



Universidad de
Oviedo



TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA

Mobile Mapping en interior de túneles: Desarrollo de una metodología para mediciones de alta precisión.

(Mobile Mapping inside tunnels: Development of a methodology for high accuracy
measurements.)

Autor: Pedro Gonçalves Caunedo

Tutora: Cristina Allende Prieto

Cotutor: Adrián Cué Álvarez

Febrero, 2024



Universidad de
Oviedo





Universidad de
Oviedo



Declaración de Originalidad del Trabajo Fin de Grado

D./Dña. Pedro Gonçalves Caunedo, con DNI estudiante del Grado en Ingeniería Geomática de la Escuela Politécnica de Mieres de la Universidad de Oviedo, declaro bajo mi responsabilidad que:

El Trabajo de Fin de Grado aquí presentado con título “*Mobile Mapping en interior de túneles: Desarrollo de una metodología para mediciones de alta precisión*” ha sido realizado bajo mi autoría, es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Para que así conste, firmo la presente declaración.

En Mieres, a 16 de enero de 2024.

PEDRO GONÇALVES CAUNEDO



Universidad de Oviedo



UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA



TRABAJO FIN DE GRADO

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN
**MOBILE MAPPING EN INTERIOR DE TÚNELES: DESARROLLO
DE UNA METODOLOGÍA PARA MEDICIONES DE ALTA
PRECISIÓN.**

Mieres del Camín, febrero del 2024

ALUMNO: PEDRO GONÇALVES CAUNEDO

TUTORES: CRISTINA ALLENDE PRIETO

ADRIÁN CUÉ ÁLVAREZ

ENTIDADES COLABORADORAS:



Resumen

Actualmente el uso de sistemas Mobile Mapping está en pleno auge, aunque todavía presentan ciertas limitaciones. Estos sistemas prometen una captura masiva de datos que representa la realidad con una eficiencia elevada respecto a las técnicas más convencionales, pero la realidad es que no es así. Hay muchas excepciones que, en determinadas situaciones reales, suponen pérdidas de precisión y calidad. La excepción más común y característica se corresponde con el uso de esta tecnología en túneles. En ellos no hay cobertura GNSS (Sistemas de Navegación por Satélite Globales, tecnología de geoposicionamiento que utilizan los sistemas Mobile Mapping), lo que impide que parte del sistema pueda seguir recibiendo información necesaria para la correcta obtención de los datos en campo.

Este Trabajo Fin de Grado consiste en el desarrollo de una metodología que, combinando el uso de diferentes tecnologías geomáticas, permita trabajar correctamente en dichos entornos subterráneos empleando este tipo de sistemas.

Abstract

Currently, the use of Mobile Mapping systems is booming. However, they still have certain limitations. These type of systems promise a massive data capture that represents reality with much more efficiency than conventional techniques, but the reality does not seem like that. There are many exceptions that, in certain real situations, imply losses of accuracy and quality. The most common and characteristic exception is the use of this technology inside tunnels. In these underground scenarios there is not GNSS coverage, which prevents part of the system from receiving the necessary information to carry out the correct data-field obtaining.

This TFG consists on the development of a methodology which allows working correctly in these subway environments using this type of systems. For that, there are used different geomatics technologies.

Índice de contenidos

Resumen	I
Lista de Figuras	IV
Lista de Tablas	VI
1. INTRODUCCIÓN	Pág.1
1.1 Antecedentes	Pág.1
1.2 Estado del arte	Pág.1
1.3 Justificación del trabajo a realizar y objetivos	Pág.3
2. MARCO TEÓRICO	Pág.5
2.1 Escaneado láser y Mobile Mapping	Pág.5
2.1.1 Escaneado láser	Pág.5
2.1.2 Mobile Mapping	Pág.7
2.2 Georreferenciación	Pág.11
2.2.1 Métodos GNSS	Pág.11
2.2.2 Sistemas de navegación inercial	Pág.14
2.2.3 Métodos taquimétricos	Pág.16
3. RECURSOS	Pág.19
3.1 Recursos técnicos y materiales	Pág.19
3.1.1 Sistema Mobile Mapping	Pág.19
3.1.2 Instrumental topográfico de apoyo	Pág.21
3.1.3 Hardware de gabinete	Pág.25
3.1.4 Software de gabinete	Pág.25
3.1.4.1 Magnet Collage	Pág.25
3.1.4.2 Magnet Tools	Pág.26
3.1.4.3 MATLAB	Pág.26
3.2 Recursos humanos	Pág.26
4. METODOLOGÍA	Pág.28
4.1 Criterios e idea general	Pág.28
4.2 Trabajo de campo	Pág.30
4.2.1 Planificación del trabajo y tareas previas	Pág.30

4.2.2 Observaciones GNSS	Pág.31
4.2.3 Observaciones taquimétricas	Pág.31
4.2.4 Captura Mobile Mapping	Pág.35
4.3 Trabajo de gabinete	Pág.40
4.3.1 Postproceso GNSS	Pág.40
4.3.2 Cálculo de la poligonal y puntos de control	Pág.41
4.3.3 Procesado Mobile Mapping	Pág.41
5. COSTES DE APLICACIÓN	Pág.46
5.1 Presupuesto descompuesto	Pág.46
5.1.1 Equipos y materiales	Pág.46
5.1.2 Mano de obra	Pág.47
5.1.3 Otros costes	Pág.47
5.1.4 Modelo presupuestario	Pág.48
5.1.5 Ejemplo de oferta	Pág.49
6. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	Pág.52
6.1 Estado de la aplicación de esta metodología	Pág.52
6.2 Conclusiones sobre la metodología propuesta	Pág.53
6.3 Futuras líneas de investigación	Pág.54
6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	Pág.56

Anexos **VII**

ANEXO I. FICHA TÉCNICA TOPCON IP-S3.

ANEXO II. FICHA TÉCNICA LEICA TS-16.

ANEXO III. FICHA TÉCNICA TOPCON HIPER VR.

ANEXO IV. RECOMENDACIONES PARA EL MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DEL TOPCON IP-S3.

ANEXO V. EJEMPLO DE PLANIFICACIÓN DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN INICIAL DEL SISTEMA MOBILE MAPPING IP-S3.

Índice de Figuras

Figura 1. Captura de la nube de puntos del escaneo de los túneles de Madrid.	Pág.2
Figura 2. Esquema de la deriva que sufre la trayectoria.	Pág.3
Figura 3. Ejemplo de nube de puntos coloreada.	Pág.5
Figura 4. Tipos de equipos láser escáner.	Pág.6
Figura 5. Esquema descriptivo de los observables y mensurando objetivo en observaciones LiDAR.	Pág.6
Figura 6. Sistema Mobile Mapping instalado en un coche.	Pág.7
Figura 7. Entorno de las instalaciones de EXCADE en Google Street View: Ejemplo de producto (recorrido virtual) generado a partir de un levantamiento Mobile Mapping.	Pág.8
Figura 8. Diagrama de la relación velocidad/calidad.	Pág.9
Figura 9. Ejemplo de entregable topográfico obtenido por Mobile Mapping: Secciones de un túnel.	Pág.10
Figura 10. Precisiones del método cinemático en tiempo real.	Pág.13
Figura 11. Precisiones del método estático relativo en postproceso.	Pág.13
Figura 12. Fotografía de un levantamiento GNSS por el método estático-relativo en postproceso. En este caso el receptor está estacionado en un trípode.	Pág.14
Figura 13. Funcionamiento de los sistemas de navegación inercial en Mobile Mapping.	Pág.15
Figura 14. Odómetro instalado en el vehículo portador de un Mobile Mapping.	Pág.15
Figura 15. Estación total estacionada en trípode.	Pág.16
Figura 16. Esquema general de la radiación.	Pág.17
Figura 17. Esquema general de la poligonal abierta encuadrada.	Pág.17
Figura 18. Esquema general de la nivelación trigonométrica simple.	Pág.18
Figura 19. Topcon IP-S3.	Pág.19
Figura 20. Topcon IP-S3 montado en vehículo APGEO.	Pág.20
Figura 21. Imán de sujeción para la antena del odómetro.	Pág.21
Figura 22. Protector de ventanilla con agujero para pasar cables.	Pág.21
Figura 23. Estación total Leica TS16.	Pág.22
Figura 24. Receptor GNSS Topcon HiPer VR.	Pág.22

Figura 25. Trípode Leica GST20-9.	Pág.23
Figura 26. Prisma Leica GPR121.	Pág.23
Figura 27. Base nivelante Leiva GDF312.	Pág.24
Figura 28. Soporte de precisión Leica GZR3.	Pág.24
Figura 29. Dianas HDS que se suelen imprimir en adhesivos.	Pág.25
Figura 30. Esquema del procedimiento a seguir en esta metodología.	Pág.29
Figura 31. Receptor GNSS en pilar con centrado forzoso.	Pág.31
Figura 32. Croquis ejemplo de la poligonal a realizar.	Pág.32
Figura 33. Croquis ejemplo de una posible ubicación de los GCPs.	Pág.33
Figura 34. Esquema de los elementos que conforman la sección de un túnel.	Pág.33
Figura 35. Fotografía de la ejecución de una poligonal en el interior de un túnel.	Pág.34
Figura 36. Señal de un GCP marcada con pintura.	Pág.35
Figura 37. Fotografía del montaje del odómetro en la rueda.	Pág.35
Figura 38. Fotografía correspondiente a la revisión de la correcta conexión del cableado.	Pág.36
Figura 39. Fotografía de un proceso de captura Mobile Mapping en el interior de un túnel.	Pág.37
Figura 40. Fotografía de la pantalla del sistema informático donde se van revisando los parámetros.	Pág.38
Figura 41. Fotografía de la vista del operario responsable de la captura durante la misma.	Pág.39
Figura 42. Fragmento de una captura LiDAR con Mobile Mapping en un túnel.	Pág.40
Figura 43. Supuesto funcionamiento del filtro de Kalman.	Pág.42
Figura 44. Comparación de nubes de puntos previas y posteriores al reposicionado por puntos homólogos.	Pág.43
Figura 45. Captura de pantalla del ajuste de una nube de puntos a un punto de control.	Pág.44
Figura 46. Ejemplo de nube de puntos coloreada, y de imagen panorámica generada a partir de los fotogramas de campo.	Pág.44
Figura 47. Captura de un fragmento de ejemplo de resultado que se puede obtener aplicando este procedimiento.	Pág.45

Índice de Tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas del Mobile Mapping frente a otras técnicas topográficas.	Pág.8
Tabla 2. Requisitos y tareas del operario 1.	Pág.27
Tabla 3. Requisitos y tareas del operario 2.	Pág.27
Tabla 4. Diferenciación de casos (túneles).	Pág.28
Tabla 5. Precios de los equipos y software necesarios.	Pág.46
Tabla 6. Precios de los materiales finitos necesarios.	Pág.47
Tabla 7. Precios del personal necesario.	Pág.47
Tabla 8. Precio de los desplazamientos.	Pág.47
Tabla 9. Valores porcentuales de los medios auxiliares y costes indirectos.	Pág.48
Tabla 10. Modelo presupuestario.	Pág.49
Tabla 11. Cálculo del coste de los alquileres de equipos y software.	Pág.50
Tabla 12. Cálculo del coste de los materiales finitos.	Pág.50
Tabla 13. Cálculo del coste de la mano de obra.	Pág.50
Tabla 14. Cálculo del coste de los desplazamientos.	Pág.50
Tabla 15. Cálculo del coste de los medios auxiliares y del coste indirecto.	Pág.51
Tabla 16. Cálculo del IVA y cuantía final.	Pág.51

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La geomática es una disciplina que relaciona las diferentes ciencias que la componen, como la topografía, la cartografía y la geodesia, con las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Esto provoca y hace posible que surjan nuevas tecnologías de captura masiva de la realidad, así como nuevas metodologías y aplicaciones que hagan uso de estas. Todo ello es posible gracias al avance tecnológico que permite el manejo de cantidades de información mucho mayores a las que eran comunes en las geociencias convencionales.

Aunque para nosotros ya es muy común la realización de trabajos o proyectos con la ayuda de las TIC, todavía no es un estándar en algunas de las tareas a las que se enfrentan los profesionales de este campo. En otras muchas, el uso tanto de software como de equipos modernos no supone el avance esperado.

El *Mobile Mapping* (apartado 2.2.2) es un ejemplo de esto último. Combinando un conjunto de sensores propios de distintas ramas de la geomática, promete una captura masiva de datos que representa la realidad con una eficiencia que está muy por encima de la de las técnicas convencionales. Esto, en realidad, tiene muchas excepciones que, de cara al trabajo real, suponen en muchas ocasiones, pérdidas de precisión y calidad que invalidan su uso. Una de estas excepciones es su utilización en el interior de túneles. El problema empieza cuando la captura de datos que realiza el equipo se ve asociada a un error denominado “deriva” generado por la pérdida de cobertura GNSS. Esto hace que la precisión de la toma de datos se vaya reduciendo a medida que aumenta el error con la distancia recorrida.

Por esto último, es necesario desarrollar una metodología que permita trabajar correctamente en dichos entornos subterráneos haciendo uso de esta tecnología.

1.2 Estado del arte

Actualmente la aplicación de metodologías Mobile Mapping en proyectos de ingeniería no es común, aunque, en los últimos años, el interés hacia dicha tecnología ha ido en aumento.

En el sector de empresas españolas de cartografía destaca el proyecto: “*Obtención del trazado y cartografiado de los hastiales de túneles en la provincia de Guipúzcoa*” [1]. En

este caso, la empresa GEOGRAMA, SL. escanea por técnicas de mapeado móvil una serie de túneles para el Departamento de Movilidad y Ordenación del Territorio de la Diputación Foral de Guipúzcoa. Lo hace con el objetivo de obtener un conjunto masivo de datos que le permite delinear el trazado de los túneles y cartografiar los hastiales. Los resultados obtenidos ofrecen una precisión absoluta de 3 centímetros.

Otro proyecto relevante para este documento es el siguiente: “*Levantamiento por Mobile Mapping de los túneles de la ciudad de Madrid*” [2]. En este caso, la empresa COTESA, SA. (Grupo TECOPY) escanea dichos túneles, con el objetivo de inventariar y cartografiar los diferentes elementos que se encuentran en su interior. El departamento de cartografía del Ayuntamiento de Madrid comunica que la precisión absoluta obtenida es de 50 centímetros, que supone una mejora, pero que no cumple con la tolerancia establecida para el proyecto (*figura 1*).

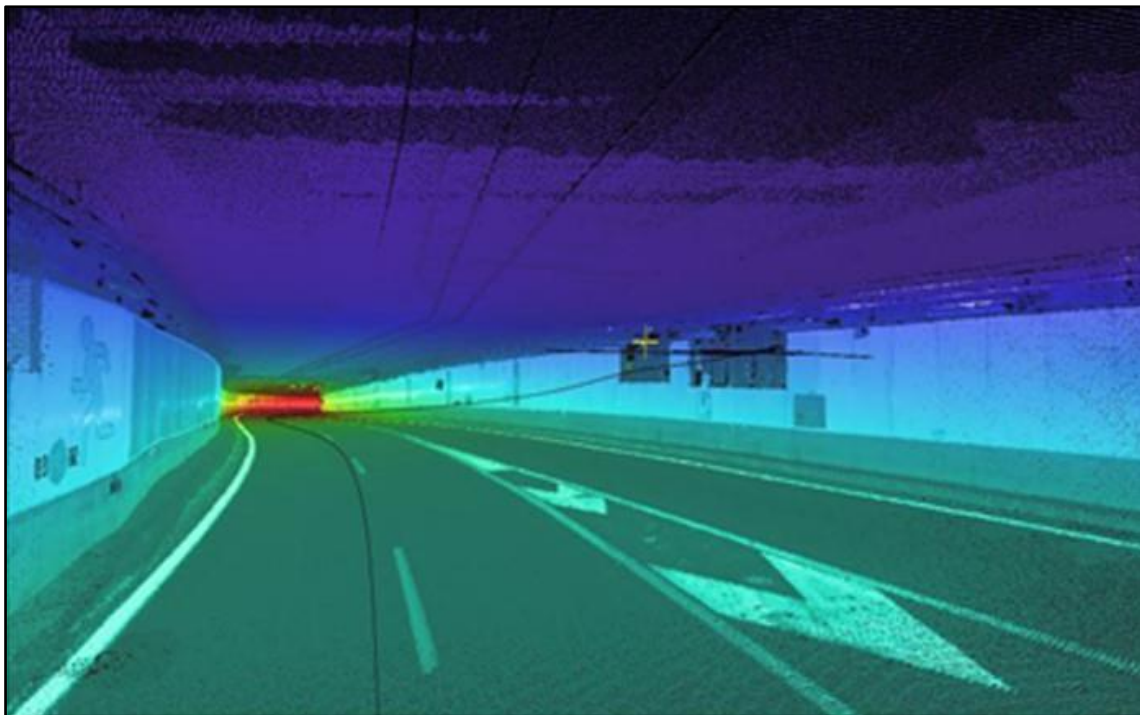


Figura 1. Captura de la nube de puntos del escaneo de los túneles de Madrid. Fuente: ESMARTCITY.

Por otro lado, la empresa APGEO, SL. (Grupo EXCADE) estudia la posibilidad de utilizar este tipo de levantamientos topográficos de alta definición (HDS) en el sector de la construcción e ingeniería civil. Hasta este momento, las pruebas realizadas no son concluyentes, y la calidad de los resultados que se obtienen no es homogénea. Estos malos resultados se asocian a la pérdida de cobertura GNSS, lo que se traduce en una deriva de la trayectoria del móvil que aumenta de forma proporcional con la distancia. Esto se puede llegar a corregir en el procesado de los datos brutos, pero requiere de un

número de horas de trabajo muy elevado que, en situaciones reales, no es asumible. La *figura 2* explica gráficamente esta problemática.



Figura 2. Esquema de la deriva que sufre la trayectoria. Fuente: Elaboración propia.

1.3 Justificación del trabajo a realizar y objetivos

Tal y como se viene describiendo en esta introducción, el Mobile Mapping es una tecnología muy moderna, por lo que, aunque sea un avance tecnológico considerable, todavía presenta algunas problemáticas que la invalidan para su aplicación en algunos proyectos, al no ser capaz de cumplir con las tolerancias exigidas.

Una de esas problemáticas es su dependencia de los sistemas GNSS y de navegación inercial. Esto hace que en algunos entornos en los que se carece de cobertura satelital, generalmente en túneles, la fiabilidad de los resultados se vea reducida en exceso debido a la pérdida de precisión del sistema.

Por lo tanto, las motivaciones que generan el interés en desarrollar esta idea siguen las siguientes líneas:

- Necesidad de una metodología fiable. A día de hoy todavía no existe ninguna propuesta firme sobre una metodología que ofrezca la obtención de unos resultados fiables con esta tecnología en este campo.

- Potencial de mercado. Una metodología de este tipo proporcionaría muchas ventajas a quienes la utilicen y, en adición, a las propias del Mobile Mapping sobre otras técnicas más convencionales.
- Innovación tecnológica. La aplicación de técnicas HDS son el presente y futuro de los trabajos topográficos, dotando a los mismos de mayor calidad. Reducir sus limitaciones aumentaría su uso en el sector de la Ingeniería y la Construcción.
- Contribución al conocimiento científico. Esta tecnología no está muy extendida en la comunidad científica, lo que provoca gran desconocimiento y pocos avances.

