



premio internacional
A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS

JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO

Séptima
Edición
2017 • 2018

CONVOCA:

 **Fundación**
Asociación Española de la Carretera

Texto completo del trabajo:

Sistema de monitorización aérea de taludes (MAT)

Autores:

Miguel Ortín Grau, FERROVIAL

Andrés Santos Becerro, FERROVIAL

Luis Menéndez Mateos, FERROVIAL

Miguel Rosa Serván, AEROTOOLS

Pablo Gutiérrez Benavides, AEROTOOLS

Alberto Cristóbal Granada, AEROTOOLS

Carlos del Río Garandilla, FUNDACIÓN CI₃

Publicado como artículo en el número Especial de la 
Revista *Carreteras* 225 (julio/agosto 2019)



SISTEMA DE MONITORIZACIÓN AÉREA DE TALUDES

MAT

Fecha: 24/09/2018



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	4
1.1.	EL PROYECTO MAT Y SU OPORTUNIDAD. NECESIDADES QUE CUBRE.	4
1.2.	OBJETIVOS DEL PROYECTO MAT.	5
2.	ESTADO DEL ARTE.	7
2.1.	ELEMENTOS TÉCNICOS A CONSIDERAR EN UNA ACTUACIÓN DE CONSERVACIÓN	7
2.2.	HERRAMIENTAS ACTUALES EN USO.	7
2.3.	ANÁLISIS ACTUAL DE RESULTADOS.	8
2.4.	LA APLICACIÓN DE DRONES.	8
2.4.1.	VENTAJAS DE ESTA HERRAMIENTA.	9
2.4.2.	LIMITACIONES DE ESTA HERRAMIENTA.	11
2.4.3.	SU APLICACIÓN EN EL SECTOR DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE CARRETERA.	12
2.5.	PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DE DRONES.	13
2.5.1.	PLANIFICACIÓN	13
2.5.2.	OPERACIÓN DE VUELO Y CAPTURA DE DATOS	14
2.5.3.	GESTIÓN DE DATOS Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS	14
3.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MAT	15
3.1.	DRONES	15
3.1.1.	DESCRIPCIÓN Y PRESTACIONES	16
3.1.2.	SISTEMAS EMBARCADOS	17
3.1.3.	OTROS SISTEMAS PARA LA CAPTURA DE DATOS	17
3.2.	APLICACIÓN DE ANÁLISIS Y VISUALIZACIÓN DE DATOS CAPTURADOS	19
3.2.1.	MÓDULOS	20
3.2.1.1.	MÓDULO VISOR DE MAPAS	20
3.2.1.2.	MÓDULO VISOR DE NUBES DE PUNTOS	21
3.2.1.3.	MÓDULO GALERÍA DE ELEMENTOS MULTIMEDIA	23
3.2.1.4.	MÓDULO REPOSITORIO DE DOCUMENTOS	23
3.2.1.5.	MÓDULO GENERADOR DE INFORMES	23
3.2.2.	FUNCIONALIDADES	24
3.2.2.1.	VISOR DE MAPAS	24
3.2.2.2.	VISOR DE NUBES DE PUNTOS	24
3.2.2.3.	GALERÍA DE ELEMENTOS MULTIMEDIA	25
3.2.2.4.	REPOSITORIO DE DOCUMENTOS	25
3.2.2.5.	GENERADOR DE INFORMES	25
3.3.	OTRAS HERRAMIENTAS DE CAPTURA DE DATOS	25



4.	PRUEBAS DE CAMPO Y VALIDACIÓN	26
4.1.	ESCENARIO	27
4.2.	OBJETIVOS	28
4.3.	CAMPAÑAS DE TOMA DE DATOS	29
4.4.	PLANIFICACIÓN	29
4.5.	OPERACIONES DE VUELO Y CAPTURA DE DATOS	30
4.5.1.	CAMPAÑA DE VUELOS SEPTIEMBRE 2017	31
4.5.2.	CAMPAÑA DE VUELOS JUNIO 2018	32
4.5.3.	CAMPAÑA DE VUELOS AGOSTO 2018	32
4.6.	PROCESADO Y GESTIÓN DE DATOS	33
4.7.	VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS	34
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	35
5.1.	EVALUACIÓN DE LAS IMÁGENES	35
5.2.	DETECCIÓN DE MOVIMIENTOS Y DESPLAZAMIENTOS	38
5.3.	DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN EN EL GEOPOSICIONAMIENTO	43
5.4.	APLICACIÓN DE LIDAR TERRESTRE PARA VALIDACIÓN DE POSICIONAMIENTO	46
6.	CONCLUSIONES	48



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las empresas constructoras y de mantenimiento de infraestructuras utilizan procedimientos de inspección de instalaciones basados fundamentalmente en el trabajo de técnicos especializados, que además de exponerse a ciertos riesgos, utilizan técnicas y procedimientos que consumen tiempo y recursos, reduciendo la efectividad de las operaciones de la instalación.

Las nuevas tecnologías aplicadas a la inspección y seguimiento de los taludes en las vías de comunicación ponen a disposición de las concesionarias de conservación herramientas innovadoras, que permiten realizar un adecuado seguimiento de la evolución de los mismos. La aparición de la tecnología de los drones en el ámbito industrial está permitiendo plantearse la mejora de los trabajos de inspección y mantenimiento de las infraestructuras.

El proyecto “**Sistema de Monitorización Aérea de Taludes**” (MAT) presenta una Metodología y herramienta innovadora para la conservación de taludes de carretera. Tiene como objetivo optimizar y evolucionar este tipo de operaciones a través de un sistema innovador apoyado en la tecnología de los drones y en sistemas de información geográfica avanzados.

1.1. EL PROYECTO MAT Y SU OPORTUNIDAD. NECESIDADES QUE CUBRE.

Los daños anuales producidos en España y el resto de Europa por deslizamientos y fenómenos de inestabilidad en taludes de carretera no se han podido registrar con certeza, pero pueden cifrarse en cientos de miles de Euros, basta con mirar los periódicos, sobre todo en periodos de lluvia intensa, para darse cuenta de las afecciones producidas por estas causas.



En obras lineales, que se emplazan en zonas onduladas y montañosas, pueden encontrarse kilómetros de taludes. Bajo estas circunstancias, las nuevas tecnologías, combinadas con un software adecuado, permiten obtener un alto nivel de seguridad en la operación a unos costes económicos razonables. Siempre que sea factible, desde un punto de vista técnico y económico, es aconsejable realizar un adecuado estudio y seguimiento de la estabilidad de los taludes.



1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO MAT.

El presente trabajo describe los desarrollos realizados para obtener un nuevo sistema de gestión de taludes, capaz de integrar nuevas técnicas aplicables a la captura de datos e imágenes (drones, cámaras termográficas, LiDAR, visión artificial,...) con los tradicionales procedimientos de topografía clásica, dando lugar a una herramienta extraordinariamente completa, que permite detectar movimientos, desplazamientos y caídas de materiales, zonas con erosión y acumulación de materiales, movimientos en diaclasas, evolución de zonas húmedas en el talud, etc.... de forma asistida y con procedimientos estandarizados.



El sistema será capaz de generar una completa base de datos e imágenes, pudiendo comparar y cruzar datos entre distintos períodos de inspección y uso de tecnologías, lo que pondrá en marcha alarmas predefinidas en aquellos casos en los que el talud experimente algún tipo de variación. Se dispondrá así de una herramienta de monitorización y control extraordinaria, capaz de detectar variaciones centimétricas en taludes de varios kilómetros de longitud de forma automática.

Se dispondrá así de una herramienta de monitorización y control muy desarrollada, capaz de detectar variaciones centimétricas en taludes de varios kilómetros de longitud, de forma rápida y efectiva.

Los objetivos del proyecto se centran en

- El desarrollo de una metodología de aplicación de los drones como fuente de obtención de datos en la inspección de taludes, que aporte resultados consistentes e independientes de las herramientas (tipos de drones, tipos de cámaras...) que se utilicen para la captura de datos.
- El desarrollo de los procesos de análisis que permitan la comparación de datos tomados en diferentes momentos de la vida útil de elemento a inspeccionar, o de datos tomados de diferentes fuentes (por ejemplo, nubes de puntos generadas por fotogrametría con los datos generados con LIDAR terrestre).
- El desarrollo de una herramienta de visualización de los datos obtenidos en sus diferentes formatos, que permita el análisis y comparación de los mismos, su gestión y la generación de informes.
- La integración de las diferentes técnicas y dispositivos de captura de datos en un sistema que pueda aplicarse de forma consistente en diferentes localizaciones y con costes razonables.

Con los resultados obtenidos, el Sistema MAT pretende aportar una nueva herramienta completa para la inspección de un elemento tan característico y abundante como son los taludes de carretera, y por extensión, de infraestructuras lineales.



2. ESTADO DEL ARTE.

Los progresos en la toma de datos se deben principalmente a la mejora y modernización de los equipos de auscultación y topografía. El desarrollo de la tecnología permite pensar en el uso de drones equipados con LiDAR, cámaras termográficas, visión artificial, combinados con los sistemas tradicionales de inspección de taludes en potentes aplicaciones. Con ellas se pretende llegar a la integración y comparación de un gran número de datos combinados, y a través de un adecuado soporte de proceso y tratamiento de los mismos, permitiendo la comparación de una forma rápida y sencilla, y la emisión de alertas predefinidas.

2.1. ELEMENTOS TÉCNICOS A CONSIDERAR EN UNA ACTUACIÓN DE CONSERVACIÓN

Actualmente, la inspección de un talud y el seguimiento de su evolución a lo largo del tiempo es realizado por personal técnico experto. En ocasiones las inspecciones deben realizarse utilizando técnicas tradicionales de topografía y fotografía. En ocasiones es preciso usar técnicas de escalada para el reconocimiento de un talud, dando lugar a situaciones peligrosas para el trabajador que deben ser evitadas.

El sistema MAT atiende los aspectos que deben tenerse en cuenta en la inspección y mantenimiento continuado de los taludes, facilitando la realización de trabajos como los siguientes:

- Control de evolución en zonas erosionables.
- Determinación de zonas homogéneas, su clasificación en cuanto al peligro de inestabilidad potencial que representan y la determinación de la urgencia de la actuación.
- Topografía completa de la superficie del talud tomada con drones y LiDAR.
- Realización de fotografías de alta resolución próximas a la pared del talud. La realización de estas fotografías con ayuda de un dron permite hacer repetitiva la posición e inclinación en la toma de imágenes, lo cual supone una extraordinaria ventaja a la hora de comparar imágenes tomadas en distintas épocas.
- Alertas de movimientos. Con ayuda de la topografía y de las imágenes obtenidas con ayuda de drones, el Sistema MAT permite comparar imágenes, detectar cambios, medir distancias de variación, identificar objetos desplazados, etc.
- Imágenes con cámara termográfica, para comprobar la existencia de humedades en la superficie del talud, y su variación en el tiempo.
- Características geométricas, dimensiones y secciones transversales del talud, a través de las nubes de puntos generadas.

2.2. HERRAMIENTAS ACTUALES EN USO.

Actualmente los métodos empleados para detectar incidencias se basan en inspecciones visuales. Por un lado, desde tierra mediante cámara fotográfica y prismáticos y, por otro, a través de personal cualificado que se descuelga por el talud, detectando anomalías y chequeando el estado de forma manual. Este último método presenta un riesgo elevado de accidente laboral.



2.3. ANÁLISIS ACTUAL DE RESULTADOS.

Las imágenes obtenidas en detalle del talud se analizan en gabinete. Se controla el estado de: bulones, mallas, fisuras, desprendimientos, etc. y se verifica en primer lugar que no existen riesgos de incidentes. A partir de aquí se toman una serie de medidas a implementar en el talud, en caso de necesidad. Todo ello se recoge en un informe donde se evalúan las inspecciones y medidas tomadas.

2.4. LA APLICACIÓN DE DRONES.

La tecnología de los drones dentro del ámbito industrial, y más concretamente en la construcción y obra civil, se encuentra en la actualidad en proceso de implantación en numerosos escenarios, existiendo un interés creciente por parte de organismos públicos y privados en cómo esta tecnología puede utilizarse, bien para reemplazar o complementar a la tecnología que se emplea actualmente, o bien para la generación de nuevas aplicaciones.

El nivel de implantación de la tecnología de los drones varía enormemente en función del tipo de aplicación que se considere, existiendo áreas en las que su utilización se encuentra relativamente consolidada, mientras que en otras se encuentra en fase de evaluación en cuanto sus posibilidades a nivel de su viabilidad técnica y/o económica.

Su utilización requiere de estudio de aspectos como:

- La viabilidad a nivel,
 - Técnico
 - Económico
 - Legal
 - Operacional
- Identificación de actores que operan, teniendo en cuenta su:
 - Capacidad tecnológica
 - Capacidad humana.

Para un conocimiento más profundo de esta tecnología, es conveniente tener en cuenta la tipología de actuación de los drones más genérica desde el punto de vista funcional, y que puede abarcar todas las posibles aplicaciones independientemente del sector al que se puedan adscribir. Esta clasificación funcional se puede efectuar desde una doble aproximación. Así, en una primera clasificación se pueden distinguir aplicaciones:

- Pasivas
- Proactivas
- Reactivas

Las aplicaciones pasivas engloban aquellas en las que la información capturada mediante la utilización de drones no genera ninguna consecuencia inmediata (por ejemplo, la generación de cartografía para estudios científicos).

