

# UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno



**UNIVERSIDAD  
DE SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

## TESIS DOCTORAL

Integración de Sensores en Plataformas UAV para  
Aplicaciones Geomáticas

**David Roca Bernárdez**

2019

Copyright © 2019 por D. Roca

Todos los derechos reservados. Ninguna parte del material protegido por estos derechos de autor puede ser reproducida o utilizada en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluyendo el fotocopiado, grabación o por cualquier sistema de almacenamiento y recuperación de información, sin el consentimiento por escrito del autor (david.roca@usal.es / davidrocabernardez@gmail.com).

Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno  
Escuela Politécnica Superior de Ávila  
Universidad de Salamanca

AUTOR:

David Roca Bernárdez

DIRECTORES:

Dra. Susana Lagüela López

Dr. Pedro Arias Sánchez

**2019**



## **Informe de los Directores de Tesis**

Integración de sensores en plataformas UAV para aplicaciones  
geomáticas

Presentada en

Departamento de Ingeniería cartográfica y del terreno

por

David Roca Bernárdez

La Tesis Doctoral “*Integración de sensores en plataformas UAV para aplicaciones geomáticas*”, presentada por David Roca Bernárdez, es resultado de un proceso investigador llevado a cabo por el doctorando a lo largo de varios años, rematado por la materialización de sus avances científicos en forma de desarrollo comercial, un UAV con sensor LiDAR integrado al que se suma el software necesario para el procesado de los datos de posicionamiento y geometría tridimensional adquiridos de cara a la generación de nubes de puntos 3D aéreas. La etapa final de esta tesis ha sido desarrollada en el marco del proyecto “UFOREST”, en el que la empresa INGENIERIA INSITU S.L., con la cual el doctorando tiene contrato vigente desde el año 2015, ha participado como entidad colaboradora.

Las plataformas aéreas no tripuladas (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) aparecieron al comienzo de los años 10 de este siglo como alternativa interesante para la adquisición de datos geomáticos desde una perspectiva novedosa hasta el momento, permitiendo la captura de datos de zonas no accesibles o con accesibilidad limitada por parte de un operador, así como con una resolución espacial y temporal inalcanzable por parte de las plataformas aéreas existentes hasta ese momento.

Por tanto, los desarrollos presentados en la presente Tesis Doctoral constituyen un estudio completo de las capacidades de las plataformas aéreas no tripuladas para la geomática, tanto desde el punto de vista de los sensores de adquisición de datos como desde el punto de vista de las aplicaciones. Así, en la tesis se incluyen desde la más tradicional

integración de cámara fotográfica en la plataforma UAV para el procesado fotogramétrico de las imágenes y generación del Modelo Digital del Terreno tridimensional, hasta la aplicación más innovadora, de integración de un sensor LiDAR para la adquisición directa de datos en tres dimensiones. Asimismo, como sensor complementario y de especial interés para estudios energéticos y de usos del terreno, se incluye entre los resultados de la tesis la integración de cámaras termográficas en la plataforma UAV.

Las nuevas contribuciones científicas, así como los resultados, han sido presentados en cuatro artículos científicos, sujetos a procesos de revisión por pares y publicados en revistas de prestigio en el ámbito de la ingeniería, la geomática y la instrumentación, todas indexadas en la base de datos Journal Citation Report (JCR) (3 revistas en el segundo cuartil, Q2 y una revista en el cuarto cuartil, Q4). Todos los desarrollos presentados son originales, y de elevada novedad en el momento de su publicación, tal y como se puede ver por el elevado número de citas recibidas por los artículos donde se presentan.

Asimismo, los resultados fueron objeto de cuatro patentes de invención, de las cuales David Roca Bernárdez es coinventor, mostrando sus capacidades de transferencia de conocimiento.

Sin embargo, el hecho que respalda definitivamente las capacidades para la transferencia de conocimiento y tecnología entre actividades de innovación y el mercado, es el desarrollo por parte de David Roca Bernárdez, de una plataforma UAV para la adquisición de datos tridimensionales a través de un sensor LiDAR integrado. Este proyecto de investigación industrial se trata del primer sistema de este tipo en el mercado diseñado y fabricado en España, consta de un desarrollo hardware-software completo, desde la integración de los sensores en la plataforma hasta el desarrollo de algoritmos y software de procesado de datos para la generación de la nube de puntos tridimensional georreferenciada.

La Tesis Doctoral se completa con una sección de Conclusiones y Trabajo Futuro en la que se muestran las principales contribuciones de la tesis y las

recomendaciones de mejora del trabajo desarrollado para su perfeccionamiento.

Por tanto, la Tesis Doctoral “*Integración de sensores en plataformas UAV para aplicaciones geomáticas*”, realizada por David Roca Bernárdez, se ajusta, de modo óptimo, a las condiciones requeridas para ser presentada en formato “Compendio de Publicaciones”, así como a ser candidata a “Mención Industrial”, dado que presenta resultados originales más que suficientes de acuerdo a los requisitos y reglamentos establecidos por la Universidad de Salamanca y Artículo 15 bis del RD 195/2016 publicado en el BOE del 3 de Junio de 2016 sobre Mención Industrial en el título de Doctor en este aspecto. En testimonio de lo cual, este certificado es firmado en,

Ávila, 27 de Junio de 2019

Dra. Susana Lagüela López

Dr. Pedro Arias Sánchez





# Listado de Artículos Publicados

La presente Tesis Doctoral está constituida por un compendio de cuatro artículos científicos, publicados en revistas internacionales de alto impacto. A continuación, se enumeran estas publicaciones.

**1. Aerial thermography from low cost UAV for the generation of thermographic Digital Terrain Models**

*“Under 35 Ermanno Grinzato” Paper Award. AITA 2013 – 12<sup>th</sup> International Workshop on Advances in Infrared Technology and Applications, Torino (Italy), September 2013.*

S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, D. Roca, H. Lorenzo  
*Opto-Electronics Review*, 2015, vol. 23(1), pp. 76-82.

DOI: 10.1515/oere-2015-0006

Citado 6 veces

Indexación Q2 (Journal Citation Report, 2015)

**2. Geometric landslide analysis based on UAV platforms and Geographical Information System processing: Xunqueira slope, Spain.**

R. El Bardai, S. Lagüela, D. Roca, H. González-Jorge  
*Dyna*, 2016, vol. 91(6), pp. 675-680

DOI: 10.6036/7972

Citado 1 vez

Indexación Q4 (Journal Citation Report, 2016)

**3. UAV Photogrammetry application to the monitoring of rubble mound breakwaters**

H. González-Jorge, I. Puente, D. Roca, J. Martínez-Sánchez, B. Conde, P. Arias

*Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, vol. 30(1), no. 04014194

DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000702

Citado 10 veces

Indexación Q2 (Journal Citation Report, 2016)

**4. Novel aerial 3D mapping system based on UAV platforms and 2D laser scanners**

D. Roca, J. Martínez-Sánchez, S. Lagüela, P. Arias

*Journal of Sensors*, 2016, no. 4158370.

DOI: 10.1155/2016/4158370

Citado 3 vez

Indexación Q2 (Journal Citation Report, 2016)





*A todos los que siempre estáis ahí.*



# Resumen

Los vehículos aéreos no tripulados (del inglés UAV, Unmanned Aerial Vehicles) están sufriendo una profunda evolución en el ámbito civil que abre su uso a un amplio abanico de sectores, haciendo posible su empleo para gran cantidad de aplicaciones. En este contexto, el uso de UAVs está evolucionando, siendo usados como instrumento que permite portar diferentes cargas de pago para adquirir datos desde un punto de vista aéreo, hecho que hasta el momento era complicado de conseguir en términos económicos y técnicos.

La adquisición de datos con estos equipos generalmente trae a la par un aumento del valor añadido con mejora en calidad, resolución y precisión, lo que propicia el desarrollo de nuevas aplicaciones que no eran factibles anteriormente. En este sentido, tecnologías como la fotogrametría, la termografía y el LiDAR aéreos, están sufriendo la evolución y adaptación que trae de la mano el nacimiento de nuevos productos y técnicas de tratamiento de datos que mejoran sustancialmente las posibilidades existentes hasta la fecha.

De forma específica, esta tesis arranca con el objetivo inicial de estudiar y analizar las posibilidades que ofrecen tecnologías como la termografía, la fotogrametría y el LiDAR usando un UAV como plataforma portante, para posteriormente desarrollar la integración de estos nuevos sensores y diseño de sus protocolos de captura. Las líneas de investigación de esta tesis no se restringen únicamente a la integración de sensores, si no que incluyen además el análisis de los datos obtenidos y el desarrollo de nuevas metodologías para el tratamiento de los mismos, así como la creación de nuevas técnicas que permiten resolver problemas concretos en el campo de la ingeniería civil, eficiencia energética, gestión forestal y mantenimiento de infraestructuras. De este modo, la presente Tesis Doctoral se enmarca principalmente dentro de las ciencias tecnológicas y, de forma más específica, la tecnología industrial y la tecnología de instrumentación, evidenciado en las integraciones de sensores

desarrolladas, pero también en áreas de aplicación, fundamentalmente de la ingeniería civil, acreditado por los métodos propuestos para resolver problemáticas concretas.