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de una metodología para procesos de medición basados en Mobile Mapping, que aumente la precisión y el nivel de fiabilidad en el uso de este tipo de tecnología HDS en el interior de túneles. Para ello, se pretende apoyar el propio levantamiento Mobile Mapping en otras técnicas topográficas más convencionales, como son los levantamientos por técnicas GNSS y los levantamientos taquimétricos. Con la aplicación de esta combinación de metodologías geomáticas se espera obtener una mejora en la precisión de los resultados (entre 1 y 5 cm). Para ello, se utiliza como apoyo una poligonal con un error de cierre teórico entorno al centímetro. Su objetivo es el de realizar una toma de puntos de control a los cuales se adaptará la captura Mobile Mapping. Dichos puntos de control han de tener una densidad, homogeneidad y ubicación determinada que no siempre han de ser las mismas y que, en las explicaciones del desarrollo de la metodología, se expondrán los criterios para tomar una decisión crítica sobre dichas características.

El objetivo secundario consiste en contribuir a la innovación tecnológica de los procesos geomáticos, así como al conocimiento científico-tecnológico de esta rama del conocimiento. De igual modo, se aspira a que las conclusiones de este documento informen y puedan servir como base de futuras investigaciones y desarrollos.

El proyecto se lleva a cabo con la colaboración de la empresa EXCADE S.L., y dentro del marco de la Cátedra EXCADE de la Universidad de Oviedo. Se realiza tomando como referencia el instrumental que dicha empresa utiliza en sus propios trabajos.

El trabajo servirá, además, como medio para optar a una evaluación favorable de su autor en el Trabajo Fin de Grado, perteneciente al plan de estudios del Grado en Ingeniería Geomática de la Universidad de Oviedo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Escaneado láser y Mobile Mapping

2.1.1 Escaneado láser

El escaneado láser es una técnica de captura masiva de puntos, a través de la cual se obtienen las coordenadas tridimensionales de los puntos que conforman dicha captura [3, 4]. El producto resultante del proceso de escaneo se denomina nube de puntos. Es común encontrarse con que este tipo de observaciones geométricas van acompañadas de imágenes, tomadas por cámaras integradas en el escáner láser, que se proyectan sobre la nube de puntos con el fin de colorearla asignando a los puntos una información radiométrica (*figura 3*).



Figura 3. Ejemplo de nube de puntos coloreada. Fuente: BIMnD Building New Dimensions.

Su principal ventaja frente a los métodos topográficos convencionales es la posibilidad de capturar mucha más información en pequeños periodos de tiempo.

Por el contrario, su desventaja más característica es que los puntos, que son el objetivo del proceso de escaneado, no son registrados a elección del operario. Sino que este sólo determina la posición desde la que se realiza el barrido láser, y la densidad de puntos con la que quiere trabajar. La zona que se escanea es lo que se conoce como campo de observación [4].

Según el posicionamiento del instrumental puede diferenciarse entre dos tipos: el escaneado láser terrestre (TLS, del inglés *Terrestrial Laser Scanner*), cuya particularidad

es que la adquisición de las observaciones se realiza sobre el terreno, y el escaneado láser aerotransportado sobre una plataforma aérea (ALS, del inglés *Aerial Laser Scanner*). A su vez, según la plataforma de sustentación del escáner se puede diferenciar entre los escáneres láser fijos o estáticos, y los móviles (MLS, del inglés *Mobile Laser Scanner*) (figura 4) [3].

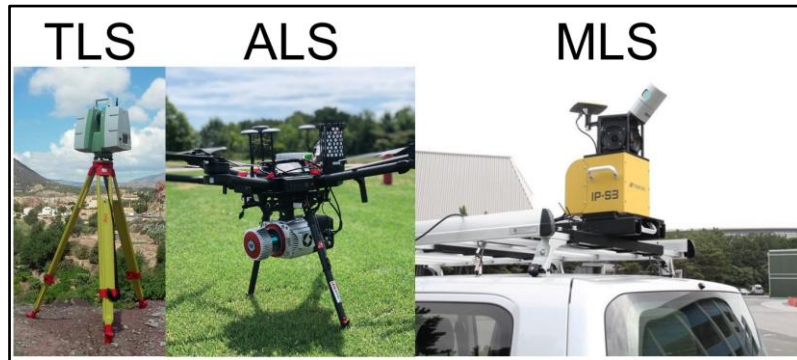


Figura 4. Tipos de equipos láser escáner. Fuente: Elaboración propia.

Estos equipos se basan en la tecnología LiDAR (del inglés, *Light Detection and Ranging*) que permite que se obtengan nubes de puntos densas que caracterizan todos los objetos presentes en la visual del escáner. Para ello, el instrumento mide los ángulos vertical, horizontal, y la distancia a cada punto observado con respecto al emisor de pulsos láser. Con esos datos se calculan las coordenadas de cada uno de estos puntos (figura 5). La nube de puntos adquirida permite realizar un modelo tridimensional del escenario observado [4].

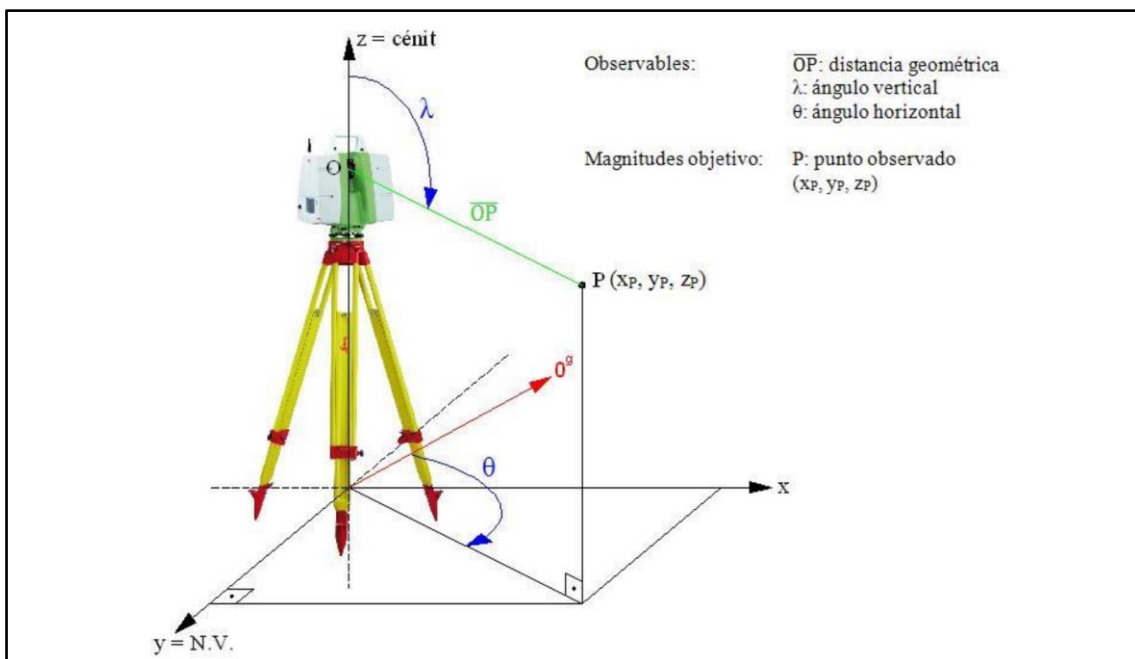


Figura 5. Esquema descriptivo de los observables y mensurando objetivo en observaciones LiDAR. Fuente: Grupo de investigación AssIST (Universidad de Oviedo)

Esta tecnología es muy útil en diversos ámbitos, como son la arquitectura, la cartografía, la ingeniería civil, la industria de precisión, la ingeniería forestal, las catástrofes naturales, etc. y es por ello por lo que, en los últimos años, el uso de equipos LiDAR está en pleno auge [4].

La metodología básica para los trabajos con láser escáner se basa en:

- La preparación del proceso de medición para garantizar el objetivo y eficiencia del trabajo.
- La adquisición de observaciones desde distintas posiciones, lo que obliga a unir todos los escaneos para obtener la nube de puntos global. Es común aprovechar este paso para realizar la georreferenciación.
- Limpieza para deshacerse de ruido e información no relevante [4].

2.2.2 Mobile Mapping

El Mobile Mapping (MM) es un método de escaneado láser móvil (MLS) terrestre. Lo más común es que los sistemas MM estén instalados en un coche (*figura 6*), por el tamaño y peso de este tipo de equipos, aunque el principio de funcionamiento permite cualquier tipo de portador.



Figura 6. Sistema Mobile Mapping instalado en un coche. Fuente: APGEO (Grupo EXCADE).

Los sistemas MM están pensados desde un punto de vista modular. Llevan integrados una serie de sensores y receptores que pueden o no utilizarse en su totalidad en función

de la finalidad del trabajo. Generalmente están compuestos por uno o varios equipos LiDAR y/o cámaras, a los que van asociados equipos secundarios que proporcionan la orientación y posición. Estos últimos son una unidad de medición inercial (IMU) y un receptor GNSS, como mínimo. Además, el sistema va conectado a un ordenador con el que se controla el escaneo y se almacenan los datos brutos.

La utilidad de este método aporta soluciones en campos muy diversos. Algunas aplicaciones pueden ser: cartografía, inventariado de carreteras y caminos, creación de gemelos digitales, estudios de ingeniería civil, recorridos virtuales VR (*figura 7*), etc. [5]



Figura 7. Entorno de las instalaciones de EXCADE en Google Street View: Ejemplo de producto (recorrido virtual) generado a partir de un levantamiento Mobile Mapping. Fuente: Google Street View.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del Mobile Mapping frente a otras técnicas topográficas.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> - Menor tiempo de trabajo de campo. - Obtención masiva de información geoespacial. - Reducción de costes. - Mayor seguridad y comodidad para los trabajadores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor precisión. - Dependencia del buen funcionamiento de varios equipos. - Necesidad de un coche con la instalación eléctrica necesaria para dar corriente al sistema. - Mayor tiempo de procesado.

Los levantamientos Mobile Mapping se dividen en dos fases muy diferenciadas.

La primera de ellas es la captura de datos. Esto, aunque requiere de una planificación previa detallada (delimitación de campo de observación, determinación de la trayectoria a seguir, búsqueda de espacios de calibración...), se resume en escanear realizando una o varias pasadas con el coche por la zona de interés. La calidad del trabajo tiene relación directa con la velocidad y suavidad de conducción. A mayor velocidad y brusquedad, menor es la cantidad de puntos por unidad de superficie capturados, y por tanto menor es la calidad del modelo final (figura 8).

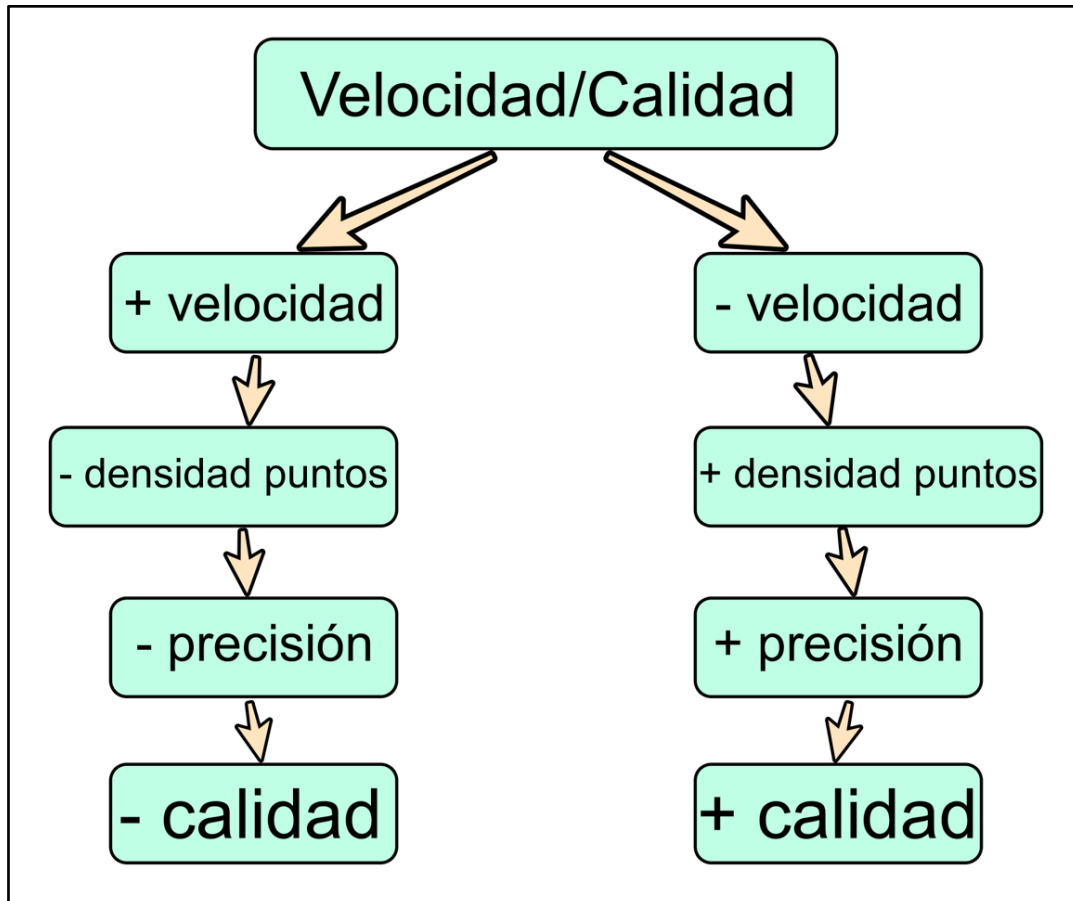


Figura 8. Diagrama de la relación velocidad/calidad. Fuente: Elaboración propia.

La segunda fase es el trabajo de gabinete, que como mínimo, consiste en el procesado de los datos brutos. Resumiendo, lo que se hace es obtener la trayectoria recorrida y asignar a cada posición (del conjunto de posiciones del coche en la trayectoria) sus correspondientes observaciones HDS. Esto es algo para lo que se necesita un ordenador con unas especificaciones de alto rendimiento. El procesado requiere de mucho tiempo y muchos recursos de rendimiento informático. Dependiendo del producto final a obtener, dicho procesado requerirá seguir unas metodologías u otras. Estas se diferencian entre ellas, principalmente, por la elección de parámetros que varían el tipo de cálculos internos que realiza el software de procesado. Estas tareas finalizan con la

obtención de la nube de puntos final, a partir de la cual se pueden generar otro tipo de entregables y productos adicionales, como el ejemplo de la *figura 9*.

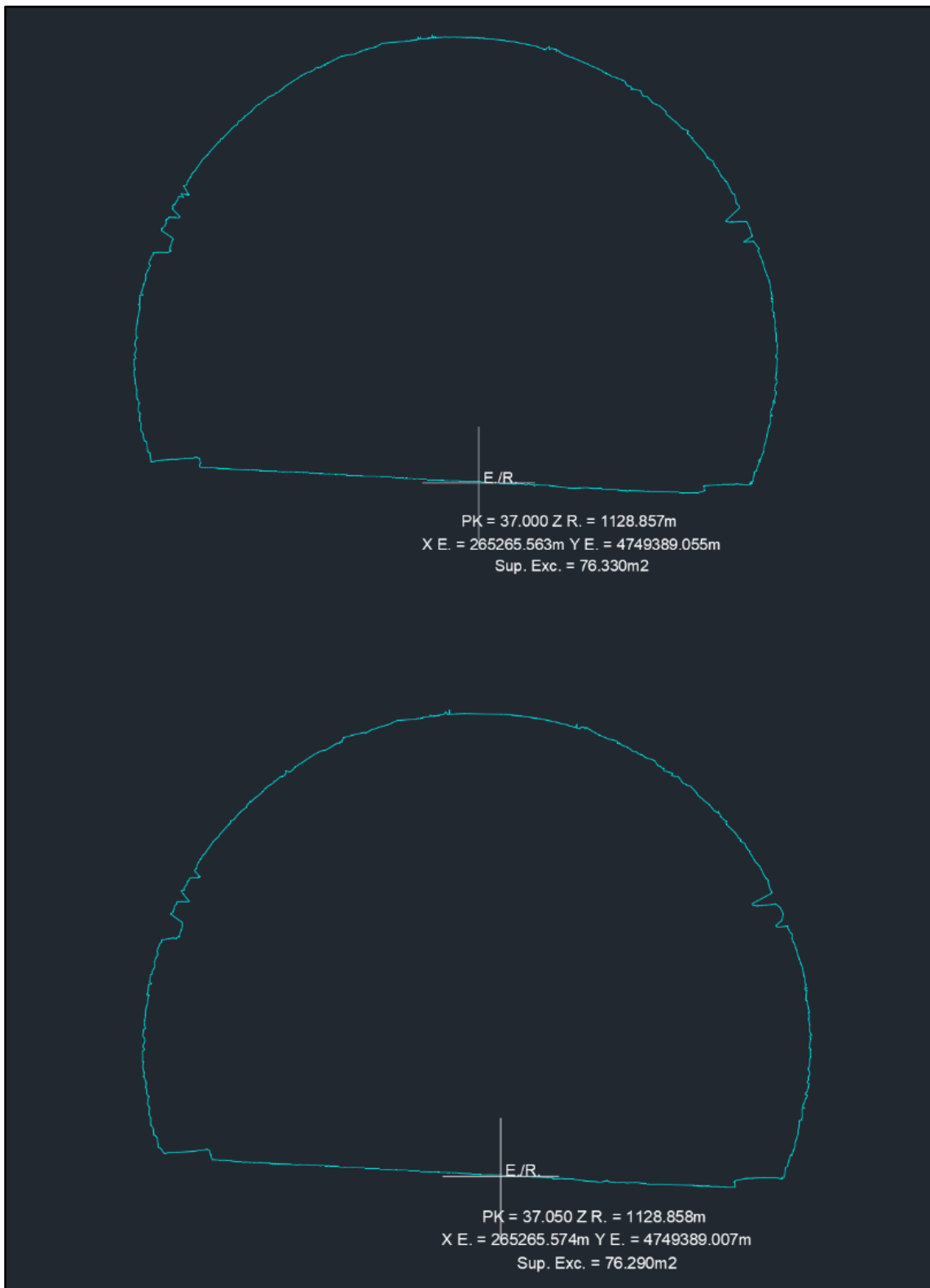


Figura 9. Ejemplo de entregable topográfico obtenido por Mobile Mapping: Secciones de un túnel. Fuente: APGEO (Grupo Excade).

Desde el punto de vista topográfico, las coordenadas de las nubes de puntos que se obtienen como producto a partir de este tipo de levantamientos están referidas a un sistema de referencia absoluto. Esto es debido a que la fuente principal de datos de posición son los sistemas de posicionamiento por satélite (GNSS). Esto último se explica con más profundidad en apartados posteriores.

Los sistemas Mobile Mapping están concebidos de tal manera que, en caso de sufrir una pérdida de cobertura GNSS, sean capaces de suplir esa falta de información con la aportada al sistema por la IMU. Si esto fuera totalmente cierto, la problemática de la que surge este proyecto no existiría (se profundiza en el *apartado 2.2*).

Actualmente también se comercializan equipos MLS de tamaño reducido, que permiten incluso llevarlos en la mano para realizar levantamientos HDS. Este tipo de instrumental tiene otro tipo de usos más industriales e incluso propios de la arquitectura de interiores. En este documento no se profundiza en ellos por no estar pensados para este tipo de entornos (túneles), en los que las distancias a recorrer y la cantidad de datos a recoger son mucho mayores.