En el caso de las aplicaciones proactivas, los datos obtenidos son procesados y utilizados tras su captura en la gestión o manejo en muy corto plazo (por ejemplo, los trabajos de conservación del firme en áreas deterioradas tras su detección a partir de imágenes obtenidas con dron).

Por último, las aplicaciones reactivas recogen aquellas en las que la actuación se realiza en tiempo real (por ejemplo, la aplicación de herbicidas desde un dron).

Y en un segundo enfoque, en cuanto al objetivo que se pretende conseguir con la aplicación de los drones, se puede trabajar con la siguiente clasificación:



- Mapeado: En las aplicaciones de “Mapeado” se trata de generar información georreferenciada que permita cuantificar, localizar y/o evaluar un determinado fenómeno.
- Monitorización: Estas aplicaciones son aquellas en las que la toma de información se realiza de forma recurrente en el tiempo con objeto de analizar un determinado fenómeno.
- Reconocimiento: Las aplicaciones de “Reconocimiento” son aquellas en las que se persigue la detección de un “objetivo”.
- Aplicación: Las aplicaciones de “Aplicación”, implican una actuación directa en tiempo real.

El Sistema MAT se fundamenta en el uso y desarrollo de aplicaciones “Proactivas” de “Mapeado” y “Monitorización”.

2.4.1. Ventajas de esta herramienta.

Durante muchos años, el uso de la tecnología de los drones se limitaba a aplicaciones militares, pero en los últimos años la innovación en este sector y el interés creciente de las empresas en los drones ha impulsado la inversión y uso de recursos para desarrollar dispositivos útiles en aplicaciones de ámbito civil, especialmente el industrial. Este crecimiento acelerado puede achacarse a una serie de factores que explican las ventajas de esta tecnología, como son:

- Abaratamiento de componentes.
- Auge de la microelectrónica, microprocesadores, etc., que permiten la reducción de las dimensiones y el peso de los equipos.
- Desarrollo de software de código abierto colaborativo.
- Desarrollo de equipos y sensores diseñados para ser embarcados en drones.

Otros factores a tener en cuenta, y que han influido en el desarrollo actual de esta tecnología son los siguientes:

- El desarrollo de un marco normativo que regula las operaciones con estos sistemas.
- El papel del aeromodelismo como canal de transmisión de conocimiento entre las actividades de ocio y el desarrollo de actividades profesionales.

A continuación, se describen las ventajas que aporta la tecnología de los drones de forma genérica frente al uso de herramientas tradicionales, para la mayor parte de las aplicaciones:

- Capacidad para acceder a lugares inaccesibles por otros medios:
 - Por imposibilidad física.
 - Por el riesgo inherente.
- Capacidad para realizar las tareas que en robótica se denominan:
 - Dull (repetitivas).
 - Dirty (sucias).
 - Dangerous (peligrosas).
- Capacidad para embarcar un elevado número de sensores de diferente tipología.
- Capacidad para la recogida masiva de datos.
- Posibilidad de obtener información con un nivel de detalle configurable y a demanda en función de las necesidades concretas del trabajo.
- Recogida de información secuencial en el tiempo con una frecuencia adaptada a las necesidades del trabajo.

En cuanto a los datos generados por los drones, la tipología de datos que va a ser necesario manejar varía según el área de la industria, por lo que hay que tener en consideración el tipo de sensor

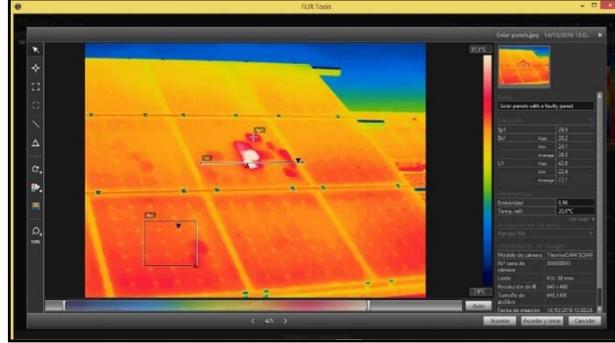


empleado, así como el procesado y generación de información que se derive de los sensores. Las principales fuentes de datos en el caso de las operaciones con drones son:

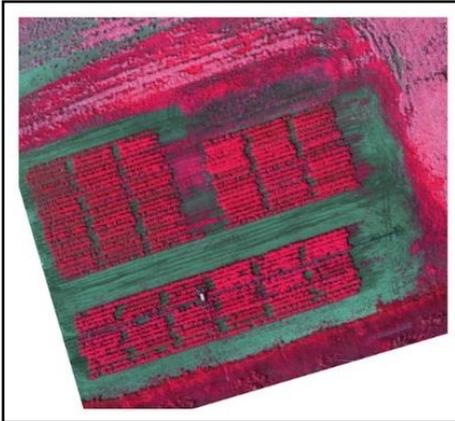
Cámaras visuales:



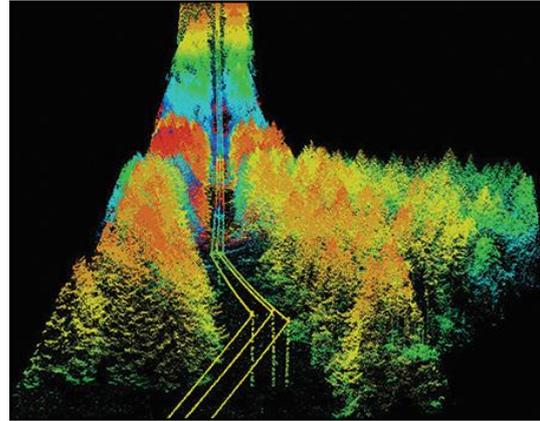
Cámaras termográficas.



Cámaras espectrales (multi e hiperespectrales).

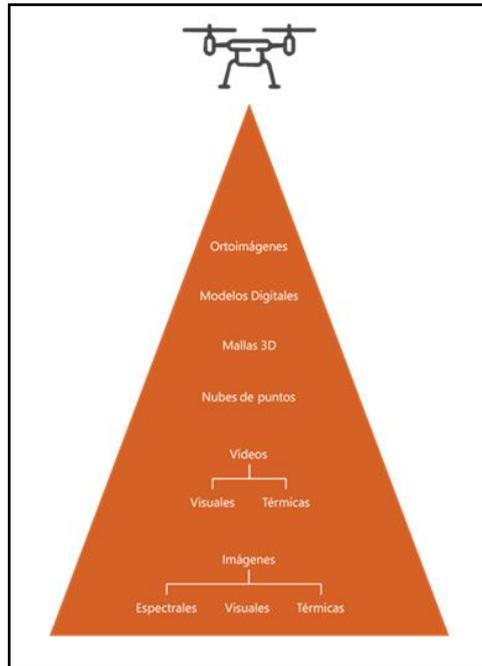


Escáner LiDAR.





Estos diferentes sensores generan principalmente las tipologías de datos que se muestran en la siguiente figura:



Para un uso completo y adecuado de los datos capturados, es necesario añadir la información contenida en forma de base de datos asociada a cada uno de ellos, como por ejemplo la información relativa al posicionamiento geográfico en el momento de capturar los datos o la información relativa al sensor de donde se obtienen los datos. Esta conjunción entre información gráfica capturada y datos adicionales es lo que se conoce como información georreferenciada o datos georreferenciados, y se trata de un factor de gran potencia para las aplicaciones industriales de los drones.

2.4.2.Limitaciones de esta herramienta.

Como sucede en otras disciplinas, la tecnología de los drones está también sujeta a limitaciones, tanto físicas como del estado de desarrollo de la tecnología, que se van superando de forma progresiva a medida que evoluciona y se consolida la tecnología. Se trata de un factor importante y que debe tenerse en cuenta en el proceso de implantación de la tecnología y en el análisis de viabilidad de las operaciones.

De forma resumida, los aspectos limitantes que más afectan a la aplicación de los drones tienen que ver con:

- La propia plataforma de vuelo: peso, tamaño, autonomía de vuelo
- Los sistemas embarcados: peso, tamaño, prestaciones en resolución y calidad de las imágenes
- El posicionamiento y la navegación: precisión en el posicionamiento, información relevante embebida en los datos generados, navegación del dron con relación al entorno, vuelo autónomo con precisión y repetibilidad.
- El procesamiento y la gestión de los datos generados: software dedicado para cada procesamiento, influencia de los parámetros del procesamiento en el resultado, capacidad de manejo de grandes volúmenes de datos, entornos de trabajo que permitan manejo de diferentes tipos de datos, capacidad de análisis y generación de conocimiento sobre los datos.



Con el presente Proyecto se ha tratado de establecer la metodología y herramientas adecuadas para superar, precisamente, estas limitaciones y ofrecer un entorno de trabajo global y estandarizado, que permita su aplicación homogénea en la inspección de taludes de carretera.

2.4.3. Su aplicación en el sector de las infraestructuras de carretera.

En el sector al que se destina el presente proyecto, el de las infraestructuras de carretera, la tecnología de los drones se utiliza de forma heterogénea en función de la aplicación concreta y del nivel de desarrollo de la tecnología.

Los niveles de madurez de la tecnología TRLs (Technology Readiness Levels) se emplean de forma generalmente aceptada para estimar el grado de madurez de una tecnología, asignando una categoría determinada en función del estado de desarrollo en el que ésta se encuentra. En este sentido, se consideran nueve niveles o categorías, que se pueden a su vez agrupar en: tecnologías maduras o probadas con éxito en entornos reales y que pueden encontrarse de forma libre o mediante licencia; tecnologías que se encuentran en fase de desarrollo y validación; y tecnologías que se encuentran a nivel de idea o de prueba de concepto.

Sin entrar en clasificaciones habituales más específicas, como los TRLs que emplea la Unión Europea (del TRL1: investigación básica al TRL9: despliegue y comercialización), y a los efectos de un mejor entendimiento de las posibilidades de uso de la tecnología, se plantean cuatro diferentes niveles (que agrupen varios de los TRL's estándar): De acuerdo a los estudios realizados, las posibles aplicaciones de los drones en este sector concreto se relacionan a continuación agrupadas según su nivel de implantación:

NIVEL 1: aplicación en fase de concepto o investigación.

- Inspección de capa de rodadura.
- Inspección en boca de túnel para la prevención de aludes y avalanchas.

NIVEL 2 aplicación en fase de desarrollo tecnológico y pruebas de validación

- Seguimiento y control ambiental.
- Vigilancia de activos y elementos inventariables.
- Vigilancia de incidentes en la vía para actuación temprana.
- Evaluación en accidentes e incidentes que se produzcan en la vía.
- Inspección de señalización y marcas viales.
- Monitorización del estado de la vegetación en medianas y zonas de servidumbre.
- Inspección de túneles.
- Control y monitorización de tráfico.

NIVEL 3 aplicación viable técnica y/u operativamente

- Monitorización de la estabilidad de los taludes. Inspección.
- Evaluación de daños causados por fenómenos naturales.
- Inspección de puentes.

NIVEL 4 aplicación operativa validada en fase de comercialización

- Elaboración de cartografía de base en estudio y diseño de trazado de vías.
- Levantamientos topográficos.
- Estimación de volumen de material en movimiento de tierras.
- Generación de modelos digitales para estudios de geomorfología y patrones de drenaje.
- Seguimiento de obra.



2.5. PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DE DRONES.

En términos generales, el interés en la tecnología de los drones surge esencialmente por las siguientes circunstancias:

- Necesidad de incrementar la eficiencia de las operaciones, reducción de costes tanto de la inspección como de mantenimiento.
- Tendencia constante a la reducción de mano de obra vía la automatización.
- Escenarios de operación que presentan peligros para los trabajadores y en ambientes adversos.
- Tecnología global, con posibilidad de replicar casos de éxito.

El aplicar con éxito esta nueva tecnología depende de la combinación de técnicas y herramientas variadas (como pueden ser la fotografía, termografía, cartografía, electrónica de control, comunicaciones, etc.), en un enfoque transversal que vaya aportando soluciones a cada uno de los pasos que es necesario dar desde que se tiene la idea, hasta que se obtiene el dato procesado y se puede aplicar de forma práctica.

El procedimiento para su aplicación se inicia con el análisis de viabilidad de la operación, donde se deben identificar:

- Parámetros a medir y objetivos a cumplir con la actuación.
- Idoneidad de los equipos (dron y sistemas) seleccionados en función de sus prestaciones y características.
- Planificación de la operación desde el punto de vista logístico y de vuelo.
- Factibilidad de la operación de acuerdo con la planificación realizada y a los recursos disponibles o asignados.
- Flujos de trabajo en las sesiones de campo para la captura de datos y para la transmisión y gestión de los datos capturados.
- Flujos de trabajo para el procesamiento de los datos.
- Procedimientos y herramientas para la gestión de los resultados.

2.5.1. Planificación

La fase de planificación es importante y va a tener una influencia decisiva en el desarrollo con éxito de la actuación programada. Debe tener en cuenta factores climáticos y meteorológicos, en función de la época del año en que se desarrolle la operación, pues afectan al propio vuelo y a la calidad de los datos capturados; la gestión de los recursos técnicos y humanos en relación con la ubicación del área a estudiar; la operativa de la infraestructura afectada, como es el caso del tramo de vía en el talud en estudio; o la orografía o características del terreno donde se encuentra.