El trabajo de investigación comienza con el análisis de la propia tecnología de los UAVs, seguido del estudio de tres tecnologías, termografía, fotogrametría y LiDAR, a partir de las cuales se definen metodologías y protocolos de captura sobre plataformas UAV, que permiten el desarrollo de nuevas aplicaciones de tratamiento de datos en diferentes campos de las ciencias, manifestado con la publicación de cuatro artículos científicos. Finalmente, fruto de la transferencia de conocimiento, se marca el hito que otorga mayor interés y valor a esta Tesis Doctoral, consistente en el diseño y desarrollo de un sistema que integra las tecnologías y sensores con las que se ha trabajado en el período de investigación, en forma de equipo multisensor, con capacidad para recoger datos LiDAR desde plataformas UAV, acompañado con imágenes RGB y multiespectrales, en forma de equipo comercializable de bajo coste con software de tratamiento de datos. Por último, se presentan cuatro patentes de modelos de utilidad producto de las necesidades detectadas en el trabajo realizado con plataformas UAV y fruto de las soluciones tecnológicas desarrolladas para estas.



# **Abstract**

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) present a profound evolution in the field of civil applications, which allows their use in a wide variety of fields and applications. In this context, the use of UAVs is in continuous growth, being used as a tool that allows carrying different payloads. These payloads are usually sensors that can acquire data from an aerial point of view, which was difficult to achieve due to economic and technical limitations. Data acquisition from UAV comes with the added value of the improvement in quality, resolution and precision, encouraging the development of new applications that were not feasible before. Thus, techniques such as aerial photogrammetry, infrared thermography and LiDAR are undergoing the evolution and adaptation provoked by the appearance of new product and data processing techniques that improve substantially the possibilities existing up to date.

In particular, this thesis starts with the first objective of studying and analyzing the possibilities offered by technologies such as infrared thermography, photogrammetry and LiDAR using an UAV as carrying platform. Subsequently, the integration of the sensors mentioned and the design of acquisition protocols is determined as second objective of the thesis. However, the research lines of this thesis are not limited to sensor integration, but the processing of data acquired is also covered. New techniques are developed for data processing and for the analysis of specific problems in the fields of civil engineering, energy efficiency, management of forest and infrastructure maintenance. In this way, the Doctoral Thesis belongs to the field of technological sciences, and particularly, to the fields of industrial technology and instrumentation. The classification within these fields is shown by the implementation of sensor integrations and in the areas of application, mainly civil engineering, certified by the resolution of particular problems with methodologies proposed within this thesis.

The research starts with the analysis of the UAVs technology, followed by the study of three technologies: infrared thermography, photogrammetry and LiDAR. These technologies are the basis for the definition of

---

acquisition methodologies and protocols from UAV platform. These data acquisitions from an aerial point of view allow the development of new applications for the data in different fields. The implications of these advances are shown in the publication of four scientific papers.

Finally, the transfer of the knowledge created with this thesis is materialized with the main contribution of the thesis to society and the scientific field, consisting on the design and development of a system integrating all the technologies studied during the doctoral period. In particular, the product is a multisensor UAV platform, with capacity to acquire LiDAR data, together with RGB and multispectral imagery. The system is a marketable device, low-cost, that can be sold with the software for data processing. Last, four patents of utility models are presented. These patents are the result of covering the needs detected during the work with UAV platforms and consist of the technological solutions developed to fulfill these needs.

# Agradecimientos

Este documento se presenta como el cierre de una etapa, de formación predoctoral, durante la cual he tenido la oportunidad de evolucionar tanto científica como laboralmente, y sobre todo, personalmente. Se trata de una etapa en la que he vivido muchos momentos inolvidables, momentos de cambios, momentos mejores y peores, culminando en la presentación y defensa de este documento de Tesis Doctoral. Este final no habría sido posible sin mis directores de tesis, Dres. Pedro Arias Sánchez y Susana Lagüela López, cuyo empeño en que completara mi formación investigadora ha sido el impulso necesario para la finalización de esta Tesis Doctoral.

Agradecer asimismo a la Comisión Académica del Programa de Doctorado de Geotecnologías aplicadas a la Construcción, Energía e Industria, en especial al Dr. Diego González Aguilera, por el apoyo aportado para el cierre de este proceso de defensa de Tesis.

Del mismo modo, quiero agradecer a mi familia, por su apoyo incondicional, ya que, sin su esfuerzo a lo largo de toda mi vida, no habría sido posible haber llegado hasta aquí.

No puedo olvidar a mis amigos, tanto en Lugo como en Vigo, que han facilitado los momentos de desconexión y descanso, para mantener siempre la energía necesaria para abordar el reto científico y laboral al que me enfrentaba.

Un agradecimiento especial va para mis compañeros de trabajo a lo largo de esta etapa, tanto en el grupo de investigación de Geotecnologías Aplicadas de la Universidad de Vigo como en Ingeniería Insitu, pues han sido apoyo y colaboración, para que los resultados de esta Tesis Doctoral fueran completos en todos los aspectos.

En resumen, y para no extenderme más, agradecer a todas aquellas personas que de alguna forma me han ayudado y han estado junto a mí durante este largo periodo de tiempo.



# Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>27</b>
1.1. Estado del arte .....	29
1.2. Hipótesis de trabajo .....	38
1.3. Objetivos.....	39
1.4. Estructura de la Tesis Doctoral.....	42
<b>2. INTEGRACIÓN DE SENSOR TERMOGRÁFICO EN UAV PARA APLICACIONES GEOMÁTICAS .....</b>	<b>47</b>
2.1. Aerial Thermography from Low Cost UAV for the Generation of Thermographic Digital Terrain Models..	47
2.1.1. Resumen .....	47
2.1.2. Artículo I .....	50
<b>3. INTEGRACIÓN DE SENSOR RGB EN UAV PARA APLICACIONES GEOMÁTICAS .....</b>	<b>61</b>
3.1. Geometric landslide analysis based on UAV platforms and Geographical Information System processing: Xunqueira slope, Spain.....	61
3.1.1. Resumen .....	61
3.1.2. Artículo II.....	62
3.2. UAV Photogrammetry application to the monitoring of rubble mound breakwaters.....	69
3.2.1. Resumen .....	69
3.2.2. Artículo III .....	72

<b>4. INTEGRACIÓN DE SENSOR LIDAR EN UAV PARA APLICACIONES GEOMÁTICAS .....</b>	<b>83</b>
4.1. Novel aerial 3D mapping system based on UAV platforms and 2D laser scanners.....	83
4.1.1. Resumen.....	83
4.1.2. Artículo IV .....	86
<b>5. DESARROLLO DE PRODUCTO .....</b>	<b>97</b>
5.1. Introducción .....	97
5.2. Definición de requisitos .....	98
5.2.1. Requisitos funcionales .....	98
5.2.2. Requisitos no funcionales .....	98
5.3. Diseño.....	100
5.3.1. Hardware embarcado .....	100
5.3.2. Hardware de comunicaciones inalámbrico .....	104
5.3.3. Firmware del sistema embarcado.....	104
5.3.4. Software de control del sistema embarcado.....	106
5.3.5. Software para el post-proceso de datos.....	107
5.4. Validación y resultados .....	108
5.4.1. Validación del sistema .....	108
5.4.2. Calibración y Resultados .....	109
<b>6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>115</b>
6.1. Conclusiones .....	115
6.1.1. Etapa científico-investigadora .....	115
6.1.2. Etapa técnico-industrial .....	119
6.2. Trabajo Futuro.....	121

<b>7. REFERENCIAS .....</b>	<b>125</b>
<b>INDEXACIÓN Y FACTOR DE IMPACTO DE LAS PUBLICACIONES CIENTÍFICAS .....</b>	<b>133</b>
<b>DESARROLLOS .....</b>	<b>143</b>
<b>PATENTES .....</b>	<b>151</b>





# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN



## 1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) han sufrido un fuerte desarrollo durante los últimos años y se estima que su crecimiento seguirá aumentando en las próximas décadas de forma exponencial. Su uso en aplicaciones civiles ha ido evolucionando progresivamente por delante de la legislación que los regula (Ministerio de Fomento, 2018) (Martinez & Cardona, 2018). En general, el bajo coste y la evolución constante de los equipos comerciales hacen que estos sean usados como portadores de sensores y equipos que generan información de diferente tipología, desde simples cámaras de vídeo (Mademlis, Mygdalis, Nikolaidis, & Pitas, 2018) hasta sofisticados conjuntos de sensores para obtener datos del terreno (van der Sluijs, Kokelj, Fraser, Tunnicliffe, & Lacelle, 2018), la atmósfera (Zhu, y otros, 2019) o los medios fluvial/marino (Gebrehiwot, Hashemi-Beni, Thompson, Kordjamshidi, & Langan, 2019) (Baek, Won Seo, Song Kim, & Nelson, 2019). El UAV es la herramienta clave en el desarrollo de esta Tesis Doctoral, el instrumento empleado para portar sensores que obtienen información destinada a generar nuevas aplicaciones en sectores de la cartografía, energía, construcción y gestión forestal, así como extender su uso con nuevas técnicas de tratamiento de los datos obtenidos. Así, el UAV es el elemento común sobre el que se desarrollan las dos líneas de trabajo llevadas a cabo en esta Tesis Doctoral: la de carácter científico-investigador y la de carácter técnico-industrial.

