional (IGNE3M) que se encuentra a una distancia máxima de 20,6Km del extremo de actuación. Esta ERGNSS se valida como referencia en solución de base simple para los trabajos, aunque también se considerará la opción de calcular el posicionamiento mediante una solución de red, en la que intervenga este vértice GNSS.

Adicionalmente, se ha verificado la existencia de alguna otra estación de referencia GNSS que pudiera servir de respaldo en el caso de fallo de la ERGNSS principal, o por si se decide incluirla en los cálculos de postproceso. De los análisis realizados, se ha determinado que la ubicación de la ERGNSS (MAD\_ALCOB) perteneciente a la red propietaria Leica Smartnet cumple con los requisitos establecido. Dicha ERGNSS, se encuentra a una distancia máxima de 19,9Km. Esta red propietaria, también incluye dentro de la red y des soluciones aportadas, las ERGNSS del IGN.

### 3.1.3 Planificación de la adquisición de datos

En una segunda fase, se procede con la **planificación de los trabajos para la captura de los datos** dentro del entorno ferroviario, un entorno con circunstancias operativas limitantes, ya sean de éstas de acceso, circulación u operación. En esta planificación. En esta fase se han

planificado los permisos de acceso, zonas de encarrilamiento (para vehículo bimodal, carros de vía) así como los permisos necesarios para los trayectos en vía, los cuales se efectúan con un Encargado de trabajos de ADIF.

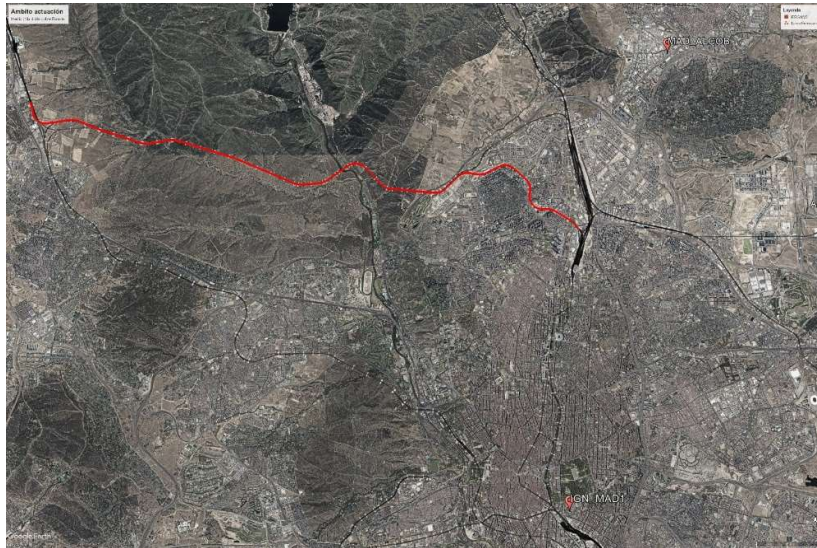


Fig. 17.. Caso 1. MMS. Ámbito actuación y Estaciones de Referencia GNSS. Fuente: Elaboración propia

Durante esta fase se procede al dimensionamiento de recursos, tiempos estimados operativos de captura, velocidad de captura, horario de trabajos, bandas de operación, determinación de medios materiales y humanos, requisitos operacionales (ya sean internos o externos), etc. Estas actividades y planificación son de vital importancia en trabajos en entorno ferroviario.

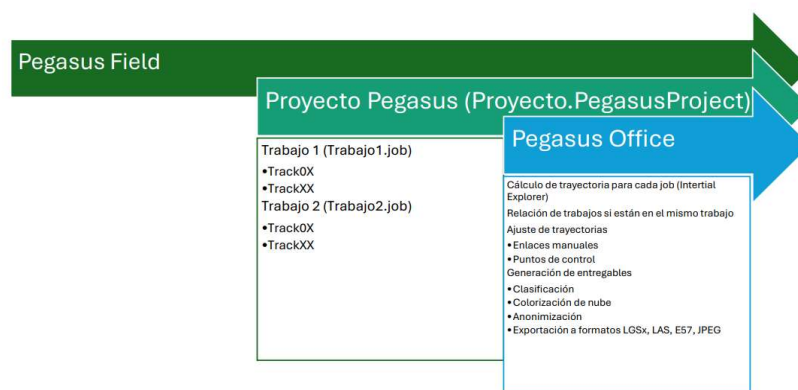


Fig. 18. Flujo de trabajo Leica Pegasus Field y Pegasus Office. Fuente: Leica

### 3.1.4 Adquisición de datos

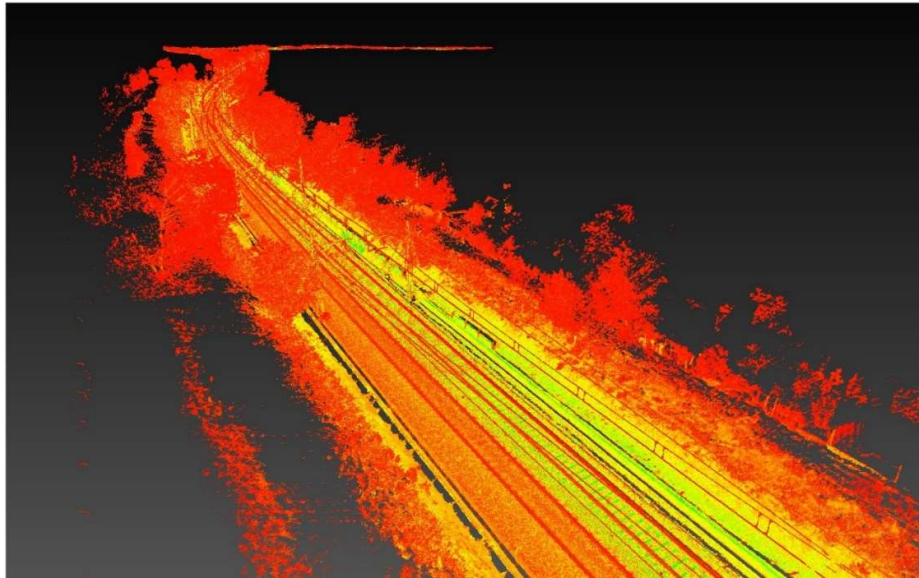
En la tercera fase, procedemos con **adquisición de datos**. La adquisición con el sistema TRK700 Evo, se efectuó por una sola vía, con encarrilamiento de vehículo bimodal, circulando a una velocidad de 10km/h y realizándose las paradas necesarias en los tránsitos de material móvil por la vía adyacente, con el fin de evitar zonas de sombra. El hecho de que el dispositivo TRK 700Evo disponga de los dos perfilómetros LiDAR activos con captura de hasta 1.000.000 de puntos por segundo, genera una nube de puntos de alta densidad.

A través del programa Leica Pegasus Explorer, se realiza la gestión integral de todos los sensores, así como la monitorización de estos durante todo el proceso de inicialización, captura y finalización del proceso de adquisición de datos.



Fig. 19. Vehículo bimodal con TRK700Evo. Fuente: Elaboración propia

Para que la captura de las imágenes de la cámara 360° sea efectiva, el nivel de iluminación debe ser el óptimo, por lo que se recomienda realizar la captura en horario diurno. Situación no viable en el presente caso, pues por motivos de seguridad, la adquisición de datos se efectúa en banda de mantenimiento nocturno. Al ser los valores de iluminación artificial insuficientes para la correcta colorización de las nubes de puntos, se podrá visualizar a través de sus valores de intensidad.



**Fig. 20. Visualización nube de puntos por Intensidad. Fuente: Elaboración propia**

El láser, con un alcance de captura de hasta 100 m de distancia a ambos lados de los perfilómetros, es más que suficiente para el trabajo que se acometía que tiene un entorno de unos 25 m a cada lado de la plataforma de interés real.

Casi toda la captura se ha realizado a cielo abierto, aunque con algunas zonas de túnel, pasos superiores y trincheras angostas, esta situación puede crear zonas de sombra y de pérdida de señal GPS, siendo áreas donde entran en funcionamiento los otros sensores de posicionamiento y se minimizan los errores de georreferenciación.

Durante esta fase, el sistema contó con dos (2) baterías con una duración máxima de 2,5 horas cada una, realizándose el trabajo total de captura en 20h, el trabajo total de captura se realizó en unas 16 horas.

Desde el punto de vista meteorológico, las condiciones generales fueron buenas con presencia de momentos de rocío en los carriles. Las condiciones meteorológicas adversas pueden llegar a anular la captura de datos en campo.

Operativamente, antes del inicio de la toma de datos se desarrollan los procesos de montaje, iniciación y calibración del sistema TRK 700Evo, asegurando que los diferentes sistemas (GPS, Inercial y SLAM) se han inicializado y calibrado.

La inicialización del sistema IMU consiste en la orientación de los inerciales y el sistema de posicionamiento, en la correcta visualización de diferentes satélites desde la posición elegida.



Dicha inicialización consiste en realizar un estacionamiento estático de 90 segundos y después un recorrido con el vehículo de 1500 m realizando movimientos y cambios de velocidad a cielo abierto. Este proceso estándar, es de difícil aplicación en ferrocarril, pues el desplazamiento de los vehículos encarrilados es un movimiento longitudinal, no siendo viable la realización de cambios de dirección y sentido. El programa de gestión de datos en la fase de campo dispone de la opción de omitir esta calibración advirtiendo que el sistema inercial no está correctamente inicializado. Esta situación, obliga a considerar que las precisiones en las zonas de pérdida de señal GNSS pueden verse comprometidas siempre que la pérdida sea muy amplia.

### 3.1.5 Procesamiento y ajuste

La cuarta fase del proceso sería el **Procesamiento y ajuste de trayectorias** de los adquiridos. Estos datos, que se han almacenado en las unidades SD, se descargan en gabinete y se inicia el proceso de cálculo hasta la generación de las nubes de puntos. Este proceso es individual con cada una de las trayectorias registradas y requiere de los siguientes pasos:

- Procesado de trayectoria
- Revisión y optimización
- Exportación de archivos

Estos procesos se llevan a cabo a través de los programas propietarios, Novatel Inertial Explorer y Leica Pegasus Office

#### **Procesado de la Trayectoria**

Al igual que la adecuada planificación y correcta ejecución de la fase de captura de datos son críticos para la obtención de resultados precisos y de calidad en la fase de campo, el correcto procesado de la trayectoria, la integración de toda la información proveniente cada uno de los sensores, así como la mitigación y eliminación de ruido, son críticos en esta fase de gabinete. Por tanto, la calidad geométrica de los resultados depende de la precisión de la trayectoria. En el cálculo de las trayectorias, se combinan los datos GNSS de la estación o estaciones de referencia seleccionadas, los datos de los inerciales, odómetro y datos GNSS de la antena secundaria. Así mismo, dentro de los ajustes de la trayectoria, también se incorporan los datos de los perfilómetros del SLAM, lo cual redundará en una mayor precisión de posicionamiento. En este contexto, el filtro de Kalman juega un papel crucial al permitir una integración eficiente y precisa de los datos provenientes de las diversas tecnologías.



Como datos de entrada tendremos:

- Los datos GNSS de las Estaciones de Referencia GNSS,
- los datos GNSS que proporcionan el posicionamiento global del vehículo, susceptible a interrupciones de la señal,
- los sistemas inerciales (INS), que incluyen acelerómetros y giroscopios, que aportan información sobre la orientación, aceleración del vehículo. Sensores especialmente útiles cuando la señal GNSS es débil o inexistente. Así mismo, aporta información adicional al posicionamiento GNSS
- Odómetros, sensor para la medición de la distancia recorrida por el vehículo,
- Cámaras de espectro visible, para disponer de imágenes visuales del entorno,
- Perfilómetros del SLAM.

Esta heterogeneidad de datos necesita ser fusionada, aplicando para tal fin el Filtro de Kalman, de forma que podamos obtener una estimación continua y actualizada del estado del sistema, como la posición, la velocidad y la orientación del vehículo (en sus componentes horizontales y verticales). El filtro de Kalman trabaja en dos fases: predicción y actualización.

- La **Fase de Predicción**, se basa en los modelos físicos del vehículo y los datos previos, prediciendo el estado futuro del vehículo
- En la **Fase de Actualización**, al recibir los datos de cualquiera de los sensores, el filtro de Kalman ajusta las predicciones para minimizar el error entre el estado predicho y el observado. En esta fase, se emplea la varianza del error de cada sensor, para ponderar su influencia en la estimación final.
- Iteración, el filtro de Kalman es un proceso iterativo que se ejecuta de forma continua a medida que el vehículo se desplaza y captura información de cada sensor, de forma que, con cada ciclo de medición, mejor a la precisión de la localización y la representación del entorno.