Desde el punto de vista de la infraestructura, la planificación se realiza de acuerdo con los siguientes parámetros:

- Longitud de vía afectada;
- Sentido de la vía afectado;
- Posibilidades de corte de circulación en el sentido adecuado;
- Situación de la vía en tramos cercanos al afectado;
- Condiciones meteorológicas;
- Relaciones con el cliente.

Desde el punto de vista de la operación de vuelo, la planificación se realiza teniendo en cuenta los siguientes parámetros:



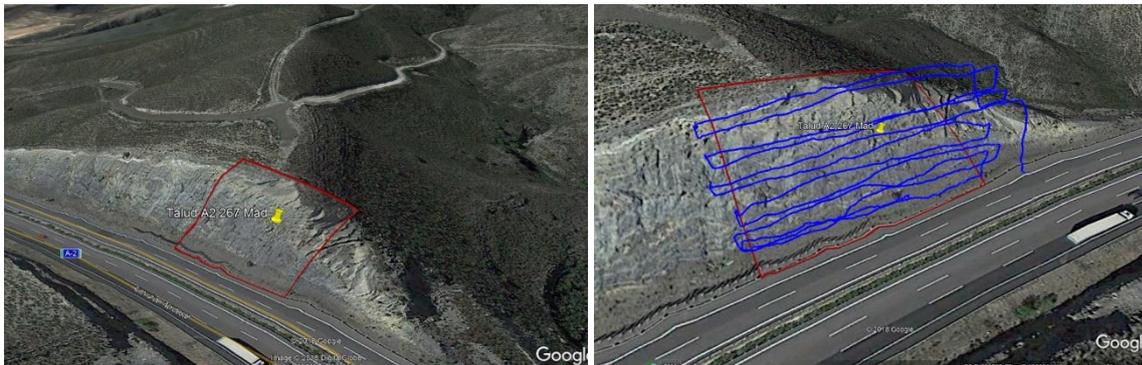
- Características y disposición del talud (pendiente, separación de la vía, altura, ancho a analizar...).
- Tipo (fotografía térmica o RGB, video, fotogrametría...) y requisitos de los datos a capturar (resolución, datos de la cámara como FOV, frecuencia de toma de fotos,
- Prestaciones de los drones y sistemas a utilizar (tamaño, tiempo de vuelo, disponibilidad de sensores de posicionamiento referido al entorno, prestaciones de las cámaras.

En función de todo ello se elaboran los planes de vuelo, con distancias al talud, alturas de vuelo, cadencia de toma de datos, georreferenciación, etc.

2.5.2. Operación de vuelo y captura de datos

La planificación concreta de la operativa de vuelo, tiene en cuenta las cuestiones logísticas relativas al desplazamiento de los equipos técnicos y humanos (distancia a la base operativa, viajes, portabilidad de los equipos de apoyo, horas requeridas para el vuelo...), los intrínsecos a la operativa en un entorno no preparado (ubicación, necesidad de recarga de baterías, alimentación para portátiles y equipos de apoyo, posibles desplazamientos a diferentes puntos de despegue, etc.), así como, por supuesto, las prestaciones de los drones en operación (posicionamiento en la localización concreta, apoyos para posicionamiento, referencias al entorno, autonomía de vuelo, necesidad de cambio de sensor...).

El software de planificación de vuelo está relacionado con el tipo de dron a utilizar, para lo que se necesitan conocimientos concretos y expertos de ambos. En las siguientes fotografías se muestran ejemplos de planificación de vuelo sobre talud:



La evolución de los programas de planificación permite anticipar una cierta convergencia en cuanto a la usabilidad por parte del usuario.

El desarrollo del proyecto ha permitido definir procedimientos muy estandarizados, que garantizan la aplicación en entornos de características diferentes entre sí con resultados homogéneos.

2.5.3. Gestión de datos y visualización de resultados

La gestión de los datos generados en el uso de los drones está pasando a convertirse en uno de los mayores problemas de la nueva tecnología, debido a que el volumen generado es cuantioso y a que permite una frecuencia mayor en la obtención de datos (obteniendo ventaja de su portabilidad, rapidez de despliegue y eficiencia operativa frente a otras fuentes de datos).

Además, la necesidad, en la mayoría de los casos, de procesar los datos obtenidos para hacerlos operativos añade complejidad al tratamiento y gestión de los datos. El procesamiento fotogramétrico es un ejemplo de ello, por ser de los más utilizados, pero también existe la necesidad en inspecciones termográficas o en la toma de datos con sensores multispectrales.



Los procedimientos actuales requieren de programas de procesamiento de diferentes prestaciones y ámbitos de actuación, con flujos de trabajo complejos, lo que está dificultando la aparición de sistemas o entornos integrales para el manejo de los datos en procesamiento y ya procesados. Se observa una gran heterogeneidad en la forma en que las organizaciones afrontan este problema.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MAT

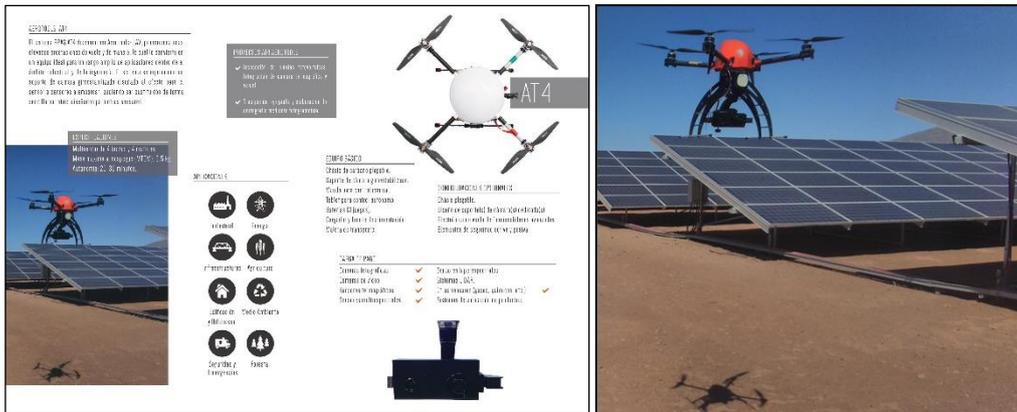
El sistema MAT desarrollado en el presente proyecto aporta soluciones a los aspectos señalados como más problemáticos según las prácticas actuales, con un enfoque innovador y, a la vez, muy centrado en la aplicación a corto plazo en escenarios reales. Por ello, se ha procurado estandarizar los procedimientos de forma que el uso de diferentes herramientas (por ejemplo, el dron o los sistemas embarcados) no influyan en los resultados generados.

A continuación, se describen con detalle los diferentes elementos que conforma el sistema MAT.

3.1. DRONES

Los equipos de vuelo más adecuados para actuaciones del tipo que se estudia en este caso son drones multirrotores de despegue y aterrizaje vertical, ya que combinan capacidad de carga adecuada con autonomía de vuelo suficiente y control sobre el posicionamiento ajustado.

Los modelos utilizados en el proyecto se seleccionaron después de un análisis de diferentes opciones, considerándose los más adecuados y óptimos teniendo en cuenta sus prestaciones y coste.



Modelo AT4 de AEROTOOLS especializado en termografía y cartografía.



Modelo DJI Phantom 3 Pro de AEROTOOLS como herramienta de cartografía.



3.1.2. Sistemas embarcados

De gran importancia resulta también el sistema embarcado para la captura de datos, en este caso y principalmente, cámaras RGB. En la siguiente tabla se muestran las características más relevantes de las cámaras embarcadas utilizadas en el proyecto:

ELEMENTO	CAMARAS		
	CANON G7X	DJI PH3	DJI PH4
Sensor	1" (13,20 x 8,80 mm) 19,9 megapíxeles (5.472 x 3.648)	1/2.3" CMOS Píxeles efectivos: 12.4 M (píxeles totales: 12.76 M)	1" CMOS Píxeles efectivos: 20M
Objetivo	24-100 mm (equivalente en formato 35mm)	FOV 94° 20 mm (35 mm formato equivalente) f/2.8, enfoque a ∞	FOV 84° 8.8 mm / 24 mm (formato equivalente a 35 mm) f/2.8 - f/11, enfoque a 1 m - ∞
Rango del zoom	4,2 x		
Apertura máxima	f/1.8 - f/2.8		
Rango ISO	125 - 12.800	100-3200 (vídeo) 100-1600 (foto)	100 - 3200 (Automático) 100- 12800 (Manual)
Sistema estabilizador	Óptico	Óptico	Óptico
Tamaño imagen	5.472 x 3.648	4000x3000	5472 x 3648
Modos de Vídeo	FHD: 1.920 x 1.080 (50/60 fps)	UHD: 4096x2160p 24/25, 3840x2160p 24/25/30 FHD: 1920x1080p 24/25/30/48/50/60	C4K:4096x2160 24/25/30p @100Mbps FHD:1920x1080 24/25/30p @100Mbps
Conectividad	WiFi, HDMI, USB (2.0)	DJI GO - 2.4 GHz ISM	DJI GO - 2.4 GHz ISM
GPS	No	No	No

3.1.3. Otros sistemas para la captura de datos

Para la toma de datos complementarios o que se utilizan para ampliar el campo de análisis, se han utilizado otros sistemas con el objeto de comparar los resultados y evaluar si se mejora la precisión de los mismos, en el caso del LIDAR, o para analizar la oportunidad de detección de fenómenos que se manifiestan fuera del espectro visible como es el caso de la cámara térmica.

Las características de la cámara térmica utilizada en la captura de datos son las siguientes:

Aspectos Técnicos	FLIR TAU 2 640 9 Hz
Tipo de sensor	Sensor Térmico LWIR no refrigerado Micro bolómetro Vox 640 x 512
Tamaño de píxel	17 µm
Banda espectral	7.5 - 13.5 µm
Sensibilidad	<50 mK @ f/1.0
Salidas	Video analógico 30/60Hz (NTSC); 25Hz/60Hz (PAL) Video digital - or 14-bit serial LVDS; 8- or 14-bit parallel CMOS; 8-bit BT.656
Rango de escena [ganancia alta]	De -25 a +100 °C
Rango de escena [ganancia baja]	De -40 a +550°C



Las características técnicas del LIDAR terrestre utilizado en la captura de datos son las siguientes:

Zoller+Froehlich IMAGER 5006i

Distancia máxima de medida	79 m.	
Distancia mínima de medida:	0.4m	
Resolución en la medida de distancia:	0.1mm	
Ratio de adquisición de datos:	= 508.000 px/sec	
Error lineal ⁽¹⁾ hasta 50m:	= 1mm	
Rango de ruido a 10m ⁽¹⁾ ⁽²⁾ :		
➤ Reflectividad 10% (black):	= 1.2 mm rms	
➤ Reflectividad 20% (gris oscuro):	= 0.7 mm rms	
➤ Reflectividad 100% (blanco):	= 0.4 mm rms	
Rango de ruido a 25m ⁽¹⁾ ⁽²⁾ :		
➤ Reflectividad 10% (black):	= 2.6 mm rms	
➤ Reflectividad 20% (gris oscuro):	= 1.5 mm rms	
➤ Reflectividad 100% (blanco):	= 0.7 mm rms	
Rango de ruido a 50m ⁽¹⁾ ⁽²⁾ :		
➤ Reflectividad 10% (black):	= 6.8 mm rms	
➤ Reflectividad 20% (gris oscuro):	= 3.5 mm rms	
Reflectividad 100% (blanco):	= 1.8 mm rms	
Influencia de la temperatura 8-10; 45°C):	despreciable	
TRANSMISOR ÓPTICO		
Láser:	visible	
Divergencia del haz:	0,22 mrad	
Diámetro del haz a 1m. de distancia:	3mm Circular	
Normas de seguridad del láser:	3R (ISO EN 60825-1)	
UNIDAD DEFLECTORA		
Sistema vertical	Espejo rotatorio	
Sistema horizontal	Terminal rotatoria	
Campo de visión vertical:	310°	
Campo de visión horizontal:	360°	
Resolución vertical:	0,0018°	
Resolución horizontal:	0,0018°	
Precisión vertical ⁽¹⁾ :	± 0,007° rms	
Precisión horizontal ⁽¹⁾ :	± 0,007° rms	
Velocidad máxima de escaneado vertical:	= 50 rps	
Velocidad típica de escaneado vertical ⁽²⁾ :	25 rps	
RESOLUCION		
Resoluciones	Pixel/360° (vertical/horizontal)	Tiempo de escaneado
Vista preliminar	1.250	25 sec
Media	5.000	1 min 40 sec
Alta	10.000	3 min 22 sec
Super alta	20.000	6 min 44 sec
Ultra alta	40.000	26 min 40 sec
Máxima resolución para las selecciones	100.000	-