2.2 Georreferenciación

Georreferenciar un elemento es determinar su posición geográfica en un sistema de referencia de coordenadas absolutas (SRC). Dicha posición geográfica debe ser única y estar bien definida. Cuando un elemento está georreferenciado se dice que sus coordenadas son absolutas [6].

En España, según el RD 1071/2007, el sistema de referencia oficial para los trabajos de geomática y topografía es el ETRS89 [7].

En lo relativo a este documento, es de interés profundizar en métodos GNSS, sistemas de navegación inercial, y métodos taquimétricos.

2.2.1 Métodos GNSS

Los sistemas de posicionamiento por satélite (SPS), comúnmente conocidos por sus siglas en inglés *GNSS*, son el principal método topográfico de georreferenciación. Se componen de un conjunto de elementos que reciben, decodifican y procesan las señales emitidas por una o varias constelaciones satelitales de posicionamiento (NAVSTAR,

GALILEO, GLONASS...), permitiendo al usuario conocer la posición absoluta de puntos que conforman el objetivo.

Esto hace que los GNSS sean una herramienta muy válida para diferentes campos de actuación como la navegación, la geodesia o la topografía.

Los receptores GNSS geodésicos se consideran instrumentos topográficos que permiten la determinación de las coordenadas tridimensionales de los puntos que ocupan. Su utilización supone muchas ventajas, como por ejemplo, la posibilidad de determinar distancias entre puntos que carecen de intervisibilidad. El único requisito indispensable para el uso de esta tecnología es la cobertura satelital. Para ello, además de tener satélites disponibles durante la medición, habrá de estar en posición de cielo abierto, es decir, sin obstáculos que impidan la conexión entre el receptor y el satélite.

En este tipo de métodos topográficos se utilizan mensurandos de origen que no son determinados por quien realiza la medición. El receptor únicamente adquiere algunos de esos datos (durante el trabajo de campo), y otros se consiguen a través de organismos encargados de las redes geodésicas descargándolos de sus respectivas plataformas web.

Los mensurandos objetivo serán las coordenadas tridimensionales de cada punto objetivo. Estas podrán ser proyectadas de manera que se obtengan las coordenadas cartográficas de los puntos, como por ejemplo las relativas al SRC ETRS89.

En los sistemas de mapeo móvil, el método GNSS que se utiliza es el que se conoce como cinemático o RTK (en inglés, *Real Time Kinematic*). Es un método diferencial que se basa en el uso de como mínimo dos receptores GNSS simultáneamente. Uno de ellos debe de estar estático en un punto de coordenadas ya conocidas, y es por ello que recibe el nombre de estación de referencia. El otro, denominado móvil o rover, es el que se utiliza para llevar a cabo la medición, y es el que llevan los sistemas MM. Actualmente ya se dispone de redes geodésicas activas compuestas por estaciones de referencia GNSS, a las que se pueden conectar los usuarios para llevar a cabo mediciones RTK sin necesidad de disponer de un segundo receptor propio. Dichas estaciones de referencia envían correcciones al receptor móvil en tiempo real, que permiten que se puedan determinar las coordenadas objetivo con una precisión centimétrica (*figura 10*) [8].

Cinemática en tiempo real

Líneas base menores de 30 km
Horizontal 10 mm + 1 ppm RMS
Vertical 15 mm + 1 ppm RMS
Red RTK
Horizontal 10 mm + 1 ppm RMS
Vertical 15 mm + 1 ppm RMS

Figura 10. Precisiones del método cinemático en tiempo real. Fuente: BERNÉ VALERI, J.L [8]

En lo relativo a este documento también es de importancia el método estático relativo en postproceso, otro de los métodos GNSS empleados en geodesia y topografía. La precisión de los resultados que se consigue en su aplicación es más alta (milimétrica) (figura 11). Es por ello que, cuando se necesita georreferenciar un trabajo con alta precisión, este es el método más recomendable. En él se utilizan varios receptores estáticos en varios puntos. Sus observaciones de campo requieren de largos periodos de observación, de aproximadamente 1 hora para distancias entre receptores de menos de 20 km, y 2-3 horas para distancias de 20-50 km. Se denomina “en postproceso” porque la obtención de las coordenadas absolutas se realiza en el gabinete, una vez descargadas las correcciones necesarias del enlace remoto del organismo competente. Al igual que para el método RTK, hoy en día ya no se utilizan varios receptores propios, sino que el topógrafo lleva un solo receptor con el que realiza las observaciones de campo (figura 12) y, una vez en el gabinete (en postproceso) se apoya en redes de estaciones de referencia para determinar las coordenadas de los puntos. Dos ejemplos de redes GNSS son la Red Geodésica Activa del Principado de Asturias (RGAPA), y la Red de Estaciones de Referencia GNSS del Instituto Geográfico Nacional (ERGNSS) [8].

Medición estática

Horizontal 3 mm + 0.1 ppm RMS
Vertical 3.5 mm + 0.5 ppm RMS
Estática rápida
Horizontal 5 mm + 0.5 ppm RMS
Vertical 10 mm + 0.5 ppm RMS

Figura 11. Precisiones del método estático-relativo en postproceso. Fuente: BERNÉ VALERI, J.L. [8]



Figura 12. Fotografía de un levantamiento GNSS por el método estático-relativo en postproceso. En este caso el receptor está estacionado en un trípode. Fuente: Lydia Murias Cuervo.

2.2.2 Sistemas de Navegación Inercial

Los sistemas de navegación inercial sirven para determinar la posición de un móvil sin depender de señales externas, como pueden ser los sistemas GNSS. Esto quiere decir que los dispositivos que utilizan estos sistemas no requieren de los datos de un dispositivo ajeno para completar sus mediciones [9].

El funcionamiento de estos sistemas se basa en el uso de acelerómetros y giroscopios que miden las aceleraciones lineales y centrípetas del móvil además de su dirección. La información recopilada por estos sensores se utiliza para calcular continuamente la posición y orientación del vehículo en función de su posición inicial conocida. El dispositivo que integra estos sensores es la IMU (Unidad de Medición Inercial) [9].

En esta tecnología MM, a medida que el portador del sistema se va desplazando, el sistema de navegación inercial registra los cambios de velocidad y dirección y los integra de manera que la posición se actualiza constantemente, tal y como lo explica la *figura 13*.

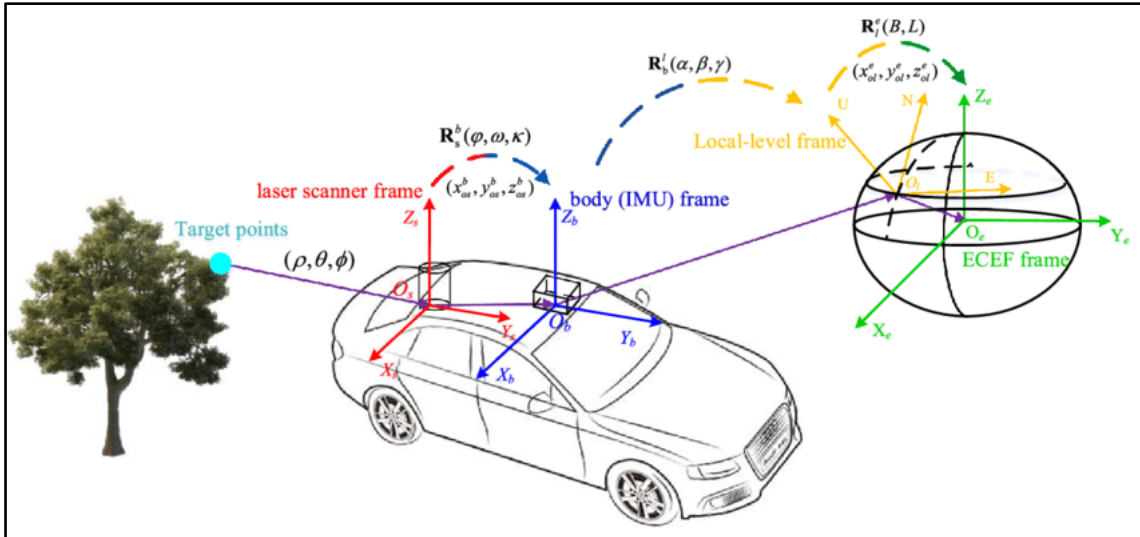


Figura 13. Funcionamiento de los sistemas de navegación inercial en Mobile Mapping. Fuente: Shi, Bo & Bai, Yuntian & Zhang, Shun & Zhong, Ruofei & Yang, Fanlin & Song, Shizhu & Li, Guoyu. [10]

En lo relativo a este documento, estos sistemas solo aportan una precisión aceptable cuando su uso se limita a distancias cortas, es decir, su precisión disminuye con el aumento de la distancia. Esto es lo que provoca la deriva que sufre la trayectoria dentro de los túneles (desviación de la trayectoria que genera el objetivo de este proyecto). El error asociado a las mediciones de la IMU se va acumulando de manera que en un túnel de varios kilómetros la desviación de la trayectoria puede llegar a ser de decenas de metros.

Con el objetivo final de mejorar la precisión de las IMUs, algunos sistemas Mobile Mapping llevan acoplado a una de las ruedas del vehículo portador un odómetro, instrumento que mide la distancia recorrida por la rueda (figura 14). Esto ayuda en el cálculo de la posición, ya que la distancia recorrida deja de ser una incógnita.



Figura 14. Odómetro instalado en el vehículo portador de un Mobile Mapping. Fuente: APGEO (Grupo EXCADE).

2.2.3 Métodos taquimétricos

La taquimetría es la rama principal de los métodos topográficos, por ser de las más precisas, la más fiable y la más versátil. Desde hace muchos años, la taquimetría ya es electrónica y por ello, lo más común es referirse a los equipos taquimétricos como taquímetros electrónicos o estaciones totales, las cuales ya permiten automatizar algunos cálculos. Esto último facilita y reduce mucho el trabajo de gabinete.



Figura 15. Estación total estacionada en trípode. Fuente: APGEO (Grupo EXCADE).

Las estaciones totales son los instrumentos utilizados y están compuestos por un conjunto de sensores y sistemas electrónicos que permiten medir ángulos y distancias, y que conforman el principio de funcionamiento que hace de los métodos taquimétricos sean los más precisos, llegando a precisiones milimétricas en planimetría y centimétricas en altimetría. Esto hace que se apliquen en diversos campos como la ingeniería civil, la arquitectura o la cartografía.

Algo que los caracteriza es la no dependencia de ningún tipo de señal externa. Es por ello por lo que se utilizan en este trabajo, ya que se prevé que puedan dar solución, o parte de ella en la problemática a tratar.

Los métodos taquimétricos de interés en esta temática son la radiación, la poligonación y la nivelación trigonométrica.

La radiación es un método que permite conocer las coordenadas planimétricas de uno o varios puntos, a partir de las coordenadas polares obtenidas con la estación total desde un punto fijo, denominado polo de radiación (*figura 16*) [11].

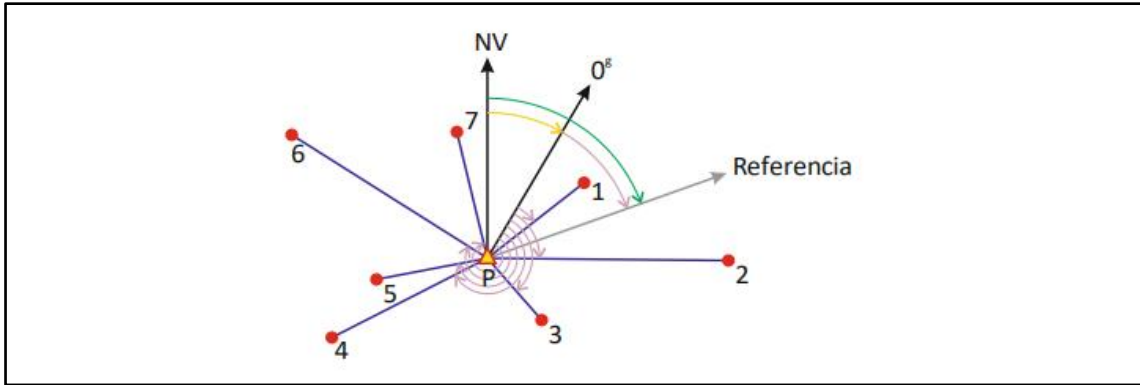


Figura 16. Esquema general de la radiación. Fuente: Pelayo González-Pumariiega Solís. [11]

La precisión de este método disminuye con la distancia, pero para las necesidades que se plantean en este documento es más que suficiente.

La poligonación es un método que permite obtener la posición planimétrica de una serie de puntos que conforman un itinerario, llevando a cabo observaciones (similares a las anteriores) desde todos los puntos de dicho itinerario al punto anterior y siguiente [11].

Para poder comprobar la validez de las observaciones de campo propias de la poligonal se han de conocer las coordenadas de los puntos extremos de la misma, y desde ellos visar a una referencia. Esto es lo que se conoce como poligonal abierta encuadrada (figura 17). Existen más tipos de poligonales, pero no se consideran de interés para este trabajo [11].

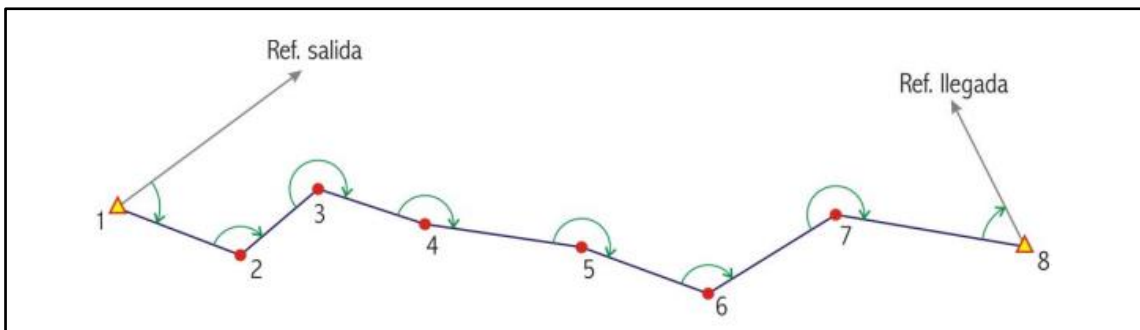


Figura 17. Esquema general de la poligonal abierta encuadrada. Fuente: Pelayo González-Pumariiega Solís. [11]

La precisión de una poligonal de este tipo depende de su geometría. Lo más favorable para no afectar negativamente a su precisión, es que sea lo más rectilínea posible y de tramos uniformes en distancia.

La nivelación trigonométrica es un método que permite determinar desniveles empleando visuales taquimétricas, midiendo desde un punto A la distancia geométrica y el ángulo vertical a un punto B, y conociendo la altura de la estación y de la señal

(generalmente prisma). Con esos datos ya es posible calcular el desnivel entre ambos puntos, y en el caso de conocer la cota de uno de ellos calcular la del otro [11].

Cuando este método se lleva a cabo empleando un solo estacionamiento recibe el nombre de nivelación trigonométrica simple (*figura 18*), aunque lo más común es realizar una nivelación trigonométrica a lo largo de un itinerario aprovechando la poligonal.

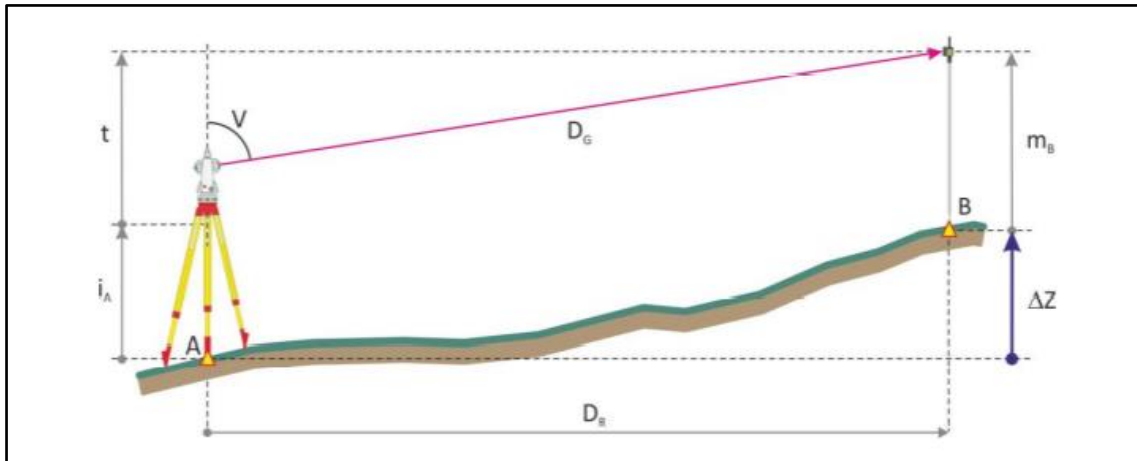


Figura 18. Esquema general de la nivelación trigonométrica simple. Fuente: Pelayo González-Pumariega Solís. [11]

En todos estos métodos, la intervisibilidad entre puntos sucesivos es requisito indispensable.

Cabe destacar que todos estos métodos mencionados en este apartado 2.2 tienen sus propias ecuaciones, variaciones, e incluso complicaciones. Profundizar en todo esto haría de este apartado algo tedioso de entender con una simple lectura, además de no ser de gran aportación para la correcta comprensión de este documento. Es por ello que se ha tratado todo ello con la mayor simplicidad posible.

3. RECURSOS

En este epígrafe se incluyen todos los recursos necesarios para la aplicación de la metodología producto de este trabajo. Cabe destacar que, ya que este TFG se desarrolla en el marco de la cátedra EXCADE, los recursos para los que esta metodología está diseñada y optimizada son los propios de la empresa EXCADE, SL. Esto no quiere decir que dicho procedimiento no se pueda seguir con otros de características similares.

3.1 Recursos técnicos y materiales.

3.1.1 Sistema Mobile Mapping.

El sistema Mobile Mapping que se toma como referencia está compuesto por los siguientes elementos:

- Equipo de mapeo móvil Topcon IP-S3, y accesorios.
- Coche portador del sistema Dacia Duster.
- Sistema informático y periféricos para su control.

El Topcon IP-S3 (*figura 19*) es un equipo Mobile Mapping que captura tanto datos LiDAR, como imágenes esféricas 360°. La nube de puntos que captura es de alta densidad y precisión, y se combina con panoramas de alta resolución capturados por una cámara digital de 6 lentes. Sus especificaciones técnicas se recogen en el *Anexo I*.



Figura 19. Topcon IP-S3. Fuente: Topcon.

Para montarlo en el coche se necesita una bandeja móvil en la que se puede anclar el equipo, que a su vez se sujeta a las barras de techo del vehículo, tal y como se muestra en la *figura 20*. En caso de que el vehículo no disponga de ellas se debe montar una baca homologada para el peso y las dimensiones del equipo.



Figura 20. Topcon IP-S3 montado en vehículo APGEO. Fuente: APGEO (Grupo EXCADE).

El odómetro que sirve de fuente de información para los cálculos de la IMU se acopla a la rueda izquierda trasera del coche intercambiando las tuercas propias de la rueda por unos espárragos que permiten su sujeción.

El coche va equipado con una instalación eléctrica dedicada a este sistema, formada por conectores, cableado especial e inversores que transforman la corriente continua que proviene de la batería del coche en corriente alterna.

También se equipa un sistema informático que sirve para controlar y almacenar los datos de la captura. Está compuesto por un ordenador que normalmente se sitúa en el maletero, y por sus periféricos, los cuales suelen ser una pantalla táctil, y un teclado que utiliza el operario del sistema.