De esta forma, el resultado es una trayectoria robusta y precisa, así como un cartografiado detallado y preciso del entorno.

Operativamente, dentro de este primer proceso y en función de las tolerancias de precisiones que indiquemos al programa de cálculo, obtendremos un gráfico de colorización semafórica de la trayectoria. Este intervalo semafórico, se basa en parámetros que indican los niveles de

incertidumbre estimados en el ajuste de la trayectoria respecto a los datos GNSS del sistema y los datos GNSS de la estación (o estaciones) de referencia GNSS seleccionada para el cálculo. A continuación, podemos observar el gráfico semafórico resultante, tras el procesamiento. El análisis detallado de este gráfico, así como de los informes del ajuste nos permitirá definir las estrategias a seguir para la mitigación de errores o para la implementación de trabajos adicionales que permitan conseguir los requerimientos exigidos.



Fig. 21. Gráfico semafórico resultante del cálculo de las trayectorias. Fuente: Elaboración propia

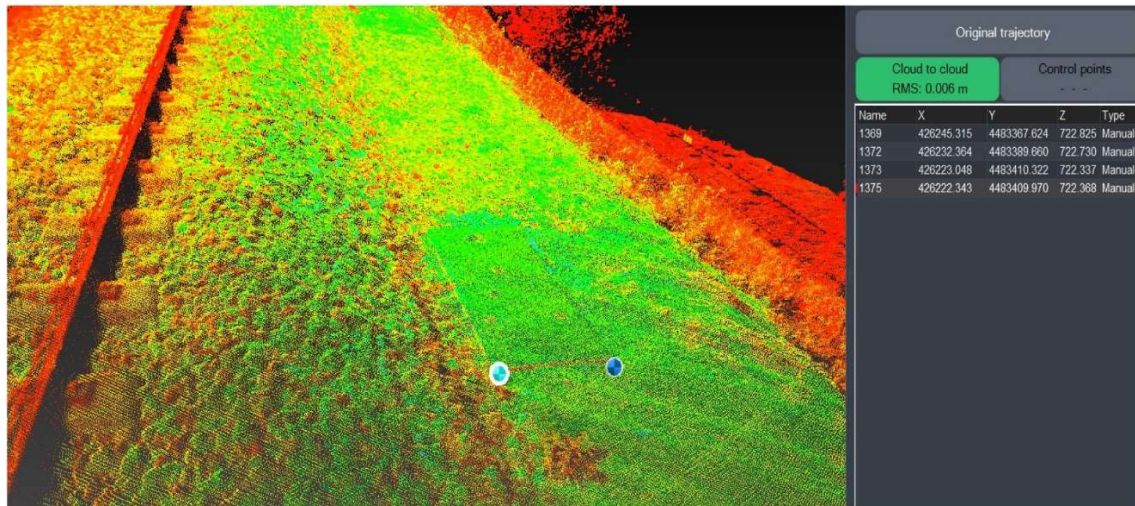
### Revisión y optimización

La escala de colores que se adjunta en el apartado anterior nos hace definir las zonas en las que debemos hacer hincapié a la hora de corregir la trayectoria en un ajuste más preciso y gracias a los puntos de control obtenidos mediante topografía clásica.

El primer subprocesamiento que se acomete es la unión de las diferentes trayectorias que se han obtenido pertenecientes al mismo trabajo. Este proceso se denomina Cloud-to-Cloud (fusión nube a nube) y se basa en la aproximación mediante algoritmos matemáticos de las nubes de puntos que tienen zonas comunes. El programa produce enlaces entre las nubes que han de medirse para luego ser evaluados, corregidos o eliminados de forma manual para que la superposición de las nubes se realice de manera correcta.

Con el proceso Cloud-to-Cloud realizado, evaluado y aprobado, se procede con el segundo subproceso: el ajuste mediante los puntos de control. Con este subproceso, se densifican los

puntos de enlace entre pasadas, mediante enlaces a estos puntos desde las diferentes trayectorias de las que consta el trabajo. Estos enlaces se hacen de forma manual con las herramientas de visualización de las que dispone el software.



**Fig. 22. Ajuste a puntos de enlace entre pasadas. Fuente: Elaboración propia**

Con el objetivo de mejorar la precisión en el posicionamiento absoluto, los trabajos se complementan con la incorporación de puntos de control terrestre, distribuidos a lo largo de trayectoria y medidos mediante técnicas topográficas tradicionales, en este caso mediante estaciones totales, pues las condiciones de entorno no hacen operativas otro tipo de técnicas como GNSS.

Finalmente, con el tercer subproceso, y una vez efectuados todos los enlaces de Cloud-to-Cloud y de puntos de control se procesa de nuevo la trayectoria, etapa que realiza el ajuste final a los puntos establecidos (tanto de control como puntos de enlace). Los puntos desechados por redundancia del dato se han utilizado como control de calidad una vez ajustada la nube.

### **Exportación de archivos**

Una vez ajustada la trayectoria, dicha trayectoria se aplica al conjunto de datos capturados (LiDAR, Cámaras, etc.) para la obtención de los entregables finales.



En el caso que nos ocupa, el principal resultado es la nube de puntos (con o sin color) en formato interoperable, de forma que pueda integrarse con otros programas de explotación de datos, tanto de código abierto como propietario.

Para ello, se ha procedido a:

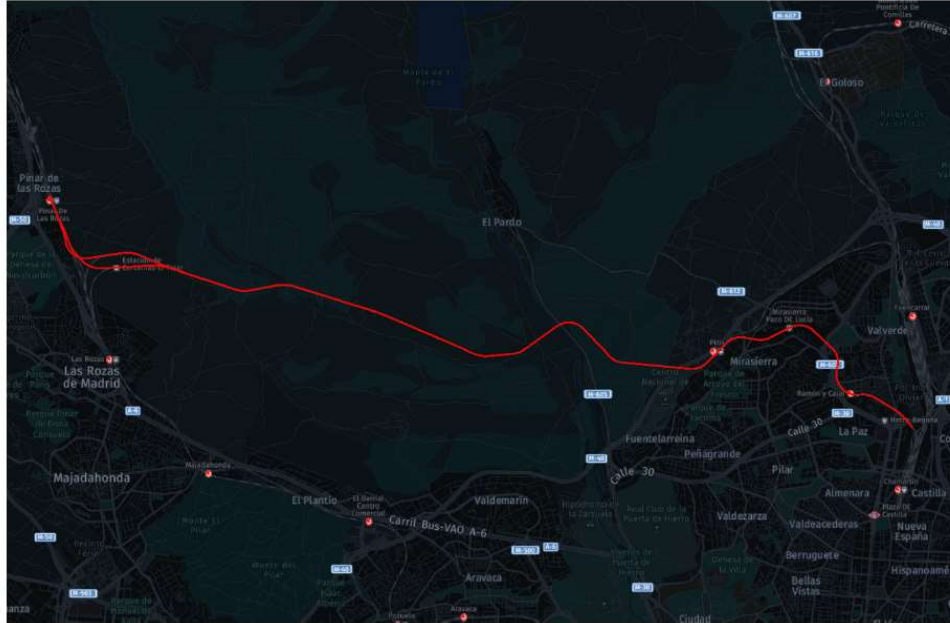
- Exportación de la trayectoria en KMZ
- Exportación de la nube de puntos LiDAR sin color, pues al realizarse la captura en horario nocturno, la iluminación de las fotografías y, por ende, la colorización de la nube de puntos no aporta un valor adicional. El formato elegido ha sido LAS 1.4.

### 3.1.6 Reporte de los ajustes

A continuación, podemos ver los resultados correspondientes al proceso de ajuste

- **Ajuste de trayectoria y enlaces Cloud-to-Cloud**

**Tabla 3. Resumen ajuste trayectoria y enlaces Cloud-to-Cloud. Fuente: Elaboración propia**



Maps provided by HERE

Summary		Absolute accuracy	
Jobs	2	Control points	-
Tracks	5	Control point links	-
Frames	3018	RMS (m)	-
Distance (km)	30.1		
Estimated uncertainty levels		Relative accuracy	
0.05 m	48%	Cloud to cloud links	126
0.10 m	11%	Max Offset RMS (m)	0.006
> 0.10 m	41%	$\Delta$ 3D RMS (m)	0.003

Coordinate system: Spain\_Central\_ETRS89  
Measurement units: meters

- **Ajuste de la trayectoria considerando Cloud-to-Cloud y puntos de control terrestre.**

**Tabla 4. Resumen ajuste Cloud-to-Cloud y Puntos Control Terrestre. Fuente: Elaboración propia**

Summary		Absolute accuracy	
Jobs	2	Control points	107
Tracks	5	Control point links	25
Frames	3018	RMS (m)	0.032
Distance (km)	30.1		
Estimated uncertainty levels		Relative accuracy	
0.05 m	48%	Cloud to cloud links	126
0.10 m	11%	Max Offset RMS (m)	0.006
> 0.10 m	41%	Δ3D RMS (m)	0.003

Coordinate system: Spain\_Central\_ETRS89  
 Measurement units: meters

- **Ejemplo de Sumario de trabajo de una jornada de trabajo.**

### JOB SUMMARY

<b>230626</b>	
Hardware type	Pegasus TRK700 Evo
Control unit	444131
Sensor unit	
Capture date	2023-06-26
Total distance (km)	24.13
Capture time	03:11:33
Activation time	22:39:15
Deactivation time	01:50:48
Total number of Tracks	2
Total number of Frames	2413
Average speed (km/h)	7.56
Space on the drive	546GB
Job planning	Not planned
Type of Job	Rail
Positioning	No RTK
Image anonymisation	No
DMI	No
2nd antenna	Yes
Images	ON
Image distance (m)	10
Scanline spacing (cm)	5
Profiler rotation (Hz)	267
Profiler points/sec	1000000
Max. scanner range (m)	182
Max. recommended speed (km/h)	48

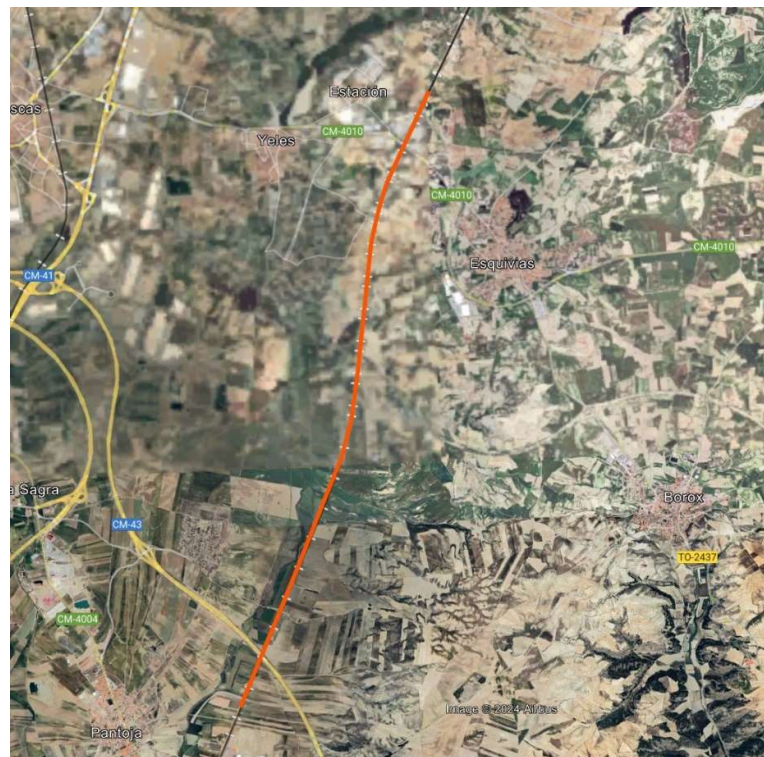
## 3.2 Caso 2. Mobile Mapping Aéreo (ALS)

### 3.2.1 Área de Estudio

Este caso, se centra en una sección de la plataforma ferroviaria perteneciente al administrador de infraestructuras ferroviarias de España, ADIF AV. El emplazamiento del tramo analizado se encuentra dentro la Línea de Alta Velocidad, Madrid-Sevilla, en las cercanías de Esquivias (Toledo).