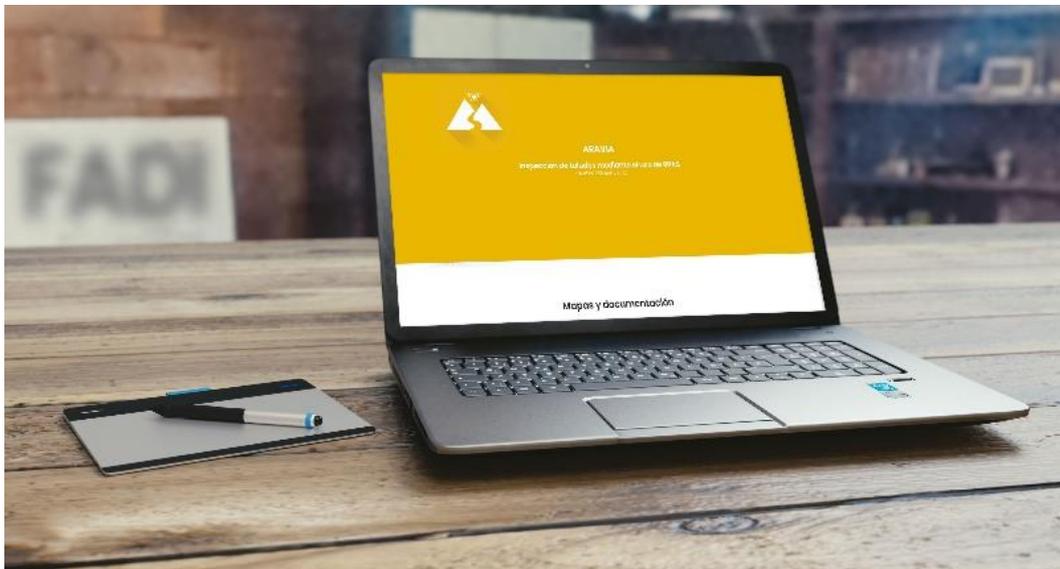


3.2. APLICACIÓN DE ANÁLISIS Y VISUALIZACIÓN DE DATOS CAPTURADOS

La gestión, la visualización y el análisis de la información capturada, en los distintos formatos en los que ésta pueda presentarse, representa uno de los aspectos más importantes a considerar en el ámbito de las aplicaciones de ingeniería que emplean drones. En este sentido, se plantea la necesidad de disponer de una herramienta que sea capaz de organizar los datos generados en las inspecciones de forma accesible e interoperable para el usuario que realice su explotación. Asimismo, ha de disponer de las herramientas y funcionalidades que permitan extraer la información de interés de cara a la toma de decisiones en las labores de conservación y mantenimiento de taludes en carreteras.

Esta organización de los datos está relacionada fundamentalmente con su localización espacial, de forma que, para una determinada ubicación, el usuario pueda acceder a la porción de información que efectivamente le correspondan.

El sistema MAT desarrollado tiene como objetivo servir como base para el estudio y análisis de taludes de cara a la optimización de las labores de inspección, la monitorización de fenómenos y la gestión de la información.



- La herramienta está desarrollada en formato de aplicación de escritorio para PC Windows, y en ella se incluye tanto la totalidad de la información capturada en sucesivas inspecciones, como las herramientas y funcionalidades para la explotación de los datos.
- Se basa en la integración de software y librerías de código abierto, evitando que el usuario deba manejar diferentes tipos de aplicaciones para la consulta y extracción de información.
- El suministro o acceso a la aplicación se realiza a través de un único fichero de instalación, lo cual supone que no es necesario por parte del usuario manejar sistemas de archivos y carpetas, proporcionando un único entorno y plataforma de acceso a toda la información disponible.

Se trata además de una herramienta “viva” puesto que permite ser actualizada a medida que se realizan nuevas inspecciones y se generan nuevos datos, permitiendo la agregación de información en el tiempo y por tanto la comparación entre éstos y los ya disponibles, facilitándose así la detección de cambios y/o la monitorización de determinados fenómenos.



3.2.1. Módulos

La aplicación se estructura en diferentes módulos cuya configuración es flexible en función de las necesidades concretas, tanto por parte del usuario como las determinadas por el propio proyecto. Los módulos de los que se componen son:

- Visor de mapas.
- Visor de nubes de puntos
- Galería de elementos multimedia
- Repositorio de documentos
- Generador de informes



3.2.1.1. Módulo Visor de Mapas

El módulo visor de mapas representa, sobre cartografía base, la localización geográfica de los diferentes taludes que forman parte de la concesión y sobre los que se han llevado a cabo inspecciones.

Este mapa presenta las siguientes características:

- Es navegable y continuo, es decir, se trata de un mapa sin límites y sobre los que el usuario puede desplazarse para acceder a la información de interés.
- Es un mapa multiescala, que puede mostrar diferente tipología de información o detalle en función de la escala que se maneje.
- Cada uno de los elementos geográficos (taludes), tiene asociada información alfanumérica procedente de bases de datos geográficas, accediendo a ella a través de elementos emergentes y/o enlaces.
- Son mapas dinámicos, en el sentido que se mantendrán actualizados a medida que sean alimentados con datos procedentes de las propias inspecciones.
- Permiten la integración, visualización y empleo de datos tanto de fuentes externas como de fuente internas (generados por la propia inspección).



El mapa está compuesto por tres categorías de elementos:

- Cartografía base procedente de servidores de mapas.
- Capas, es decir, cada uno de esos elementos geográficos y sus bases de datos asociadas, que representan los taludes, así como posibles datos geográficos accesorios tanto de fuentes internas como externas. La base de la información estará compuesta por archivos vectoriales bidimensionales (2D).
- Una serie de herramientas que permitan la navegación sobre el mapa, la consulta de la información contenida en ellos, así como la edición y la introducción de información asociada a un determinado elemento (en el apartado de Funcionalidades se incluye una relación de estas).

3.2.1.2. Módulo Visor de Nubes de Puntos

El módulo visor de nubes de puntos representa la parte de mayor potencia en cuanto a la capacidad de consulta y extracción de información de la aplicación. Se trata de un visor basado en librerías *Open Source* y permite la visualización tridimensional de una o varias nubes de puntos de forma simultánea.

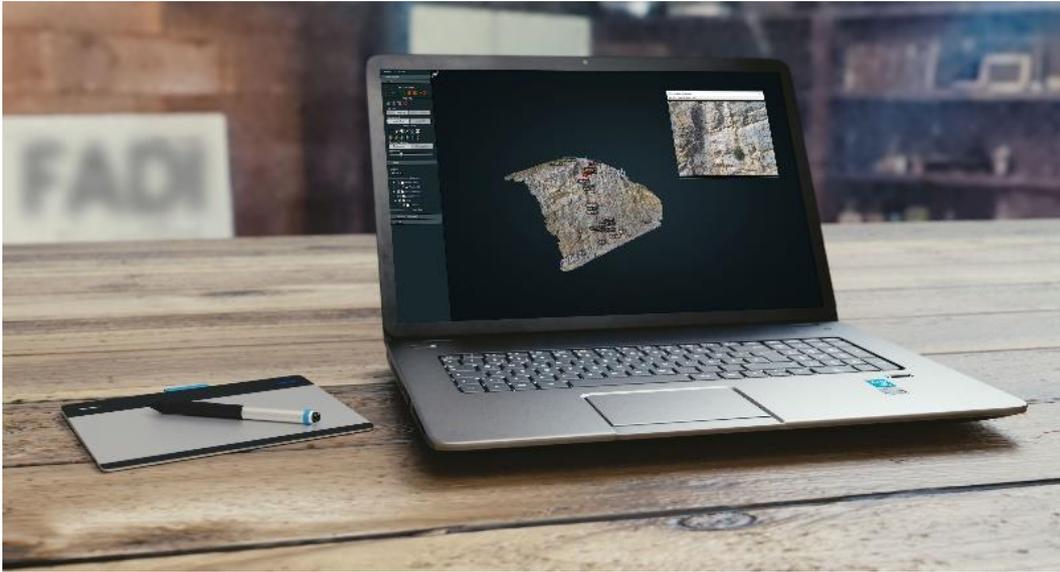
Estas nubes de puntos, las cuales consisten en puntos referenciados con coordenadas XYZ en un Sistema de Referencia de Coordenadas determinado, pueden proceder de diferentes fuentes. A saber:

- Nubes de puntos fotogramétricas obtenidas a partir de vuelos realizados con drones.
- Nubes de puntos fotogramétricas a partir de imágenes capturadas desde tierra.
- Nubes de puntos LiDAR (terrestre o aéreo).

El hecho de disponer de una posición XYZ para cada uno de los puntos de la nube permite obtener información métrica de cualquier elemento representado en el talud, como puede ser la posición espacial de un elemento, distancias en tres dimensiones, áreas, perfiles, etc. En el apartado de

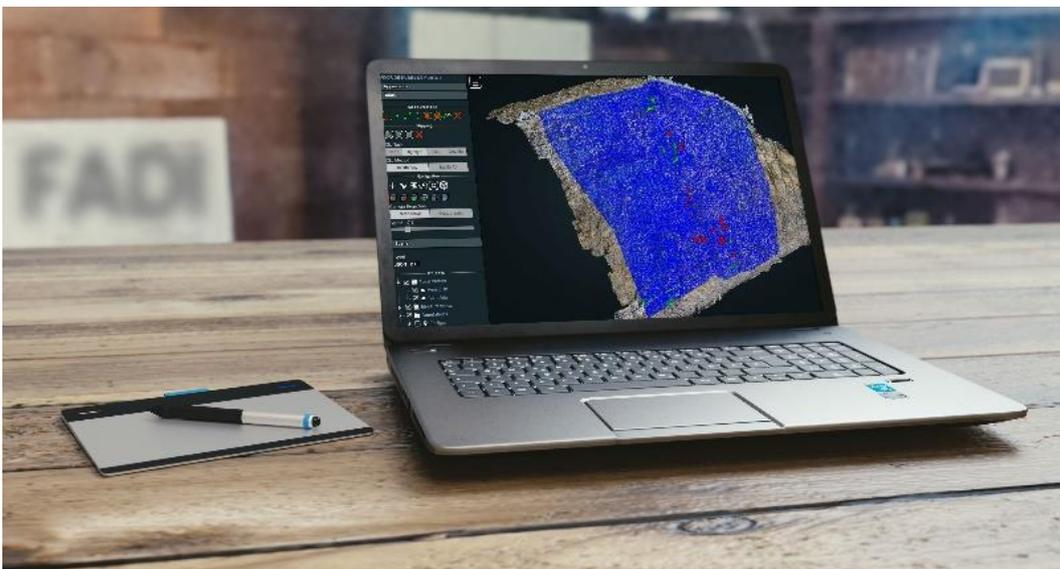


Funcionalidades se incluye una relación de las herramientas de consulta y extracción de información disponibles.



Además de la visualización de la nube de puntos, el módulo permite el acceso a la información gráfica (imágenes o vídeos) y alfanumérica asociada a un elemento concreto del talud, el cual se puede localizar sobre la nube de forma precisa. Esta información se muestra a través de elementos emergentes para su consulta sin necesidad de salir de la propia aplicación.

En el caso concreto de las labores asociadas a la conservación de taludes, el visor permite la integración y visualización de forma simultánea de la información capturada en sucesivas inspecciones, de cara a poder realizar una comparativa que permita detectar cambios que puedan producirse en el tiempo.





Este seguimiento a través de la detección de cambios se puede efectuar por una doble vía:

- A partir de la comparación de las sucesivas nubes de puntos obtenidas para la obtención de posibles diferencias dimensionales entre ambos (caída de rocas, derrumbes, depósito de materiales, rotura o deformación de elementos de protección, etc.), y/o
- A partir de la observación de diferencias a nivel visual visionando las imágenes tomadas en las sucesivas inspecciones (existencia o no de determinados elementos).

El visor está estructurado en dos bloques fundamentales:

- El visor 3D donde se muestra la(s) nube(s) de puntos localizada en el espacio, así como la posición de todos los elementos de interés del talud e imágenes capturadas.
- El panel de control, donde se ubican las herramientas y controles del propio visor.

3.2.1.3. Módulo Galería de elementos multimedia

El módulo de elementos multimedia permite la consulta y visualización de elementos gráficos capturados en las inspecciones. El acceso a los mismos se encuentra organizado en base a éstas, de modo que se facilite al usuario un modo rápido y ordenado de acceso a esta información.

El tipo de material gráfico que se puede integrar en el módulo es amplio e irá en función del sensor o sensores empleados durante la inspección. Típicamente estará compuesto por galerías de imágenes visuales de las sucesivas inspecciones, aunque se pueden integrar:

- Vídeos visuales.
- Imágenes y vídeos térmicos.
- Imágenes capturadas en otras regiones del espectro electromagnético.

El acceso a las imágenes de las inspecciones puede realizarse asimismo a partir de los módulos de visor de mapas y de nube de puntos, dado que se encuentran ligados logrando así una mejora en la accesibilidad de la información.

3.2.1.4. Módulo Repositorio de documentos

Uno de los objetivos de la aplicación es el de reunir en un único entorno la mayor cantidad de información acerca de cada uno de los taludes independientemente de su tipología o formato. En este sentido, se dispone de un módulo en el que se permite la visualización y descarga de información documental relativa a las inspecciones y/o otras labores de conservación, así como los relativos a las operaciones de captura de datos con drones y/o otras herramientas.

La consulta se realiza a través de la implementación de un visor de documentos *.pdf*, permitiendo asimismo la descarga de los mismos para su uso fuera de la aplicación.

3.2.1.5. Módulo Generador de informes

El módulo generador de informes consiste en un editor de texto en el que sobre un formulario “tipo” se permite la introducción de texto relativo a una determinada inspección de talud o de elemento en concreto. El objetivo de este es el de permitir la emisión de informes desde la propia aplicación a medida que se analizan los datos volcados en el resto de los módulos de la aplicación. Su configuración y contenido es adaptable en función de la diferente tipología de trabajos o inspecciones



a realizar, permitiendo la integración de cuantos formularios “tipo” diferentes se desee por parte del usuario.