Además de todos los elementos básicos necesarios, se suelen utilizar ciertos accesorios para facilitar el montaje, e impedir la desconexión de los elementos más visibles y del cableado por agentes externos (viento, ramas, etc) (figuras 21 y 22).



Figura 21. Imán de sujeción para la antena del odómetro. Fuente: Elaboración propia.



Figura 22. Protector de ventanilla con agujero para pasar cables. Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Instrumental topográfico de apoyo.

Los equipos topográficos que se toman como referencia son:

- Estación total robotizada Leica TS16.
- Receptor GNSS Topcon HiPer VR.

La Estación Total Leica TS16 (figura 23) es una estación total robotizada de alta precisión, que está diseñada para ser utilizada en topografía e ingeniería de alta precisión. Las características técnicas que la hacen ideal para este tipo de trabajos son su capacidad de puntería automática y su precisión en la medida de ángulos horizontales de 1". La puntería automática le permite ser capaz de buscar el prisma (señal observada) sin necesidad de que el operario tenga que apuntar el objetivo. La alta precisión, en la medida de ángulos horizontales, de la que dispone permite la determinación de coordenadas planimétricas con una exactitud muy alta. El resto de las características técnicas se recogen en el Anexo II [12].



Figura 23. Estación total Leica TS16. Fuente: Leica Geosystems.

El receptor Topcon HiPer VR (figura 24) es un receptor GNSS que permite la conexión universal para todas las constelaciones de posicionamiento satelital. Es un equipo muy versátil y sirve para métodos GNSS tanto estáticos como cinemáticos. Una característica destacable sobre este equipo es que cuenta con una IMU y una brújula digital que le permiten compensar errores como el de inclinación, que generalmente se propagan hasta el cálculo final de las coordenadas. El Anexo III se corresponde con su ficha técnica [13].



Figura 24. Receptor GNSS Topcon HiPer VR. Fuente: Topcon Positioning Systems.

Para utilizar estos equipos se necesitan ciertos accesorios. Los recomendados en este documento son:

- Trípodes de madera Leica GST20-9.
- Prismas Leica GPH1P.
- Bases nivelantes Leica GDF312.
- Soportes de precisión Leica GZR3.
- Señales HDS adhesivas.

El trípode Leica GST20-9 (*figura 25*) se considera uno de los accesorios más importantes para el posicionamiento preciso de equipos de medición, destacando por ser de los más estables y resistentes. Se utiliza cuando en la zona a medir no hay pilares equipados con centrado forzoso [14].



Figura 25. Trípode Leica GST20-9. Fuente: Topotienda.

El prisma Leica GPR121 (*figura 26*) es un accesorio de alta precisión ampliamente utilizado en topografía que cuenta con una precisión de medición de 2 milímetros [14].



Figura 26. Prisma Leica GPR121. Fuente: Topotienda.

Las bases nivelantes (*figura 27*) y los soportes de precisión (*figura 28*) son los accesorios que permiten el preciso posicionamiento del equipo. En este trabajo se utilizan tanto para el estacionamiento GNSS, como para el posicionamiento de los prismas [14].



Figura 27. Base nivelante Leica GDF312. Fuente: Topotienda.



Figura 28. Soporte de precisión Leica GZR3. Fuente: Topotienda.

Las señales HDS (*figura 29*) sirven para señalar puntos de control en este tipo de levantamientos. Tienen la característica de ser antirreflectantes, y por tanto pueden ser reconocidas en nubes de puntos. Normalmente se imprimen en papel adhesivo para poder colocarlas en cualquier superficie.

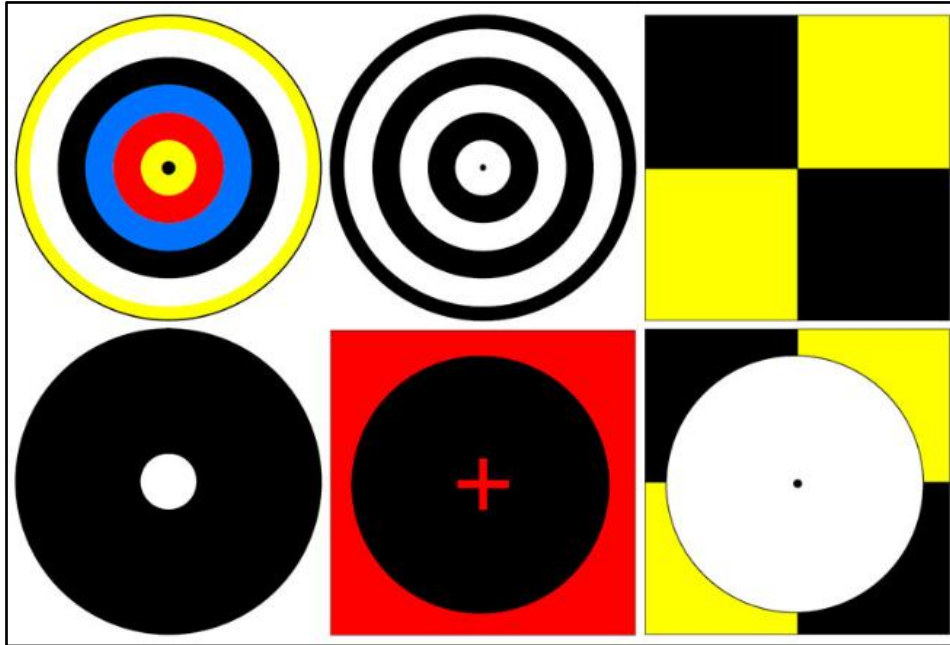


Figura 29. Dianas HDS que se suelen imprimir en adhesivos. Fuente: GIS&Beers.

3.1.3 Hardware de gabinete

El hardware de gabinete es el ordenador que, principalmente, se utiliza para procesar los datos obtenidos en campo. Esta es una tarea en la que se realizan cálculos muy complejos sobre un volumen de datos muy grande, y por ello se necesita un procesador y una tarjeta gráfica de alto rendimiento.

El ordenador que se toma como referencia está equipado con un procesador Intel i7-13700K, 64 GB de memoria RAM DDR5, y una tarjeta gráfica NVIDIA GeForce RTX 3070 Ti.

3.1.4 Software

3.1.4.1 Magnet Collage

Magnet Collage es el software de Topcon para el procesamiento de los levantamientos LiDAR y Mobile Mapping que se realizan con sus equipos.

Es un software muy polivalente y tiene muchas funcionalidades que permiten combinar datos obtenidos con distintos equipos y fuentes. Además, tiene una estética similar a los programas del paquete office que hace que sea bastante intuitivo y fácil de utilizar.

Algo muy característico es que tiene un flujo de trabajo que permite incluirlo y utilizarlo en proyectos que sigan una metodología BIM. Además de realizar el procesado permite exportar múltiples tipos de archivos que facilitan el trabajo en este tipo de proyectos.

3.1.4.2 Magnet Tools

Magnet Tools es otro software propio de Topcon. En este trabajo, se utiliza para procesar y ajustar datos de posicionamiento satelital, aunque tiene otras muchas funcionalidades que no se explican por no ser de interés para este trabajo.

3.1.4.3 MATLAB

MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico que utiliza su propio lenguaje de programación. Es ampliamente utilizado en diversos campos como la ciencia de datos, el procesamiento de imágenes y la visión artificial, o el aprendizaje máquina (en inglés, *Machine Learning*).

Es este documento se toma como referencia para su uso como herramienta de cálculo numérico. La idea es utilizar unos scripts (nombre que reciben los archivos que contienen el código programado) que hagan los cálculos topográficos, con la ventaja de que, una vez preparados esos scripts, el usuario ya no tiene que hacer nada más que editar la línea correspondiente al registro de entrada de los datos brutos de cada levantamiento y ejecutar el código.

3.2 Recursos humanos.

El personal mínimo para el que se diseña esta metodología son dos profesionales con formación en geomática.

El operario principal es un Ingeniero Técnico en Topografía y/o Graduado en Ingeniería Geomática, y es quien realiza los trabajos de campo y gabinete, siendo responsable de los mismos, tal y como se recoge en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Requisitos y tareas del operario 1.

OPERARIO 1: INGENIERO	
REQUISITOS:	TAREAS:
<ul style="list-style-type: none"> - Ser Ingeniero Técnico en Topografía o Graduado en Ingeniería Geomática 	<ul style="list-style-type: none"> - Planificación - Trabajos de campo - Cálculos y procesado en gabinete - Es el responsable del procedimiento

El segundo operario es quien realiza las tareas correspondientes a las de un Auxiliar Técnico de Topografía, sirviendo de apoyo en los trabajos de campo. Es fundamental que, además de tener conocimientos en el ámbito de la geomática, disponga de carnet de conducir (Tabla 3). Esto último es lo que garantiza que el ingeniero pueda estar controlando el mapeo móvil durante la captura sin perjudicar la seguridad del procedimiento.

Tabla 3. Requisitos y tareas del operario 2.

OPERARIO 2: AUXILIAR TÉCNICO DE TOPOGRAFÍA	
REQUISITOS:	TAREAS:
<ul style="list-style-type: none"> - Conocimientos de geomática - Carnet de conducir 	<ul style="list-style-type: none"> - Apoyo en los trabajos de campo - Conducción del coche durante la captura HDS

Como ya se ha mencionado, estos son los recursos humanos mínimos necesarios para la correcta ejecución del procedimiento. Esto quiere decir que puede haber determinados proyectos en los que, debido a su envergadura o al tiempo disponible, el personal necesario puede variar.

4. METODOLOGÍA

4.1 Criterios e idea general.

Cómo ya se viene diciendo en todo el documento, el desarrollo de esta metodología cubre la necesidad de realizar levantamientos Mobile Mapping en interior de túneles. La problemática que hace que estos trabajos sean un caso particular tiene que ver con el entorno. Al tratarse de un entorno subterráneo no hay cobertura GNSS, lo que se acaba traduciendo en una imprecisión intolerable en el resultado (explicado en profundidad en apartados anteriores).

Hay que diferenciar dos casos (*Tabla 4*): túneles de corta distancia y túneles de larga distancia.

Tabla 4. Diferenciación de casos (túneles).

TÚNELES DE CORTA DISTANCIA	TÚNELES DE LARGA DISTANCIA
LONGITUD < 50 METROS	LONGITUD > 50 METROS

Para los túneles de corta distancia, la falta de cobertura GNSS no provoca que los sistemas de mapeo móvil vean comprometido su buen funcionamiento. En ellos, la captura de datos en campo también va asociada a ese error de posicionamiento que se va propagando y aumentando con la distancia recorrida, pero la deriva que provoca no es tan notable y se corrige durante el procesado cuando el software detecta que hay dos datos de posicionamiento consecutivos que no siguen la misma tendencia de trayectoria.

En los túneles de mayor longitud este problema es mucho más significativo, siendo en los que más sentido tiene el desarrollo y aplicación de una metodología como la desarrollada en este trabajo.

El desarrollo de esta metodología está pensado con el fin de obtener un plan de trabajo estándar para cualquier trabajo futuro que se pueda plantear en este ámbito. Con esto se busca una cierta automatización en la planificación de las tareas a realizar como si se tratara de una *check-list* (del inglés, lista de chequeo u hoja de verificación) (*figura 30*). Esto es algo que suele ser necesario en trabajos en los que el entorno en el que se llevan a cabo implica que la seguridad de los operarios se vea reducida.

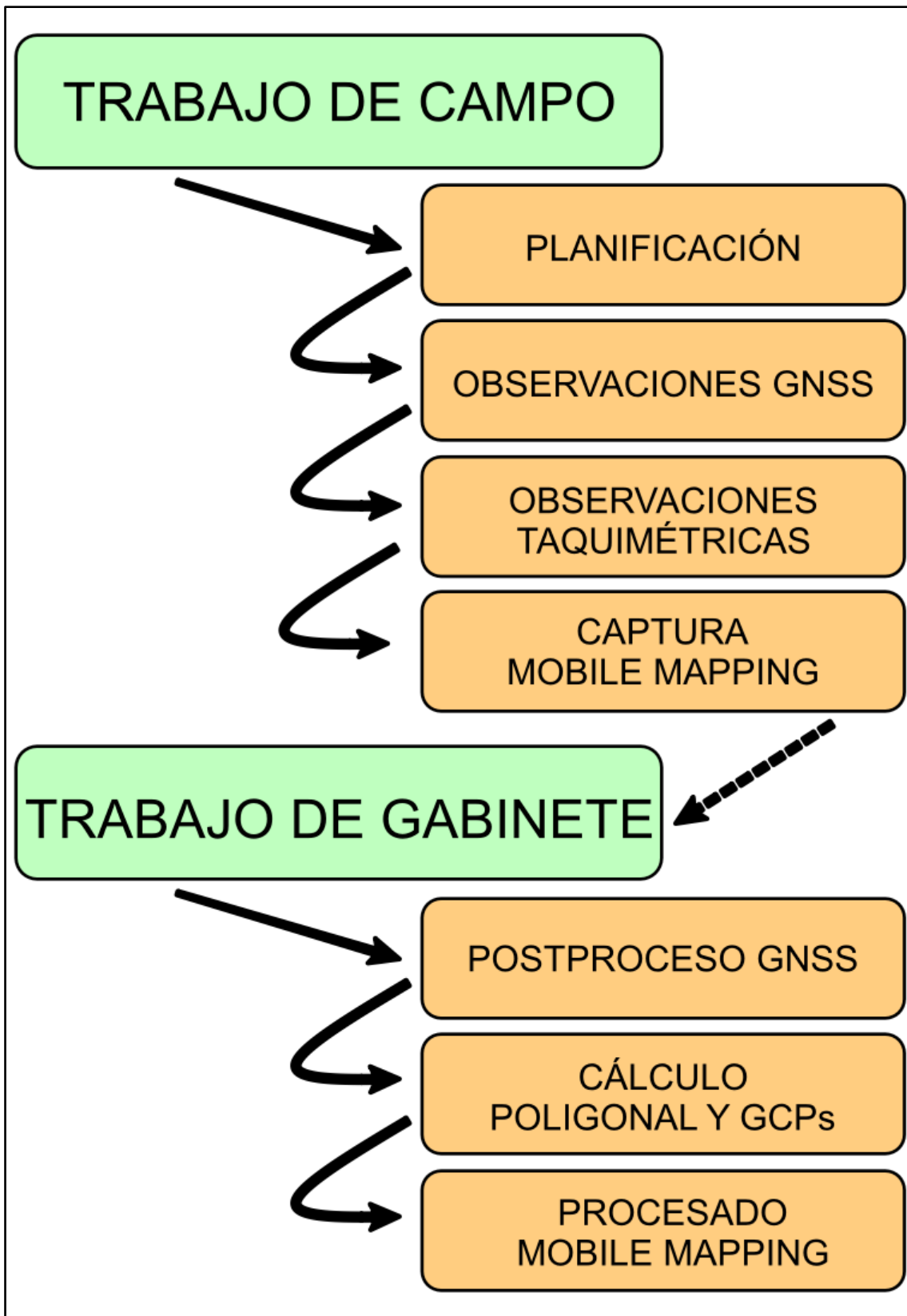


Figura 30. Esquema del procedimiento a seguir en esta metodología. Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento se divide en dos fases: trabajo de campo y trabajo de gabinete. El trabajo de campo consiste en el mapeo móvil y en las tareas auxiliares que aumentan la precisión basándose en la georreferenciación de la captura HDS con puntos de control. Por otro lado, el trabajo de gabinete se resume en obtener las coordenadas de los GCPs (término utilizado para referirse a los puntos de control utilizados en técnicas HDS, del inglés *Ground Control Points*), y en la obtención de la nube de puntos final.

4.2 Trabajo de campo.

4.2.1 Planificación del trabajo y tareas previas.

La planificación del trabajo es el conjunto de gestiones que tienen el objetivo de organizar y diseñar las tareas necesarias a realizar de forma eficiente y precisa. Una correcta planificación es fundamental para garantizar la calidad de los resultados.

En este caso, la planificación del trabajo se limita a las tareas previas relacionadas con las observaciones GNSS y taquimétricas, y al mapeo móvil.

En cuanto a las observaciones GNSS, es imprescindible la búsqueda de una buena ubicación para los levantamientos estáticos. Cerca de las bocas de túnel es común encontrar pilares con centrados forzosos, aunque en caso de no haberlos se realiza el levantamiento con trípode.

Las observaciones taquimétricas requieren de mayor planificación. Esto se debe a que, en este procedimiento, son las tareas más tediosas a realizar y, además, es cuando la seguridad de los operarios es muy reducida. Es importante cortar el tráfico en un carril del túnel para poder realizar el levantamiento taquimétrico con precisión y seguridad, o en caso de que el túnel sea de un solo carril, o muy estrecho, el corte de tráfico deberá de ser completo (problema poco probable). Se realizará una poligonal a lo largo de un lateral del túnel aprovechando para radiar ciertos puntos destacados.

Para la captura MM la planificación del trabajo se limita a conocer la zona de escaneo para detectar posibles impedimentos y localizar una zona para la calibración del sistema. Para esta fase ya no es necesario el mantener el tráfico cortado.

4.2.2 Observaciones GNSS

Una vez se tenga organizado todo el trabajo, el primer paso es el levantamiento GNSS por el método estático-relativo en postproceso de cuatro puntos. Estos se corresponden con los puntos inicial y final de la poligonal, y con dos referencias externas necesarias para poder realizar la orientación de una poligonal abierta encuadrada.

Para ello, y en caso de ser posible, es muy recomendable utilizar pilares de centrado forzoso, ya que estos aportan mayor estabilidad, lo que repercute en la calidad final de la medida (*figura 31*).



Figura 31. Receptor GNSS en pilar con centrado forzoso. Fuente: APGEO (Grupo EXCADE).

El tiempo de observación necesario para cada punto suele ser de aproximadamente 1 hora, aunque siempre es mejor que el responsable del levantamiento lo calcule determinando cuál es el mejor momento para realizarlo estudiando cuál es la mejor ventana de observación.

En caso de disponer de más de un equipo se pueden realizar varios de estos levantamientos a la vez para aumentar la eficiencia del procedimiento.

4.2.3 Observaciones taquimétricas

Una vez terminadas las observaciones satelitales, que sirven para la obtención de las coordenadas planimétricas y altimétricas de 4 puntos, se realiza el corte de tráfico y se inician los trabajos taquimétricos.

El objetivo de esta tarea es obtener las coordenadas de los puntos de control dentro del túnel. Para ello se realiza una poligonal abierta encuadrada por dentro del carril cortado (*figura 32*), aprovechando para radiar, desde cada una de las bases de la poligonal, una serie de puntos destacados (denominados así en el argot de la topografía por ser de gran utilidad en el desarrollo de un proyecto) que hacen la función de puntos de control o apoyo.