La línea científico-investigadora se centra en el desarrollo de aplicaciones y metodologías para el uso, procesado y puesta en valor de la información aportada por sensores montados en UAV, mediante la integración de nuevos equipos en la plataforma y el tratamiento de los datos aportados por estos. En concreto, el trabajo se centra en el uso de sensores fotográficos RGB para la obtención de información cartográfica de detalle; sensores termográficos para la obtención de información en la banda del espectro del infrarrojo térmico; y sensores LiDAR para la obtención de información geométrica en tres dimensiones, proporcionando además

nuevas técnicas para el tratamiento de la información adquirida y abriendo las puertas a nuevas aplicaciones.

La línea técnico-industrial, llevada a cabo en la etapa final de la misma, tiene como objetivo el desarrollo de un nuevo producto comercial, desde la etapa de diseño hasta la puesta en mercado, usando el conocimiento previo y las tecnologías empleadas en la etapa investigadora. En concreto, se desarrolla un sistema de bajo coste para la generación de cartografía tridimensional con información espectral basado en la integración de tecnología GNSS, sensores inerciales, sensores LiDAR y cámaras RGB y multispectrales en plataformas UAV.

El objetivo de este capítulo es servir de introducción a esta Tesis Doctoral desarrollando el estado del arte de las tecnologías involucradas, exponiendo las hipótesis de trabajo, marcando los objetivos y presentando la organización de la misma.

## 1.1. Estado del arte

### 1.1.1. Vehículos aéreos no tripulados

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) son aeronaves que no requieren de un piloto a bordo, pudiendo ser autónomos o pilotados de forma remota, y que disponen de sistemas de control y estabilización de vuelo y sistema de comunicaciones para monitorizar, controlar o programar misiones (Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal - AESA, 2017). Además, suelen disponer de diferentes actuadores para operar la carga de pago, tanto de forma remota como de forma autónoma (Pastor, López, & Royo, UAV Payload and Mission Control Hardware/Software Architecture, 2007).

El primer uso registrado de un artefacto previo al UAV quizás sea el uso de globos aerostáticos para portar armamento militar en 1849 y el uso de cometas para portar cámaras y estudiar los movimientos enemigos en el año 1898. En el siglo XX, a través de las diferentes guerras, los UAVs se fueron evolucionando, pasando de ser usados como simples dianas para probar torpedos a ser aeronaves pilotadas de forma remota para prácticamente cualquier propósito militar (Eisenbeiss, 2004). Fuera de esta industria, a partir del año 2004 empieza su desarrollo para aplicaciones civiles, en las que esta tecnología comienza a tener una evolución y un impacto en el mercado, siendo el año 2010 el que marca el punto de despegue (Martinez & Cardona, 2018).

Dentro del ámbito civil, las aeronaves se pueden clasificar en base a diferentes criterios, siendo uno de los más estandarizados su clasificación en aeronaves de despegue vertical, donde las más comunes son las de ala rotatoria, y las aeronaves que no puede realizar un despegue vertical, donde las más comunes son las de ala fija (Korchenko & Illyash, 2013). Independientemente de la clasificación, un UAV está generalmente compuesto de un sistema de control interno, un sistema de navegación, un sistema de comunicaciones y una carga de pago.

El sistema de control interno generalmente está compuesto por un sistema inercial, formado por acelerómetros y giroscopios, que obtienen la actitud de la aeronave en base a las aceleraciones y rotaciones sobre sus ejes

(Bristeau, Callou, Vissière, & Petit, 2011). Este sistema posibilita la estabilización de la aeronave permitiendo actuar sobre superficies móviles, en general alerones en aeronaves de ala fija y rotores, conjunto hélice-motor, en aeronaves de ala rotatoria, mediante filtros de realimentación que de forma continua actúan sobre estos (Dydek, Annaswamy, & Lavrestky, 2013) (Johansen, Cristofano, Sorensen, Hansen, & Fossen, 2015). Complementariamente a los acelerómetros y giróscopos se suelen añadir sensores de presión, para mantener la estabilización en altura, tubos de Pitot, en aeronaves de ala fija para medir la velocidad relativa respecto al viento, magnetómetros para orientación con respecto al norte magnético y sistemas GNSS, que complementando el sistema de control con el sistema de navegación, permiten a la aeronave conocer permanentemente su posición (Sun, Zeng, Liu, & Dai, 2018). Por su parte, el sistema de navegación, posibilita la realización de misiones autónomas guiando la aeronave hacia puntos prefijados atendiendo a diferentes parámetros establecidos como velocidad, rumbo y orientación (Hernández-López, Felipe-García, González-Aguilera, & Arias-Pérez, 2013).

El sistema de comunicaciones sirve para la operación del UAV desde una estación de tierra, siendo el canal de intercambio de comandos de control y telemetría del equipo (Agogino, Parker, & Tumer, 2012). En la estación de tierra, puede haber otros elementos como pueden ser el sistema de lanzamiento o recuperación u otras interfaces de control, normalmente de la carga de pago.

En general, la integración y control de la carga de pago puede ser realizado haciendo uso del propio sistema de control de la aeronave o mediante un sistema externo (Pastor, López, & Royo, UAV Payload and Mission Control Hardware/Software Architecture , 2007). En el primer caso, el UAV debe estar preparado para facilitar el uso de señales de control y buses de comunicación a través de las que el integrador pueda recibir información y comandos de acciones a ejecutar por la carga de pago y enviar, si fuese necesario, información de la carga de pago a través del sistema de control del UAV a la estación base. En el segundo caso, la propia carga de pago lleva incorporado un sistema de comunicaciones de forma que el control puede realizarse directamente desde la estación base por un canal diferente al de la propia aeronave.

En relación al uso, dependiendo de la tipología y de la propia performance de la aeronave, los vuelos pueden estar limitados por el peso máximo al despegue y, con esto, el peso máximo de la carga de pago, las condiciones meteorológicas, y muchos otros factores que se deben analizar en función del tipo de aeronave. Además, fuera de las propias características técnicas y debido al aumento de su uso en aplicaciones civiles, los diferentes gobiernos se han visto en la obligación de legislar conforme a esta materia, estableciéndose leyes que regulan su uso en distintos tipos de escenarios y la habilitación de los operadores para la realización de operaciones de actividades aéreas especializadas o la realización de vuelos experimentales (Real Decreto 1036/2017, 2017).

### **1.1.2. Termografía**

La termografía infrarroja es la técnica que permite medir la temperatura de los cuerpos a distancia, en base a la intensidad de la radiación emitida por los mismos en la banda del infrarrojo térmico (entre 7 y 14  $\mu\text{m}$  de longitud de onda). Se basa en el hecho de que todos los cuerpos a temperaturas por encima de 0K (cero absoluto) emiten radiación en la banda del infrarrojo térmico debido a la vibración de las moléculas que los conforman: a mayor temperatura, mayor vibración de las moléculas y por tanto mayor intensidad de radiación recibida por el sensor (Lagüela, Díaz-Vilariño, & Roca, 2016) (Lagüela, Susana, 2014).

La medición de la radiación infrarroja se realiza con sensores termográficos, montados en cámaras para su protección. Estos sensores pueden ser refrigerados o no refrigerados, en función de si van equipados con un sistema de refrigeración en la cámara (Rajic & Street, 2015). Los primeros son más precisos, pero más pesados, mientras que los no refrigerados, aunque presentan menos precisión (típicamente, 2°C) son los comúnmente empleados para la adquisición de datos termográficos desde plataformas móviles. Los sensores termográficos no refrigerados son de silicio amorfo u óxido de vanadio.

Para que la medición de temperaturas con cámara termográfica sea válida, han de tenerse en cuenta ciertos parámetros que influyen tanto en la

radiación emitida por el cuerpo, como en la radiación recibida por el objeto. Estos son la emisividad del cuerpo y la atenuación de la atmósfera, respectivamente (Hamrelius, 1992).

La emisividad se define como la capacidad de un cuerpo de emitir radiación infrarroja en base a su temperatura. Es el parámetro opuesto a la reflectividad, que es la capacidad de un cuerpo de reflejar la radiación que recibe del entorno, de tal modo que la radiación que recibe la cámara termográfica del mismo no se debe a su temperatura, sino a la temperatura de los cuerpos del entorno (McIntosh & Huff, 2018). Así, el valor de emisividad del cuerpo debe tenerse en cuenta para hacer la conversión de intensidad de la radiación recibida por la cámara a temperatura.

El cálculo de la temperatura de un cuerpo a partir de la radiación que este emite en la banda de infrarrojo térmico se realiza con la Ley de Stefan-Boltzmann, que relaciona la radiación recibida, en forma de energía, con la cuarta potencia de la temperatura, a través de una constante, conocida como la constante de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma * T^4$$

Donde  $E$  es la radiación térmica en  $W/m^2$ ,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann y tiene un valor de  $5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$ , y  $T$  es la temperatura absoluta de la superficie, en K.