Este módulo incluye asimismo un generador de hojas de imágenes para complementar al texto introducido en los formularios.

Los módulos descritos componen la configuración actual de la aplicación, no obstante, la adaptabilidad en el diseño que permite la misma, hace que ésta sea una herramienta viva, capaz de integrar actualizaciones constantes, así como flexible por cuanto permite la integración de nuevos módulos y funcionalidades que se adapten a las necesidades de un talud en concreto. Asimismo, se plantea como una herramienta escalable de cara a su empleo en la conservación de otro tipo de infraestructuras.

3.2.2. Funcionalidades

A continuación, y para cada uno de los módulos descritos en el apartado anterior, se recogen las funcionalidades que integran, las cuales representan las herramientas fundamentales proporcionadas por la aplicación para la inspección y seguimiento en la conservación de taludes en carreteras. Asimismo, en la página 26 se incluye una figura con la distribución esquemática de ésta.

3.2.2.1. Visor de mapas

- Control de mapas base.
- Control de capas vectoriales.
- Mediciones.
- Consulta de coordenadas.
- Consulta de información asociada a los elementos geográficos (taludes).
- Localización.
- Buscador de elementos geográficos.
- Leyenda.

3.2.2.2. Visor de nubes de puntos

- Mediciones.
 - Puntos.
 - Ángulos.
 - Distancias.
 - Alturas.
 - Áreas.
 - Volúmenes.
 - Perfiles.
- Exportación de ficheros de coordenadas.
- Exportación de nubes de puntos.
- Filtrado de puntos para visualización.
- Control de navegación y vistas.
- Control de capas.
 - Nubes de puntos.
 - Medidas.
 - Anotaciones.
 - Imágenes.
- Filtro de clasificación de nubes de puntos.
- Controles de apariencia de la nube de puntos.
- Acceso a información alfanumérica.
- Desplegable de imágenes o vídeos asociados a elementos del talud.



3.2.2.3. Galería de elementos multimedia

- Directorio de imágenes organizadas por inspecciones y/o talud.
- Visualizador de imágenes.
- Visualizador de vídeo.

3.2.2.4. Repositorio de documentos

- Directorio de acceso a documentos organizados por inspecciones y/o talud.
- Visualizador de documentos.
- Descarga de documentos.

3.2.2.5. Generador de informes

- Editor de texto.
- Inclusión de imágenes de apoyo al informe.

3.3. OTRAS HERRAMIENTAS DE CAPTURA DE DATOS

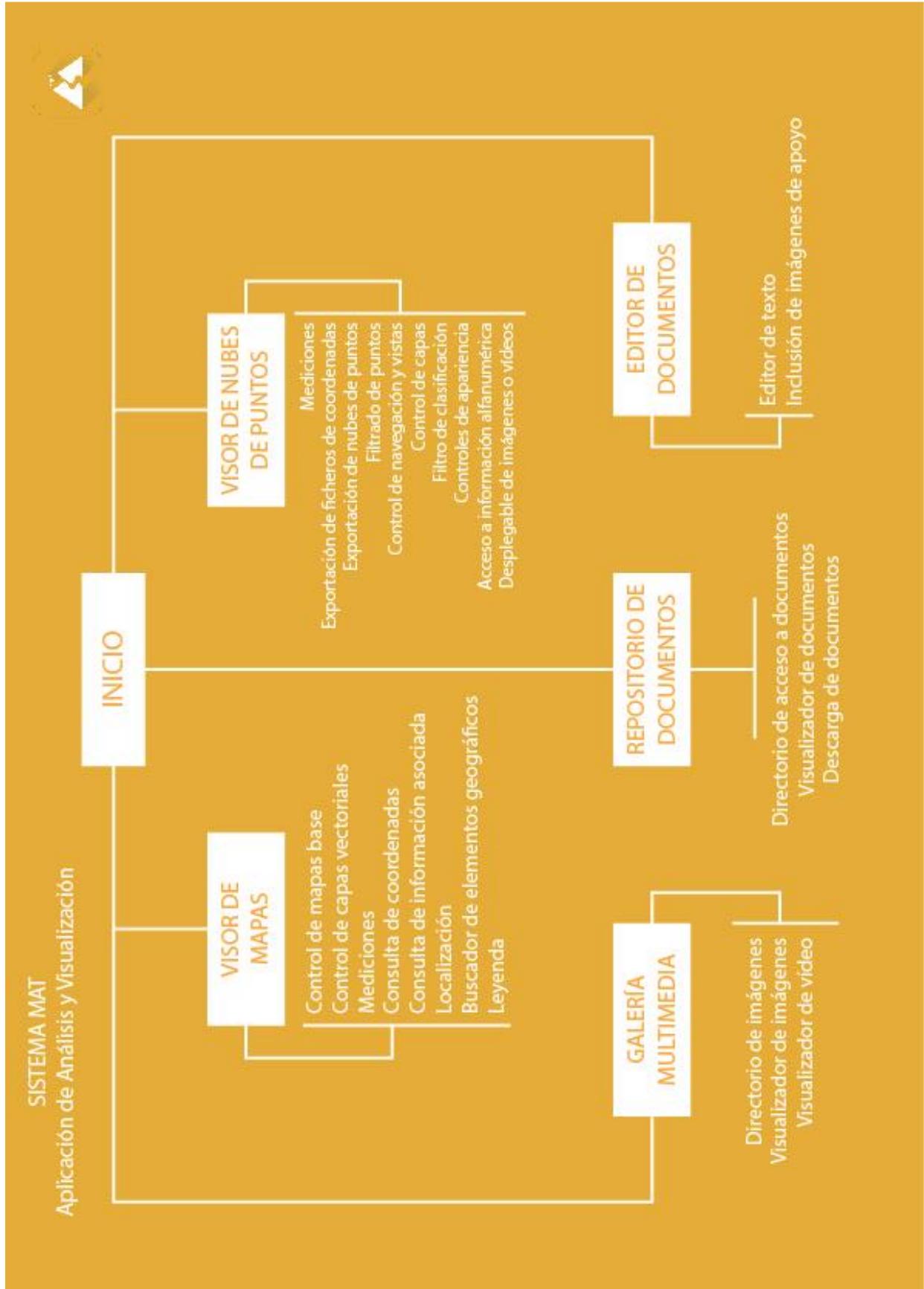
Uno de los aspectos más relevantes a tener en cuenta a la hora de valorar la potencialidad de las herramientas y la metodología que se describe en este trabajo, es la capacidad para poder emplear e integrar para su visualización y análisis información y datos procedentes de otros sensores y/o sistemas. En este sentido, y durante las campañas de vuelo realizadas, se han empleado sensores auxiliares de cara a evaluar su posible empleabilidad como apoyo en la conservación de taludes.

Así, se ha empleado un sensor termográfico para la evaluación de la capacidad de estos sensores para la detección remota de determinados fenómenos relacionados con el efecto de la humedad y el agua en la superficie del talud.

De la misma manera, se ha empleado un escáner LiDAR terrestre con objeto de obtener información geométrica de referencia para su utilización en el control dimensional del talud. El equipo empleado en este caso es terrestre por razones que tiene que ver con la precisión de las mediciones. En la actualidad, existen sistemas LiDAR diseñados para ser embarcados en drones, los cuales, aun con menor precisión en el posicionamiento, hacen factible integrar esta tecnología en los flujos de trabajo y en los sistemas de visualización de la información planteados en el presente trabajo.

Asimismo, y poniendo el enfoque hacia aplicaciones relacionadas con la monitorización de la estabilidad de taludes y su relación con la vegetación, existen sensores de tipo multiespectral embarcables en drones que pueden también proporcionar información valiosa en la conservación de infraestructuras viarias.

En definitiva, la flexibilidad por un lado de los drones como soporte para el embarque de diferentes tipos de sensores, como del sistema desarrollado para la visualización y análisis de datos, proporcionan un elevado potencial de aplicación exitosa en el ámbito de la inspección de taludes en particular, y de infraestructuras en general.

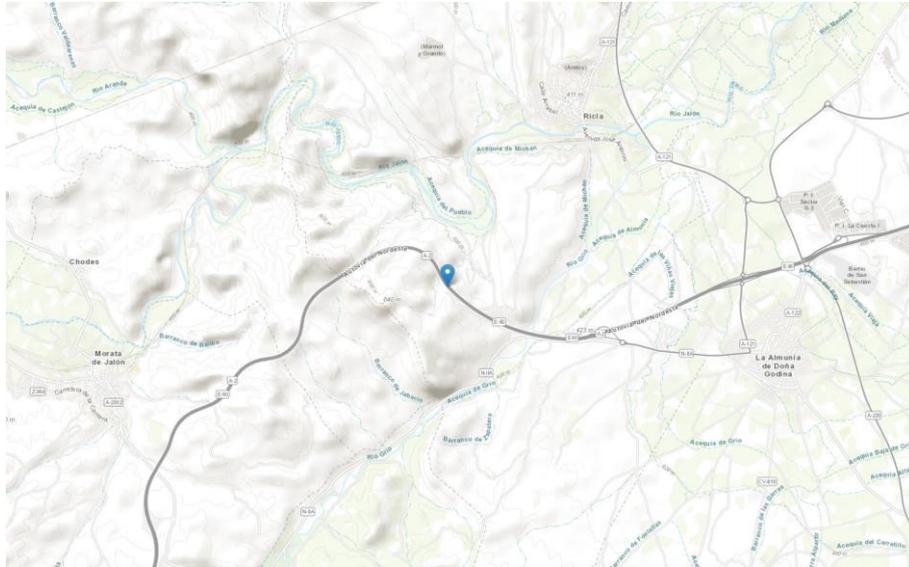




4. PRUEBAS DE CAMPO Y VALIDACIÓN

4.1. ESCENARIO

El talud seleccionado para la realización de los trabajos objeto del presente proyecto se localiza en el PK 266 de la autovía A-2 sentido creciente, en el término municipal de Ricla, provincia de Zaragoza.



Se trata de un tramo de talud de 70 metros aproximadamente, si bien los trabajos realizados se concentraron en una franja de 50 m ubicada en las siguientes coordenadas (SRC ETRS89 UTM Huso 30N):

X	Y	Z
631577.395	4593747.473	474.301





La altura máxima en coronación del talud se sitúa próxima a los 40 m, presentando un perfil transversal irregular que dificultan la inspección visual del mismo desde tierra.



Sobre el talud se ubican elementos para la estabilización del mismo como bulones, así como una malla anti-desprendimientos que ocupa parte de su superficie.

4.2. OBJETIVOS

Los objetivos que se plantearon para las pruebas de campo y validación del sistema fueron los siguientes:

- Determinación de las potencialidades del uso de drones en la conservación de taludes en carretera.
- Evaluación del alcance de la información capturada.
- Determinación de los equipos y herramientas óptimas para la inspección de taludes mediante el empleo de drones.
- Desarrollo de una metodología de inspección.
- Desarrollo de una herramienta para la consulta, visualización y análisis de la información capturada.

Estos objetivos cubren los aspectos más relevantes del proyecto y su grado de cumplimiento permiten obtener una referencia clara de la validez y potencial de aplicación del sistema MAT.



4.3. CAMPAÑAS DE TOMA DE DATOS

De cara a la obtención de la información necesaria para la consecución de los objetivos marcados se realizaron una serie de campañas de vuelo y toma de datos, en los que se emplearon distintos sistemas y sensores. En la siguiente tabla se recoge un resumen descriptivo de estas:

Campaña	Drones	Sensores	Equipos auxiliares
Septiembre 2017	Aerotoools AT-4	Cámara visual RGB	
	DJI Phantom 3	Cámara termográfica	
Junio 2018	Aerotoools AT-4	Cámara visual RGB	
	Aerotoools AT-4	Cámara termográfica	
Agosto 2018	DJI Phantom 3	Cámara visual RGB	Láser Scanner terrestre
	DJI Phantom 4		

La duración de cada una de las campañas se limitó a una jornada de trabajo en campo, con objeto de reproducir con fidelidad la aplicación del sistema en el mundo real, donde existen restricciones ya comentadas como la afección de los trabajos de mantenimiento a la circulación por la vía, la disponibilidad de los equipos humano y técnico, las condiciones ambientales, etc.

4.4. PLANIFICACIÓN

Previamente a la realización de cada una de las campañas de toma de datos, se llevó a cabo la planificación de las operaciones de vuelo a realizar durante las mismas. Para ello se dispuso de la información cartográfica disponible para el área de estudio, así como de los datos topográficos de los elementos colocados en el talud con objeto de servir de apoyo para su reconstrucción y control geométrico (dianas e hitos feno topográficos). En la segunda y tercera campaña, esta información se complementó con la recogida en la(s) campaña(s) anterior(es).

La realización de las planificaciones implica la configuración de una serie de parámetros y de la determinación de las trayectorias de vuelo a seguir por el dron.