Esta área de estudio, con una longitud total de 10Km, se corresponde con plataforma ferroviaria de vía doble electrificada, a cielo abierto, que combina diversos activos de interés tales carriles, traviesas, postes de catenaria, hilo de contacto de la catenaria, activos de señalización, entornos con vegetación, etc.

El armamento de la vía se compone de carril UIC60 con traviesas polivalentes de hormigón, sobre cama de balasto en toda su longitud.



**Fig. 23. Caso 2. ALS. Ámbito Actuación. Vía en balasto. LAV. Fuente: Elaboración propia**

Así pues, los datos capturados, procesados y analizados combinan tantos datos de infraestructura (plataforma, túneles, viaductos), superestructura (carriles, traviesas...) y de electrificación (hilo de contacto, postes de

catenaria). El análisis detallado de la información, así como la calidad de los resultados y productos finales permitirán establecer el criterio de aplicación en los procesos de diseño y ejecución vinculados a la renovación completa de la vía, incluyendo la sustitución de todos sus elementos como balasto, traviesas, carril y desvíos. A la par que agilizar la fase de ingeniería de la electrificación.

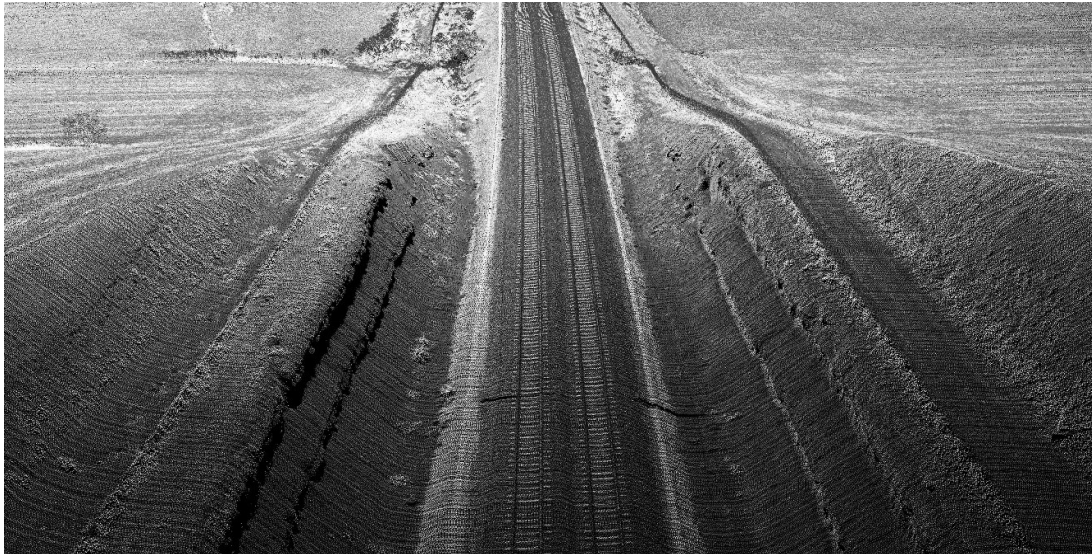


Fig. 24. Caso 2. ALS. Perspectiva de la Infraestructura Ferroviaria. Fuente: Elaboración propia

## Objetivos

- Implementar un sistema de captura de datos basado en tecnología LiDAR aéreo.
- Extracción de activos ferroviarios específicos (carril, catenaria), estudios de capa de balasto e impacto de la vegetación.

### 3.2.2 Estudio del Entorno

La zona de estudio discurre por Castilla-La Mancha, en cielo abierto sin obstrucciones, a excepción de las inherentes a la infraestructura ferroviaria.

Siguiendo el mismo proceso que el explicado en el caso 1, procedemos a determinar qué estación o estaciones se encuentran cerca de la zona de trabajo, con el fin de poder determinar previamente si queremos trabajar con solución de base simple, base múltiple o solución de red. En este caso, estación más cercana es ARAJ, antena GNSS perteneciente a la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS (ERGNSS) del Instituto Geográfico Nacional, ubicada a una distancia máxima de 18km del extremo de actuación. Esta ERGNSS se válida

como referencia en solución de base simple para los trabajos, aunque también se considerará la opción de calcular el posicionamiento mediante una solución de red, en la que intervenga este vértice GNSS.

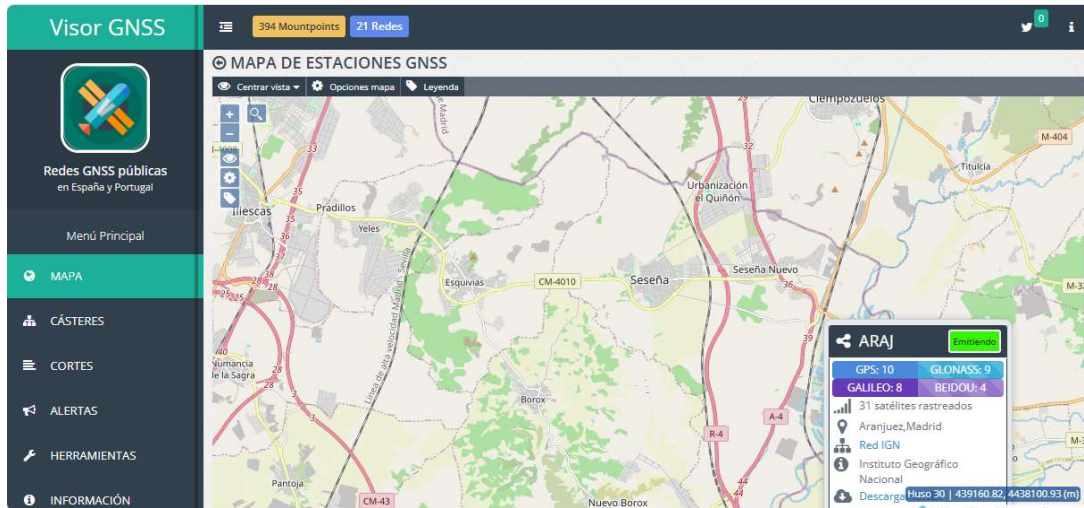


Fig. 25 Caso 2. ALS. Antena GNSS para el proyecto. Fuente: Visor Redes GNSS

El estudio se realizará en todas las líneas convencionales y de ancho métrico de ADIF, incluyendo estaciones de viajeros y centros logísticos. Las áreas de especial interés serán aquellas exentas de vegetación, subestaciones de tracción, instalaciones de telecomunicaciones y pasos a nivel.

### 3.2.3 Planificación de la adquisición de datos

En esta fase de **planificación de los trabajos para la captura de los datos** dentro del entorno ferroviario y empleando medios aéreos, es necesario la obtención de los permisos de vuelo y de las autorizaciones pertinentes de la EASA (European Union Aviation Safety Agency) y AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea). Para llevar a cabo estas autorizaciones, y entre la documentación requerida, se deberá transformar la información de las líneas ferroviarias objeto de estudio, a formatos digitales (como KMZ, SHP) de cara a la planificación del vuelo y evaluación de posibles restricciones.

En función de los medios aéreos, helicópteros o drones, los requisitos documentales y de operación son distintos. Tanto por la tecnología como por los condicionantes de vuelo y de seguridad operacional.

Para llevar a cabo los objetivos propuestos, y principalmente, la extracción de activos lineales y su digitalización, se ha definido que la franja de datos LiDAR, se registre en sentido transversal al vuelo, en una única pasada, con una altura de vuelo de 40m sobre el terreno. Las imágenes aéreas serán en RGB con una resolución de 10cm sobre el terreno.

Se utiliza el sistema LiDAR RIEGL VPI VUX, que combina un escáner láser con sensores inerciales (IMU) y receptores GNSS para obtener datos de alta precisión. Este sistema se monta en helicóptero para realizar los vuelos de captura de datos.

Previo al inicio del vuelo, es necesario confirmar el modelo de helicóptero con el fin de poder determinar exactamente las posiciones de las antenas GNSS, así como de los sensores. Siendo necesario una calibración previa de estas configuraciones.

### 3.2.4 Adquisición de datos

En esta fase, la **adquisición de datos** se ha realizado en base a los planes de vuelo detallados en formato KML, los cuales consideran todos los elementos a volar. El vuelo se ejecuta con helicóptero AS350/355 con sistema Riegel VUX1 embarcado. Las medidas calibradas del lever arm, para este modelo de helicóptero y día de captura fueron:

X: 9.850; Y: 0.650; Z: -2.88

Estando la antena GNSS montada sobre el puro de la cola y el LiDAR montado sobre el soporte vertical, en dirección opuesta al avance de la trayectoria.



Fig. 26. Caso 2. ALS. Instalación en helicóptero AS350/355. Fuente: Elaboración propia



Fig. 27. Caso 2. ALS. Detalles de instalación LiDAR y antena GNSS. Fuente: Elaboración propia

### 3.2.5 Procesamiento, ajuste y exportación

#### Tratamiento de Datos

- **Procesamiento de Trayectoria:** Utilizando el software POSPac MMS de Applanix, se ajustarán las trayectorias de los vuelos para obtener una precisión postproceso.
- **Georreferenciación:** Se integrarán los datos GNSS e inerciales para georreferenciar las nubes de puntos en el sistema de coordenadas establecido.
- **Clasificación de Nubes de Puntos:** Se clasifica y limpia la nube de puntos utilizando la tabla de clases ASPRS, mediante algoritmos automáticos, semi-automáticos o manuales.
- **Generación de Entregables y exportación:**

De cada vuelo que se realice para la captura del dato se obtiene una trayectoria, la cual representa el movimiento del helicóptero desde el momento de su despegue hasta su aterrizaje. Con los sistemas de GNSS e inerciales incorporados en el sistema de Mobile Mapping aéreo, se registran datos de posición y giros a lo largo del recorrido.

Respecto a las bases de referencia, se utilizarán las bases fijas de la red GNSS del Instituto Geográfico Nacional (IGN), necesarias para el cálculo preciso de la trayectoria y dotar de coordenadas a los datos medidos.

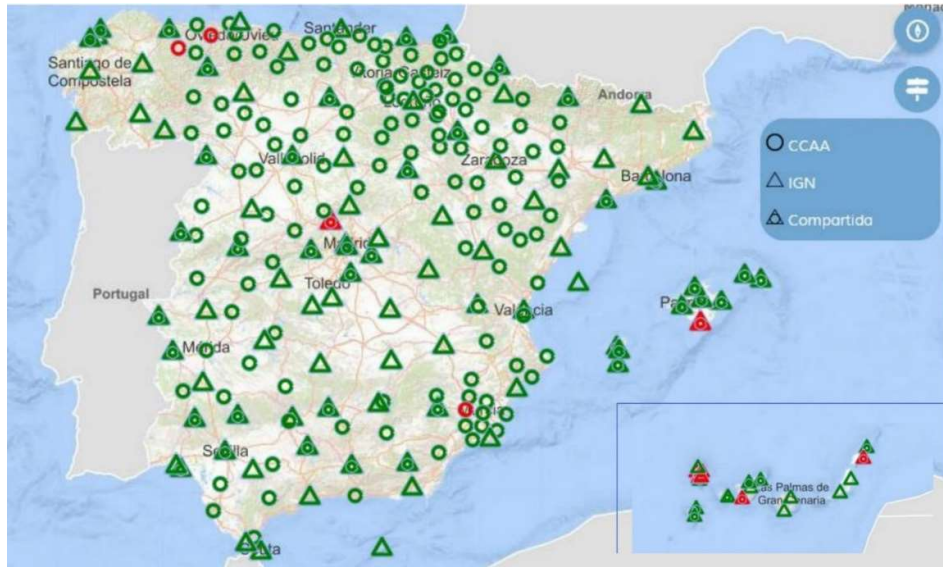


Fig. 28. Red ERGNSS. Fuente: IGN

### Ajuste de los Datos.

Una vez se ha terminado la captura de los datos, se generan los ficheros con los datos recogidos por los sensores GNSS e IMU y las mediciones realizadas por el láser escáner. Con la unión de estos datos y unos cálculos posteriores se obtendrán las nubes de puntos.