La Ley de Stefan-Boltzmann está formulada para cuerpos ideales, como un cuerpo negro, que emiten toda la radiación que reciben. En el caso de los cuerpos reales, también llamados cuerpos grises, estos no emiten toda la radiación recibida, sino que parte de esta es reflejada por su superficie, sin afectar a su estado térmico. Para adecuar el cálculo de la temperatura de los cuerpos reales, se introduce el término de emisividad en la ecuación,  $\varepsilon$ , de manera que la Ley de Stefan-Boltzmann adaptada a cuerpos reales sería:

$$E = \varepsilon * \sigma * T^4$$



La atmósfera absorbe radiación infrarroja y emite su propia radiación, en función de su estado de temperatura y humedad relativa. En condiciones normales de temperatura y humedad, y distancias de 1-2 m típicas en inspecciones realizadas por un operador, la atenuación de la atmósfera puede considerarse despreciable. Sin embargo, en adquisiciones desde UAV, en las que la distancia entre el cuerpo medido y el sensor es más elevada, el efecto de atenuación de la atmósfera sí debe tenerse en cuenta, para compensar la radiación recibida (Guo, y otros, 2019).

### **1.1.3. Fotogrametría aérea**

La fotogrametría es la técnica por medio de la cual es posible obtener representaciones 3D del terreno u objetos a partir de fotografías. La fotogrametría aérea es la rama de la fotogrametría que se realiza con fotografías tomadas desde el aire, generalmente desde aeronaves y en la actualidad se están introduciendo los UAVs como plataforma de adquisición de este tipo de datos (Jaud, y otros, 2019) (Padró, y otros, 2018) (Akturk & Oguz Altunel, 2018). Además, en los últimos años, con la evolución de la capacidad de procesamiento de los ordenadores y los avances en las técnicas de visión computacional, la evolución experimentada por la fotogrametría digital aérea permite la obtención de datos espaciales de gran calidad y precisión a precios muy reducidos.

La primera fase del proceso fotogramétrico es la orientación, distinguiendo entre la orientación interna y externa. En la orientación interna se reconstruye la forma del haz perspectivo definidos por los puntos imagen y el centro de proyección, tarea para la cuál será necesario conocer o estimar los parámetros de calibración interna de la cámara, esto es, distancia focal, punto principal y función de distorsión (Arias, Pedro, 2003) (Luhmann, Robson, Kyle, & Harley, 2006). La orientación externa se divide en dos fases, la orientación relativa donde los haces perspectivos se orientan entre sí usando puntos homólogos y la orientación absoluta, donde los haces perspectivos, una vez orientados entre sí, se sitúan con respecto al objeto mediante el uso de los puntos de apoyo. Para la orientación relativa se parte del principio de colinealidad, que indica que el centro óptico de la cámara, el punto de la imagen y el punto del terreno

al que representa, están en la misma línea. Partiendo de esto, y del trazado de líneas para diferentes puntos de la imagen y sus correspondencias en el terreno, se resuelve el problema de resección espacial.

$$\text{Esto es, por el principio de colinealidad: } \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ -f \end{pmatrix} = \lambda * M * \begin{pmatrix} X_A - X_0 \\ Y_A - Y_0 \\ Z_A - Z_0 \end{pmatrix}$$

Donde  $(x_a, y_a, -f)$  son las coordenadas imagen del punto, al que se asigna la distancia focal de la cámara,  $f$ , como tercera dimensión;  $\lambda$  es una constante que indica la proporcionalidad entre los vectores, y  $(X_A - X_0, Y_A - Y_0, Z_A - Z_0)$  son las coordenadas terreno del punto.

$M$  es la matriz de rotación que lleva el sistema de coordenadas terreno a la misma posición que el sistema de coordenadas imagen. Es una matriz 3X3, que incluye las rotaciones necesarias en los tres ejes.

$$M = \begin{matrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{matrix}$$

Donde:

$$m_{11} = \cos \varphi * \cos \kappa$$

$$m_{12} = -\cos \varphi * \sin \kappa$$

$$m_{13} = \sin \varphi$$

$$m_{21} = \cos \omega * \sin \kappa + \sin \omega * \sin \varphi * \cos \kappa$$

$$m_{22} = \cos \omega * \cos \kappa - \sin \omega * \sin \varphi * \sin \kappa$$

$$m_{23} = -\sin \omega * \cos \varphi$$

$$m_{31} = \sin \omega * \sin \kappa - \cos \omega * \sin \varphi * \cos \kappa$$

$$m_{32} = \sin \omega * \cos \kappa + \cos \omega * \sin \varphi * \sin \kappa$$

$$m_{33} = \cos \omega * \cos \varphi$$

Siendo  $\omega$  la rotación sobre el eje X,  $\varphi$  la rotación sobre el eje Y y  $\kappa$  la rotación sobre el eje Z.

En el esquema de trabajo clásico de la fotogrametría aérea digital, una vez realizadas las orientaciones, se genera el modelo digital de elevaciones y se realiza la ortoproyección. Finalmente, se realiza un control del error mediante los puntos de control (Sanz-Ablanedo, Chandler, Rodríguez-Pérez, & Ordóñez, 2018).

#### **1.1.4. LiDAR**

LiDAR (Light Detection and Ranging) es un sistema compuesto por a) una fuente emisora de fotones, generalmente un láser, b) un sistema de detección de fotones, c) un circuito contador de tiempo, y d) una óptica tanto para el sistema de emisión como de detección, que utiliza la luz emitida para medir la distancia y/o propiedades de objetos sobre los que se refleja (NGA, 2011).

Inicialmente los usos más comunes del LiDAR han sido para la medición en estático pero, desde su aparición, han ido evolucionando para permitir ser instalados en plataformas móviles, inicialmente aeronaves. Estos LiDAR aéreos presentaban unas dimensiones y peso elevados que no permitían su instalación en aeronaves de baja carga de pago que, con el desarrollo de la tecnología de los últimos años se ha traducido una considerable reducción de estos parámetros, haciendo estos sensores más versátiles para el montaje en plataformas, tanto terrestres y marítimas, como aéreas no tripuladas, siendo el caso de los UAVs de menor carga de pago (Roca, Armesto, Lagüela, & Díaz-Vilariño, 2014) (Tulldahl & Larsson, 2014).

Dependiendo del tipo de láser empleado, los LiDAR se pueden clasificar en: tiempo de vuelo (TOF, Time of Flight) o medición de fase (Riveiro, González-Jorge, Conde, & Puente, 2016). Los primeros usan un pulso láser corto, registran de forma precisa el tiempo de emisión y el tiempo en que el pulso retorna de forma que pueden obtener la distancia a la que se encuentra el objeto. Los segundos, emiten un haz láser de forma continua y miden la diferencia de fase entre el pulso emitido y el pulso reflejado sobre el objeto. Atendiendo al tipo de escaneo, pueden clasificarse en lineales, en los que la rotación de un espejo que desvía el haz láser hace

que se produzcan líneas de escaneo paralelas sobre el terreno; de zigzag, donde un espejo rotatorio de ida y vuelta produce líneas en zigzag sobre el terreno; elípticos, en los cuales el haz es desviado por dos espejos que producen un patrón de escaneo elíptico; y de fibra óptica, que usan cables de fibra óptica para desviar los haces láser.

Su uso habitual en plataformas en movimiento hace que este instrumento tenga que ser acompañado por dos componentes principales, el sistema GNSS y el sistema inercial (Puente, González-Jorge, Martínez-Sánchez, & Arias, 2013). Frecuentemente, su uso es combinado con diferentes tipos de cámaras u otros sensores de captura. Para la generación de nubes de puntos 3D a partir de las medidas puntuales del LiDAR y las mediciones del sistema GNSS e inercial, estas últimas, normalmente integradas mediante filtros de Kalman, es necesario conocer los diferentes sistemas de referencia implicados y las ecuaciones de georreferenciación directa.

Para obtener las coordenadas en el sistema de coordenadas geográfico es necesario saber los sistemas de referencia de los diferentes componentes, que no están centrados ni alineados con el geográfico, y comprender sus interrelaciones. A continuación, se nombran los sistemas de referencia básicos, definidos según la integración del sensor en una plataforma tipo UAV (NGA, 2011):

- **Sistema referencia del escáner:** describe el marco de referencia del escáner durante la emisión del láser desde el LiDAR hacia el terreno.
- **Sistema de referencia del sensor:** describe el marco de referencia en el que el escáner opera. El sistema de referencia del escáner rota con los ángulos de escaneo y es coincidente con el sistema de referencia del sensor cuando estos ángulos son cero.
- **Sistema de referencia de plataforma:** describe el marco de referencia de la plataforma de vuelo, donde el sensor es montado y centrado en la IMU, donde el origen está localizado en el centro de navegación de la aeronave.
- **Sistema de referencia local-vertical:** describe el marco de referencia con respecto al sistema local-vertical. Se obtiene de

aplicar la medición de la IMU al sistema de referencia de la plataforma.

- **Sistema de referencia NED:** describe el sistema de referencia Norte-Este-Abajo con el plano horizontal tangente al elipsoide geodésico de referencia. La diferencia con el sistema de referencia local-vertical es el ángulo formado entre la normal del elipsoide y la normal del vector de gravedad local.
- **Sistema de referencia ECEF:** describe el sistema de referencia del elipsoide geodésico cuyo centro coincide con el centro de masas de la tierra.