Los parámetros principales que se configuran, y cuyos valores fueron ajustándose en cada una de las campañas con objeto de determinar su grado de idoneidad son:

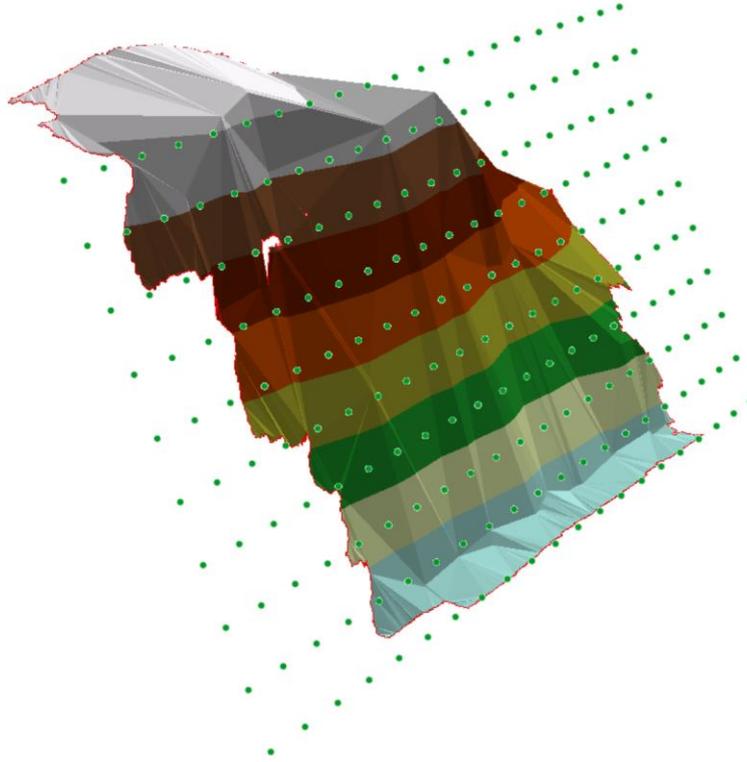
- Distancia horizontal de vuelo con respecto al talud.
- Velocidad de vuelo.
- Solape longitudinal y transversal entre imágenes.
- Longitud focal y resolución del sensor embarcado.
- Velocidad de disparo (intervalo de captura).

La configuración de las misiones de vuelo se efectúa a través de diferentes programas informáticos en función del tipo de dron a emplear. En este caso, las herramientas informáticas empleadas fueron Mission Planner, para la configuración de los vuelos y el diseño de rutas del dron Aerotoools AT-4, y DJI GS Pro para las operaciones con DJI Phantom.



De cara a asegurar la uniformidad de los datos capturados con el dron, el planteamiento en las planificaciones parte del diseño de una trayectoria de vuelo “tipo” a partir de la cual ejecutar los vuelos, ya sea de forma automática o manual en función de las limitaciones en cuanto a recepción de señal GPS que puedan condicionar la realización de las primeras.

De esta manera, todos los sucesivos vuelos a realizar sobre el talud se ajustarán a esta trayectoria tipo, asegurando así la replicabilidad de los propios vuelos de cara a la comparación y seguimiento del talud.



4.5. OPERACIONES DE VUELO Y CAPTURA DE DATOS

Como ya se ha mencionado anteriormente se realizaron tres campañas de toma de datos en el período desde septiembre de 2017 a agosto 2018, en los que se recogió la información necesaria de cara, por un lado, al desarrollo de la metodología de inspección a emplear, así como a la evaluación de los resultados esperables para las mismas.

La información principal generada consistió en todos los casos en imágenes visuales RGB empleadas para la reconstrucción geométrica del talud aplicando técnicas de fotogrametría, así como para la interpretación y análisis visual directo a partir de ellas. En paralelo, se emplearon sensores termográficos y escáner LiDAR con objeto de reforzar el estudio del talud, así como para evaluar la capacidad de la metodología y las herramientas desarrolladas para integrar información procedente de otras fuentes.

Con objeto de mejorar la precisión geométrica de los resultados se emplearon puntos de control en el talud, los cuales consistieron en la colocación de dianas en la base del mismo y de hitos feno en la coronación.



El número de estos elementos coincidente con el área de estudio fue de 3 hitos feno y 4 dianas (como la que se observa en la fotografía siguiente).



4.5.1. Campaña de vuelos septiembre 2017

Los equipos empleados en este caso fueron los multicopteros Aerotools AT-4 y DJI Phantom 3. El primero de ellos para la toma de datos de inspección propiamente, mientras que el segundo fue empleado como medio para la adquisición de imágenes y vídeos de documentación.

Los sensores empleados en el caso del equipo principal (AT-4) fueron:

- Cámara visual digital Canon G7X de 20,2 Mpx
- Cámara termográfica FLIR Tau2 640x512 px

Para la captura de datos se tuvo en cuenta la ubicación de los puntos de control situados sobre el talud.

La información recogida consistió en:

- 298 imágenes RGB.
- 1 vídeo térmico de la superficie del talud.



4.5.2. Campaña de vuelos junio 2018

Los equipos empleados, de la misma forma que en el caso anterior, fueron los multicopteros Aerotools AT-4 y DJI Phantom 3.



Los sensores empleados en el caso del equipo principal (AT-4) fueron:

- Cámara visual digital Canon G7X de 20,2 Mpx
- Cámara termográfica FLIR Tau2 640x512 px

Para la captura de datos se tuvo en cuenta la ubicación de los puntos de control situados sobre el talud.

La información recogida consistió en:

- 418 imágenes RGB.
- 1 vídeo térmico de la superficie del talud.

4.5.3. Campaña de vuelos agosto 2018

Los equipos empleados para la captura de datos fueron los multicopteros Aerotools AT-4 y DJI Phantom 4, mientras que el DJI fue empleado de nuevo para la documentación de las operaciones...

Los sensores empleados en el caso del equipo principal (AT-4) fueron:

- Cámara visual digital Canon G7X de 20,2 Mpx

En el caso del DJI Phantom 4:

- Cámara visual digital de 20 Mpx

Paralelamente a la realización de los trabajos aéreos se llevó a cabo el escaneo del talud mediante el empleo de un escáner LiDAR terrestre modelo Zoller+Froehlich Imager 5600, para la generación de una nube de puntos de detalle del talud.

Para la captura de datos se tuvo en cuenta la ubicación de los puntos de control situados sobre el talud.



La información recogida por los drones consistió en:

- 367 imágenes RGB procedentes del equipo AT-4.
- 642 imágenes RGB procedentes del equipo Phantom 4.

4.6. PROCESADO Y GESTIÓN DE DATOS

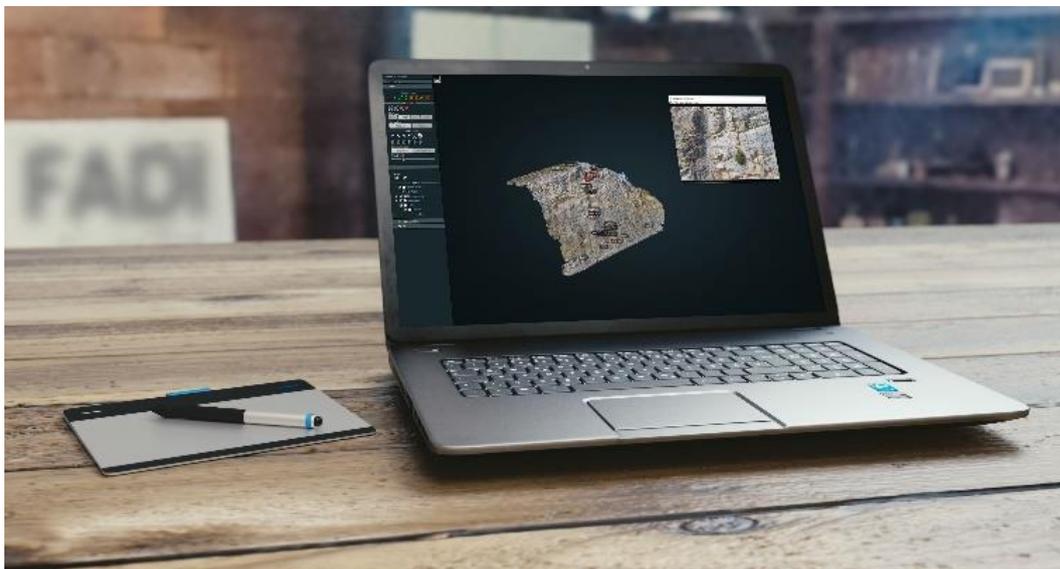
La fase de procesado de información consiste en primer lugar en la georreferenciación de toda la información capturada para, a continuación, proceder al procesado fotogramétrico de las imágenes con el objetivo de obtener las correspondientes nubes de puntos que permitan obtener información dimensional sobre el talud y todos los elementos que se ubiquen en él.

Para el procesado de las imágenes se han empleado indistintamente dos softwares como son Agisoft Photoscan y Pix4D. Se trata en ambos casos de programas optimizados para el tratamiento de imágenes obtenidas por sensores embarcados en drones.

Como resultado del procesado de las imágenes capturadas en las campañas de vuelo descritas en el apartado anterior, se generaron tres nubes de puntos coloreadas de la zona de interés, de diferentes resoluciones en función de las distintas configuraciones de vuelo adoptadas en cada caso.

Campaña	Nube de puntos
Septiembre 2017	19.955.435 puntos
Junio 2018	60.222.375 puntos
Agosto 2018 (drones)	72.578.207 puntos
Agosto 2018 (LiDAR)	92.132.478 puntos

El hecho de disponer de diferentes nubes de puntos y, por ende, de puntos de coordenadas XYZ conocidas, para tres períodos de tiempo diferentes, permite llevar a cabo la comparación de las mismas de cara realizar el control dimensional del talud para detectar posibles movimientos o desplazamientos de material. Para ello se ha empleado el software Cloud Compare, el cual realiza la comparación entre nubes de puntos y generando a su vez una nube en la que se representan, tanto numérica como visualmente, las diferencias dimensionales entre ellas, proporcionando una herramienta muy potente de cara a la inspección de taludes y otros tipos de infraestructuras viarias.





Dado que las propias imágenes capturadas, más allá de su empleo para la reconstrucción geométrica del talud mediante fotogrametría, son parte de los resultados de los trabajos (para el análisis visual del talud y de sus elementos), su manejo y organización es también un aspecto clave. En este sentido, la correcta georreferenciación y ubicación espacial de las mismas para cada una de las inspecciones permitirá acceder a aquellas referidas a un mismo punto o elemento para cada uno de los tiempos en los que fue capturada, permitiendo así una comparación también a nivel visual.

4.7. VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS

Una vez realizado el procesado y organizada la información capturada, se trata de generar el entorno que permita su consulta, visualización y análisis. Así, y tal como se ha descrito en el apartado de descripción de la aplicación desarrollada para este fin, se dispone de una herramienta que facilita el acceso integral a la información localizada tanto en su dimensión espacial como temporal, y que dispone de las herramientas necesarias para poder comparar y realizar un seguimiento del estado de los taludes y sus elementos que sirva de apoyo a las labores de conservación.

La disponibilidad de esta herramienta es tanto más importante por cuanto permite disponer de diferentes tipologías de información sin tener que emplear diferentes medios de visualización y extracción de datos, siendo capaz asimismo de manejar y almacenar el elevado volumen de datos que se genera en las inspecciones.

En el caso de los trabajos realizados, se dispone de una herramienta que integra:

- i. Las nubes de puntos de cada una de las tres campañas realizadas, tanto las fotogramétricas como la nube de puntos LiDAR.
- ii. Las imágenes capturadas (visuales y térmicas).
- iii. Documentación relativa a las operaciones y a la propia infraestructura.



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez descritas las herramientas, la metodología y el flujo de trabajo realizado en el presente proyecto, se describe a continuación el proceso de evaluación de los resultados obtenidos de cara a determinar la robustez y aplicabilidad de aquellas.

Se trata de valorar en este apartado diferentes aspectos relacionados con la precisión e idoneidad de la información capturada con respecto a las necesidades inherentes a la conservación de taludes en carreteras. De esta manera, se evalúan:

- Nivel de detalle alcanzado por las imágenes visuales capturadas.
- Capacidad de detección de movimientos en el talud o desplazamiento de materiales o elementos.
- Precisión en la determinación de la posición de elementos en el talud.

5.1. EVALUACIÓN DE LAS IMÁGENES

La interpretación visual de las imágenes para evaluar el estado de un determinado elemento, o la comparación de una determinada zona del talud, requiere que éstas tengan una resolución y nivel de definición tal que permita la identificación y valoración de forma clara y sencilla. En este sentido, y dado el nivel de resolución y prestaciones que ofrecen las cámaras actuales que pueden emplearse para su uso en drones, las capacidades en cuanto derivadas de sus especificaciones cumplen sobradamente con las necesidades. No obstante, en este caso la distancia al objetivo a identificar juega un papel preponderante, ya que, a igualdad de características entre sensores, el nivel de detalle a distinguir será mayor en el caso de imágenes tomadas más cerca del objetivo.

En esta línea se capturaron imágenes del talud en diferentes modalidades en cada una de las campañas realizadas. A saber:

Campaña	Distancia al talud	Inclinación cámara
Septiembre 2017	15 m	0°
Junio 2018	8 m	45°
Agosto 2018	8 m	0°

Tras la realización de la primera campaña de vuelo, realizada a una distancia de 15 m del talud, se estimó necesario reducir la distancia de cara a aumentar la resolución de las imágenes. En las dos campañas sucesivas se redujo a 8 metros, logrando un nivel de definición adecuado para los objetivos marcados para el trabajo. En el caso de la inclinación de cámara, y tras testear un ángulo de inclinación de 45 grados, se determinó que no resulta adecuado dado que se producía una merma significativa en la calidad de la reconstrucción fotogramétrica sin que aportara mejoras en cuanto a la capacidad de identificación visual.