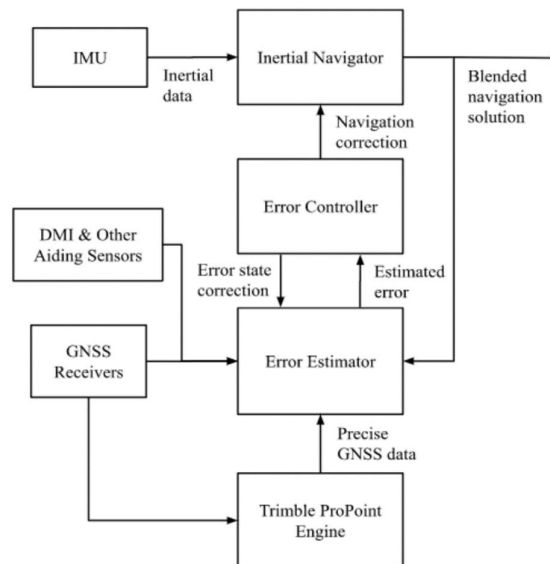


Fig. 29. Trimble Applanix InFusion + Arquitectura. Fuente: Trimble Inc.

En primer lugar, se ha procesado los datos de la trayectoria obtenida en tiempo real en vuelo para obtener una trayectoria de postproceso precisa, mucho más exacta en posición. Para ello,



a través del programa *Trimble POSPac* MMS de Applanix (*POSPac* Trimble Post-Processed CenterPoint® RTX™). Los datos de partida dentro de este software serán las mediciones de las constelaciones GNSS (gps, glonass, galileo) capturadas durante el vuelo y los ficheros de observación de las estaciones bases fijas del IGN y otros organismos autonómicos que se encuentran repartidas por todo el territorio nacional. *POSPac*, en función de cómo se decida ejecutar el ajuste de la trayectoria, ofrece una serie de opciones de ajuste. En esta medición en concreto, no será necesario emplear el método llamado “SmartBase”, el cual genera una base virtual en función de las bases que haya en el entorno de la trayectoria a fin de mejorar la precisión en el ajuste. En el caso que nos ocupa, la distancia de la ERGNSS es suficiente para determinar un alto grado de precisión posicional.

En segundo lugar, se utilizará el programa de Riegl llamado *RiProcess* para la obtención de la nube de puntos. Para ello, se incorpora utilizar la trayectoria de postproceso precisa obtenida con *POSPac* (formato SBET) y los datos brutos almacenados por el láser escáner. Con todo esto podremos procesar los datos y exportar la nube de puntos en el sistema de referencia requerido.

### **Exportación de los Datos.**

Una vez ajustados y sincronizados los datos de trayectoria y LiDAR, procedemos a su exportación de cara a la explotación y validación del dato.

Para ello, se ha procedido a:

- Exportación de la trayectoria en KMZ, y formato SBET
- Exportación de la nube de puntos LiDAR sin color, pues al realizarse la captura en horario nocturno, la iluminación de las fotografías y, por ende, la colorización de la nube de puntos no aporta un valor adicional. El formato elegido ha sido LAS 1.4.



Fig. 30 Flujoograma procesamiento para Líneas Ferrocarril. Fuente: Elaboración propia

### Entregables

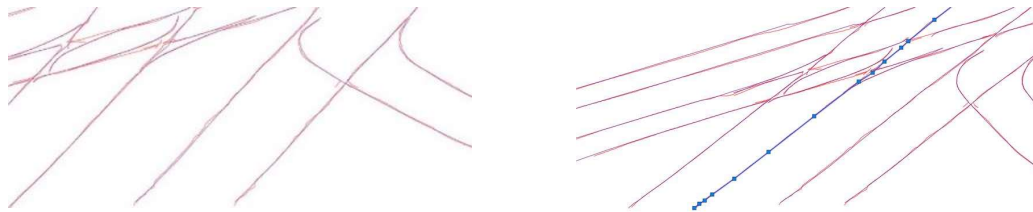
- **Nube de Puntos LiDAR:** Depurada y clasificada acorde al estándar elegido, por ejemplo, ASPRS.
- **Modelo Digital de Vegetación:** En formato ráster, geo TIFF o TIFF.
- **Análisis de Distancias:** Identificación de incumplimientos de gálibo actuales y futuros, y localización de vegetación con riesgo de caída.
- **Digitalización de activos:** Digitalización tridimensional de entidades lineales, para su incorporación en programas de CAD y de Ingeniería Civil.

### 3.3 Tratamiento de Nube de Puntos y Extracción de objetos

Para el tratamiento de la nube de puntos, se han llevado a cabo distintas estrategias en base a las capacidades de los programas. Así mismo, independientemente de las capacidades intrínsecas de cada programa, y en función de cada situación y activo a extraer, se han implementado desarrollos propios de cara a la clasificación de los activos, así como para la generación de entidades vectoriales.

En los casos aplicados, tanto TopoDot como Trimble Scan Analyst disponen de herramientas de extracción de información sin necesidad de clasificación y segmentación de datos.

Por otro lado, se ha trabajado con los programas Cloud Compare y Terrascan, para extraer también entidades lineales. En estos programas, para un adecuado procesamiento de la información y una obtención de adecuada de resultados, es necesario realizar una segmentación y clasificación de la nube de puntos, acorde a los estándares y categorías definidas. Con ambos programas se han realizado procesos de segmentación, clasificación automática, semiautomática y manual. Siguiendo el proceso de división de la nube de puntos en regiones coherentes basados en criterios específicos, como proximidad espacial, intensidad...(segmentación) y mediante la clasificación, se han obtenido conjuntos de nubes de datos con la estructura y categoría adecuada para la aplicación de algoritmos de generación de entidades vectoriales y de información ráster.



**Fig. 31. Vectorización en cruzamientos desvíos ferroviarios. Manual vs algoritmo implementado.**

**Fuente: Elaboración propia**

Una vez segmentada la nube de puntos, se procede a la clasificación, aplicando en este caso la clasificación de puntos LiDAR de ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing,

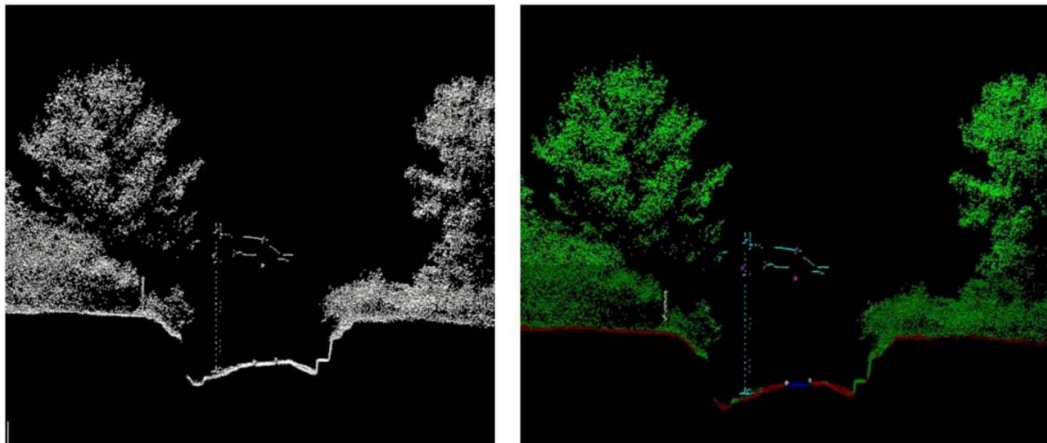
### **Clasificación de objetos**

En esta etapa del proceso, se filtran y limpian las nubes de puntos procesadas y georreferenciadas, separando por clases los puntos en función de las entidades que representan. Para esta clasificación se utilizará la tabla de clases definida, como, por ejemplo, ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing):

**Tabla 5. Clases para puntos LiDAR. Fuente: ASPRS**

<b>Classification Value</b>	<b>Meaning</b>
0	Created, never classified
1	Unclassified <sup>1</sup>
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Point ("low noise")
8	High Point (typically "high noise"). Note that this value was previously used for Model Key Points. Bit 1 of the Classification Flag must now be used to indicate Model Key Points. This allows the model key point class to be preserved.
9	Water
10	Rail
11	Road Surface
12	Bridge Deck
13	Wire - Guard
14	Wire - Conductor (Phase)
15	Transmission Tower
16	Wire-structure Connector (e.g. Insulator)
17	Reserved
18-63	Reserved
64-255	User definable – The specific use of these classes should be encoded in the Classification lookup VLR.

De esta tabla, para mantener el estándar, se mantendrán las 16 primeras clases y, según se necesiten, se irán utilizando las llamadas “Reserved”, que van de la capa 18 hasta la 63. Cada una de ellas llevará un color asignado, a fin de poder distinguir cada una de las clases a simple vista.



**Fig. 32. Clasificación nube de puntos tras clasificación ASPRS. Fuente: Elaboración propia**

Se aplican procesos de clasificación supervisada y no-supervisada.

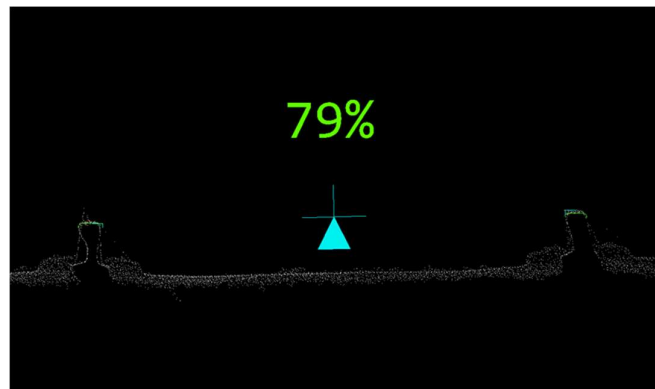
### 3.4 Digitalización 3D

Una vez procesada la nube de puntos obtenida en el levantamiento topográfico con el equipo de mapeado móvil MMS, se procede a la delineación en 3D de los elementos considerados empleando el programa específico, muchos de ellos, apoyados en una plataforma de CAD, en el presente trabajo, dicha plataforma de CAD ha sido Microstation.

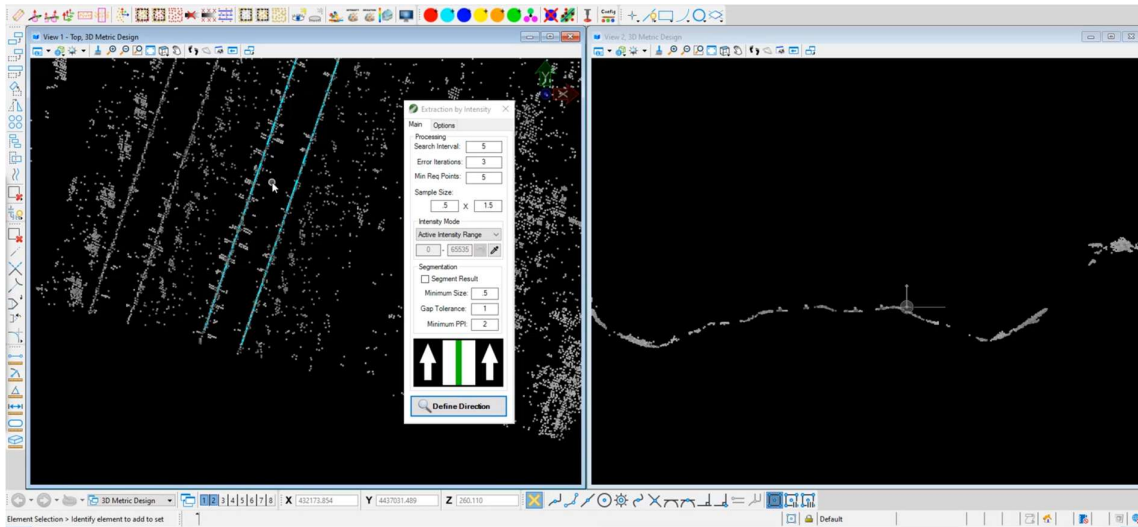
En la digitalización 3D, se incluirán todos los elementos lineales, poligonales y puntuales necesarios para la correcta definición de la cartografía de la plataforma ferroviaria.

Entre los principales criterios de medición cabe destacar la definición del eje, como punto de partida a través del cual se obtendrán las distancias relativas de los elementos de la vía, mediante los trazados de carril.

Este eje se obtendrá a partir de los ejes de cada carril, ubicándose en el punto medio de ambos. Hay que mencionar, que uno de los retos de la identificación de los carriles, se encuentra en la correcta definición del eje del carril (y en los casos más precisos, de la cara activa del carril). Para ello, los programas necesitan trabajar con una referencia del modelo de carril sobre el cual van a realizar la extracción del eje del carril (y en base a la calidad del dato adquirido) podrán definir el eje de carril o la cara activa.