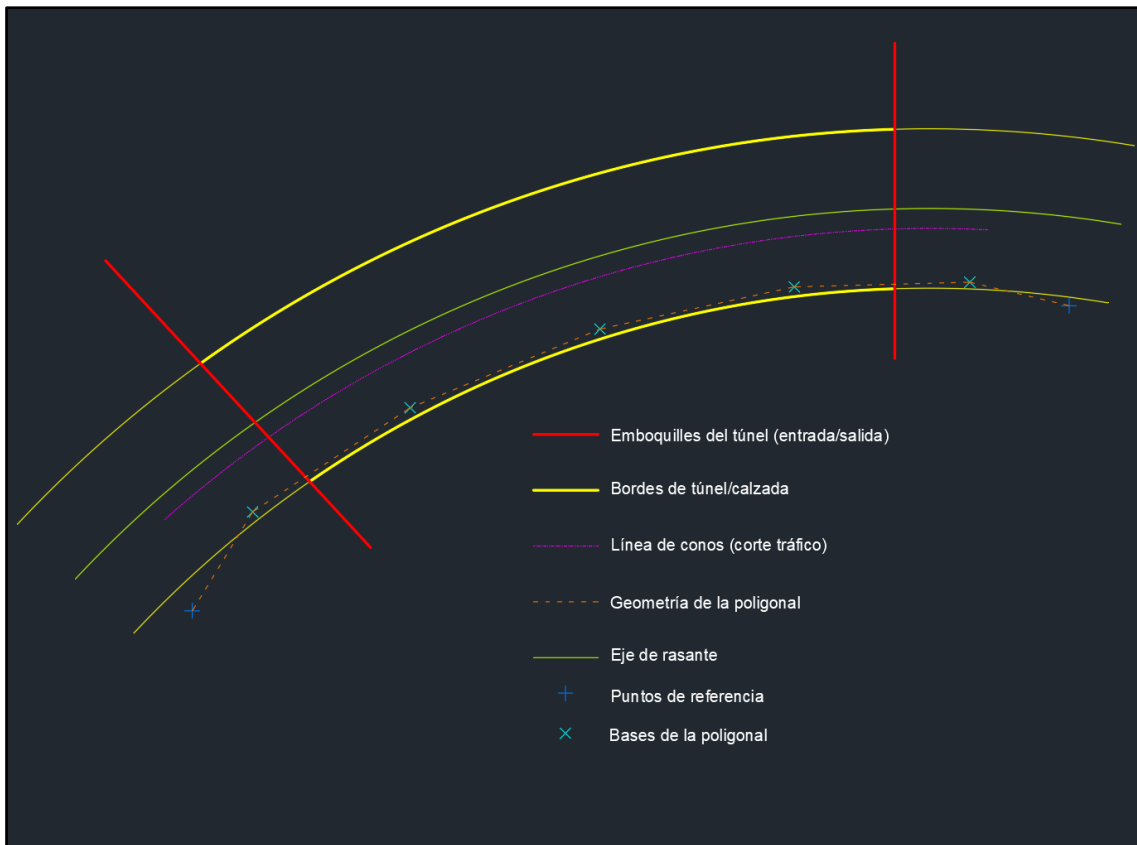


Figura 32. Croquis ejemplo de la poligonal a realizar. Fuente: Elaboración propia.

Simultáneamente a la aplicación de esos métodos que permiten la obtención de las coordenadas planimétricas de los puntos de interés, se realizan, además, nivelaciones trigonométricas con el objetivo de obtener las cotas (coordenadas altimétricas) de los puntos. De esta manera se contribuye a la eficiencia de los trabajos de campo.

El número de bases de la poligonal depende de la geometría y longitud del túnel, ya que un túnel curvo no va a permitir visuales tan largas como uno rectilíneo, y un túnel largo va a requerir de más bases porque el número de puntos de control necesarios es mayor. La ubicación de las bases es decisión del ingeniero responsable de la operación, siendo recomendable que la distancia entre ellas sea lo más homogénea posible para garantizar la calidad y precisión de la poligonal (explicado en el *apartado 2.2.3*).

Los puntos de control que se observan desde las bases de la poligonal han de estar en posición de zig-zag (*figura 33*). Esto hace que, en el posterior procesado, se puedan detectar más fácilmente deformaciones de la nube de puntos e imprecisiones en la captura. Además, esta práctica sirve como método de compensación del desplazamiento que puede sufrir la nube de puntos si sólo se utilizan como GCPs puntos de un solo lateral del túnel. Por la misma razón, dichos puntos de control han de colocarse a diferentes alturas con respecto a la rasante, obteniendo puntos correspondientes a la contrabóveda, hastiales y bóveda del túnel, aleatoriamente (*figura 34*).

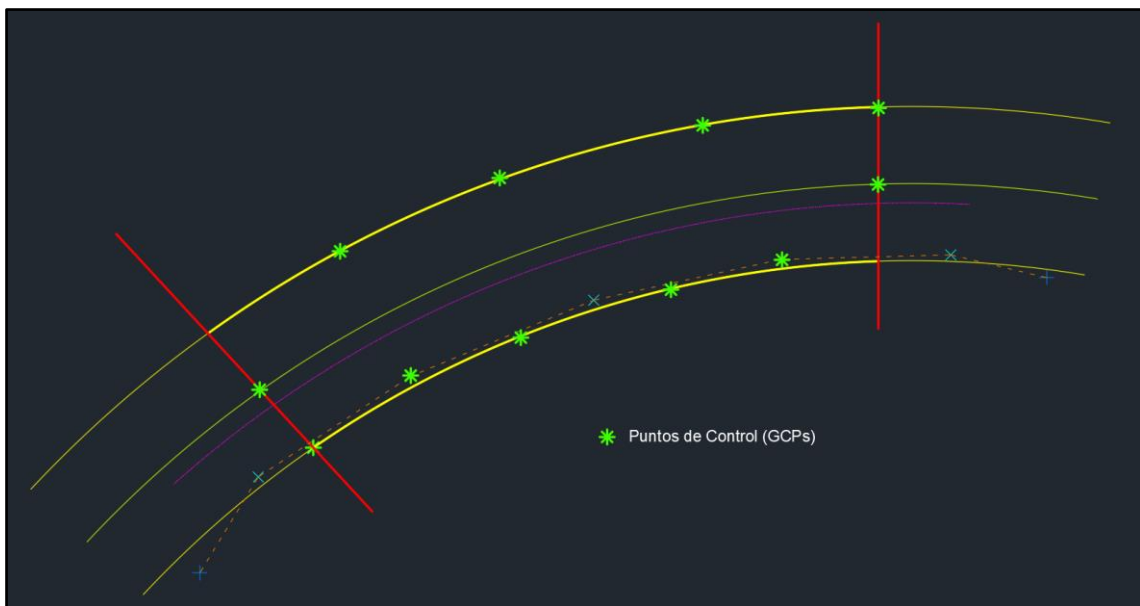


Figura 33. Croquis ejemplo de una posible ubicación de los GCPs. Fuente: Elaboración propia.

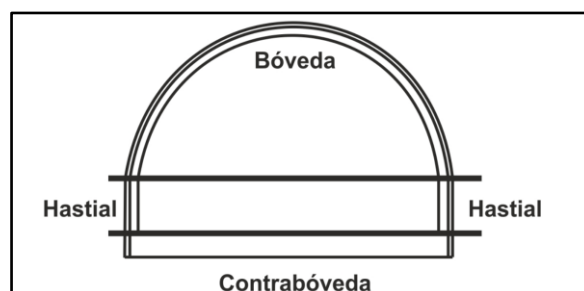


Figura 34. Esquema de los elementos que conforman la sección de un túnel. Fuente: Informe académico sobre intervención de bomberos en túneles [15].

También se debe tener en cuenta la posibilidad de incluir puntos en los emboquilles del túnel, así como bases de la poligonal como GCPs (*figura 33*). Esto ayuda a controlar la posible deformación longitudinal de la nube de puntos.

Los levantamientos topográficos en túneles (*figura 35*) van asociados a mayor error debido a que las fuentes de error en estos entornos son más numerosas que al aire libre. Es por ello que la ejecución de la poligonal requiere de una alta concentración para evitar errores groseros de los operarios y de la aplicación de técnicas, como la de Bessel, para eliminar los errores sistemáticos [16]. La propagación del error en una poligonal provoca que el error final, denominado error de cierre, la haga inválida y que se tenga que repetir el proceso de medición de la misma.



Figura 35. Fotografía de la ejecución de una poligonal en el interior de un túnel. Fuente: APGEO (Grupo EXCADE).

Es muy importante que los puntos de control queden señalizados con elementos antirreflectantes de fácil identificación. La razón de esto es que en el posterior

levantamiento LiDAR que realice el sistema Mobile Mapping, dichos puntos tienen que quedar capturados para su referenciación en el procesado. En caso de usar señales reflectantes (como los prismas topográficos utilizados en la poligonal) el láser se refleja en ellos haciendo que no quede capturado el punto. No es imprescindible usar dianas, también se pueden utilizar plantillas para marcar los puntos con *spray*, por ejemplo (figura 36).



Figura 36. Señal de un GCP marcada con pintura. Fuente: APGEO (Grupo EXCADE).

4.2.4 Captura Mobile Mapping

En este punto lo normal es que el tráfico vuelva a la normalidad y que todos los trabajos por técnicas topográficas convencionales hayan terminado.

Lo primero es el montaje del equipo (figuras 37 y 38). Esto se debe hacer en una zona segura y se recomienda que sea en el mismo lugar (o muy próximo) al de calibración (procedimiento explicado más adelante). Los pasos y recomendaciones para hacerlo se recogen en el *Anexo IV*.

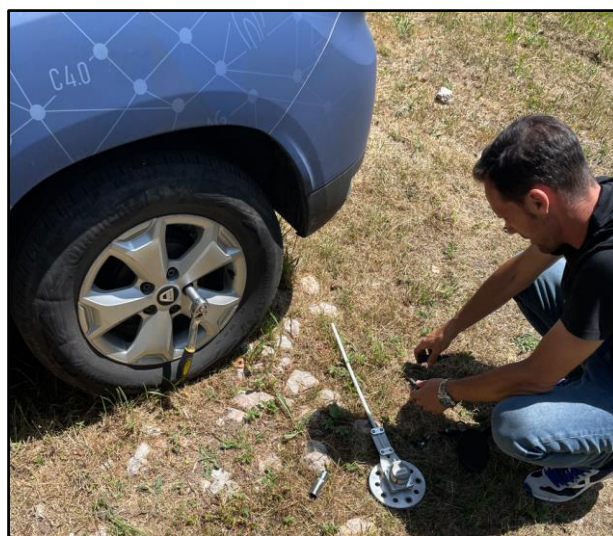


Figura 37. Fotografía del montaje del odómetro en la rueda. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 38. Fotografía correspondiente a la revisión de la correcta conexión del cableado.
Fuente: Elaboración propia.*

Es recomendable que, una vez montado el equipo, se limpien el sensor LiDAR y las cámaras porque es muy común que los insectos se hayan quedado incrustados en ellos. Una vez encendido el equipo también se debe comprobar el correcto funcionamiento del sistema panorámico de cámaras mediante el software propio de Ladybug, y configurar la frecuencia de toma de imágenes, que puede variar en función de la distancia o del tiempo.

El siguiente paso es la calibración del sistema. Este proceso consiste en realizar una aceleración de 0 a 30 km/h, un giro a izquierdas y otro a derechas con el vehículo. Es recomendable que este proceso se realice de la forma más exagerada posible para garantizar que, sobre todo, la IMU detecte de una forma muy clara dichos movimientos. Durante este proceso el sistema aprovecha para activar las observaciones GNSS realizando primero un levantamiento estático de prueba (tanto satelital como de navegación inercial), e iniciando, a continuación, las lecturas de posición RTK. En el *Anexo V* se expone un ejemplo de cómo se puede hacer una calibración aprovechando los diferentes elementos viales que se pueden encontrar.

Una vez terminado el proceso de calibración, se inicia la captura MM (*figura 39*), en la que el conductor debe conducir a una velocidad máxima de 90 km/h manteniendo una

conducción lo más homogénea y suave posible. En función de las características propias de cada proyecto esta velocidad puede que tenga que ser menor. Concretamente, para los entornos propios de este documento, cuando la longitud del túnel sea considerada muy elevada, o con mucho riesgo de generar derivas, la velocidad deberá ser menor para aprovechar ese mayor detalle que se consigue en las correcciones a realizar en la fase de procesado. Esto lo debe estudiar y determinar el responsable de la operación basándose en las características geométricas del eje del túnel.



*Figura 39. Fotografía de un proceso de captura Mobile Mapping en el interior de un túnel.
Fuente: COTESA (Grupo TECOPY) [17].*

Durante el proceso de observaciones HDS la labor del operario encargado del sistema de mapeo móvil es verificar el correcto funcionamiento del equipo para detectar posibles errores de captura de datos e imprecisiones, revisando ciertos parámetros relativos a los datos registrados por los diferentes sensores en tiempo real (*figuras 40 y 41*), que son:

- Datos relativos al odómetro: Mediante el sistema informático el operario puede consultar la distancia recorrida.
- Datos referidos a la IMU: El operario puede visualizar en pantalla unos gráficos relativos a las aceleraciones, fuerzas y cambios de posición que representan los movimientos registrados por el sistema de navegación inercial.
- Cobertura GNSS: En este caso la revisión de la cobertura GNSS no es necesaria ya que, una vez entrado en el túnel, no hay cobertura satelital.
- Captura LiDAR: El operario puede ir visualizando la captura en tiempo real. La nube de puntos que puede ver no tiene todo el detalle, porque simplemente es una previsualización para ir interpretando y verificando el estado del escaneo.

- Fotogramas capturados: Todos los fotogramas capturados van saliendo por pantalla. Normalmente esto va tan rápido que es imposible verificar que las imágenes se estén obteniendo con calidad, por lo que lo único a verificar en este caso es que las cámaras estén capturando los fotogramas.



Figura 40. Fotografía de la pantalla del sistema informático donde se van revisando los parámetros. Fuente: Elaboración propia.

Para concluir con el proceso de medición, el operario finaliza el escaneo desde el sistema informático. Para ello, es conveniente que lo haga en una zona en la que ya haya cobertura GNSS. Esto ayuda a detectar la deriva generada, ya que en el posterior procesado (apartado 4.3.3) se podrá percibir en la nube de puntos un salto (correspondiente a la recuperación de la correcta geoposición de la trayectoria). Además, en este punto es necesario repetir el proceso de calibración para que el sistema realice un pequeño ajuste de las observaciones. En este momento todos los

datos brutos quedan guardados en la ruta de almacenamiento elegida por el operario (en el módulo de registro).



*Figura 41. Fotografía de la vista del operario responsable de la captura durante la misma.
Fuente: Elaboración propia.*

En determinadas ocasiones, la cantidad de datos obtenidos se puede aumentar realizando varias pasadas, a modo de redundancia, en pro de reducir el error y aumentar la precisión final del trabajo. La idea es que varios escaneos se pueden unir para obtener una nube de puntos con más información y de mejor calidad, tal y como se suele hacer en los levantamientos LiDAR estáticos.

Es importante destacar que, si se realizan varias pasadas, estas deben de seguir distintos procesos de medición. Esto quiere decir que cada captura Mobile Mapping debe corresponder a una única pasada (*figura 42*). La razón está directamente relacionada con la problemática principal que trata este documento. El incremento del error generado por el sistema de navegación inercial aumenta con la distancia recorrida. La teoría de propagación de errores implica que realizar varias pasadas en una misma captura no tenga sentido, pero que, realizar varias pasadas en varias capturas contribuye a que se pueda realizar una compensación de errores de deriva en el procesamiento de datos al realizar la construcción (unión) de ambas nubes de puntos obtenidas.

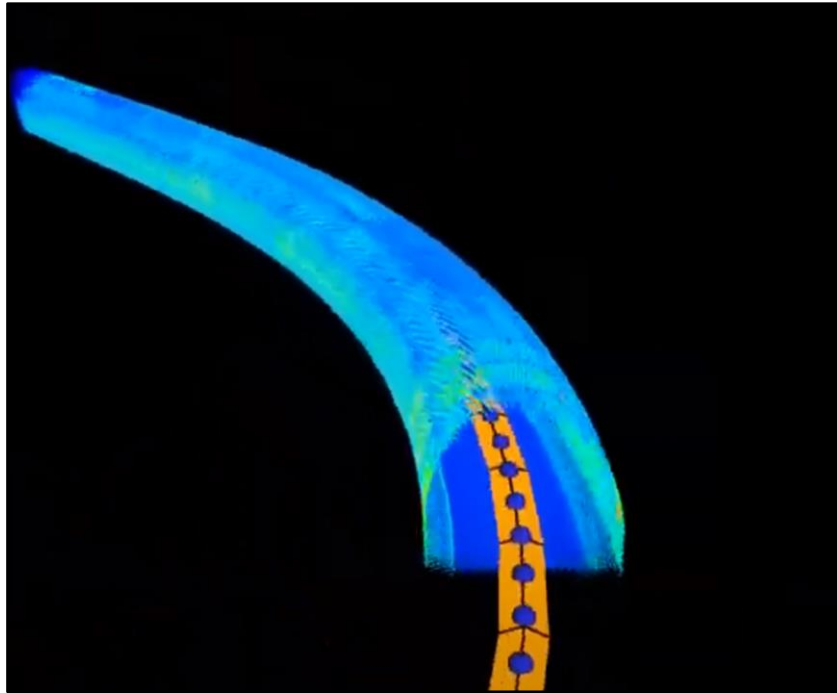


Figura 42. Fragmento de una captura LiDAR con Mobile Mapping en un túnel. Fuente: COTESA (Grupo TECOPY) [17].

En el *Anexo IV* se recogen más detalles junto con algunas recomendaciones específicas sobre lo explicado en este apartado.

4.3 Trabajo de gabinete

4.3.1 Postproceso GNSS

Para poder obtener la nube de puntos final (producto MM que requiere mayor precisión), lo primero es tener las coordenadas de los puntos de control en los que se apoya la captura de datos.

Por tanto, la primera tarea a realizar durante el trabajo de gabinete es la determinación de las coordenadas de los puntos observados por técnicas GNSS.

En este caso, el método utilizado es el relativo a los levantamientos de tipo estático-relativo en postproceso y por ello, además de las observaciones realizadas en campo, se necesitan otros datos, que son:

- Observaciones y coordenadas de, como mínimo, 3 estaciones de referencia pertenecientes a alguna red geodésica activa cercana a la zona de los puntos levantados. Estos datos se descargan del portal web de la red elegida.
- Efemérides precisas. Estos datos son los relativos a las órbitas satelitales, y permiten conocer la posición de los satélites. Facilitan el cálculo de las coordenadas de los puntos, además de hacerlas mucho más precisas. Estos

datos son accesibles desde muchas plataformas web. En este documento se recomienda el uso del portal CDDIS [18] perteneciente al IGS (Servicio GNSS Internacional).

Después del propio procesado, del que no se detalla más por no ser el tema principal en este documento, se realiza un ajuste de observaciones y se obtienen las coordenadas finales de los 4 puntos observados por técnicas GNSS.

Para realizar este procedimiento, en este documento, se utiliza el software Magnet Tools.

4.3.2 Cálculo de la poligonal y puntos de control

El paso siguiente es el cálculo de las coordenadas de las bases de la poligonal, que se hace siguiendo en orden los procedimientos conocidos como corrida de acimutes, compensación de acimutes y ajuste por mínimos cuadrados.

Para realizar estos cálculos, en este documento, se propone el uso del script de Matlab desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia, que también realiza el cálculo de la nivelación trigonométrica asociada a la poligonal [19].

Una vez calculadas las coordenadas de los puntos que conforman la poligonal se han de calcular los puntos destacados radiados y para ello, lo más común es aplicar directamente las ecuaciones de radiación y nivelación trigonométrica, mencionadas en el marco teórico, con la ayuda de una hoja de cálculo Excel, o similar.

Una vez obtenidas las coordenadas de todos los puntos de control ya se está en disposición de empezar con las tareas de procesado propias del Mobile Mapping.

4.3.3 Procesado Mobile Mapping

Para procesar los datos brutos del sistema Mobile Mapping asociado al equipo IP-S3 se utiliza el software Magnet Collage. Este apartado no pretende ser una guía de los pasos a seguir con dicho software, sino una explicación del procedimiento.