Las coordenadas de los puntos LiDAR son el resultado de la combinación de las mediciones de los distintos componentes del sistema, obtenidas a través del modelo matemático que las relaciona teniendo en cuenta los diferentes sistemas de referencia existentes (Habib, Kersting, Shaker, & Yan, 2011). A continuación se muestra la ecuación del modelo matemático simplificado:

$$\vec{X}_G = \vec{X}_0 + R_{\omega,\varphi,\kappa} \vec{P}_G + R_{\omega,\varphi,\kappa} R_{\Delta\omega,\Delta\varphi,\Delta\kappa} \vec{P}_L$$

donde  $\vec{X}_G$  son las coordenadas del punto en el sistema de referencia geográfico,  $\vec{X}_0$  el vector de coordenadas GPS del sistema de referencia de la IMU,  $R_{\omega,\varphi,\kappa}$  es la matriz de rotación de las mediciones de la IMU,  $\vec{P}_G$  es el vector entre el origen del sistema de referencia de la IMU y el origen del sistema de referencia del sensor LiDAR,  $R_{\Delta\omega,\Delta\varphi,\Delta\kappa}$  es la matriz de rotación de los ángulos de boresight entre el sistema de referencia de la IMU y el sensor LiDAR  $\vec{P}_L$  es el vector de coordenadas del punto en el sistema de referencia del sensor LiDAR.

## **1.2. Hipótesis de trabajo**

En el apartado anterior se ha presentado una breve introducción al estado del arte de diferentes tecnologías que permiten la obtención de datos de diversa naturaleza y con interés para diferentes tipos de aplicaciones que, combinando su uso con plataformas de captura aéreas no tripuladas, UAVs, ofrecen un campo de investigación con varias líneas de trabajo sobre las que se desarrolla este trabajo de Tesis Doctoral. El presente proyecto, se centra en el desarrollo de nuevas fórmulas y protocolos de obtención de datos geomáticos de precisión para que, a través de su posterior tratamiento, se obtengan resultados y productos de alto valor añadido, introduciendo nuevas técnicas y metodologías que resuelven nuevos problemas de ingeniería.

De este modo, para dar respuesta a la investigación llevada a cabo se parte de las siguientes hipótesis de trabajo:

- La introducción de los vehículos aéreos no tripulados en su uso para aplicaciones civiles posibilita la adquisición de datos desde puntos de vista aéreos, diferentes a los obtenidos hasta la fecha y con unos costes reducidos.
- La evolución de los sensores de captura de datos hacen que la calidad del dato vaya en aumento mientras que el tamaño y coste de los sensores cada vez sea más reducido, posibilitando el acceso e integración en aplicaciones de alto valor añadido.
- Es posible desarrollar nuevos protocolos de captura y obtención de información con la introducción de vehículos aéreos no tripulados e integración de sensores de bajo coste que aporten datos de calidad.
- Es posible realizar la integración eléctrica y mecánica de los diferentes sensores y componentes en las plataformas UAV, realizando desarrollos embebidos adaptados a cada necesidad específica.
- Es posible el desarrollo de nuevas técnicas de tratamiento de datos y obtención de nuevas metodologías de trabajo que solucionen diferentes problemas de ingeniería que se plantean.

### 1.3. Objetivos

En base al marco de trabajo presentado en los apartados previos, se plantean los objetivos de esta Tesis Doctoral, distinguiendo entre los objetivos de la etapa científico-investigadora y los objetivos de la etapa técnico-industrial.

El objetivo general de la etapa científico-investigadora es el uso de sensores específicos sobre plataformas UAV para el **diseño de nuevas integraciones** y el **desarrollo de técnicas de tratamiento de datos** que aporten valor añadido para su uso en aplicaciones geomáticas.

Concretamente, los **objetivos específicos** de esta etapa científico-investigadora son:

- Estudiar la tecnología implementada en los UAVs, estudiando ventajas e inconvenientes para establecer la base de conocimiento que permita explotar su utilización como plataformas de cargas de pago de sensores geomáticos.
- Estudiar la técnica termográfica, principios físicos de funcionamiento y aspectos a tener en cuenta para obtener datos tomados desde UAVs de forma que puedan ser explotados mediante el uso de tratamientos específicos.
- Explorar las capacidades de la técnica fotogramétrica sobre UAV para resolver problemas concretos en ingeniería civil mediante nuevos desarrollos no contemplados hasta la fecha.
- Conocer los principios de funcionamiento de los sensores LiDAR y las tecnologías de escaneado existentes en el mercado, de cara a su montaje en UAVs para una correcta adquisición y procesamiento de datos 3D.
- Estudiar las ecuaciones matemáticas necesarias para la georreferenciación directa de los datos obtenidos mediante plataformas móviles.
- Diseñar metodologías de integración de sensores termográficos en UAVs, que garanticen la utilidad de los valores de temperatura medidos para estudios de balance energético, así como en aplicaciones de gestión de usos del suelo.

- Diseñar metodologías de integración de sensores RGB en plataformas UAV que permitan la adquisición de datos adaptada a los requerimientos de la estructura en estudio, garantizando elevados valores de resolución y precisión.
- Diseñar la integración de sensores láser, 2D y 3D, en plataformas UAV, para la adquisición de datos geométricos de alta resolución y precisión.
- Desarrollar y automatizar algoritmos y nuevas metodologías de procesado y tratamiento de datos RGB obtenidos desde UAV para aplicaciones en ingeniería civil, forestal, geomática e industria en general.
- Desarrollar estrategias de adaptación de los algoritmos de procesado de datos RGB a las características propias de las imágenes termográficas (baja resolución espacial y espectral).
- Generar algoritmos y metodologías de procesado de datos de láser escáner, incluyendo el filtrado de datos de posicionamiento y orientación del UAV, el refinamiento de la trayectoria, y estrategias de proyección de valores de posicionamiento 3D en la misma.
- Validar los resultados obtenidos tras la aplicación de las técnicas y algoritmos generados para comprobar la veracidad y usabilidad de estos en escenarios reales.

El objetivo general de la etapa técnico-industrial es el **desarrollo de un sistema de adquisición de datos mediante sensor LiDAR desde plataformas UAV de bajo coste listo para su puesta en el mercado**, como resultado de aplicar los conocimientos del trabajo previo de la etapa investigadora.

A continuación, se enumeran los **objetivos específicos** de la etapa técnico-industrial:

- Establecimiento de requisitos del sistema y software asociado.
- Diseño del hardware del sistema de captura de datos atendiendo a su característica de bajo coste y la necesidad de industrialización.
- Diseño del software de gestión del sistema de captura.



- Diseño del software de tratamiento de los datos obtenidos para la generación de resultados.
- Desarrollo del hardware específico de integración.
- Desarrollo del software de gestión del sistema de captura.
- Desarrollo del software de tratamiento de datos, poniendo en valor el conocimiento matemático y técnicas de procesado adquiridas en la etapa investigadora.
- Integración de los diferentes elementos hardware: sensores y hardware específico.
- Validación final de los desarrollos mediante métricas para evaluar la precisión de los resultados obtenidos.

## **1.4. Estructura de la Tesis Doctoral**

Esta Tesis Doctoral es presentada de acuerdo a la regulación vigente para programas de doctorado de la Universidad de Salamanca, mediante transferencia científica, a través de cuatro artículos científicos publicados en revistas internacionales de alto impacto, y tecnológica, representado por el desarrollo de un producto comercial generado al término de la misma. La estructura consiste en un total de seis capítulos siguiendo una estructura acorde a los objetivos fijados y distribuidos de la siguiente forma:

- Capítulo I: Introducción
- Capítulo II: Integración de sensor termográfico en UAV para aplicaciones geomáticas.
- Capítulo III: Integración de sensor RGB en UAV para aplicaciones geomáticas.
- Capítulo IV: Integración de sensor LiDAR en UAV para aplicaciones geomáticas.
- Capítulo V: Desarrollo de producto.
- Capítulo VI: Conclusiones y trabajo futuro

Además de los seis capítulos principales, se incluyen tres apéndices con información relevante adicional, Apéndice A, con información del factor de impacto de las revistas en las que fueron publicados los artículos, Apéndice B, con información específica de los productos desarrollados en la etapa técnico-industrial de esta Tesis Doctoral y, finalmente, el apéndice C que incluye las patentes de invención registradas a lo largo del desarrollo de la Tesis Doctoral, resultado del trabajo exhaustivo con plataformas UAVs que presentan invenciones para solucionar carencias identificadas de la tecnología existente en la fecha.

A continuación, se proporciona de forma detallada el contenido de cada capítulo:

**Capítulo I:** establece una revisión inicial del estado del arte de las diferentes tecnologías sobre las que se desarrollará el trabajo de

---

investigación, se establecen los objetivos y se finaliza con la organización y estructura de esta Tesis Doctoral.

**Capítulo II:** recoge el contenido de la primera publicación científica titulada “*Aerial Thermography from Low Cost UAV for the Generation of Thermographic Digital Terrain Models*”, en donde se presenta una nueva metodología para generar un MDT termográfico a partir de termografía aérea y se desarrolla una metodología de segmentación píxel a píxel para clasificación de los diferentes usos de suelo.