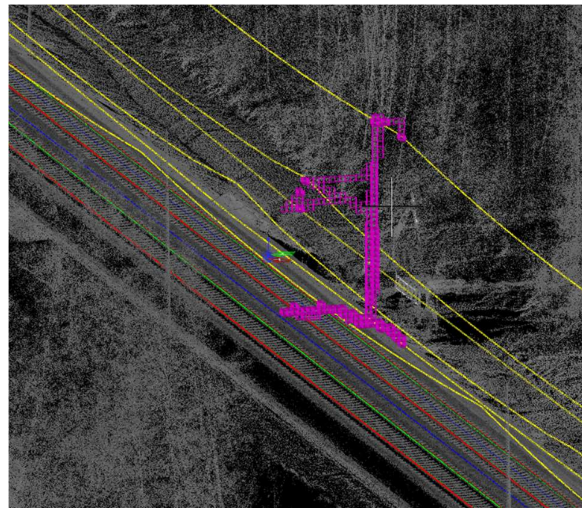


**Fig. 33. Coincidencia Carril - Nube de puntos con Trimble Gedo Analyst. Fuente: Elaboración propia**



**Fig. 34. Extracción de carril por intensidad. fuente: Elaboración propia**

Las principales geometrías para identificar serán la vectorización de la vía y la base del balasto, las agujas, los peraltes, los gradientes, la red de drenaje, secciones y colocación de gálibos, así como todos aquellos elementos que el cliente considere necesarios.



**Fig. 35. Voxelización Poste catenaria con TopoDot. Fuente: Elaboración propia**



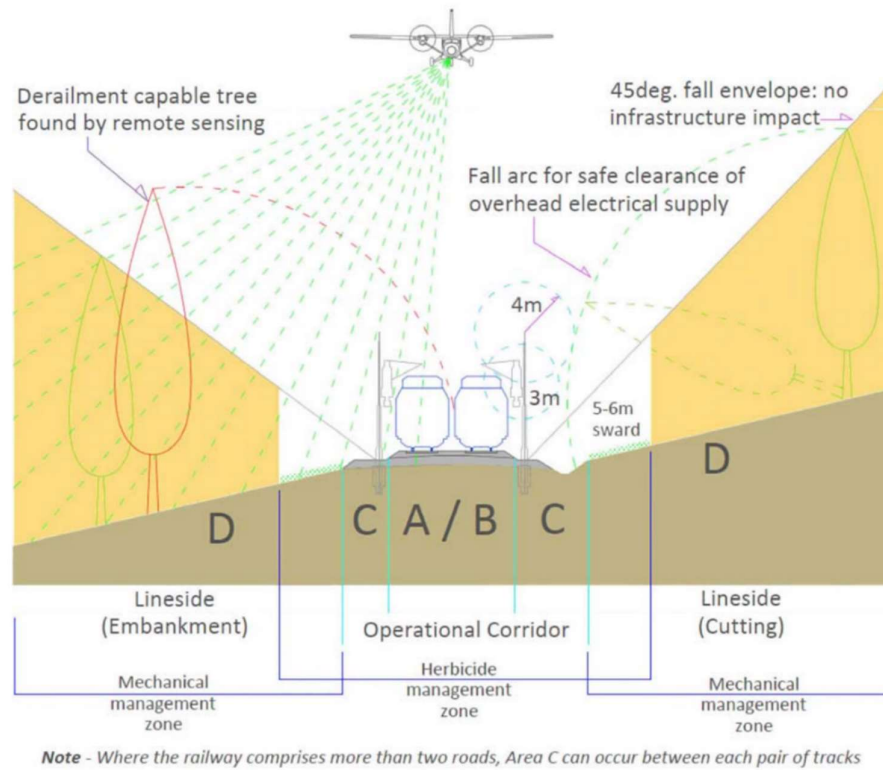


Fig. 37. Representación esquemática de la vegetación vs ferrocarril. Fuente: IRS

La identificación de los árboles conflictivos puede ser identificados en 2D y también sobre la nube de puntos (3D).

Pueden ser clasificados en diferentes categorías teniendo en cuenta el nivel de invasión en caso de caída sobre la vía:

- ❖ Contacto con **Plataforma**
- ❖ Contacto con **Vía**
- ❖ Contacto con **Catenaria**
- ❖ Caída exterior

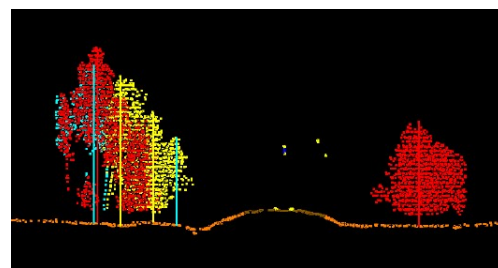
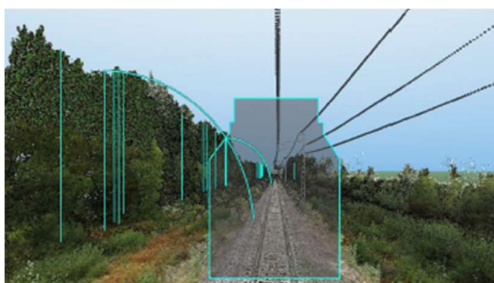


Fig. 38. Afección de vegetación sobre la vía. Fuente: Terrasolid



Como uno de los resultados de interés, es la creación de una cartografía vegetal, basado en archivos ráster.

El proceso que se seguiría para el análisis de incumplimientos y riegos de impacto lo podemos estructurar en 6 fases:

- Fase 1: Visualización y reconocimiento
- Fase 2: Clasificación de la nube de puntos
- Fase 3: Generación de la cartografía
- Fase 4: Generación e identificación de vegetación
- Fase 5: Asignación de crecimientos
- Fase 6: Cálculo de incumplimientos

### 3.6 Modelo BIM

La modelización se ha efectuado en base a la nube de puntos georreferenciada obtenida mediante mobile mapping terrestre, embarcada en vehículo bivial, circulando sobre vía.

El entorno consiste en vía doble de balasto de ancho internacional y carril UIC54 que discurre por tramos a cielo abierto y en túneles.

Para la obtención del modelo, se ha trabajado con el programa Revit, a partir de la nube de puntos LiDAR.

La estrategia de procesamiento para la obtención del modelo 3D en Revit a sido:

- Clasificación y segmentación de la nube de puntos, y creación de archivos LAS independientes.
- Conversión de los datos LiDAR obtenidos en formato LAS a formato RCP, propio del programa de intercambio Recap (Autodesk)
- Procesamiento de la nube de puntos. Eliminando el ruido y datos irrelevantes de la nube de puntos, aplicación de segmentación espacial y filtrado de la nube de puntos
- Importación de datos con formato \*.rcp, dentro de Revit mediante las opciones adecuadas
- Creación de elementos estructurales básicos, y extracción de elementos específicos
- Análisis de interferencias entre elementos, verificación de dimensiones

- En la creación del modelo paramétrico, se podrán crear familias personalizadas acorde a las especificaciones y necesidades del proyecto. En el caso que nos ocupa, no se ha realizado personalización, empleando una definición genérica. En España, y dentro del sector ferroviario, podría emplearse la clasificación del Railway Innovation Hub (RIH).

### 3.7 Animación

De cara a la difusión y comunicación de los resultados, se ha determinado que una de las herramientas efectivas para este fin es la creación de un video animado del modelo generado. Para este fin, se ha empleado el programa Twinmotion (Epic Games) a partir del cual se ha realizado un renderizado y recorridos virtuales de la zona modelada.

Dentro de Twinmotion, podemos importar tanto el modelo como la nube de puntos de forma independiente, o al haber empleado el programa Revit para el modelado, efectuar una transferencia directa a través del plug-in instalado para tal fin, creándose un fichero compatible (\*.udatasmith) que se podrá abrir en Twinmotion.

Para la creación de recorridos virtuales y renderizados, debemos seguir un proceso estructurados de forma que:

- Primeramente, configuremos las posiciones de las cámaras, a partir de las cuales recreará las trayectorias
- Seguidamente, se definen los ajustes del renderizado, considerando parámetros como resolución, efectos visuales, calidad de las sombras...
- Por último, se efectúa la exportación del renderizado en formato video, seleccionando el formato deseado.

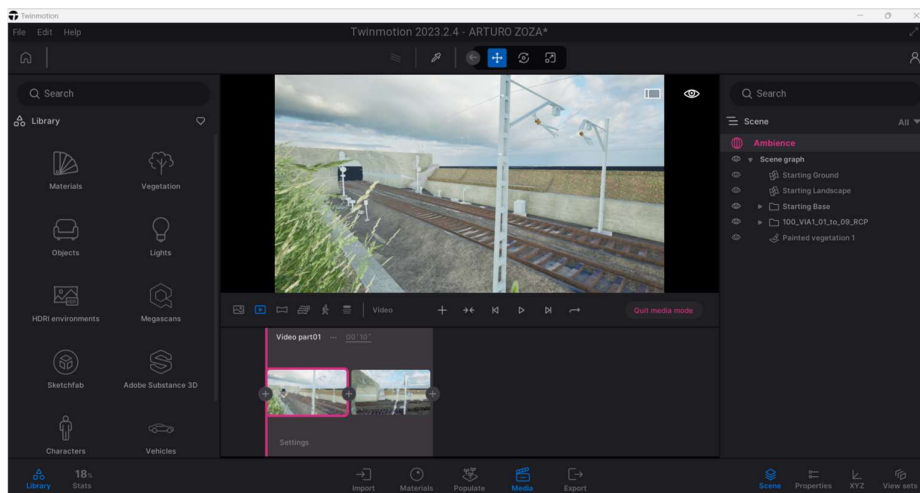


Fig. 39. Twinmotion. Creación video

## 4 Resultados esperables

### 4.1 Procesamiento de datos

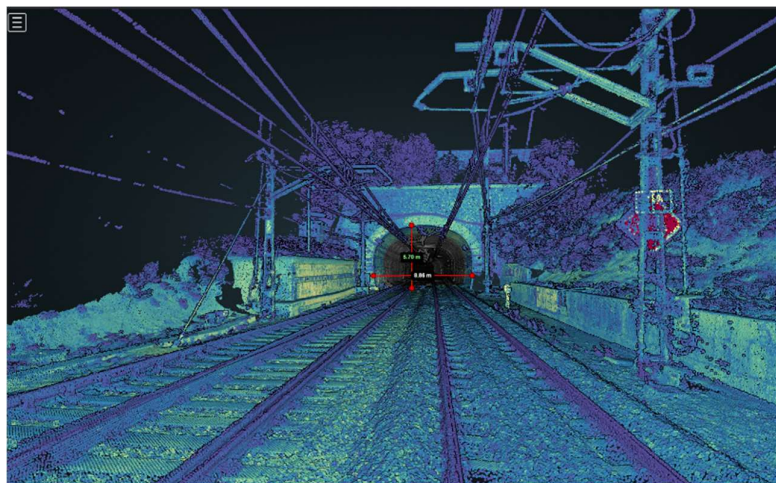
Los diversos datos capturados, son procesado y tratados de forma que puedan ser integrados en programas o flujos analíticos dedicados.

Los formatos de colaboración e intercambio son diversos y variados, ya sea formatos brutos procedentes de los sensores, formatos de las nubes de puntos y trayectorias, los cuales incorporaremos a programas de código libre o propietario para su explotación.