Una vez cargados los datos, lo primero que se hace es la estimación de la trayectoria del vehículo, que se calcula combinando los datos GNSS, los datos de la navegación inercial y los datos del odómetro recogidos en campo por el MM. Esto se realiza aplicando el filtro de Kalman (*figura 43*), que es un algoritmo que se basa en la

determinación de la posición por técnicas de interpolación, y que cuando no tiene datos de posicionamiento satelital le da más importancia en los cálculos a los datos de la IMU y del odómetro [20]. Aun así, el resultado de esta operación es la trayectoria afectada por el error de deriva debido a la pérdida de señal GNSS.

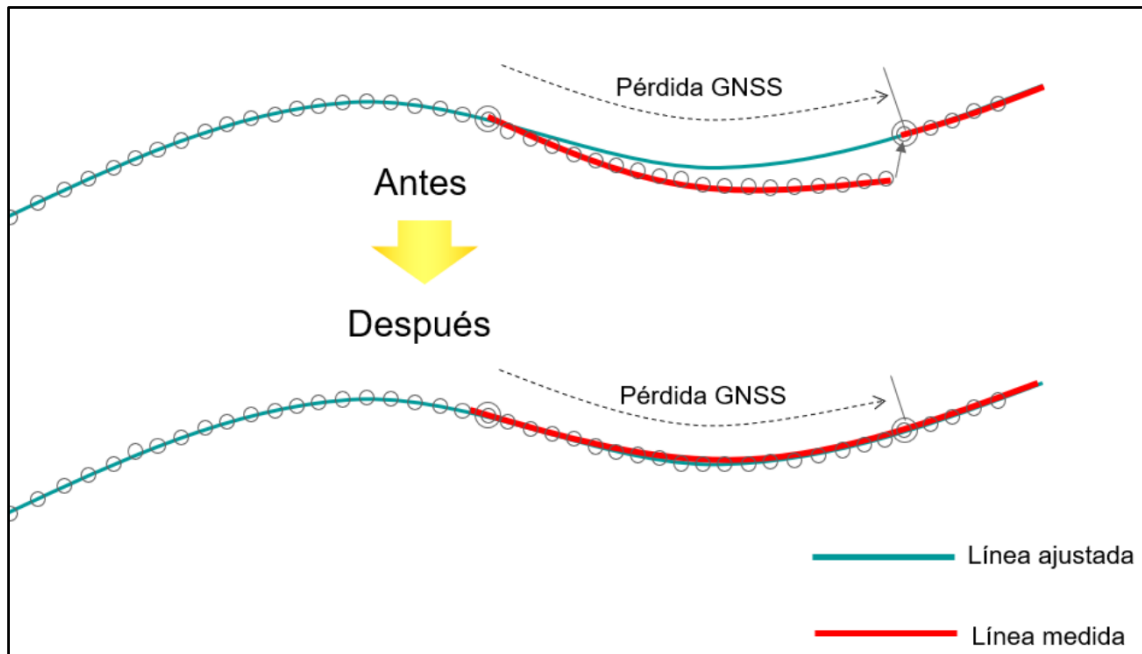


Figura 43. Supuesto funcionamiento del filtro de Kalman. Fuente: Documentación de Topcon sobre el procesado Mobile Mapping asociado al equipo IP-S3 con Magnet Collage [20].

Al terminar la estimación de la trayectoria se generan automáticamente los escaneos, y se posicionan en función de la geometría resultado de dicha estimación. Este paso se debe realizar para cada una de las pasadas de un mismo proyecto.

Ahora, en caso de haber realizado varias pasadas, se pueden observar discrepancias geométricas entre las distintas nubes de puntos (se pueden interpretar superficies dobles). Estos errores nunca deben de ser muy exagerados, y suelen tender a incrementarse en los extremos de las trayectorias. Si se observan discrepancias muy evidentes es recomendable que se repita la captura Mobile Mapping, ya que alguna de las pasadas está asociada a un error muy alto. De todos modos, si las discrepancias están dentro de un margen (interno del software) se pueden solucionar aplicando un algoritmo de ajuste, que consiste en buscar puntos homólogos de las nubes de puntos. El software apoya los puntos de mayor RMS (error medio cuadrático) sobre sus respectivos homólogos de menor RMS, dando lugar a nubes de puntos reposicionadas, tal y como se muestra en la figura 44. Este procedimiento puede y debe repetirse varias veces en bucle para mitigar lo máximo posible este error de dobles superficies.

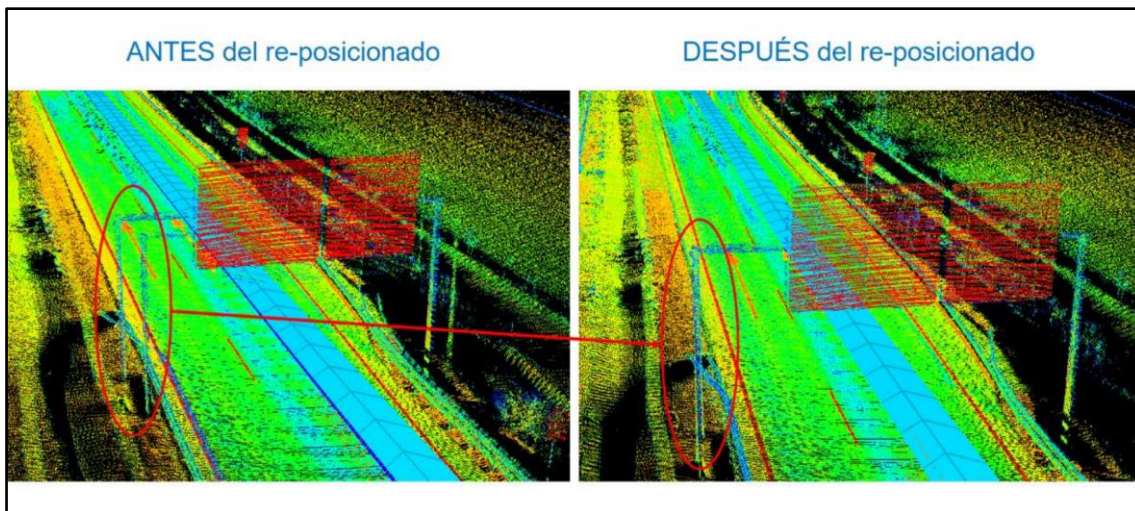


Figura 44. Comparación de nubes de puntos previas y posteriores al reposicionado por puntos homólogos. Fuente: Documentación de Topcon sobre el procesado Mobile Mapping asociado al equipo IP-S3 con Magnet Collage [20].

Al realizar esta operación hay que tener mucho cuidado, ya que es muy común confundir las superficies dobles que se generan por error con la cara de delante y la de detrás de algunos elementos escaneados, correspondiéndose esto último con el grosor de dichos elementos.

El siguiente paso es la revisión de la nube de puntos comparándola con los puntos de control. Teóricamente, la nube de puntos ya debería de coincidir con los GCPs, pero si la captura está afectada por el error de deriva no es así. Para ello, lo mejor es colocar la nube de puntos en una vista general, y de forma longitudinal cenital, de manera que se pueda apreciar la longitud total del túnel, ya que de esta manera se facilita la visualización de la desviación de la nube de puntos con respecto a los puntos de control.

Una vez visto sobre la práctica el problema de la desviación geométrica de la nube de puntos, el procedimiento a seguir es ir encajando los puntos de control, de manera que la nube se adapte a ellos (figura 45). El software, en realidad, no adapta la nube de puntos, sino que adapta la trayectoria, de manera que la nube de puntos que se genera coincide finalmente con los puntos de control.

Llevando a cabo este procedimiento, la nube de puntos resultante que, en caso de ser exportada, es considerada como nube de puntos final, puede llegar a tener una precisión absoluta de entre 1 y 5 centímetros (como máximo). Aun así, es recomendable realizar revisiones y repeticiones de este procedimiento para garantizar que el resultado es de calidad.

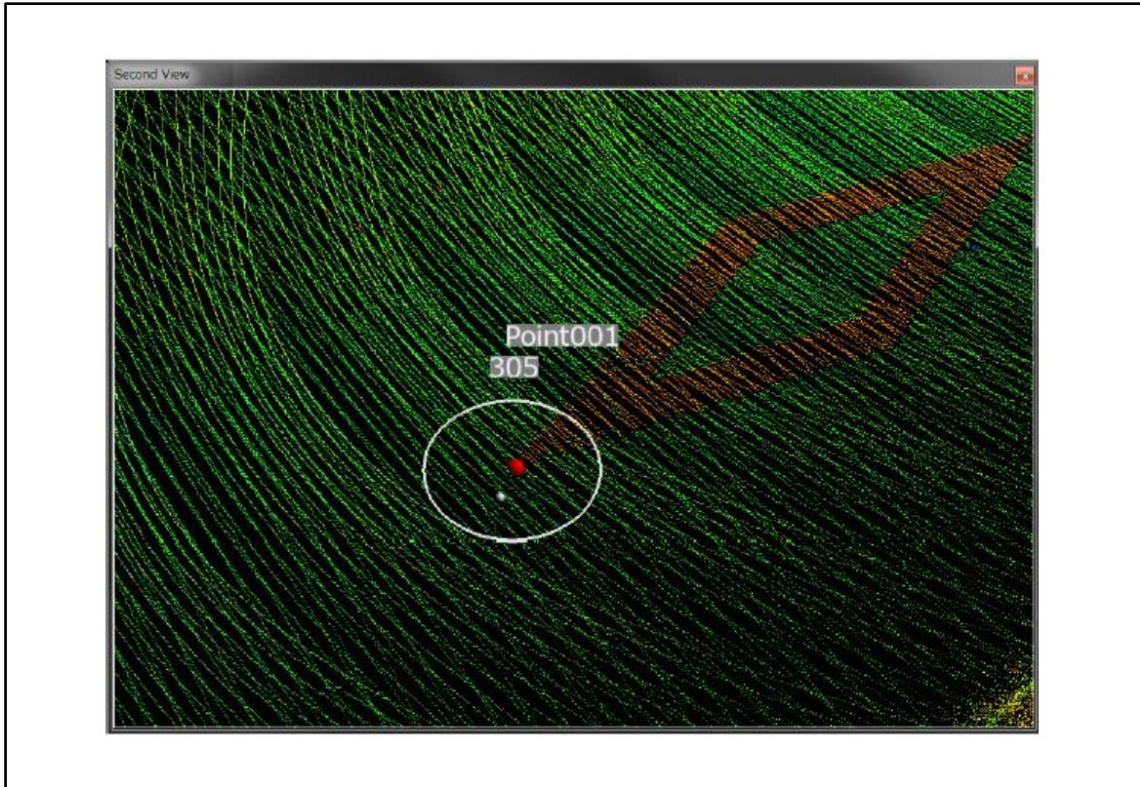


Figura 45. Captura de pantalla del ajuste de una nube de puntos a un punto de control. Fuente: Documentación de Topcon sobre el procesado Mobile Mapping asociado al equipo IP-S3 con Magnet Collage [20].

En este punto la nube de puntos ya está geoméricamente preparada, y es completamente válida para la generación de numerosos posibles entregables.

Algo que suele ser de interés son las imágenes panorámicas, y es por ello que Magnet Collage tiene una opción que sirve para generar dichas imágenes, que en este caso son 360°. Esto lo hace realizando una reconstrucción a partir de las imágenes capturadas en campo y que, normalmente, se utilizan para proyectar las imágenes en la nube de puntos y conseguir que esta quede coloreada (figura 46).



Figura 46. Ejemplo de nube de puntos coloreada, y de imagen panorámica generada a partir de los fotogramas de campo. Fuente: Documentación de Topcon sobre el procesado Mobile Mapping asociado al equipo IP-S3 con Magnet Collage [20].

En determinadas ocasiones, alguno de estos pasos no consigue los resultados esperados en alguna zona de la nube de puntos aunque se repita varias veces el proceso. Esto se debe a la falta de homogeneidad en la captura MM o en la disposición de los GCPs. La solución a esto, no siempre recomendable (depende de la finalidad del trabajo), es ir haciendo cortes de la nube de puntos (denominados clips en Magnet Collage) y editando, por coincidencia de puntos vecinos la geometría de la nube de puntos. Esto no es una práctica que se pueda hacer a gran escala, ya que el resultado se puede considerar de dudosa exactitud con respecto a la realidad. Este proceso se puede hacer manualmente o utilizando las herramientas propias del propio software.

Por último se realiza la limpieza de la nube de puntos, que consiste en eliminar ruido y elementos capturados que no son de interés.

Con esto finaliza el procedimiento a seguir, correspondiente con la metodología propuesta en este documento, para la realización de levantamientos Mobile Mapping en el interior de túneles garantizando una alta precisión y calidad de los resultados. En la *figura 47* se expone un ejemplo de los resultados que se pueden obtener.

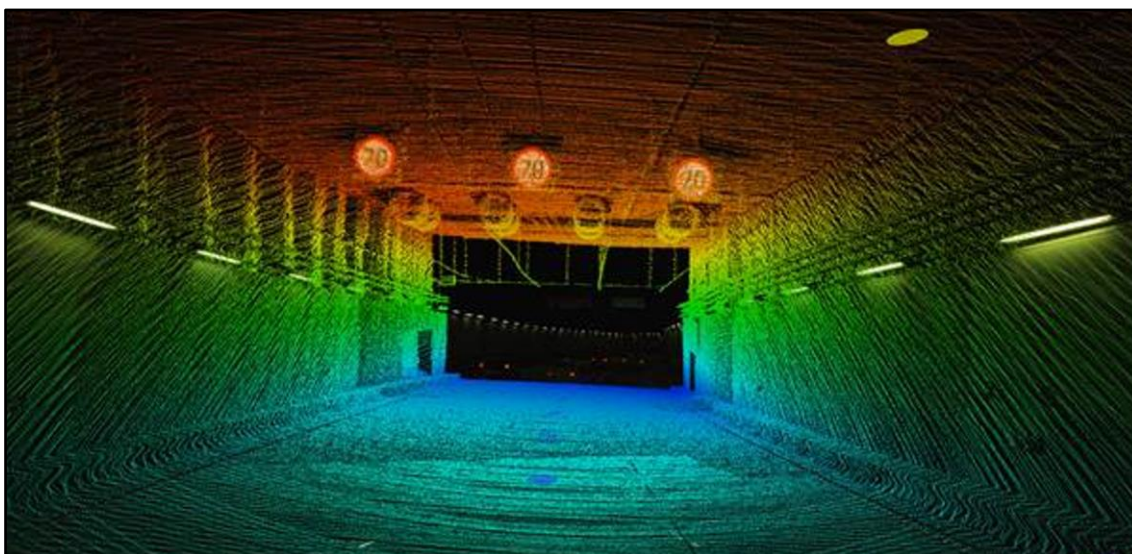


Figura 47. Captura de un fragmento de ejemplo de resultado que se puede obtener aplicando este procedimiento. Fuente: Ayuntamiento de Madrid.

Es importante repetir que este procedimiento está optimizado para el uso de los recursos referenciados. Aun así, el empleo de esta metodología se puede adaptar a recursos similares.

5. COSTES DE APLICACIÓN

En este epígrafe, se realiza una estimación del coste de aplicación de esta metodología, de modo que se pueda tener en cuenta para la presupuestación de algún determinado trabajo que conlleve el uso de la misma.

Para ello, se ha realizado un análisis detallado de los precios que se ofertan en este sector, en los cuales se basa lo que se expone a continuación.

5.1 Presupuesto descompuesto

5.1.1 Equipos y materiales

Tal y como se detalla en el *apartado 3*, los recursos materiales son el sistema MM, el instrumental topográfico de apoyo, y el hardware y software de gabinete.

Por lo tanto, cada uno de esos elementos tiene que ir reflejado en el presupuesto con su precio asociado a una variable temporal de uso. El alquiler de los equipos de topografía se presupuesta por días o jornadas de trabajo, mientras que las herramientas de software, empleadas en los procesos de gabinete, se presupuestan por horas. El hardware de gabinete es una excepción ya que, en las ofertas presupuestarias, no se suele contemplar como recurso material, sino como parte de los costes indirectos (*apartado 5.1.3*). En la *Tabla 5* se exponen los precios de estos recursos, en los que se incluyen sus accesorios necesarios.

Tabla 5. Precios de los equipos y software necesarios.

EQUIPO/SOFTWARE	PRECIO
Equipo Mobile Mapping: Topcon IPS3	2.500 €/jornada
Equipo GNSS: Topcon HiPer VR	150 €/jornada
Estación Total: Leica TS16	200 €/jornada
Procesado MM: Magnet Collage	25 €/hora
Procesado GNSS: Magnet Tools	20 €/hora
Cálculo: Matlab	10 €/hora

En el caso de los elementos que se utilizan para materializar los puntos de control, estos se cobran por unidad por ser materiales consumibles o finitos, es decir que una vez utilizados quedan instalados en el lugar de trabajo, o se imposibilita su uso para futuros trabajos [21]. El precio de estos elementos se expone en la *Tabla 6*.

Tabla 6. Precios de los materiales finitos necesarios.

MATERIAL FINITO	PRECIO
Dianas para la materialización de GCPs	2,5 €/unidad

5.1.2 Mano de obra

Conforme a lo explicado en apartados anteriores, los recursos humanos necesarios para la aplicación de esta metodología son un Ingeniero Técnico en Topografía o Graduado en Ingeniería Geomática y un Auxiliar Técnico en Topografía. Los costes asociados a este tipo de recursos se expresan en función de las horas de trabajo a emplear en el trabajo. Estos se exponen en la siguiente tabla (*Tabla 7*).

Tabla 7. Precios del personal necesario.

PERSONAL	PRECIO
Ingeniero Técnico en Topografía	60 €/hora
Auxiliar Técnico en Topografía	30 €/hora

5.1.3 Otros costes

Este grupo se compone por los costes de los desplazamientos, de los medios auxiliares, y los costes indirectos.

Los desplazamientos son los movimientos de ida al emplazamiento del proyecto y de vuelta a la oficina (o punto de partida). Estos se cobran en función de la distancia, y nunca se consideran como tal las trayectorias seguidas cuando el sistema Mobile Mapping está en funcionamiento. En la *Tabla 8* se expone su precio.

Tabla 8. Precio de los desplazamientos.

OTROS COSTES	PRECIO
Desplazamientos	0,40 €/km

En este documento, se consideran medios auxiliares los costes asociados a la gestión financiera y de planificación de la aplicación de la metodología en un determinado proyecto. No tienen un precio directamente asociado a ellos, sino que se cobran como porcentaje de la suma presupuestaria de todos los elementos anteriores.

Los costes indirectos son los que no se pueden atribuir directamente en su totalidad a la aplicación de esta metodología, pero que están relacionados con ella. Algunos ejemplos de costes indirectos son la electricidad, los vehículos, los seguros, etc.

En la siguiente tabla (*Tabla 9*) se exponen los valores porcentuales de referencia para los medios auxiliares y los costes indirectos.

Tabla 9. Valores porcentuales de los medios auxiliares y costes indirectos.

OTROS COSTES	VALOR PORCENTUAL
Medios auxiliares	10 % del total
Costes indirectos	3 % del total

5.1.4 Modelo presupuestario

El presupuesto final se elabora a partir de la suma de todas las partidas presupuestarias anteriores, añadiéndoles las tasas impositivas (impuestos indirectos) que gravan las transacciones comerciales (venta de productos o servicios) en el territorio dónde se desarrollan [22].