**Capítulo III:** está formado por dos publicaciones científicas en donde se presentan diferentes técnicas para el procesado de imágenes RGB tomadas desde UAV y se desarrollan aplicaciones específicas. Este capítulo se divide en dos secciones de la siguiente forma:

**III.1:** abarca la segunda publicación científica titulada “*Geometric landslide analysis based on UAV platforms and Geographical Information Systems processing: Xunqueira slope, Spain*”, donde se presenta la utilidad de modelos digitales de alta resolución generados a través de fotogrametría con UAV para su utilización en geo-procesos en software SIG para la generación de mapas con información de interés para el estudio de fenómenos que puedan afectar al terreno

**III.2:** contiene la tercera publicación científica titulada “*UAV Photogrammetry application to the monitoring of rubble mound breakwaters*”, donde se presenta una técnica basada en fotogrametría con UAV para la generación de datos espaciales de alta calidad que permiten el desarrollo de una metodología para monitorizar el desplazamiento de cubos de hormigón en diques de puertos.

**Capítulo IV:** recoge el contenido de la cuarta publicación científica titulada “*Novel aerial 3D mapping system based on UAV platforms and 2D laser scanners*”, donde se presenta el desarrollo de un sistema de generación de información cartográfica basado en la integración de sensores sobre UAV realizando estudios de precisión y comprobando su utilidad.

**Capítulo V:** sintetiza el trabajo de la etapa técnico-industrial, resumiendo las fases llevadas a cabo durante el desarrollo de un sistema de adquisición de datos con sensor LiDAR desde UAV de bajo coste como producto comercializable haciendo uso de las tecnologías que previamente han sido estudiadas y desarrolladas en la etapa investigadora de esta Tesis Doctoral.

**Capítulo VI:** es el capítulo final donde se realiza una discusión técnica de los resultados y conclusiones obtenidos durante el desarrollo de esta Tesis Doctoral. Finalmente, se fijan diferentes enfoques hacia la continuidad del trabajo de las diferentes líneas de investigación abordadas a lo largo de este trabajo de tesis.

# **CAPÍTULO II**

## **INTEGRACIÓN DE SENSOR TERMOGRÁFICO EN UAV PARA APLICACIONES GEOMÁTICAS**



## 2. INTEGRACIÓN DE SENSOR TERMOGRÁFICO EN UAV PARA APLICACIONES GEOMÁTICAS

### 2.1. Aerial Thermography from Low Cost UAV for the Generation of Thermographic Digital Terrain Models

Este capítulo contiene el artículo *Aerial Thermography from Low Cost UAV for the Generation of Thermographic Digital Terrain Models* publicado en la revista científica de impacto *Opto-Electronics Review* en 2014.

#### 2.1.1. Resumen

Este artículo describe una nueva metodología para extender el uso de la termografía usando UAVs para la inspección y estudio de tejados en áreas urbanas de tamaños medio a alto, así como proporcionar información para determinar distintos usos de suelo en el entorno que afecta de forma directa a la eficiencia energética de los edificios, como puede ser, por ejemplo, el análisis de la existencia de islas urbanas de calor.

En estudios previos, la termografía ha sido aplicada por diferentes autores desde una perspectiva terrestre para la detección de defectos de construcción tales como infiltraciones de aire, puentes térmicos y cálculos de parámetros termo-físicos en edificios y materiales. En estudios más recientes, esta información termográfica es combinada con nubes de puntos y otros datos geométricos de forma que permiten obtener de forma precisa las dimensiones de áreas afectadas y otros parámetros geométricos de interés. Desde una perspectiva aérea, otros autores utilizan imágenes satelitales o información tomada desde avión en la banda del infrarrojo

térmico para realizar estudios de zonas urbanas en su aspecto más general, sin poder bajar al nivel de edificio por no tener una resolución suficiente.

En el estudio propuesto, los datos termográficos adquiridos son usados para generar un mosaico y texturizar un Modelo Digital de Terreno (MDT) permitiendo la identificación de usos de suelo tales como edificaciones, bosques y zonas verdes, con su respectiva contextualización y caracterización.

Se describe la configuración de sensor y plataforma de vuelo para la adquisición de imágenes termográficas con un solape mayor del 50% de la zona de estudio en función de los parámetros de altura de vuelo, características del sensor termográfico y lente utilizada. Resultado de la campaña de recogida de datos se cubre un área de aproximadamente 26000  $m^2$ , con termogramas de aproximadamente 48 x 48  $m^2$  de huella y un tamaño de píxel de 15 cm, lo que permite la perfecta identificación de diferentes zonas en edificios y la distinción de los distintos tipos de vegetación en la zona colindante.

Tras adaptar los datos brutos de la cámara termográfica y la conversión a imagen RGB con paleta de color, se calculan los coeficientes de distorsión de la lente y se procede con la corrección de la distorsión, tanto radial ( $dr$ ) como tangencial ( $dp_x$ ,  $dp_y$ ), introducida por esta en las imágenes siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$dr = r + K_1 * r^2 + K_2 * r^4 + K_3 * r^6$$

$$dp_x = P_x * (r^2 + 2x^2) + 2P_y xy$$

$$dp_y = P_y * (r^2 + 2y^2) + 2P_x xy$$

Una vez corregida la distorsión se realiza el registro de las imágenes termográficas para la obtención del mosaico termográfico al que se le aplican técnicas de transición lineal (LTM) para la corrección y homogeneización de las variaciones bruscas entre píxeles contiguos provocadas por la unión de imágenes. El mosaico termográfico es usado para proveer de textura a un MDT de la zona y fusionarlo con la ortoimagen correspondiente.



Sobre el MDT texturizado con información térmica se aplican técnicas de cambio de espacio de color para realizar una clasificación píxel a píxel y obtener una segmentación de la imagen en base a los diferentes usos del suelo en función de su temperatura. El conocimiento del número de píxeles de cada clase, así como del tamaño de la huella del píxel en el terreno posibilita el cálculo automático del área de cada zona. La zona de estudio se clasifica en tres grupos: edificaciones, vegetación baja y vegetación alta (arbustos y árboles) obteniendo unos resultados con un error inferior al 5% para el valor del área, usando como referencia o “verdad-terreno” datos obtenidos del Instituto Geográfico Nacional.

Finalmente, se concluye que el trabajo desarrollado proporciona una nueva metodología para generar un MDT termográfico a partir de termografía aérea y se desarrolla una metodología de segmentación píxel a píxel para clasificación de los diferentes usos de suelo. Se establece una nueva línea de trabajo que permitirá, en edificación, realizar estudios de pérdidas de calor en edificios y gestión energética; en agricultura, una gestión más eficiente del suelo y recursos hídricos; y común a todos los campos, realizar valoraciones cuantitativas tanto a nivel superficie como de magnitud térmica

### **2.1.2. Artículo I**

# Aerial thermography from low-cost UAV for the generation of thermographic digital terrain models

S. LAGÜELA\*, L. DÍAZ-VILARIÑO, D. ROCA, and H. LORENZO

Applied Geotechnologies Research Group, University of Vigo, Lab 22, ETSE Minas, Campus Universitario Lagoas- Marcosende, 36310 Vigo, Pontevedra, Spain

---

---

*Aerial thermography is performed from a low-cost aerial vehicle, copter type, for the acquisition of data of medium-size areas, such as neighbourhoods, districts or small villages. Thermographic images are registered in a mosaic subsequently used for the generation of a thermographic digital terrain model (DTM). The thermographic DTM can be used with several purposes, from classification of land uses according to their thermal response to the evaluation of the building print as a function of their energy performance, land and water management. In the particular case of buildings, apart from their individual evaluation and roof inspection, the availability of thermographic information on a DTM allows for the spatial contextualization of the buildings themselves and the general study of the surrounding area for the detection of global effects such as heat islands.*

---

---

**Keywords:** aerial platform, infrared thermography, thermographic DTM, land uses, terrain classification.

## 1. Introduction

Infrared thermography has been widely used in buildings for the detection of construction defects such as air infiltrations, thermal bridges, and moisture areas [1–3], as well as the calculation of thermophysical parameters of the building materials [4–5] and the energy performance of the building as a whole [6–7]. In recent studies this information has been registered with a point cloud for its combination with geometric information towards its location and accurate measurement of the affected areas [8–9]. These studies are usually performed from a terrestrial point of view, either by an operator walking around the building [10], or by a terrestrial mobile platform from where data is acquired as a sequence [11]. Nevertheless, the principal drawbacks of these studies are that buildings are considered in isolation, not paying attention to their environment, and that the documentation process does not usually include details from difficult access areas such as roofs, where measurements are not possible in the common mode.

Up to date thermal satellite images and thermographic aircraft acquisitions are the most used technologies for providing temperature data of large areas from a bird's eye viewpoint. In both cases the resolution is usually not enough for capturing depict details of buildings due to the width of the areas covered unless panchromatic bands are used [12], and the applications usually focus on studying the behaviour of large areas as a whole, for example, urban heat stress and heat island mapping studies in complete cities [13].