**Tabla 6. Formatos convencionales de archivos para sistemas mobile mapping. Fuente: Elaboración propia**

Datos MMS	Formato de Archivo Convencional	Observaciones (ASCII / Binario)	Programa más comunes para leer y procesar
<b>Formatos Brutos del Sensor (RAW Data)</b>			
Datos GNSS	RINEX, Formatos nativos fabricantes	ASCII	Editores de Texto (Bloc de Notas, Notepad...)
Imágenes Digitales	TIFF, JPEG, PNG	Binario	Photoshop
Video Digital	AVI, MOV, MPG	Binario	Media Player
<b>Nube de Puntos (NdP) e Imágenes</b>			
NdP formato en Bruto (RAW)	LAS, PTX,XYZ	LAS: binario standard, ASCII PTX, XYZ: ASCII abierto	Terrasolid, TopoDot, Trimble Business Center, Leica Cyclone, Bentley PointTools, Trimble Realworks
Imágenes Digitales en formato en Bruto (RAW)	TIFF, JPEG, PNG	Binario	Photoshop
NdP Corregidas	LAS, PTX,XYZ, E57	LAS: binario standard, ASCII PTX, XYZ: ASCII abierto	Terrasolid, TopoDot, Trimble Business Center, Leica Cyclone, Bentley PointTools, Trimble Realworks
Imágenes Digitales corregidas	TIFF, JPEG, PNG	Binario	Photoshop
<b>Ficheros de trayectoria</b>			
	SBET, CMS	Binario	PosPac, Inertial Explorer
	SHP	Binario	QGIS, ESRI
	KMZ, TXT	ASCII	Editores de Texto (Bloc de Notas, Notepad...)
<b>El conjunto de datos derivados</b>			
Secciones transversales, curvas del nivel, gálbos, Vectorización de elementos	Formatos CAD (ej. DGN, DXF, DWG)	Binario, ASCII	Microstation, AutoCAD, ZWCAD, SketchUp
Modelo 3D	RVT, SKU, PLN, NDW, EDF	Binario	Revit, SkechUp, ArchiCAD, AllPlan, ACCA
Modelos IFC	IFC	Binario	BIMvision, BIMcollab, usBIM, SketchUp...

### 4.2 Topografía e Inspección



**Fig. 40. Inspección Geométrica de túnel. Fuente: Elaboración propia**

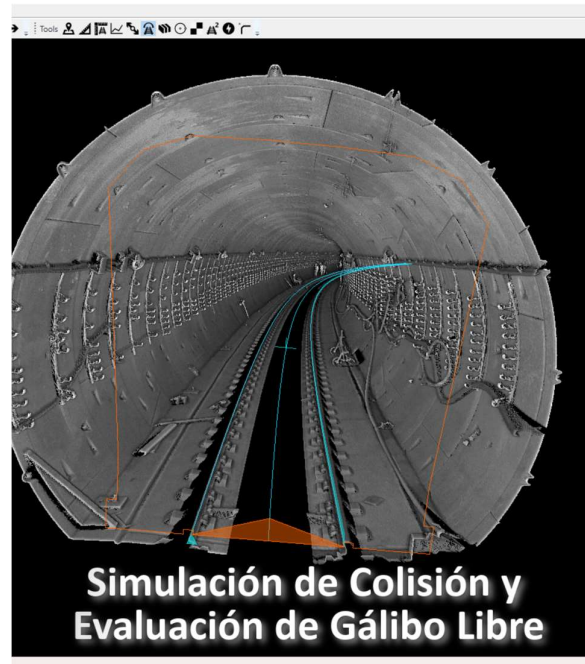


Fig. 41. Estudio de Gálidos. Fuente: Trimble Geko Scan Analyst

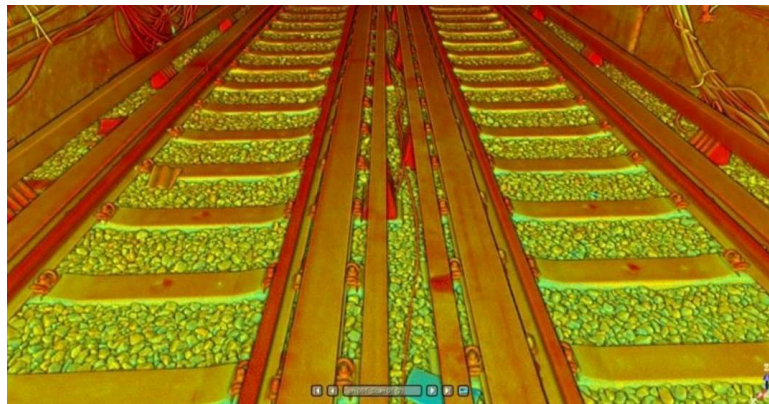


Fig. 42. Inspección desvío con LiDAR Trimble GX50. Fuente: Elaboración propia

### 4.3 Digitalización 3D

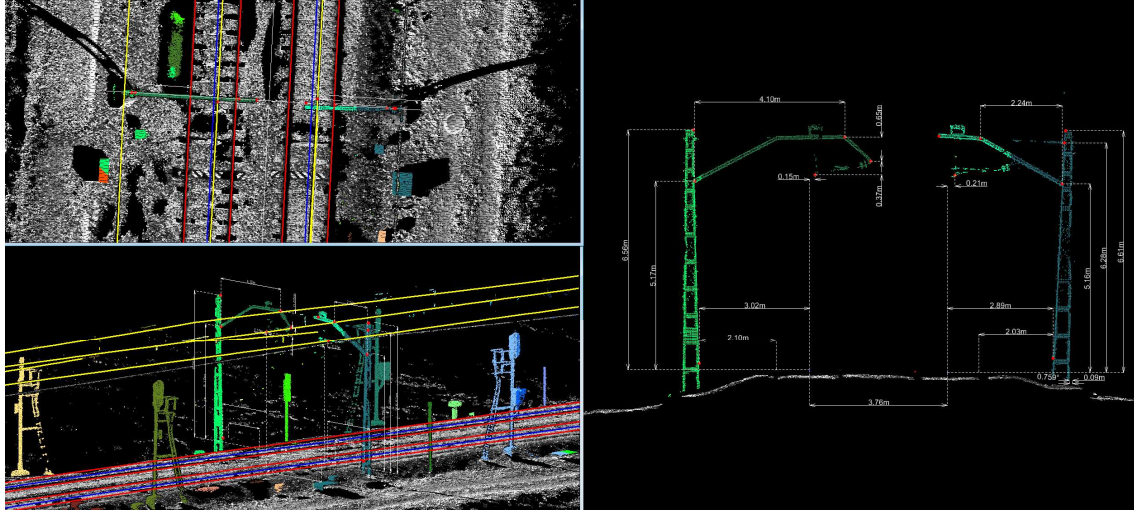


Fig. 43. Topografía de elementos de vía y acotaciones de catenaria. Fuente: Elaboración propia

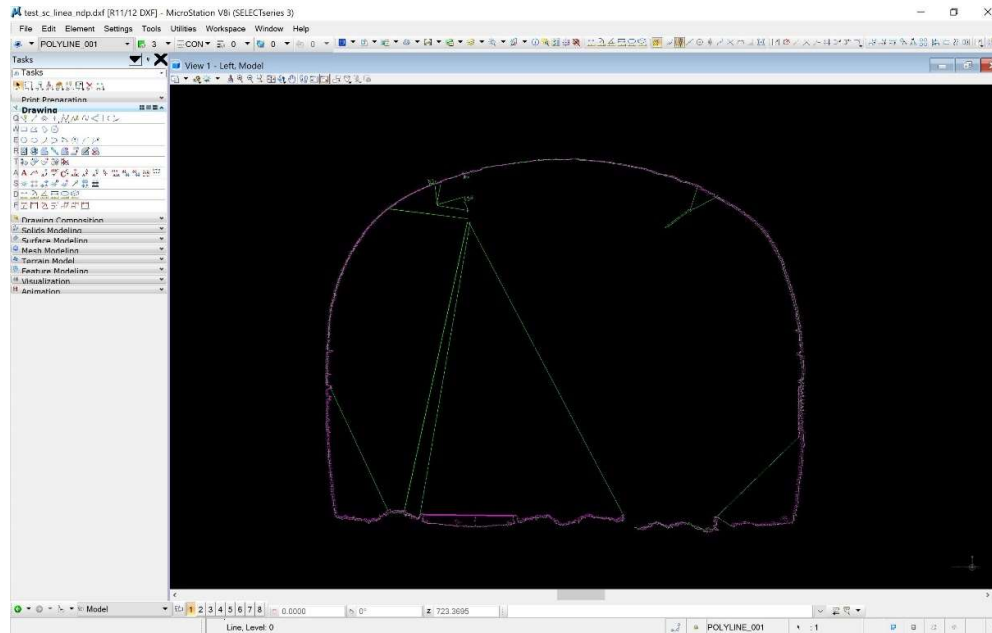


Fig. 44. Sección túnel desde Cloud Compare. Fuente: Elaboración propia

## 4.4 Análisis de defectos

A partir de los datos capturados mediante MMS embarcado en vehículo bivial o dresina sobre vía, podemos realizar inspecciones de los activos, en este caso, se ha concentrado en la evaluación de la relación entre la vía y la catenaria, obteniendo valores de altura y descentramiento del hilo de contacto, así como distancias del eje de vía al poste de catenaria. Como puede observarse en la figura, la densidad de la nube de puntos permite, tanto la digitalización de los activos como una representación tridimensional suficiente para la identificación visual del tipo de activo y sus características, tal y como puede constatare en la sección con dos poste de catenaria, donde se identifica tanto la altura, cartelas, altura e inclinación del poste, entre otros aspectos).

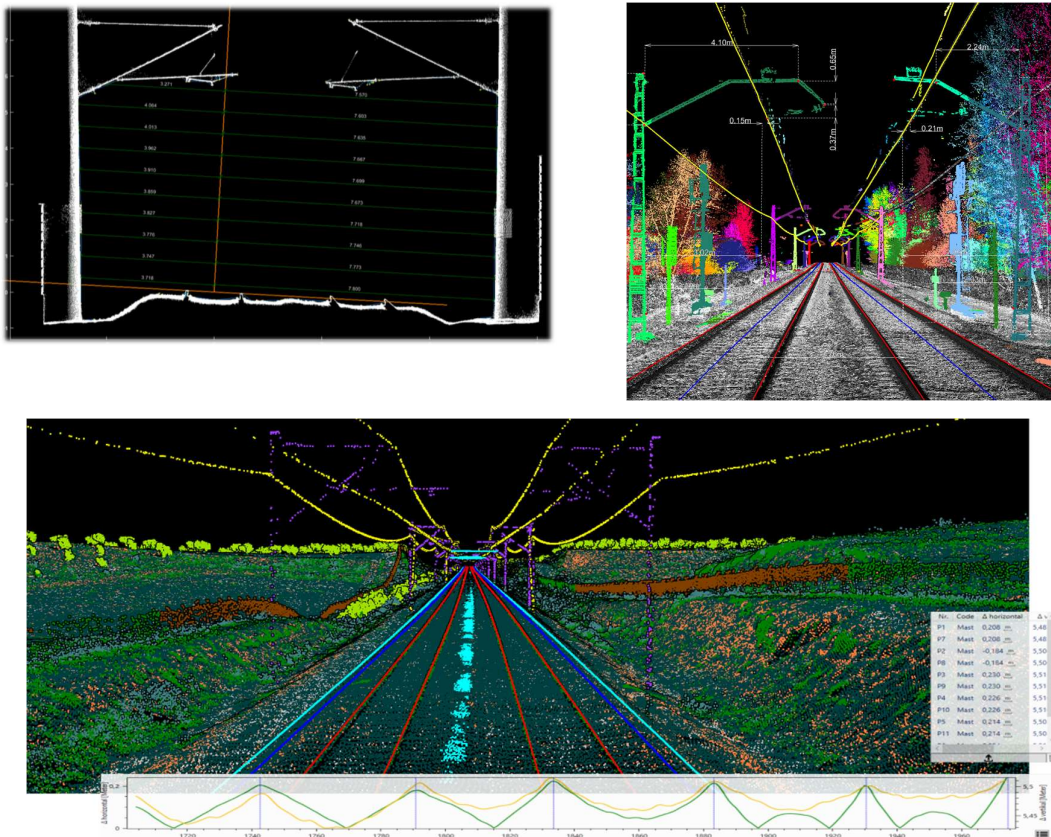


Fig. 45. MMS. Inspección de catenaria. Fuente: Elaboración propia

En el caso de aplicación de los sistemas aerotransportados, dispondremos de más información superficial a lo capturado a nivel de terrestre, lo cual favorecerá la realización de análisis sobre

áreas más extensas, tales como estabilidad de taludes, estudios de inundabilidad, asentamientos del terreno, etc.