En este documento solo se contempla como impuesto indirecto para el presupuesto el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA), que en España es del 21%. En otros países también se utiliza esta estructura impositiva al consumo, pero reciben otros nombres y otros tipos impositivos [22].

El modelo presupuestario que se propone en este apartado no está vinculado a ningún trabajo concreto, y por tanto sus partidas quedan expresadas en función de sus unidades de cobro. Esto quiere decir que cada trabajo concreto, que implique el uso de esta metodología, se puede ofertar teniendo en cuenta los precios de la *Tabla 10*, y calculando la cuantía total basándose en la estimación de tiempo, materiales finitos y desplazamientos pertinentes.

Tabla 10. Modelo presupuestario.

MODELO PRESUPUESTARIO PARA PRESUPUESTO DESCOMPUESTO	
COSTE	PRECIO
Equipos y materiales:	
Topcon IPS3 (MM)	2.500 €/hora
Topcon Hiper VR (GNSS)	150 €/hora
Leica TS16 (ET)	200 €/hora
Magnet Collage	25 €/hora
Magnet Tools	20 €/hora
Matlab	10 €/hora
Dianas GCPs	2,5 €/unidad
Mano de obra:	
Ingeniero Técnico en Topografía	60 €/hora
Auxiliar Técnico en Topografía	30 €/hora
Otros costes:	
Desplazamientos	0,40 €/km
Medios Auxiliares	10 % de la suma de los anteriores
Costes Indirectos	3 % de la suma de los anteriores
IVA	21 % del total

5.1.5 Ejemplo de oferta

A modo de ejemplo, se presenta, en este apartado, la oferta presupuestaria para la aplicación de esta metodología en un túnel de 300 metros, que está a 40 kilómetros de la oficina, y para el que se estima una jornada (8 horas) de trabajo de campo, y 15 horas de procesamiento de datos (14 horas de Mobile Mapping + 1 hora de procesamiento GNSS y cálculo de poligonal). Además, se calcula que se necesitan materializar un total de 11 puntos de control.

Lo primero a realizar es el cálculo del coste los alquileres de los equipos y software (Tabla 11). Para ello, hay que tener en cuenta que los equipos de campo se necesitan durante una jornada completa, el Magnet Collage durante 14 horas, y el Magnet Tools y Matlab durante media hora cada uno.

Tabla 11. Cálculo del coste de los alquileres de equipos y software.

EQUIPO/SOFTWARE	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTE
Topcon IPS3 (MM)	2.500 €/jornada	1	2.500 €
Topcon HiPer VR (GNSS)	150 €/jornada	1	150 €
Leica TS16 (ET)	200 €/jornada	1	200 €
Magnet Collage	25 €/hora	14	350 €
Magnet Tools	20 €/hora	0,5	10 €
Matlab	10 €/hora	0,5	5 €
SUMA			3.215 €

El cálculo del coste de los materiales finitos es el siguiente (Tabla 12).

Tabla 12. Cálculo del coste de los materiales finitos.

MATERIALES FINITOS	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTE
Dianas	2,5 €/unidad	11	27,50 €
SUMA			27,50 €

El cálculo relativo al coste de la mano de obra es el expresado en la siguiente tabla (Tabla 13), en el que se tiene en cuenta que la mano de obra del ingeniero técnico en topografía implica la dedicación temporal tanto de los trabajos de campo, como de los de gabinete, mientras que la del auxiliar técnico en topografía solo es necesaria en los trabajos de campo.

Tabla 13. Cálculo del coste de la mano de obra.

PERSONAL	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTE
Ingeniero Técnico en Topografía	60 €/hora	23	1.380 €
Auxiliar Técnico en Topografía	30 €/hora	8	240 €
SUMA			1.620 €

El coste del desplazamiento se expone en la siguiente tabla (Tabla 14).

Tabla 14. Cálculo del coste de los desplazamientos.

TIPO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTE
Desplazamientos	0,40 €/km	80 (ida y vuelta)	32 €
SUMA			32 €

A continuación (*Tabla 15*), el cálculo del coste de los medios auxiliares y del coste indirecto.

Tabla 15. Cálculo del coste de los medios auxiliares y del coste indirecto.

OTROS	PORCENTAJE	COSTE
Suma de los anteriores		4.894,50 €
Medios Auxiliares	10 %	489,45 €
Suma parcial		5.383,95 €
Costes Indirectos	3 %	161,52 €
SUMA		5.545,47 €

Por último, para obtener el presupuesto final se calcula el IVA (*Tabla 16*).

Tabla 16. Cálculo del IVA y cuantía final.

IMPUESTO	PORCENTAJE	COSTE
Suma de los anteriores		5.545,47 €
Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA)	21 %	1.164,55 €
SUMA		6.710,02 €

Por lo tanto, el total presupuestado en la oferta es de **SEIS MIL SETECIENTOS DIEZ EUROS CON DOS CÉNTIMOS (6.710,02 €)**.

Este precio final puede ser utilizado como orientación del coste de la contratación de un servicio de este tipo, ya que las variables ejemplo empleadas para el cálculo se pueden considerar como valores medios de la mayoría de los casos reales que se pueden plantear.

6. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

En este epígrafe se recogen las conclusiones resultantes de la elaboración de este Trabajo Fin de Grado. Aunque se cree necesario dividirlo en varios apartados, previamente, es importante destacar que este proyecto cumple con los objetivos planteados:

- Se desarrolla una metodología para procesos de medición Mobile Mapping que aumenta la precisión y el nivel de fiabilidad en interior de túneles.
- Se contribuye a la innovación tecnológica de los procesos geomáticos, dando especial importancia a que innovar no es solo crear nuevas tecnologías, sino que también pasa por desarrollar soluciones combinando el uso de tecnologías ya existentes.

6.1 Estado de la aplicación de esta metodología

Este TFG se desarrolla durante el periodo de prácticas que el autor realizó en el departamento de topografía y oficina técnica de la empresa EXCADE, SL. En este periodo no se pudo aplicar esta metodología por falta de oportunidad, ya que no surgieron trabajos en los que la empresa pudiera aplicarla.

De todos modos, aunque todavía no se haya podido plantear ningún trabajo que siga este procedimiento, sí que se han ido adoptando ciertas prácticas propias del mismo.

La más destacable es el uso de las bases de una poligonal como puntos de control, que ya supone una mejora de la precisión absoluta de los entregables finales muy notoria. Debido a esto, la motivación de la empresa por ampliar el uso de esta metodología en este tipo de escenarios va en aumento.

El único inconveniente que afecta negativamente a estas pruebas es la propagación de errores a lo largo de la poligonal. Los errores, por muy mínimos que sean, se van propagando por dicha geometría haciendo que, cuando el escenario es un túnel de longitud muy considerable (aproximadamente a partir de un km), el error de cierre que se obtiene en el cálculo de la poligonal es intolerable, lo que implica que parte de los trabajos de campo se tengan que repetir.

Esto, ya explicado a lo largo de esta memoria con más detalle, es algo muy común que se ve agravado, sobre todo, en entornos subterráneos donde la presión de los operarios

y las propias condiciones hacen que se incremente la dificultad para una correcta ejecución de las tareas de campo.

Se prevé que en el futuro se presente la oportunidad de aplicar la metodología propuesta, con la esperanza de la obtención de buenos resultados, de calidad y precisos que, basándose en las pruebas de algunas fases y recomendaciones de esta metodología, tiene una probabilidad de éxito muy alta.

6.2 Conclusiones sobre la metodología propuesta

En relación con la metodología desarrollada, se concluye que su aplicación supone una mejora de la precisión en los resultados de los levantamientos Mobile Mapping en interior de túneles. La precisión relativa se puede reducir hasta valores que están entorno al centímetro, y la precisión absoluta puede llegar a bajar de los 5 centímetros. Esto es prueba de que se soluciona la problemática de la que surge la idea de este proyecto, que se consigue gracias a un proceso de medición muy cuidadoso y con muchas observaciones redundantes, sobre todo en el levantamiento taquimétrico. Esto último suprime algunas de las ventajas del MM, como son la reducción de tiempo de trabajo de campo o la facilidad de adquisición de observaciones.

De todos modos, la metodología desarrollada en este TFG implica una mejora muy sustancial en los levantamientos Mobile Mapping en el interior de túneles. No usar esta metodología implica seguir obteniendo resultados afectados por la problemática de deriva, provocada por la dependencia de un sistema de navegación inercial que, hoy en día, todavía no es lo suficientemente preciso como para ser la base de posicionamiento en trabajos de este tipo.

Para un túnel con las características geométricas en las que el mapeo móvil tiene el problema sobre el que se redacta este documento, existen otras tecnologías que se pueden utilizar. Un ejemplo de ellas es el LiDAR estático, porque con esta tecnología no existiría el problema de deriva, aunque también se tendrían que utilizar puntos de control (necesarios para georreferenciar), pero en menor medida. La precisión absoluta que se puede obtener con el láser escáner estático está entorno al centímetro y la facilidad de obtener dicha precisión es mucho mayor, destacando el menor tiempo de trabajo de gabinete que conlleva aunque, por el contrario, el tiempo necesario para la captura de datos en campo es mucho mayor.

Con todo esto, se llega a la conclusión de que, cuando se pretende obtener una precisión absoluta elevada, las ventajas que presenta el Mobile Mapping sobre otras

metodologías HDS no son tan evidentes respecto a otras tecnologías que comparten campo de actuación, y la decisión del uso de una u otra depende de las necesidades y características propias de cada proyecto, siendo los estudios de viabilidad técnica y de viabilidad económica los más decisivos. Las casuísticas más comunes en túneles, que pueden servir de ayuda para entender esto son las siguientes:

- Se necesita una densidad de datos muy alta y de alta precisión. En este caso, el empleo de la tecnología de mapeo móvil generalmente no tiene mucho sentido. El empleo de un equipo LiDAR estático (ej.- Topcon GLS2000) o móvil de tipo SLAM (ej.- Leica BLK2GO y/o Leica BLK2FLY) es más coherente ya que, realmente, el tiempo de los trabajos de campo que serían necesarios son muy parecidos y la facilidad para obtener resultados precisos es mucho mayor. Además, en muchos casos el presupuesto sería menor. Todo esto, teniendo en cuenta que en la mayoría de los trabajos en los que se necesita mucha precisión, las dimensiones del campo de observación son más reducidas (la necesidad de una captura masiva de un túnel entero con tanta precisión es poco común).
- Se necesita poca densidad de datos y una precisión alta. En este caso, la aplicación de técnicas HDS no supone ninguna ventaja, sino que lo más apropiado sería la realización de un levantamiento topográfico con estación total.

La conclusión final es que el Mobile Mapping todavía no se puede considerar la opción principal para cartografiar túneles, al no ser del todo viable y efectiva en este tipo de escenarios (existen excepciones, y por eso surge la necesidad del desarrollo de esta metodología). Aunque su uso cada vez esté más extendido, los avances científico-tecnológicos no son lo suficientemente significativos, y esto provoca que todavía sea necesario una mayor innovación, que posiblemente tenga que pasar por la mejora del funcionamiento de los equipos ya existentes con futuras actualizaciones de los mismos.

6.3 Futuras líneas de investigación

En caso de querer seguir con esta línea de investigación, se proponen las siguientes temáticas:

- Aplicación práctica de la metodología desarrollada en este trabajo.
- Desarrollo de un algoritmo basado en métodos *machine learning* (del inglés, aprendizaje máquina) que aporte una solución alternativa a la propuesta, con un enfoque de inteligencia artificial. Esto es algo que los softwares de procesado,

supuestamente, ya tienen implementado (algoritmo de Kalman, técnicas de SLAM...), pero en la práctica no funcionan bien.

- Desarrollo de un sistema de navegación inercial que aporte mayor precisión en el cálculo de posición a los sistemas Mobile Mapping.

7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] GEOGRAMA; *Mobile Mapping en túneles: la solución al desconocimiento de su trazado*; 2021. Recuperado el 5 de septiembre de 2023 (<https://www.geograma.com/blog/mobile-mapping-en-tuneles-la-solucion-al-desconocimiento-de-su-trazado/>).
- [2] eSMARTCITY; *Levantamiento por Mobile Mapping de los túneles de Madrid*; 2018. Recuperado el 5 de septiembre de 2023 (<https://www.esmartcity.es/comunicaciones/comunicacion-levantamiento-mobile-mapping-tuneles-madrid>).
- [3] CABO GÓMEZ, C.; *Algoritmos para la detección automática de elementos en entornos viales a partir de datos de escáneres láser móviles.*; Tesis Doctoral (Universidad de Oviedo); 2017. Accesible en: (<http://hdl.handle.net/10651/42649>).
- [4] GONZÁLEZ NISTAL, R.; *Aplicación de técnicas HDS a la medición de deformaciones en vigas sometidas a flexión. Caso práctico.*; PFC Ingeniería Técnica en Topografía (Universidad de Oviedo); 2016.
- [5] Aplicaciones Geomáticas (Grupo EXCADE); *APGEO*; 2023. Recuperado el 10 de septiembre de 2023 (<https://ap-geo.com/>).
- [6] DÁVILA MARTÍNEZ, F.J. y CAMACHO ARRANZ, E.; *Georreferenciación de documentos cartográficos para la gestión de archivos y cartotecas. Propuesta Metodológica*; Ibercarto; 2012. Accesible en: (<https://www.ign.es/web/ign/portal/cartoteca-articulos-ibercarto-georreferenciacion>).
- [7] *Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio de 2007.* (BOE de 29 de agosto de 2007). Accesible en: (<https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/27/1071>)
- [8] BERNÉ VALERO, J. L., ANQUELA JULIÁN, A.B., y GARRIDO VILLÉN, N.; *GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*; Valencia; Editorial Universidad Politécnica de Valencia; 2014.
- [9] XATAKA Ciencia; *¿Qué es un sistema de navegación inercial?*; 2011. Recuperado el 11 de septiembre de 2023

(<https://www.xatakaciencia.com/sabias-que/que-es-un-sistema-de-navegacion-inercial>).

[10] SHI, B., BAI, Y. ZHANG, S., ZHONG, R., YANG, F., SONG, S., LI, G.; *Reference-plane-based approach for accuracy assesment of mobile mapping point clouds*; Elsevier Science Direct; 2020. Accesible en doi: 10.1016/j.measurement.2020.108759.

[11] GONZÁLEZ-PUMARIEGA SOLÍS, P.; *Instrumentos y observaciones topográficas*; Apuntes (Grado en Ingeniería Geomática); Universidad de Oviedo; 2016.

[12] LEICA Geosystems; *Leica TS16: Estación Total Robotizada*; 2020. Recuperado el 16 de septiembre de 2023 (<https://leica-geosystems.com/es-es/products/total-stations/robotic-total-stations/leica-ts16>).

[13] TOPCON Positioning; *HiPer VR: Receptor GNSS versátil de alta tecnología*; 2018. Recuperado el 16 de septiembre de 2023 (<https://www.topconpositioning.com/es/gnss/receptores-gnss/hiper-vr>).

[14] TOPOTIENDA GLOBAL-GEOSYSTEMS; *Accesorios originales. Cuestión de Material. (Catálogo de accesorios Leica)*; 2016. Recuperado el 16 de septiembre de 2023 (https://topotienda.com/es/index.php?controller=attachment&id_attachment=141)

[15] BOTÍA NORTES, J.M.; *Intervención en túneles. Principios y sistemática de actuación.*; Formación Diaria (Coordinadora Unitaria de Bomberos); 2017. Accesible en: (<https://www.cubp.es/wp-content/uploads/2017/07/Intervenci%C3%B3n-en-t%C3%BAneles-Formaci%C3%B3n-Diaria.pdf>).

[16] COVIÁN REGALES, E., y PUENTE GARCÍA, V.; *Fundamentos del ajuste de observaciones topográficas*; Universidad de Oviedo; Editorial Textos Universitarios Ediuno; 2013.

[17] COTESA (Grupo TECOPY); *Proyecto Mobile Mapping en los túneles M-30 de Madrid.*; 2017. Recuperado el 25 de septiembre de 2023 (<https://www.youtube.com/watch?v=NbkaXgO6LIA>).

[18] National Aeronautics and Space Administration (NASA); *Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS)*; 2023. Recuperado el 26 de septiembre de 2023 (<https://cddis.nasa.gov/>).

[19] ROS VALIENTE, L.; *Script de Matlab para el cálculo y compensación de poligonales por el método de mínimos cuadrados*; Universidad Politécnica de Valencia.

[20] TOPCON Positioning; *Mobile Mapping IP-S3. Sistemas de Captura Masiva*; 2020.

[21] RAMÍREZ DE ARELLANO AGUDO, A.; *Presupuestación de obras*; Universidad de Sevilla; Editorial Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla; 2010.

[22] WIKIPEDIA; *Impuesto de valor agregado*; 2023. Recuperado el 5 de noviembre de 2023.

ANEXOS

ANEXO I. FICHA TÉCNICA TOPCON IP-S3



IP-S3 HD1

SISTEMA COMPACTO DE CARTOGRAFÍA
MÓVIL EN 3D DE ALTA DENSIDAD





Lo más avanzado en reconocimiento de características y cartografía

- Completa solución integrada
- Diseño ultracompacto
- Múltiples láseres minimizan las sombras de escaneo
- Facilidad de uso inigualable
- Calibración del usuario innecesaria
- Integración completa de nubes e imágenes

Nubes de puntos de alta densidad con superposición de imágenes

El IP-S3 HD1 incorpora la prolongada experiencia de Topcon en los sistemas de cartografía móviles en un pequeño paquete. El sistema supera los desafíos que supone cartografiar características en 3D con un gran nivel de precisión. La precisión de las posiciones del vehículo se obtiene mediante tres tecnologías: Un receptor de frecuencia dual GNSS establece una posición geoespacial; una unidad de medición de inercia (IMU) proporciona la actitud del vehículo y una conexión con el vehículo o un encoder de rueda externo obtienen información odométrica. Estas tres tecnologías trabajan al unísono para mantener una posición 3D de alta precisión para el vehículo, incluso en aquellos lugares en los que las señales de satélites pueden quedar bloqueadas por obstrucciones como, por ejemplo, edificios, puentes o arboledas.

El sistema incluye un cabezal de sensor único de LiDAR que contiene láseres orientados para cubrir las características de la cuneta, llegando a una distancia de hasta 100 metros. La cámara panorámica y de alta resolución, de 30 megapíxeles, permite recopilar imágenes en intervalos de distancia fijos. Todas las entradas del sensor se registran y se marcan cronológicamente según un reloj común, accionado por el IP-S3 HD1.

Utilice el potente y completo software Mobile Master Field y Office para recopilar y procesar datos de LiDAR georreferenciados y/o datos de imagen digital en representaciones 3D llenas de color, que pueden exportarse a software de terceros. Las técnicas de correspondencia y la funcionalidad de control del suelo optimizan la precisión y la exactitud absoluta. El software Mobile Master proporciona una interfaz sencilla que permite combinar, ver y trabajar con los diversos datos del sensor.

El IP-S3 HD1 proporciona rápidamente datos de alta precisión e imágenes dinámicas para cualquier proyecto de cartografía. El sistema de fácil montaje en vehículo tiene capacidad para cartografiar datos a velocidades de desplazamiento normales para la evaluación de condiciones de la superficie de la carretera y la realización de inventario de las características de la cuneta. Otras aplicaciones incluyen tuberías, servicios públicos, planos conforme a obra, supervisión del progreso de construcciones y gestión de riesgos.