These studies are usually ordered by governmental institutions with wide purposes, and they are not commonly affordable by citizens for their particular needs.

With the appearance of low-cost unmanned aerial vehicles (UAVs), different research groups have started to use this technology to program photogrammetry flights and generate 3D point clouds and digital terrain models (DTM) from the digital imagery acquired of medium size areas [14–15]. Regarding the use of thermographic cameras, some studies have approached the use of UAVs for the geometric – thermographic inspection of façades, acquiring data difficult to reach from a terrestrial point of view, but missing important information of the roof [16]. What is more, multispectral cameras have been used for agricultural purposes, [17–18], such as monitoring the application of herbicide in turf grass and detection and classification of greenhouses.

This paper proposes the extension of the thermographic studies performed in individual building façades, to the inspection of the building roofs, at a larger scale: medium-size areas such as neighbourhoods, villages or districts using a low-cost aerial platform, UAV-type. Due to this enlargement in the scale, land uses other than buildings can be analysed, consequently widening the application of the proposed methodology from energy efficiency in buildings to fields such as land and water management, agriculture monitoring, detection of greenhouses, forest exploitation, etc.

In the proposed study, data acquired is used to generate a thermographic mosaic and texture a digital terrain model, allowing for the identification of different land uses, such as buildings, forest and grass area, their spatial contextuali-

---

\* e-mail: susiminas@uvigo.es

zation and characterization. The structure of the paper is as follows: Section 2 explains the proposed methodology, including both data acquisition and data processing for the generation of thermographic mosaics covering larger areas than images individually and its inclusion in a digital terrain model (DTM); Section 3 presents the procedure use for the classification of the thermographic DTM's as a function of the different land uses; Section 4 discusses the quality of the results obtained with the proposed procedure regarding methods currently under use. Finally, Section 5 includes the conclusions reached after the performance of the study.

## 2. Methodology

### 2.1. Data acquisition

The platform chosen for the aerial inspection has been provided by HiSystems GmbH [19]. It is an eight-propeller copter, referred to as Okto XL, chosen due to its high payload, its high robustness to motor failure, its easiness of manoeuver in difficult outdoor scenes, and its low-cost [20].

The copter consists on a frame of aluminium squared tubes and carbon fibre base plates, powered by eight brushless motors with the capability of driving both left and right.

However, although the payload is among the greatest for these kind of vehicles, its value of 2 kilograms is still a restrictive factor when choosing a thermographic sensor to mount on (Fig. 1). Because of its compromise between lightweight and thermal resolution, a thermographic camera Gobi384 was selected for this work. It has a  $384 \times 288$  uncooled microbolometer array able to acquire with a frame rate of up to 50 fps. Thanks to its high acquisition speed, the flight speed of the copter is not limited and acquisition of thermographic images of all the area flight is assured. The camera is equipped with a thermographic lens with 10 mm focal length, providing a field of view of  $51^\circ \times 40^\circ$ .

The study area is located in the municipality of Vigo, province of Pontevedra, in the Northwest of Spain (Fig. 2). It comprises an area of about 26.000 m<sup>2</sup> at the south of the city, and is centred on the WGS84 geographic coordinates of  $42^\circ 10' 11''\text{N}$  and  $8^\circ 41' 23''\text{W}$ .

The area selected for the flight is a mountainous zone with dispersed buildings, in such a way that different land



Fig. 1. UAV equipped with thermographic camera.

uses are acquired (rural zones and buildings), allowing for the analysis of the spectral responses in the thermal infrared band of the different terrains.

The flight was planned taking into account the field of view of the camera and the overlap desired between consecutive strips, considering as a strip each long flying line that forms the complete path followed by the UAV. Given these factors, a flight height of 50 meters, and 4 strips was the configuration needed. The flight planning can be seen in Fig. 3.

The weather conditions for the flight must be in agreement with the requirements of both the copter and the thermography: that is, on a no-rainy day, with light wind and in a moment when there is not direct sun on the surface, so that there is no heterogeneous heating affecting the surface and consequently distorting the measurements.

For the area covered, a flight of only 5 minutes is needed at an average speed of 5m/s, in which more than 14000 images are acquired, each covering an approximate area of  $48 \times 48$  m<sup>2</sup> according to the angular field of view of the camera lens and the flight height. What is more, the pixel size under these conditions is 15 cm<sup>2</sup>, which allows for the identification of individual trees and bushes, as well as most of the building elements present in the roof: chimneys, antennas and air conditioning systems, among others.

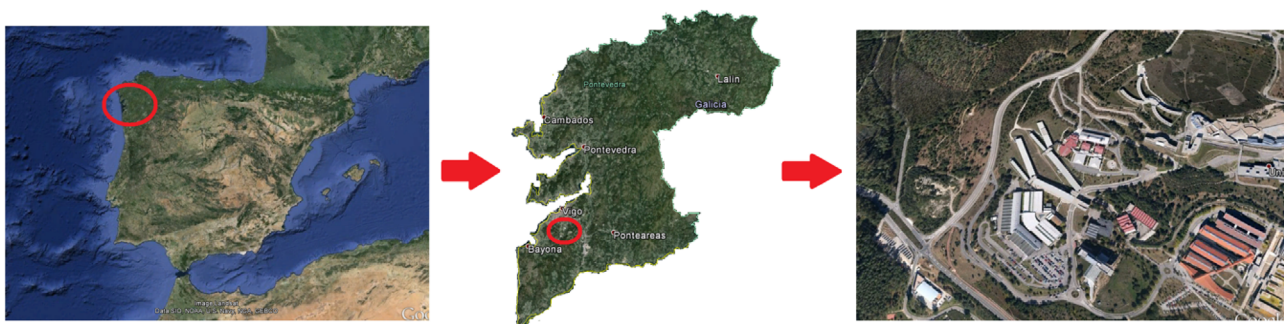


Fig. 2. Location of the area selected for the study.

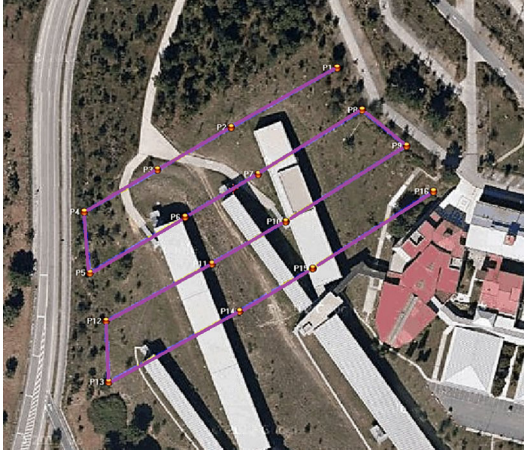


Fig. 3. Flight planning for thermographic image acquisition. Red dots identify the control points established to avoid the deviation of the copter within one strip.

## 2.2. Thermographic mosaicking

Thermographic images are formed by only one matrix with temperature values; regarding image format it would be as if the value of each pixel was a temperature value. Taking the smallest and the largest temperature values appearing in the image, the matrix can be scaled, so that all values range between 0 and 1. Then, a 3-channel colour palette can be applied, so that thermographic images are converted to images in the RGB colour space with colours related to temperature values. Once this conversion is performed, images can be subjected to the mosaicking process.

The first step of the process is the generation of a thermographic mosaic of the area, with which the digital terrain model can be textured. The mosaic is generated using proprietary software made in Matlab® and an orthophotograph as a support, from RGB-thermographic images chosen among all those acquired. The selection of thermographic images for the mosaic is performed in such a way that the images cover all the area under study with a minimum overlap of 50% between adjacent thermographies. For the selected thermographies distortion added by the sensor is corrected prior further processing, thanks to the geometric calibration of the camera-lens system, performed as in Ref. 21. The calibration parameters of the thermographic camera used in the inspection are shown in Table 1.

For the correction of radial distortion, the unbalanced lens model is considered; distortion is calculated with Eqs. (1)–(3), where  $x$ ,  $y$  are the image coordinates of each pixel, and  $r$  is the radial position of the pixel, calculated as the sum  $x^2 + y^2$ .

$$\text{Radial distortion: } dr = r + K_1 * r^2 + K_2 * r^4 + K_3 * r^6; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Tangential distortion in the X-axis:} \\ dp_x = P_x * (r^2 + 2x^2) + 2 * P_y * x * y; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Tangential distortion on the Y-axis:} \\ dp_y = P_y * (r^2 + 2y^2) + 2 * P_x * x * y. \end{aligned} \quad (3)$$

Table 1. Geometric calibration parameters of the thermographic camera Gobi 384 used for data acquisition.

Pixel size (mm/pix)	0.0156	
Format size (mm)	5.9997 (W) × 4.5000 (H)	
Principal point (mm)	$X_p$	2.8807
	$Y_p$	2.2891
Radial distortion	$K_1$	-0.1142
	$K_2$	2.924e-3
	$K_3$	0
Tangential distortion	$P_x$	-1.813e-4
	$P_y$	-9.998e-5

Once radial distortion is corrected from the selected images, image registration is performed for each thermography by marking control points between thermographies and the orthophotograph of the selected area; this process is refined by the calculation of the correlation value between each pair of points, followed by the search of points that maximize this value within an area of 7×7 pixels for each thermography. This value is chosen for being the smallest area size that maximizes the precision of the result of correlation [22]. After registration, perspective effects appearing in the original thermography are corrected and the registered images have the same resolution as the reference orthophotograph. The registration process is shown in Fig. 4.