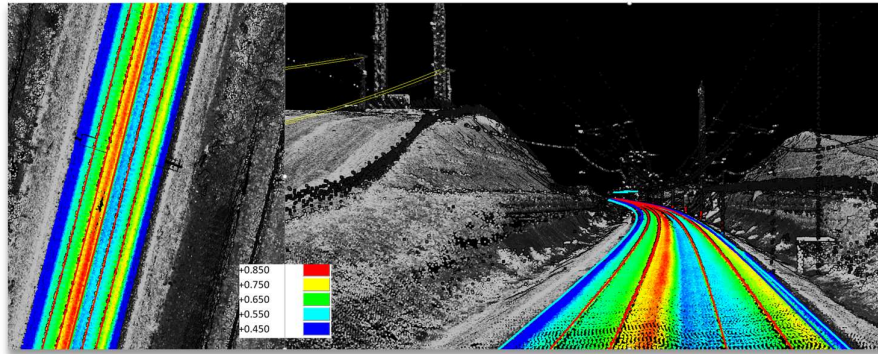


Fig. 46. ALS. Inspección de volumen y acopio de balasto. Fuente: Elaboración propia

## 4.5 Modelado 3D

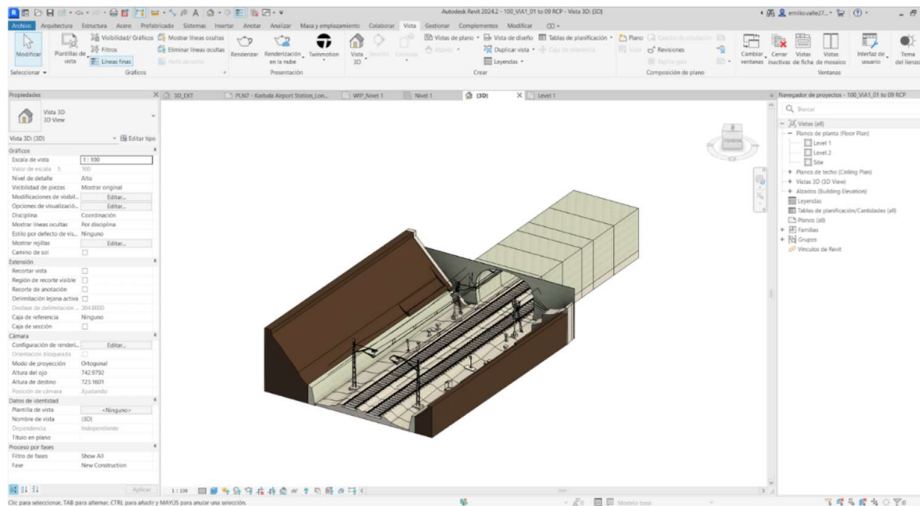


Fig. 47. Modelo 3D. Vista general. Elaboración propia

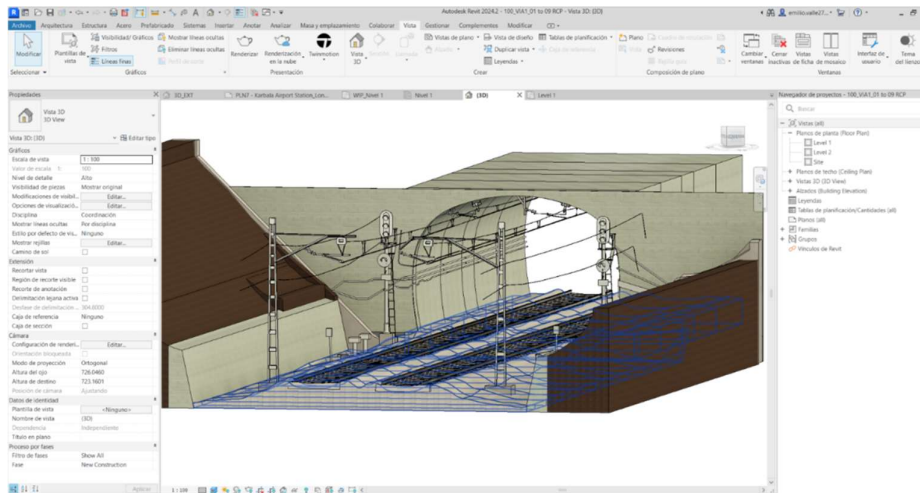


Fig. 48. Modelo 3D. Vista detalle con componentes. Fuente: Elaboración propia

## 4.6 Renderizado



Fig. 49. Vista Renderizada entrada túnel. Fuente: Elaboración propia



## 5 Conclusiones

- La información LiDAR proveniente de los sistemas láser escáner móviles, se postula como la fuente de información fiable para la representación del entorno y de los activos ferroviarios.
- En función de la precisión y resultados a obtener, se deberán seleccionar plataformas y sensores adecuadas, ya sean terrestres o aéreas
- Con los sistemas evaluados, la precisión absoluta se encuentra en los 10cm, pudiendo mejorarse con el empleo de puntos de control terrestre.
- Si queremos conseguir precisiones superiores, llegando al milímetro, se deberían de emplear carros de vía con sensores precisos de ancho-peralte conseguir.
- Para aplicaciones ferroviarias puras, se necesita una densidad, al menos de 10 puntos en cabeza de carril, por sección transversal.
- La determinación precisa del carril se encuentra afectada de ruido, fundamentalmente por la reflectividad del carril y del tipo de escáner empleado, así como la distancia carril-escáner. Otros efectos como la lluvia, el rocío, humedad, etc. que influyen en la medición precisa del láser y la determinación del activo
- Instalar los LiDAR en la plataforma a distancia óptima del activo, para minimizar, cuando no eliminar, los efectos derivados del LiDAR
- Para equipos de alta gama, las velocidades de trabajo se recomiendan que estén entre los 20km/h y 80Km/h, y en función de la aplicación y nivel de detalle, configurar la velocidad de escaneado y de de rotación de los láseres.
- Dentro del sector ferroviario, las aplicaciones que podemos destacar son:
  - o Digitalización masiva de la infraestructura ferroviaria para conseguir cartografías hasta 1/500 y 1/1.000.
  - o Inspección y Mantenimiento de la infraestructura, permitiendo disponer de un conjunto de datos para inspecciones y valoraciones precisas, tanto en recursos, tiempo y dinero.
  - o Modelado y Cartografía.
  - o Análisis geométrico y evaluación de riesgos.
  - o Control predictivo y correctivo de la vegetación
  - o Integración con sistemas de información geográfica (SIG).
  - o Integración BIM.



- Requisitos Computacionales: El procesamiento de grandes volúmenes de datos LiDAR puede requerir hardware potente, lo que puede ser una limitación en equipos con recursos limitados.
- Debido al volumen de datos, es necesario disponer de ordenadores potentes y de gran capacidad.
- En función de los resultados esperados, es necesario la utilización de uno o varios programas específicos.
- Curva de Aprendizaje: La amplia gama de funcionalidades y herramientas puede resultar abrumadora para los usuarios novatos, requiriendo una curva de aprendizaje considerable

## 6 Futuras líneas de investigación

Entre las futuras línea de investigación basada de estos sistemas de láser escáner móvil y de la información generada podríamos destacar:

- Investigaciones para la mejora del posicionamiento preciso del sistema en entornos complicado y con grandes obstrucciones y ausencia de medidas GNSS. Como, por ejemplo, la integración de la imagen en el posicionamiento.
- Reconocimiento de patrones y activos, evitando procesos de clasificaciones supervisadas.
- Desarrollo de algoritmos para la extracción de activos
- Incorporación de la Inteligencia Artificial
- Simplificación de flujos de trabajos y procesos para minimizar la curva de aprendizaje
- Inclusión de la termografía en los análisis de defectos, deformaciones, junto con las imágenes en el espectro visible, RGB.
- ...

**Tabla 7. Comparativa de Capacidades y Recursos por sistema. Fuente: Elaboración propia**

	Carro de Vía con IMS con láser escáner	Mobile Mapping en Dresina/Bivial (MMS) con láser escáner	Aerial Mobile Mapping con láser escáner
<b>Capacidad</b>	<p>Trazado</p> <p>Secciones de túneles, estructuras, andenes, muros, trincheras...</p> <p>Gálibos</p> <p>Altura y descentramiento de la catenaria</p> <p>Posición y estado de señales fijas, balizas, etc.</p> <p>Estado geométrico de la banqueta de balasto</p> <p>Estado de otras instalaciones (arquetas, cunetas, muros...)</p> <p>Inventario de componentes de la infraestructura</p> <p>Generación de cartografía de la traza</p> <p>Geometría interna de la vía</p>	<p>Trazado</p> <p>Secciones de túneles, estructuras, andenes, muros, trincheras...</p> <p>Gálibos</p> <p>Altura y descentramiento de la catenaria</p> <p>Posición y estado de señales fijas, balizas, etc.</p> <p>Estado geométrico de la banqueta de balasto</p> <p>Estado de otras instalaciones (arquetas, cunetas, muros...)</p> <p>Inventario de componentes de la infraestructura</p> <p>Generación de cartografía de la traza</p> <p>Imágenes 360º y direccionales (RGB e infrarrojo)</p> <p>Control de la vegetación</p>	<p>Trazado</p> <p>Secciones de estructuras, andenes, muros, trincheras...</p> <p>Gálibos</p> <p>Altura y descentramiento de la catenaria</p> <p>Posición y estado de señales fijas, balizas, etc.</p> <p>Estado geométrico de la banqueta de balasto</p> <p>Inventario de componentes de la infraestructura</p> <p>Generación de cartografía de la traza</p> <p>Imágenes nadirales</p> <p>Cámaras RGB direccionales, térmicas, infrarrojo.</p> <p>Control de la vegetación</p>
<b>Medios materiales</b>	<p>Carro con unidad inercial (IMS), con láser escáner y GNSS o Estación total.</p> <p>Vehículo transporte de personal, equipo y medios auxiliares</p> <p>Equipo informático para tratamiento de las nubes de puntos</p> <p>Equipo informático con programa de trazado</p>	<p>Equipo Mobile Mapping</p> <p>Dresina /Vehículo bivial</p> <p>Equipo de topografía complementario</p> <p>Vehículo transporte de personal, equipo y medios auxiliares</p> <p>Equipo informático para tratamiento de las nubes de puntos</p> <p>Equipo informático con programa de trazado</p>	<p>Equipo Aerial Mobile Mapping</p> <p>Helicóptero</p> <p>Equipo de topografía complementario</p> <p>Vehículo transporte de personal, equipo y medios auxiliares</p> <p>Equipo informático para tratamiento de las nubes de puntos</p> <p>Equipo informático con programa de trazado</p>
<b>Medios personales</b>	<p>1 Jefe de equipo</p> <p>1 Coordinador de trabajos de campo/oficina</p> <p>1-2 Auxiliares para toma de datos del carro, puntos de control...)</p> <p>1 Piloto de Seguridad</p> <p>2 Ingenieros expertos en geometrización de trazado y estudios de gálibo</p>	<p>1 Jefe de equipo</p> <p>1 Coordinador de trabajos de campo/oficina</p> <p>1-2 Auxiliares para trabajos complementarios (puntos de control...)</p> <p>1 Técnico en Bases de datos</p> <p>1 Técnico montaje/calibración equipos</p> <p>1 OMI para conducción dresina/bivial</p> <p>1 Encargado de trabajos</p> <p>2 Ingenieros expertos en geometrización de trazado y estudios de gálibo</p>	<p>1 Jefe de equipo</p> <p>1 Coordinador de trabajos de campo/oficina</p> <p>1 Coordinador operaciones de vuelo</p> <p>1-2 Auxiliares para trabajos complementarios (puntos de control...)</p> <p>1 Técnico en Bases de datos</p> <p>1 Técnico montaje/calibración equipos</p> <p>2 Ingenieros expertos en geometrización de trazado y estudios de gálibo</p>
<b>Afección a la circulación</b>	<p>Trabajo incompatible con la circulación</p> <p>Piloto de Seguridad</p> <p>Sin ocupación de vía</p>	<p>Trabajo incompatible con la circulación</p> <p>OMI + Encargado de trabajos</p> <p>Con ocupación de vía</p>	<p>No afección a la circulación</p> <p>-</p> <p>Sin ocupación de vía</p>
<b>Precisión</b>	<p>Absolutas: Coordenadas X,Y (2-3cm); Coordenada Z (3-5cm)</p> <p>Relativas: Ancho vía, peralte, curvaturas (1mm)</p>	<p>Absolutas: Coordenadas X,Y (10cm); Coordenada Z (10-15cm). Puede mejorar a &lt;5cm con Puntos de Control.</p> <p>Relativas: Ancho vía, peralte, curvaturas (2-3cm)</p>	<p>Absolutas: Coordenadas X,Y (10cm); Coordenada Z (10-15cm). Puede mejorar a &lt;5cm con Puntos de Control.</p> <p>Relativas: Ancho vía, peralte, curvaturas (5cm)</p>
<b>Rendimiento toma de datos</b>	<p>Velocidad de medición: 4km/h</p> <p>Rendimiento con montaje, paradas...: 2-3km/h</p>	<p>Velocidad de medición: hasta 80km/h (dependiendo de características del equipo)</p> <p>Tiempo de montaje en dresina/bivial: 30min - 1h</p> <p>Rendimiento con montaje, paradas,etc: 50km/día</p>	<p>Velocidad de medición: hasta 80km/h (dependiendo de características del equipo)</p> <p>Tiempo de montaje y calibración en helicóptero: 1h</p> <p>Rendimiento con montaje, paradas,etc: 300 km/día</p>
<b>Rendimiento en Oficina</b>	<p>Es necesario el procesamiento y tratamiento de la nube de puntos. Exportación datos</p> <p>Importación de los datos a software de trazado especializado</p> <p>Geometrización: 3-4 h/km</p>	<p>Es necesario el procesamiento y tratamiento de la nube de puntos. Exportación datos.</p> <p>Digitalización 3D entidades lineales</p> <p>Importación de los datos a software de trazado especializado</p> <p>Geometrización: 3-4 h/km</p>	<p>Es necesario el procesamiento y tratamiento de la nube de puntos. Exportación datos.</p> <p>Digitalización 3D entidades lineales</p> <p>Importación de los datos a software de trazado especializado</p> <p>Geometrización: 3-4 h/km</p>
<b>Requisitos de las empresas</b>	<p>Consultoras de ingeniería, especializadas en ferrocarril.</p> <p>Alquiler y formación</p>	<p>Consultoras de ingeniería, especializadas en ferrocarril.</p> <p>Empresa de mayor estructura y capacidad.</p>	<p>Consultoras de ingeniería, especializadas en ferrocarril.</p> <p>Empresa de mayor estructura y capacidad.</p> <p>Experiencia en operaciones aéreas</p>
<b>Observaciones</b>	<p>Entrada y salida de vía de forma inmediata.</p> <p>Puede ser operado por una persona</p>	<p>Dificultad de salida de vía.</p> <p>Dificultad de inicialización de sensores. Desplazamientos longitudinales</p>	<p>Aplicación de Drones y sus cargas de pago. Rendimientos menores que con helicóptero, aunque más versátiles en zonas localizadas y tramos cortos.</p> <p>Independiente de la vía y su operación</p>