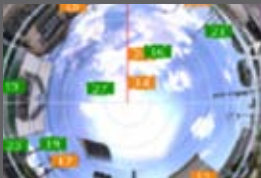


Escáner láser de alta definición

El escáner láser IP-S3 HD1 recopila 700.000 puntos por segundo, en un rango de 100 metros. Dispone de un campo de visión horizontal de 360° y de un campo de visión vertical de 30°, que permiten incrementar la cobertura de la recopilación de datos y minimizar las sombras creadas por el láser. Con un peso de 18 kg, es el sistema de cartografía móvil de alta precisión más ligero y compacto disponible en la actualidad.

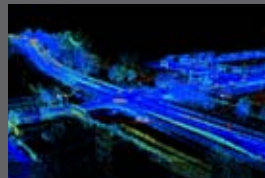


MAP PROCESS EXTRACT DELIVER



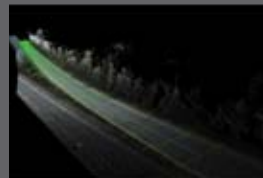
Cartografiar

Cartografiar con el IP-S3 HD1 le permite recopilar más datos en menos tiempo. Se recopila un completo conjunto de datos que permiten disponer de una detallada representación continua de la realidad.



Procesar

Procese fácilmente los datos con el software Mobile Master Office. Obtenga una alta precisión con el pase automático y la coincidencia de intersecciones. Logre una alta precisión con la coincidencia de puntos de control. Produzca imágenes escaneadas en color y visualice y utilice datos de forma excelente.



Extraer

El software Mobile Master Office transfiere fácilmente los datos al software de extracción de nubes de puntos de su elección como, por ejemplo, Topcon ScanMaster, Orbit Asset Inventory, Autodesk Recap o Bentley PointTools.



Entregar

Exporte la información extraída a archivos GIS y CAD para entregar, permitiendo así el uso en flujos de trabajo verticales.

Unidad de temporización IP-S3 HD1	
Tamaño (a x pr x al)	260 x 160 x 121 mm
Peso	3,0 kg
Puertos de entrada/salida	Alimentación, Ethernet, escáner, cámara esférica, encoder de rueda, IMU, antena GNSS
Resolución de temporización	10 nsec
Unidad de sensor	
Tamaño (a x pr x al)	300 x 500 x 600 mm
Peso	18 kg
Receptor GNSS	
Seguimiento	226 canales universales para seguimiento GPS y GLONASS fiable, de "visión de conjunto", frecuencia dual de código/portadora L1/L2
IMU	
Estabilidad del sesgo en giroscopio	1°/h
Estabilidad del sesgo en aceleración	7,5 mg
Escáner láser	
Tasa de medición	700.000 puntos/s
Alcance	100 m a reflectividad del 100%, 70 m típico
Calibración	Calibrado por Topcon
Cámara esférica	
Unidad de cámara	Cámara CCD (6 piezas)
Resolución máxima	8000 x 4000 píxeles
Rendimiento del sistema	
Precisión de coordenadas absolutas	
(1 sigma)*1	50 mm a 10 m
(1 sigma)*2	10 mm en superficie de carretera
Tiempo de cartografía continuo	8 horas (aprox. 1 TB de datos)
Rango ambiental / temperatura	
operativa	De 0 °C a 45 °C
Almacenamiento	De -30 °C a 60 °C
Tensión	
eléctrica de entrada	De 9 V a 36 V
Alimentación	60W
*1 Comparación con 10 puntos conocidos, 30 pases a 30 km/h	
*2 Resultados de planos encajados en superficie de carretera plana	



Para obtener más información:
topconpositioning.com/ips3

Las especificaciones están sujetas a modificaciones sin aviso previo. ©2016 Topcon Corporation. Todos los derechos reservados. T530ES B 4/16



Escáner láser de alta definición

- Capture nubes de puntos de alta resolución y densidad en 3D.
- Proyecte datos en coordenadas globales en 3D con indicadores cronológicos precisos.
- Produzca panoramas georreferenciados.



Componente de posicionamiento

- Determine la posición y actitud precisas del vehículo
- Receptor GNSS de frecuencia dual integrada
- Unidad de medición de inercia
- Supervisión constante del movimiento y actitud del vehículo



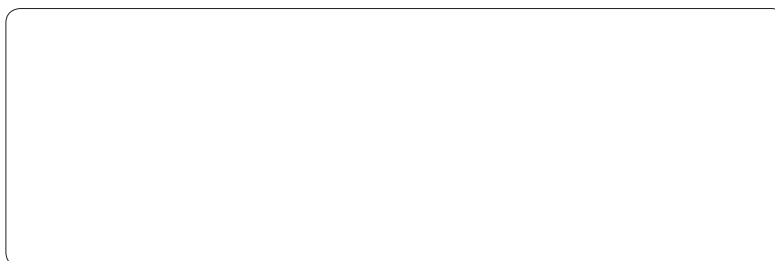
Encoder de la rueda del vehículo

- El encoder optimiza la precisión y fiabilidad
- Detecta la rotación de la rueda
- Solo se requiere un encoder de rueda



Componente de imágenes

- Cámara panorámica de 30 megapíxeles
- Sensores de imagen adicionales complementarios que optimizan la claridad



ANEXO II. FICHA TÉCNICA LEICA TS-16

Leica Viva TS16

Especificaciones Técnicas



Viva



Software envolvente

La estación total Leica Viva TS16 se acompaña con el revolucionario software Captivate, convirtiendo datos complejos en modelos 3D realistas y manejables. Con aplicaciones fáciles de usar y tecnología táctil que le es familiar, todos los formatos de datos medidos y diseñados se pueden ver en todas sus dimensiones. Leica Captivate abarca industrias y aplicaciones con poco más que un simple cambio de aplicación, sin importar si usted trabaja con GNSS, estaciones totales o ambas cosas.



Comparta fácilmente datos entre todos sus instrumentos

Mientras Leica Captivate captura y modela los datos en campo, Leica Infinity procesa la información en oficina. Una transferencia de datos segura permite mantener siempre el proyecto de forma correcta. Leica Captivate y Leica Infinity trabajan en conjunto para adjuntar datos de mediciones anteriores y editar proyectos de forma más rápida y eficiente.

ACC»

La atención al cliente a tan solo un clic de distancia

A través del servicio de Atención Activa al Cliente (ACC), solo está a un clic de distancia de una red global de profesionales con experiencia para guiarle a través de cualquier problema. Elimine los retrasos con nuestro servicio técnico, termine los trabajos más rápido con un excelente soporte de consultoría, y evite costes extra por tener que volver con un servicio online para enviar y recibir datos directamente desde el campo. Controle sus gastos con un Pack de Atención al Cliente a medida, que le da la tranquilidad de estar respaldado en cualquier lugar y a cualquier hora.



Estación Total Leica Viva TS16

MEDICIÓN ANGULAR

Precisión ¹ Hz y V	Absoluto, continuo, diametral	1" (0.3 mgon), 2" (0.6 mgon), 3" (1 mgon), 5" (1.5 mgon)
-------------------------------	-------------------------------	--

MEDICIÓN DE DISTANCIAS

Alcance ²	Prisma (GPR1, GPH1P) ³ Sin Prisma / A cualquier superficie ⁴	1.5m a 3500m R500: 1.5m a >500m, R1000: 1.5m a >1000m
Precisión / Tiempo de Medición	Normal (a prisma) ^{2,5} Normal (a cualquier superficie) ^{2,4,5,6}	1mm + 1.5ppm / normalmente 2.4s 2mm + 2ppm / normalmente 3s
Tamaño del punto láser	A 50m	8mm x 20mm
Tecnología de medición	Sistema de Análisis	Coaxial, láser rojo visible

IMÁGENES

Cámara gran angular	Sensor Campo visual Tasa de muestreo	Sensor de 5 Mpixel CMOS 19.4° Hasta 20 frames por segundo
---------------------	--	---

PUNTERÍA AUTOMÁTICA - ATRplus

Alcance de la puntería a prisma ² / Alcance de seguimiento a prisma ²	Prisma Circular (GPR1, GPH1P) Prisma 360° (GRZ4, GRZ122)	1500m / 1000m 1000m / 1000m
Precisión ^{1,2} / Tiempo de medición	Precisión angular del ATRplus Hz, V	1" (0.3 mgon), 2" (0.6 mgon), 3" (1 mgon), 5" (1.5 mgon) / normalmente 3-4 s

POWERSEARCH

Alcance / Tiempo de Búsqueda	Prisma 360° (GRZ4, GRZ122)	300m / normalmente 5s
------------------------------	----------------------------	-----------------------

LUCES GUÍA DE REPLANTEO (EGL)

Rango de Trabajo / Precisión		5-150m / normalmente 5cm @ 100m
------------------------------	--	---------------------------------

GENERAL

Software de campo	Leica Captivate con apps	
Pantalla y teclado	5", WVGA, a color, táctil, pantalla I estandar / pantalla II opcional	37 teclas, iluminadas
Procesador	TI OMAP4430 1GHz Dual-core ARM® Cortex™ A9 MPCore™	Sistema operativo – Windows EC7
Administración de energía	Batería intercambiable Li-Ion	Autonomía de uso 5-8 h
Almacenamiento de datos	Memoria interna Tarjeta de memoria	2 GB Tarjeta SD 1 GB o 8 GB
Interfaces	RS232, USB, Bluetooth®, WLAN	
Peso	Estación Total incluida batería	5.3 - 6kg
Especificaciones ambientales	Rango de temperatura de trabajo Polvo / Agua (IEC 60529) / Humedad	-20°C a +50°C IP55 / 95%, sin condensación

LEICA VIVA	TS16 M	TS16 A	TS16 P	TS16 I
Medición angular	✓	✓	✓	✓
Medición de distancias a prismas	✓	✓	✓	✓
Medición de distancias a cualquier superficie (sin prisma)	✓	✓	✓	✓
Puntería automática a prisma - ATRplus	✗	✓	✓	✓
PowerSearch (PS)	✗	✗	✓	✓
Cámara gran angular	✗	✗	✗	✓
Luces Guía de Replanteo (EGL)	✓	✓	✓	✓

✓ = Estandar ✗ = No disponible

¹ Desv. Estándar ISO 17123-3

² Cubierto, sin bruma, visibilidad aprox. 40 km; sin reverberación

³ 1.5m a 2000m para prismas de 360° (GRZ4, GRZ122)

⁴ Objeto en sombra, cielo nublado, Tarjeta Gris Kodak (90% reflectividad)

⁵ Desv. Estándar ISO 17123-4

⁶ Distancia > 500m: Precisión 4mm + 2ppm, Tiempo de medición típico de 6s

Las marcas registradas Bluetooth® son propiedad de Bluetooth SIG, Inc.

Radiación láser, evitar la exposición directa a los ojos. Láser clase 3R de acuerdo con IEC 60825-1:2014.

Las ilustraciones, descripciones y datos técnicos no son vinculantes. Todos los derechos reservados.

Impreso en Suiza - Copyright Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Suiza, 2015.

836480es - 05.15

Leica Geosystems AG
Heerbrugg, Suiza

www.leica-geosystems.com

- when it has to be **right**

Leica
Geosystems

ANEXO III. FICHA TÉCNICA TOPCON HIPER VR





Rendimiento completo y avanzado

- Universal Tracking Channels™ para todos los satélites, señales y constelaciones
- Diseño IP67 probado y listo para el campo
- Forma compacta ideal para mmGPS y Hybrid Positioning™
- Revolucionaria IMU de 9 ejes y brújula electrónica de 3 ejes ultra compacta

"Las mejores cosas vienen en cajas pequeñas"

El HiPer VR es más pequeño y ligero, pero no se deje engañar por su tamaño. No solo incorpora la tecnología GNSS más avanzada, sino que se ha concebido para soportar los entornos más hostiles. Construido con una robusta carcasa, sin plástico endeble, puede soportar las condiciones del lugar de trabajo.

Mediante el chipset GNSS avanzado con tecnología Universal Tracking Channels™, el receptor rastrea automáticamente todas y cada una de las señales de satélite, ahora y en el futuro.

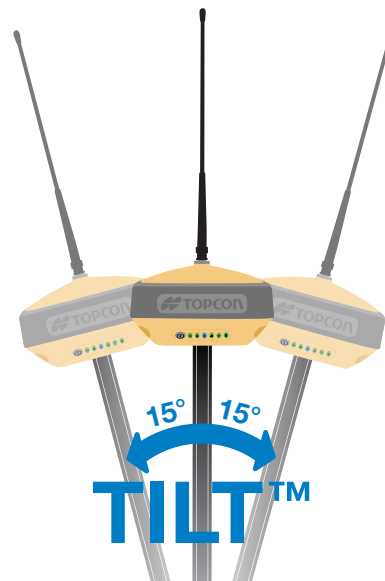
Todas las señales, satélites y constelaciones, todo en un diseño robusto y compacto, con IMU integrada y brújula electrónica.



TILT™ : Tecnología de nivelación integrada de Topcon

El HiPer VR incorpora una revolucionaria unidad de medición inercial (IMU) de 9 ejes y una brújula electrónica de 3 ejes ultracompacta. Esta avanzada tecnología compensa las mediciones desniveladas sobre el terreno fuera de plomo hasta 15 grados.

Las tomas complicadas en pendientes con gran inclinación o en lugares de difícil acceso resultan ahora de lo más sencillo gracias a la tecnología TILT.





Seguimiento GNSS	
Número de canales	226 con la tecnología Universal Tracking Channels™, patentada por Topcon.
Señal	
Señales GPS	L1 C/A, L1C ¹ L2C, L2P(Y), L5 ¹ L1C cuando hay señal.
GLONASS	L1 C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3C ² ² L3C cuando hay señal.
Galileo	E1/E5a/E5b/Alt-BOC
BeiDou/BDS	B1, B2
IRNSS	L5
SBAS	WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN (L1/L5) ³ L5 cuando hay señal.
Banda L	Servicios de correcciones TopNET Global D & C
OZSS	L1 C/A, L1C, L1-SAIF, L2C, L5
Rendimiento de posicionamiento	
Estático/ Estático rápido	H: 3 mm + 0,4 ppm V: 5 mm + 0,5 ppm*
Estático de alta precisión	H: 3 mm + 0,1 ppm V: 3,5 mm + 0,4 ppm
RTK	H: 5 mm + 0,5 ppm V: 10 mm + 0,8 ppm
RTK, compensación TILT	H: 1,3 mm/ ⁴ Inclinación; Inclinación ≤ 10° V: 1,8 mm/ ⁴ Inclinación; Inclinación > 10° El ángulo máximo recomendado para la compensación de inclinación es de 15°. **
DGPS	0,25 m HRMS
Banda L, servicio de correcciones D	H: < 0,1 m (95%) V: < 0,2 m (95%)
Tiempo operativo	Modo RX: 10 h Modo TX 1 W: 6 h <i>Se recomienda el uso de la batería externa de 12 V cuando se utilice HiPer VR con radio interna en modo de transmisión.</i>
Radios internas	Radio UHF de 425-470 MHz Potencia transmisión máx.: 1 W Alcance: 5-7 km típicamente; 15 km en condiciones óptimas.***
Memoria	SDHC interna de 8 GB no extraíble
Datos ambientales	Clasificación de protección: IP67 Temp. de funcionamiento: De -40 °C a 65 °C Humedad: 100%, condensación Caída: Caída desde 1,0 m a hormigón. Caída de jalón desde 2,0 m a hormigón.
Dimensiones	150 x 100 x 150 mm (an x al x l)
Peso	< 1,15 kg



Radio integrada y opciones de módem

Radio UHF TX/RX de 400 MHz



Listo para la Tecnología de Banda L

L Band esta listo para recibir correcciones GNSS avanzadas de datos en cualquier ubicación¹



Altamente configurable

Diseñado para adaptarse a sus necesidades. Los exclusivos archivos de opciones le permitirán activar las funciones disponibles de forma instantánea.



Sin miedo al futuro

La antena multi-direccional de Topcon rastrea todas las señales GNSS disponibles y está diseñada para rastrear las constelaciones y señales del futuro.

* Bajo condiciones de observación nominal y estrictos métodos de procesamiento, incluido el uso de GPS de frecuencia dual, efemérides precisas, condiciones ionosféricas tranquilas, una calibración aprobada de la antena, visibilidad sin obstáculos por encima de 10 grados y una duración de observación de al menos 3 horas (dependiendo de la longitud de base). ¹ Póngase en contacto con su representante de Topcon para comprobar la disponibilidad.

** Sujeto a calibración TILT y a un entorno operativo libre de perturbaciones magnéticas.

*** Varía con las condiciones operativas y del terreno.



Para obtener más información:
www.topconpositioning.com/hiper-vr

Las especificaciones están sujetas a modificaciones sin previo aviso. © 2019. Topcon Positioning Systems, Inc. Todos los derechos reservados. 7010-2258 ESLA B 12/19

El nombre de marca Bluetooth® y los logotipos asociados son marcas comerciales registradas, propiedad de Bluetooth SIG, Inc., y cualquier uso de dichas marcas por parte de Topcon se hace con licencia. Las demás marcas y nombres comerciales son propiedad de sus respectivos propietarios.



**ANEXO IV. RECOMENDACIONES PARA
EL MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA
DEL TOPCON IP-S3**

RECOMENDACIONES PARA EL MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DEL TOPCON IP-S3.

Estas son algunas de las indicaciones y recomendaciones de Topcon

Montaje

1. Aflojar las 4 manivelas de sujeción del soporte de techo. Extraer el soporte del techo hacia atrás y aflojar las 2 manivelas de sujeción de la base del IP-S3. Liberar las 4 sujeciones de la base del IP-S3.
2. Apretar de nuevo las 4 manivelas de sujeción del soporte de techo.
3. Acoplar el IP-S3 a la base sujetando los cables para que no tropiecen con la base.
4. Apretar las 2 manivelas de sujeción y fijar las 4 sujeciones de la base del IP-S3.
5. Bajar la ventanilla trasera izquierda del vehículo y extraer la manguera de cables de conexión.
6. Conectar los cables del IP-S3 a la manguera en sus correctas posiciones (indicado por colores).
7. Conectar el cable USB 3.0 de la cámara al puerto USB 3.0 de la parte trasera del PC de captura (a la tarjeta PCIe Card).
8. Subir la ventana con cuidado para sujetar la manguera de cables.
9. Fijar la pantalla del PC al cristal de la luna mediante el sistema de ventosas.
10. Conectar el cable de mechero a la toma de enchufe de mechero del vehículo y encender el inversor de potencia situado debajo del asiento del copiloto.

Encendido del sistema

1. Arrancar el vehículo.
2. En la fuente de alimentación situada en el maletero del vehículo, mover el interruptor giratorio a la posición 1 o 1+2.
3. Esperar a que el display muestre el voltaje (típicamente entre 12V y 15V) y entonces levantar los interruptores de las posiciones 1 y 2.
4. Encender el PC de captura.
5. Mover el interruptor de la Timing Box del IP-S3 a la posición ON (se observará que el LiDAR comienza a girar)

Comprobaciones durante la puesta en marcha del sistema

1. Comprobar que el ordenador esté conectado en red local.
2. Comprobar que la cámara está bien conectada y se recibe señal. Para ello abrir el software LadybugCapPro.
3. Comprobar los parámetros tanto de la cámara (con su software), como del sistema de captura (con el software Magnet Field).

**ANEXO V. EJEMPLO DE PLANIFICACIÓN DEL
PROCESO DE CALIBRACIÓN INICIAL DEL
SISTEMA MOBILE MAPPING IP-S3**

Recorrido de calibración inicial para levantamiento Mobile Mapping (IP-S3) de la subida a Puerto de Tarna