A la luz de los resultados obtenidos, y en el caso de las imágenes capturadas a 8 metros de la superficie del talud, se puede concluir que bajo las condiciones descritas podemos alcanzar un nivel de definición en la imagen que nos permite distinguir a nivel visual variaciones en elementos por debajo del centímetro.



A continuación, se muestran dos ejemplos de imágenes capturadas señalando el mismo elemento como justificación de lo anteriormente descrito:

Comparativa de bulón



Detalle de bulón septiembre 2017. Aerotools AT-4 Canon G7X



Detalle de bulón junio 2018. Aerotools AT-4 Canon G7X



Detalle de bulón agosto 2018. DJI Phantom 4



Comparativa de malla



Detalle de malla septiembre 2017. Aerotools AT-4 Canon G7X



Detalle de malla junio 2018. Aerotools AT-4 Canon G7X



Detalle de malla agosto 2018. DJI Phantom 4



5.2. DETECCIÓN DE MOVIMIENTOS Y DESPLAZAMIENTOS

La disponibilidad de diferentes nubes de puntos correspondientes a sucesivas inspecciones permite realizar una comparación geométrica entre ellas para poder determinar posibles movimientos o desplazamientos. Para ello, y mediante el empleo de software open source de manejo de nubes de puntos, el ya mencionado Cloud Compare, se comparan las nubes obtenidas en las tres campañas de vuelo entre sí.

El resultado son tres nubes comparativas en las que se reflejan de forma localizada los desplazamientos entre ellas en términos de distancias absolutas (septiembre/junio, septiembre/agosto, junio/agosto), las cuales quedan preparadas para su implementación en la aplicación de visualización y análisis. Una vez determinadas las áreas marcadas con desplazamientos, se proporciona una visualización directa al usuario sobre los puntos sobre los que realizar un seguimiento.

De cara a la validación de los resultados obtenidos, se indujeron de forma artificial movimientos en el talud mediante el desplazamiento manual de materiales. De cada una de las zonas donde se actuó se tomaron coordenadas mediante equipo topográfico de precisión subcentimétrica. El objetivo por tanto es el de evaluar el nivel de detección de estos movimientos que pueden detectarse aplicando la metodología de inspección con drones descrita en este trabajo.

Así, se registran trece actuaciones, las cuales se relacionan en la siguiente tabla. Las actuaciones identificadas como ROC1, ROC2 y ROC3 generaron efectos en diferentes localizaciones, es por ello que se registraron varias posiciones para las mismas.

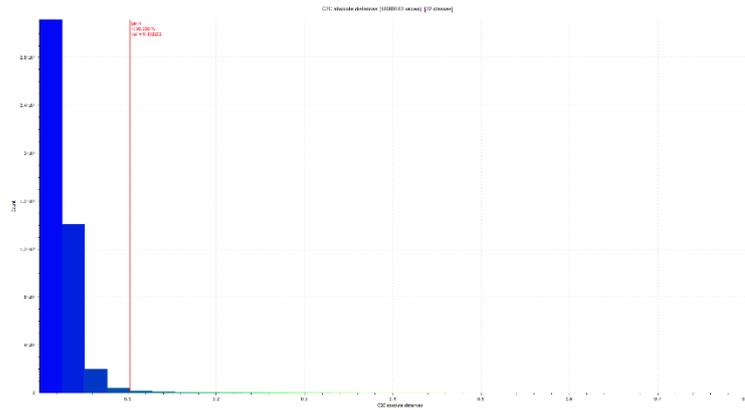
Identificador	Coord X	Coord Y	Coord Z
ROC1-1	631571.716	4593735.097	503.125
ROC1-2	631572.024	4593734.979	503.036
ROC2-1	631576.119	4593738.927	492.126
ROC2-2	631576.816	4593739.162	490.663
ROC3-1	631578.125	4593738.695	489.322
ROC3-2	631580.247	4593740.138	482.274
ROC4	631579.627	4593740.786	482.455
ROC3-3	631580.259	4593740.235	482.225
ROC5	631576.08	4593744.146	482.401
ROC6	631574	4593746.581	482.752
ROC7	631574.502	4593746.391	482.384
ROC8	631576.102	4593745.578	479.641
ROC9	631575.734	4593748.707	476.159

Dado que estas actuaciones se llevaron a cabo de forma previa a los vuelos de agosto, las nubes de puntos a emplear obligan necesariamente para realizar la evaluación utilizar la nube de puntos de agosto. A partir de este punto, se descarta la nube resultado de la comparación junio/agosto debido a las diferencias en cuanto a los ángulos de captura de las imágenes (45° vs. 0°), debido a que en la primera se presentan áreas en las que no se generan puntos debido a las propias características del talud (con numerosas áreas en contrapendiente que suponen áreas “oscuras”).

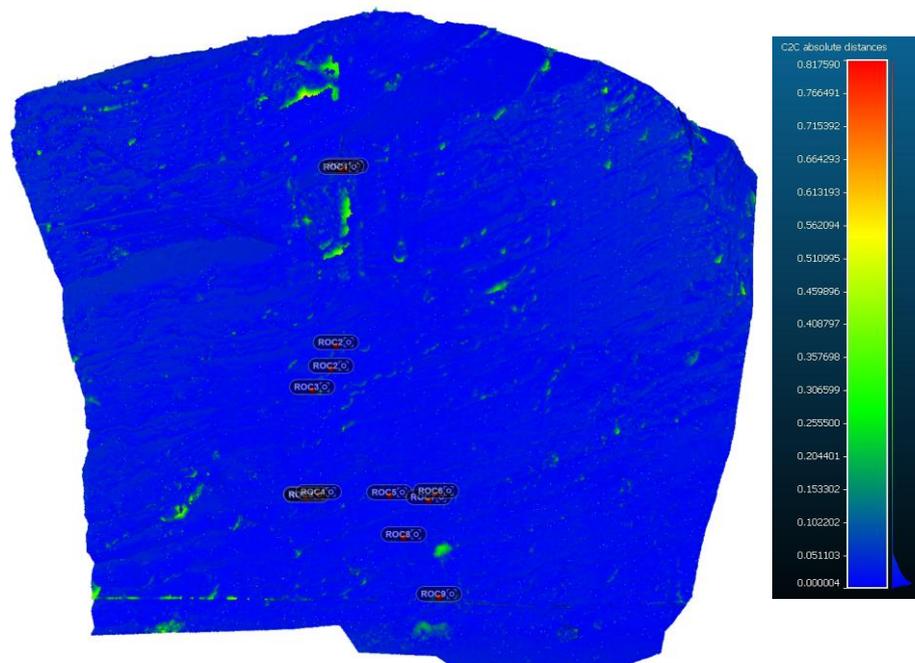


Una vez hechas estas consideraciones, se procede a realizar la comparación de la nube de puntos diferencia entre septiembre/agosto. Esta nube de puntos arroja unas diferencias, en valores absolutos, que oscilan entre los 0 y los 0,81 m.

Analizando la distribución de valores de diferencias absolutas entre ambas nubes a la luz de lo mostrado en el histograma, se observa que nos encontramos en un percentil 98 para valores por debajo de los 10 cm de diferencia para una nube de algo más de 48 millones de puntos.



En la siguiente figura se representa sobre el alzado del talud la localización en diferentes tonos de color las distancias de desplazamiento estimadas de forma automática, junto con la posición (procedente de las mediciones en campo con métodos topográficos) de cada uno de los elementos situados para evaluar la fiabilidad del sistema.





Analizando de manera individualizada cada una de las trece actuaciones para determinar su detectabilidad aplicando el sistema propuesto, se obtienen los siguientes resultados:

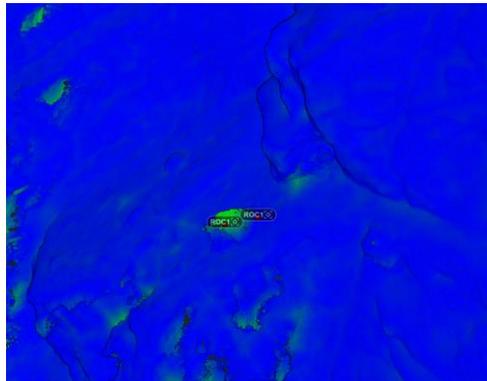
Identificador	Detección
ROC1	Positiva
ROC1	Positiva
ROC2	Positiva
ROC2	Positiva
ROC3	Positiva
ROC3	Positiva
ROC4	Positiva
ROC3	Positiva
ROC5	Positiva
ROC6	Positiva
ROC7	Negativa
ROC8	Negativa
ROC9	Positiva

Así pues, de las trece actuaciones efectuadas, el sistema es capaz de detectar de forma automática y sin recurrir a la visualización de imágenes once de ellas, lo cual representa un 85% del total.

A modo ilustrativo, se incluye el detalle de dos de estas actuaciones y su visualización en la aplicación.



Comparativa de elemento "ROC1"



Nube de puntos diferencia



Nube de puntos agosto (izq.) y septiembre (dcha.)

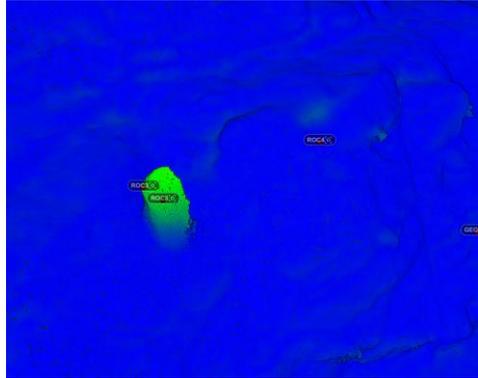


Imágenes agosto (izq.) y septiembre (dcha.)

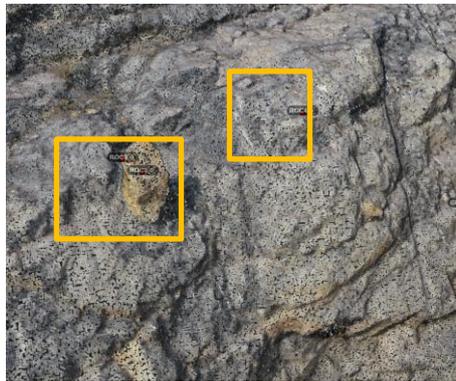
En este caso se observa la presencia de una roca en la nube de puntos de agosto que no estaba presente en septiembre, constatándose este hecho cotejando las imágenes que corresponden a estas áreas. El tamaño estimado de la roca es de alrededor de 20 cm.



Comparativa elementos “ROC3” y “ROC4”



Nube de puntos diferencia



Nube de puntos agosto (izq.) y septiembre (dcha.)



Imágenes agosto (izq.) y septiembre (dcha.)

En el caso de ROC3 se observa la presencia de una roca en la nube de puntos de agosto que no estaba presente en septiembre, constatándose este hecho cotejando las imágenes que corresponden a estas áreas. El tamaño estimado de la roca es de alrededor de 30 cm. En el caso de ROC4 se produce el hecho contrario, aspecto que también queda mostrado en la nube de puntos diferencia, aunque se observa una ligera diferencia en el posicionamiento. Estas diferencias en los valores de posición se analizarán en el siguiente apartado. El tamaño estimado de la roca es de alrededor de 15 cm.

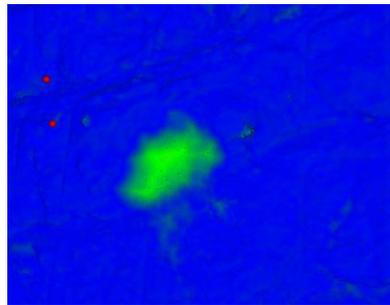


En los casos en los que no se aprecia diferencia en la nube de puntos de diferencia (ROC7 Y ROC8), pueden influir aspectos como la existencia de malla protectora cubriendo el talud (la cual dificulta la reconstrucción geométrica del talud por fotogrametría), así como el hecho de trabajar con una nube de puntos de menos definición en el caso de la nube de septiembre (al haber tomado las imágenes desde mayor distancia).

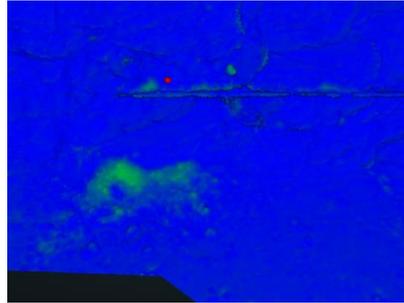
De la misma forma sobre la nube de puntos diferencia se nos marcan desplazamientos en otras áreas distintas de las de control, las cuales pueden corresponderse a:

- Movimientos naturales de materiales en el talud.
- Vegetación.

En las siguientes imágenes se pueden apreciar algunos de estos movimientos o desplazamientos de material distintos de los realizados artificialmente.



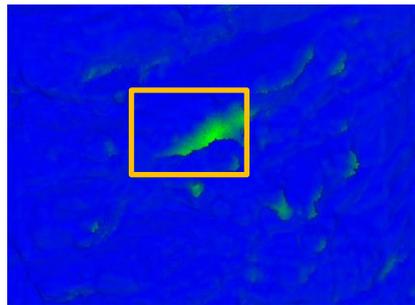
Imágenes agosto (izq.) y septiembre (dcha.)