**Tabla 8. Relación entre Actividades Generales y Aplicaciones Específicas. Fuente: Elaboración propia**

Actividad General	Aplicación Específica
Planificación de Proyectos	Análisis Ferroviarios Cartografía. Modelos Digitales del Terreno Topografía de entorno Estudios de trazado y diseño Análisis y Evaluación de Gálibos Estudios Medioambientales Rehabilitación Análisis y estudios de Drenaje GIS Sistemas de Información Geográfica (GIS)
Desarrollo de Proyectos	Diseño 3D, Estudio de Interferencias y Colisiones Extracción de entidades para CAD y bases de datos
Construcción	Monitorización del progreso y avance de las obras Documentación As-Built y Estado actual Control de Maquinaria y Automatización de la Construcción Control y Aseguramiento de la Calidad Medición de movimientos de tierras Control de planeidad y rugosidad de las capas de forma
Mantenimiento	Inspección de puentes Inspección de túneles Estudio de Gálibos, Horizontales y Verticales Gálibos de Líneas Eléctricas y Catenaria Control de Vegetación Estudios del Balasto Evaluación del drenaje y áreas de inundación
Operaciones	Optimización de aparcamientos Simulaciones de rutas, optimización de trayectorias Gestión de tasas e impuestos BIM Modelización de Puentes y Túneles Respuestas de Emergencias Gálibos, Horizontal y Vertical (puentes, túneles, señalización, líneas eléctricas, vegetación...)
Seguridad	Extracción de entidades y propiedades geométricas (obstrucciones, zonas ocultas...) Investigación de accidentes y análisis forense Inspección de cruces ferroviarios Facilitar la coordinación y cooperación con otros vehículos (trenes, tranvía, coches...) Navegación autónoma Estudios de estabilidad
Gestión de Activos	Inventariado y cartografía de activos Modelización e inspección Extracción automática o semiautomática de señales y activos ferroviarios Señales, Pasos a Nivel, LAC Enclavamientos y Comunicaciones Línea Aérea de Contacto
Turismo	Visitas virtuales remotas Modelización Patrimonio Histórico
Investigación	Detección y estudios de Inestabilidad de taludes Estudios de asentamientos y movimientos del terreno Extracción de modelos CAD desde las Nubes de Puntos Uso de la nube de puntos para el control de las imágenes Realidad Virtual (RV) interaccionando con la nube de puntos Planificación de trayectorias y puntos de paso para Drones Control predictivo de la Vegetación Mejora de la precisión de las trayectorias en ausencia de GNSS



## 7 Bibliografía

Abdullah, S., Tahar, K. N., Rashid, M. F. A., Osoman, M. A., & Abdullah, F. (2021). The production of assets inventory by using a 360-degree camera mobile mapping system in langkawi, malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 767(1), 012012. doi:10.1088/1755-1315/767/1/012012

Attard, L., Debono, C. J., Valentino, G., & Di Castro, M. (2018). Tunnel inspection using photogrammetric techniques and image processing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 180-188. doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.07.010

Běloch, L., & Pavelka, K. (2024). Optimizing mobile laser scanning accuracy for urban applications: A comparison by strategy of different measured ground points. *Applied Sciences*, 14(8), 3387. doi:10.3390/app14083387

Bensalah, M., Elouadi, A., & Mharzi, H. (2019). Overview: The opportunity of BIM in railway. *Smart and Sustainable Built Environment*, 8 doi:10.1108/SASBE-11-2017-0060

Biancardo, S. A., Intignano, M., Viscione, N., Guerra de Oliveira, S., & Tibaut, A. (2021). Procedural modeling-based BIM approach for railway design. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 1-17. doi:10.1155/2021/8839362

Catigbac, G. (2023). Integrated workflow with mobile mapping survey and BIM approach to digitalize subway infrastructures. *European Transport/Trasporti Europei*, , 1-16. doi:10.48295/ET.2023.93.1

Čeňava, J., Tuček, J., Chudá, J., & Koreň, M. (2024). Mobile laser scanning data collected under a forest canopy with GNSS/INS-positioned systems: Possibilities of processability improvements. *Remote Sensing*, 16(10) doi:10.3390/rs16101734

Cui, H., Li, J., Mao, Q., Hu, Q., Dong, C., & Tao, Y. (2024a). STSD:A large-scale benchmark for semantic segmentation of subway tunnel point cloud. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 150, 105829. doi:10.1016/j.tust.2024.105829

Cui, H., Li, J., Mao, Q., Hu, Q., Dong, C., & Tao, Y. (2024b). STSD:A large-scale benchmark for semantic segmentation of subway tunnel point cloud. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 150, 105829. doi:10.1016/j.tust.2024.105829



- Gutiérrez-Fernández, A., Fernández-Llamas, C., Matellán-Olivera, V., & Suárez-González, A. (2020). Automatic extraction of power cables location in railways using surface LiDAR systems. *Sensors*, 20(21), 6222. doi:10.3390/s20216222
- Hexagon Geosystems. Leica pegasus TRK. Retrieved from <https://leica-geosystems.com/es-es/products/leica-pegasus-trk>
- Hinks, T., Carr, H., Truong-Hong, L., & Laefer, D. F. (2013). Point cloud data conversion into solid models via point-based voxelization. *Journal of Surveying Engineering*, 139(2), 72-83. doi:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000097
- Hutton, J., Gopaul, N., Wang, J., Mostafa, M., Jarvis, A., Huynh, V., . . . Zhang, X. (2023). Optimizing the accuracy and efficiency of mobile mapping and surveying using the latest GNSS constellations and frequencies and LiDAR adjustment technology optimizing the accuracy and efficiency of mobile mapping and surveying using the latest GNSS constellations and frequencies and LiDAR adjustment technology (11947) optimizing the accuracy and efficiency of mobile mapping and surveying using the latest GNSS constellations and frequencies and LiDAR adjustment technology
- Instituto Geográfico Nacional. (2024). IGN - servicio de posicionamiento en tiempo real. Retrieved from <https://www.ign.es/web/gds-gnss-tiempo-real>
- IRS 70723:2020, Ed1: [Railway application - technical aspects of vegetation control and tree risk management guidance and recommendations]. (2020). International union of railways (). Paris, France: UIC.
- Jeon, W. G., & Kim, E. M. (2019). Automated reconstruction of railroad rail using helicopter-borne light detection and ranging in a train station. *Sensors and Materials*, 31(10), 3289-3302. doi:10.18494/SAM.2019.2433
- Justo, A., Soilán, M., Sánchez-Rodríguez, A., & Riveiro, B. (2021). Scan-to-BIM for the infrastructure domain: Generation of IFC-compliant models of road infrastructure assets and semantics using 3D point cloud data. *Automation in Construction*, 127, 103703. doi:10.1016/j.autcon.2021.103703
- Kalvoda, P., Nosek, J., & Kalvodova, P. (2021). Influence of control points configuration on the mobile laser scanning accuracy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 906(1), 012091. doi:10.1088/1755-1315/906/1/012091



- Kalvoda, P., Nosek, J., & Kocmanova, P. (2021). Influence of control points configuration on the mobile laser scanning accuracy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 906, 012091. doi:10.1088/1755-1315/906/1/012091
- Karolina Pietras-Couffignal, Michael BelowPinar Yilmazer, Roland Nolte, Thomas Schuh. (2021). Future vegetation control of european railways - state-of-the-art report (TRISTRAM final report). (). Retrieved from <https://uic.org/projects/article/tristram>
- Kwiatek, K., & Litwin, U. (2013). Panoramic videography as a potential tool for enhancement land intensity factors. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, 3, 67-80. doi:10.15576/GLL/2013.3.67
- Letard, M., Lague, D., Le Guennec, A., Lefèvre, S., Feldmann, B., Leroy, P., . . . Corpetti, T. (2024). 3DMASC: Accessible, explainable 3D point clouds classification. application to bi-spectral topo-bathymetric lidar data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 207, 175-197. doi:10.1016/j.isprsjprs.2023.11.022
- Rashdi, R., Garrido, I., Balado, J., Del Río-Barral, P., Rodríguez-Somoza, J. L., & Martínez-Sánchez, J. (2024). Comparative evaluation of LiDAR systems for transport infrastructure: Case studies and performance analysis. *European Journal of Remote Sensing*, 57(1), 2316304. doi:10.1080/22797254.2024.2316304
- Riegel VUX-1 series. Retrieved from [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxriegldownloads/Infosheet\\_VUX-1series\\_2017-12-04.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/Infosheet_VUX-1series_2017-12-04.pdf)
- Sánchez-Rodríguez, A., Riveiro, B., Soilán, M., & González-deSantos, L. M. (2018). Automated detection and decomposition of railway tunnels from mobile laser scanning datasets. *Automation in Construction*, 96, 171-179. doi:10.1016/j.autcon.2018.09.014
- Shankar, S., Roth, M., Schubert, L. A., & Versteegen, J. A. (2020). Automatic mapping of center line of railway tracks using global navigation satellite system, inertial measurement unit and laser scanner. *Remote Sensing (Basel, Switzerland)*, 12(3), 411. doi:10.3390/rs12030411
- Soilán, M., Sánchez-Rodríguez, A., del Río-Barral, P., Perez-Collazo, C., Arias, P., & Riveiro, B. (2019). Review of laser scanning technologies and their applications for road and railway infrastructure monitoring. *Infrastructures*, 4(4) doi:10.3390/infrastructures4040058
- Trimble Inc., & Trimble Geospatial. Trimble business center | software de oficina. Retrieved from <https://geospatial.trimble.com/products/software/trimble-business-center>
- Trimble Inc., & Trimble Geospatial. Trimble track surveying & scanning. Retrieved from <https://gedo.trimble.com/en>



Trimble Railways. (2024). Trimble GEDO GX50. Retrieved from <https://gedo.trimble.com/en/products-and-solutions/trimble-gedo-gx50>

Zhu, Y. (2019). Extracting masts of overhead supply and streetlights from point cloud (195). Available from DiVA. Retrieved from <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1290461/FULLTEXT01.pdf>  
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-244424>

Zou, R., Fan, X., Qian, C., Ye, W., Zhao, P., Tang, J., & Liu, H. (2019). An efficient and accurate method for different configurations railway extraction based on mobile laser scanning. *Remote Sensing (Basel, Switzerland)*, 11(24), 2929. doi:10.3390/rs11242929