Imágenes agosto (izq.) y septiembre (dcha.)

Asimismo, y tras analizar las ubicaciones donde se marcan diferencias entre las nubes de puntos, se observa la existencia de numerosos casos en los que el marcado se debe a la propia malla de protección. La explicación a este fenómeno es que en la nube de puntos ésta queda definida en toda su extensión, mientras que, en la nube de septiembre, y debido a que las imágenes se tomaron a mayor distancia, existen áreas en las que no fue posible su reconstrucción geométrica por fotogrametría. Dado que el planteamiento operativo para sucesivas inspecciones es el de realizar la toma de imágenes a una distancia análoga a la de la campaña de agosto, y por tanto tener imágenes de la misma definición, este fenómeno se evitaría, no existiendo esos falsos positivos.

En las siguientes imágenes se ilustra lo explicado en este párrafo.





En el tercer caso, estaríamos ante falsos positivos. Aspecto que, recurriendo al análisis de las nubes de puntos de origen de forma individualizada, así como a las imágenes correspondientes al área en cuestión, pueden quedar solventadas y descartados movimientos o desplazamientos de materiales.

5.3. DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN EN EL GEOPOSICIONAMIENTO

La tercera de las validaciones viene de la mano de la comprobación de la precisión en la geolocalización de la nube de puntos. Con el objetivo de evaluar esta precisión, se colocaron ocho geopuntos marcados con clavos sobre la superficie del talud previamente a la realización del vuelo de la campaña de agosto, tomando al mismo tiempo con medios topográficos sus coordenadas XYZ con precisión subcentimétrica.



Detalle de geopunto GEO7 (izq.) y GEO8 (dcha.)

Una vez obtenida la nube de puntos se han extraído las coordenadas de esos mismos puntos identificados sobre la nube de puntos y las imágenes, obteniendo sus coordenadas calculadas.



En la siguiente tabla se resumen los valores comparativos de cada uno de ellos, así como el error en cada uno de los tres ejes.

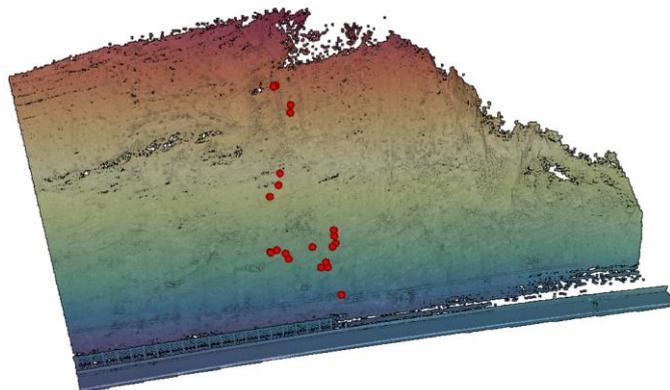
Id	Coordenadas referencia			Coordenadas nube de puntos fotog.			Error		
	Coord X	Coord Y	Coord Z	Coord X	Coord Y	Coord Z	Error X	Error Y	Error Z
GEO1	631571.452	4593737.333	499.533	631571.464	4593737.389	499.644	-0.012	-0.056	-0.111
GEO2	631571.283	4593737.295	500.597	631571.303	4593737.334	500.724	-0.020	-0.039	-0.127
GEO3	631578.724	4593742.04	481.118	631578.753	4593742.064	481.242	-0.029	-0.024	-0.124
GEO4	631578.873	4593741.666	481.878	631578.896	4593741.691	482.005	-0.023	-0.025	-0.127
GEO5	631573.293	4593745.824	484.317	631573.317	4593745.852	484.448	-0.024	-0.028	-0.131
GEO6	631573.41	4593745.988	483.476	631573.43	4593746.011	483.6	-0.020	-0.023	-0.124
GEO7	631575.572	4593746.343	479.68	631575.613	4593746.37	479.794	-0.041	-0.027	-0.114
GEO8	631575.451	4593745.984	480.3	631575.465	4593746.006	480.417	-0.014	-0.022	-0.117

A la luz de los resultados obtenidos, se comprueba que se obtiene una precisión muy adecuada de acuerdo a los objetivos del proyecto, teniendo en cuenta, por un lado, que se trata de nubes de puntos fotogramétricas y por tanto generadas a partir de imágenes, y por otro la imposibilidad de establecer puntos de coordenadas conocidas bien distribuidas sobre la superficie del talud (limitándonos a las zonas accesibles de forma general).

5.4. APLICACIÓN DE LIDAR TERRESTRE PARA VALIDACIÓN DE POSICIONAMIENTO

Tal y como se describió en apartados anteriores, durante las operaciones de toma de datos de agosto de 2018, se contó con un sistema Láser Scanner terrestre para la generación de nubes de puntos LiDAR. El objetivo inicial fue el de obtener una nube de puntos de mayor definición que la obtenida por fotogrametría de cara a su utilización como nube de puntos de referencia para futuras inspecciones.

En este sentido, se ha generado una nube de puntos de algo más de 92 millones de puntos, obtenida a partir del escaneado desde estaciones situadas en la calzada perpendicular al talud y desde el talud contrario. La ubicación de estas estaciones se determinó en campo de cara a intentar cubrir con visuales la mayor parte del talud.

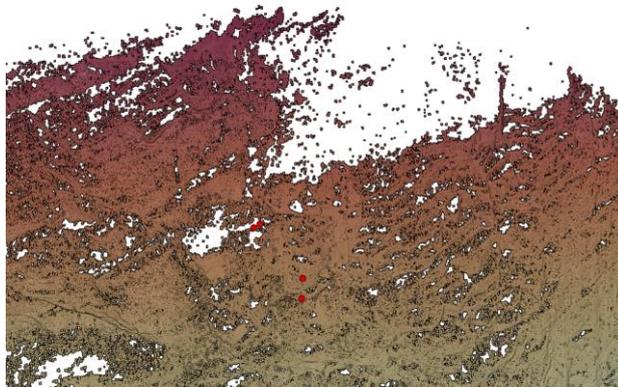




Una vez analizada la nube de puntos obtenida, y tomando como referencia los geopuntos a los que se hacía mención anteriormente, se muestra la siguiente tabla comparativa.

Id	Coordenadas referencia			Coordenadas nube de puntos LiDAR			Error		
	Coord X	Coord Y	Coord Z	Coord X	Coord Y	Coord Z	Error X	Error Y	Error Z
GEO1	631571.452	4593737.33	499.533	631571.539	4593737.42	499.677	-0.087	-0.086	-0.144
GEO2	631571.283	4593737.3	500.597	631571.399	4593737.36	500.747	-0.116	-0.064	-0.15
GEO3	631578.724	4593742.04	481.118	631578.769	4593742.06	481.227	-0.045	-0.02	-0.109
GEO4	631578.873	4593741.67	481.878	631578.899	4593741.71	482.017	-0.026	-0.043	-0.139
GEO5	631573.293	4593745.82	484.317	631573.339	4593745.87	484.447	-0.046	-0.046	-0.13
GEO6	631573.41	4593745.99	483.476	631573.459	4593746.03	483.596	-0.049	-0.042	-0.12
GEO7	631575.572	4593746.34	479.68	631575.619	4593746.37	479.795	-0.047	-0.027	-0.115
GEO8	631575.451	4593745.98	480.3	631575.479	4593746.03	480.417	-0.028	-0.045	-0.117

Si bien cabe esperar una mayor precisión de los datos LiDAR, en el caso concreto del talud en estudio, nos encontramos una importante limitación relacionada con la presencia de numerosas áreas de sombra (como consecuencia de la propia geomorfología del talud) que generan una nube de puntos incompleta. Este hecho supone la ausencia de información fiable de una porción importante del talud sobre la que realizar estimaciones y comparaciones. Este es el motivo de que los resultados sean inferiores en precisión a los de la nube de puntos fotogramétrica.



Se presentan también dificultades para la georreferenciación de la nube de puntos empleando los puntos de control establecidos en la parte superior (hitos feno) e inferior del talud (dianas), ya que la ubicación de los primeros en la coronación imposibilita su escaneado desde tierra.

De cara a la comparación de nubes de puntos tal y como se ha descrito en el apartado anterior, aparece el problema de que la presencia de huecos repartidos de forma uniforme por el talud arroja valores de distancias absolutas diferenciales que no se ajustan a la realidad, dado que no existe una correspondencia total entre puntos de una nube fotogramétrica y otra LiDAR.

Este hecho supone por tanto una limitación muy importante en el caso del empleo de sistemas de escáner LiDAR terrestre, y que no hace sino reforzar la potencia de los drones como herramienta de toma de datos en zonas inaccesibles o no visibles.



6. CONCLUSIONES

En definitiva, las empresas industriales y de construcción utilizan procedimientos de inspección y mantenimiento de instalaciones o infraestructuras basados fundamentalmente en el trabajo de numerosos técnicos especializados, que además de exponerse a ciertos riesgos, se apoyan en técnicas y procedimientos que consumen mucho tiempo y recursos, reduciendo la efectividad y eficiencia de las operaciones.

Es en este aspecto en el que el sistema MAT cambia drásticamente la metodología y las herramientas empleadas introduciendo ventajas significativas:

- Posibilidad de inspeccionar una infraestructura completa evitando dejar zonas sin revisar de manera aleatoria pues algunos defectos quedan sin detectar.
- Reducción de recursos y tiempo destinado a la operación incrementando la eficiencia.
- Reducción de costes asociados a una operación.
- Detalle y calidad de las imágenes e información recogida notablemente superior gracias a la tecnología implementada en MAT.
- Aplicación intuitiva, flexible y escalable para la visualización y análisis de la información capturada capaz de incrementar la eficiencia de manera notable en la interpretación de resultados.

Asimismo, a la luz de lo descrito a lo largo de este trabajo, y tras haber analizado y evaluado los resultados conseguidos mediante la aplicación de la metodología y de los sistemas y herramientas propuestas, podemos realizar una serie de consideraciones a modo de conclusión:

- Los drones se presentan como una herramienta de gran potencial de aplicabilidad en las labores de conservación de taludes y otras infraestructuras viarias. Las razones las encontramos fundamentalmente en:
 - Su capacidad para embarcar una gran cantidad de tipología de sensores y sistemas para la captura de información de interés.
 - La capacidad para tomar información en zonas inaccesibles o de difícil acceso físico o visual.
 - La rapidez en la generación de información masiva.
 - La capacidad para la configuración *ad hoc* de la resolución espacial y temporal de los datos a obtener.
- La aplicación de la metodología propuesta en cuanto a tipología de las herramientas a emplear, gestión y procesado de los datos, y puesta a disposición de usuario, generan unos resultados de plena utilidad para el apoyo en las labores asociadas a la conservación de taludes.
- La metodología, gestión, procesado y puesta a disposición de cliente de la información es independiente del tipo de dron que se emplee siempre y cuando tenga la capacidad de embarcar los sistemas y sensores que se exijan para el cumplimiento de los objetivos del trabajo. No obstante, dada la naturaleza de los elementos en cuestión (taludes), el tipo de dron adecuado es de tipo multirrotor.
- En lo relativo al nivel de adecuación de los datos obtenidos en los trabajos de investigación llevados a cabo, se puede concluir que:
 - La obtención de imágenes visuales del talud mediante la utilización de cámaras digitales compactas embarcadas en drones es la adecuada para realizar el análisis visual de taludes, pudiendo alcanzar definiciones que permiten distinguir elementos u objetos a nivel subcentimétrico.
 - Las nubes de puntos fotogramétricas ofrecen un nivel de detalle tal que permite, mediante la comparación de nubes sucesivas, la detección automática de movimientos



- y desplazamientos de material, mejorando y facilitando así las labores de control y prevención y la economía de recursos de cara a la ejecución de actuaciones correctoras.
- La precisión en la geolocalización de los puntos constituyentes de las nubes fotogramétricas se considera adecuada para el control dimensional de taludes, tal y como se infiere a partir de los datos de comparación entre los geopuntos testigo colocados en la superficie del talud y su equivalente sobre la nube de puntos.
 - El uso de sistemas de láser escáner terrestre, si bien aportan nubes de mayor definición, tienen la limitación en cuanto a la existencia de gran cantidad de sombras en áreas en las que no existe visual entre la estación de tierra y la superficie del talud. Este hecho dificulta la georreferenciación de la nube, así como la comparación con nubes fotogramétricas obtenidas a partir de dron que sí poseen cobertura completa del talud.
 - En lo referente a la herramienta de análisis y visualización de información, se puede concluir que representa gran potencial dado que:
 - Permite organizar, consultar, visualizar y analizar datos de diferente procedencia y tipología dentro de un mismo entorno, facilitando así la comprensión de determinados fenómenos al poder disponer de forma integrada y comparada esta información.
 - Permite la consulta de las imágenes, nubes de puntos, información geográfica y documental relacionada con un determinado talud o taludes de una concesión.
 - Permite la extracción de información métrica para su análisis pormenorizado, así como la consulta de información métrica comparativa para la detección y monitorización de cambios.
 - Es modulable, actualizable y configurable en función de las necesidades concretas de un proyecto.
 - Es capaz de incorporar datos de diferentes sensores (visuales, termográficos, audiovisuales, LiDAR, etc.).