Once all thermographies are registered, they are put together into the same mosaic image, so that all the flown area is covered. Pixel values in overlapping regions between adjoining images are specifically calculated in order to avoid edge seam. Thus, a linear transition method (LTM) is applied [23]. This LTM method calculates the value of each pixel as a weighed mean of the pixel in each image, using as weigh the distance of the pixel in the thermographic mosaic to the image centre of each image composing the mosaic, Eq. (4).

$$\begin{aligned} M_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) * A_i \\ + [1 - (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min})] * B_i. \end{aligned} \quad (4)$$

If images are adjacent, in the same row  $X_{\max}$  and  $X_{\min}$  stand for the maximum and minimum value of  $X$  in the overlapping area. Where  $A_i$  denotes the value of pixel  $i$  in image  $A$ , and  $B_i$  the value of pixel  $i$  in image  $B$ . The position of pixel  $i$  in image  $A$  is denoted as  $X_i$ , and the homogenized pixel value is  $M_i$ .

An example of the process of thermographic mosaic generation is shown in Fig. 5.

## 2.3. Thermographic digital terrain modelling

The thermographic mosaic generated is ready to be imported in a spatial mapping software such as ArcGis©. The mosaic is directly imported and geo-referenced before being used to texture a conventional DTM. Furthermore, the ther-



Fig. 4. Image registration process (left); registered image (right).

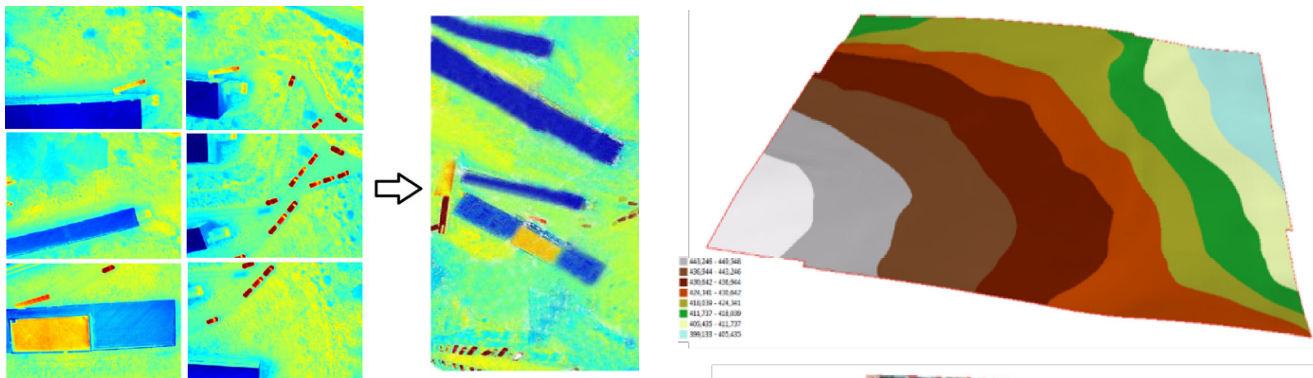


Fig. 5. Thermographic mosaic generation.

mographic mosaic can be fused with an orthophotograph of the area in order to obtain both visual and thermal information in a spatial context (Fig. 6). Image fusion can be performed with different approaches; in this case, the thermographic image is converted to IHS colour space (intensity, hue, saturation), and the intensity channel is substituted by the orthophotograph in grayscale. The fused image GHS (gray level, hue, saturation) is then reconverted to the original RGB colour space. With this procedure, the resulting image presents the colour information of the thermographic image, with the geometrical resolution of the orthophotograph.

### 3. Land-use classification

The generated thermographic digital terrain model allows for the detection of four buildings in the flight area (in blue), together with a parking area, and rural area with different types of vegetation: warmer areas, in yellow, correspond to low-height vegetation such as grass, whereas colder areas, in green and light blue, correspond to taller vegetation, from bushes to trees.

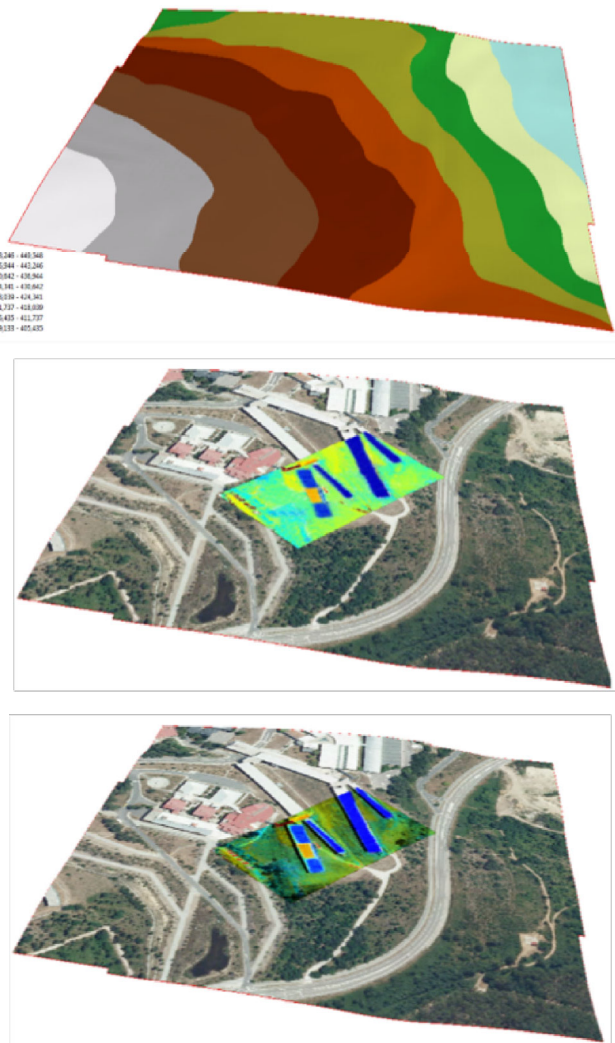


Fig. 6. Thermographic DTM generation carried out in ArcGIS. From top to bottom: conventional DTM, DTM textured with the thermographic mosaic, texture completed with the orthophotograph, and DTM textured with an image resulting from the fusion of a thermography with an orthophotograph.

Given that the terrain presents different temperature according to its use, pixel classification is performed in the thermographic DTM, so that the area affected by each use is automatically calculated. Pixel segmentation is based on the conversion of the image, in RGB colour space, to XYZ colour space [24]. Other colour spaces such as YCbCr can be used for the conversion, but in this work the XYZ colour space is chosen due to its device-independent nature, allowing the performance of identical segmentation analysis in every device.

In this colour space, each pixel X is a measure of the stimulus of red, Y measures luminosity, and Z indicates the stimulus of blue. Consequently, if we convert the image to the XYZ colour space and focus on the X, Z values, pixels can be classified merely according to their chromaticity. In the area under study, three different groups have been selected: buildings, low-height vegetation, and tall vegetation (bushes and trees) (Fig. 7). After this, pixels that have been classified in a group where they do not belong are removed from each cluster using a threshold value for colour; this step is especially important in the low-height vegetation cluster (Fig. 7, Cluster 2), since it includes pixels corresponding to concrete paths for vehicles.

Knowing the value of the pixel size of the DTM (25 cm/pixel) and the number of pixels of each use provides the area dedicated: metal roofs (Fig. 7, Cluster 1) occupy 4650 m<sup>2</sup>, for 100 m<sup>2</sup> of non-metal roofs. These surface values, together with the surface temperatures measured in the thermographic images and the ambient conditions, allow for the identification of the material of the roof, so that the quantity of heat lost to the atmosphere (by convection and radiation heat transfer methods) through the building's roof can be computed [Eq. (5)].

$$Q = h_{\text{roof}} * A * (T_{\text{roof}} - T_{\text{ext}}) + 4 * \epsilon * \sigma * A * T_{\text{roof}}^4 \quad (5)$$

Being Q the quantity of heat lost to the atmosphere,  $h_{\text{roof}}$  the thermal convective coefficient of the outer part of the roof (units W/m<sup>2</sup>K), A the area of the roof,  $T_{\text{roof}}$  the temperature of the outer surface of the roof measured in the thermographic images, and  $T_{\text{ext}}$  the ambient temperature. For the computation of the radioactive heat,  $\epsilon$  is the emissivity value of the outer surface of the roof, and  $\sigma$  is the Boltzmann constant, equal to 5.67e<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>.

Regarding environment, and following the same approach as with buildings, a value of 8050 m<sup>2</sup> and 13240 m<sup>2</sup> is obtained for the areas destined to tall and low vegetation, respectively.

## 4. Results and discussion

The validity of the proposed methodology is checked by comparing the surface values obtained per land use with reality. Consequently, official maps from the National Cartographic Institute [25] are used as a reference (Fig. 8), and the surfaces corresponding to the 3 different land uses are measured in the official orthophotograph of the area. Re-

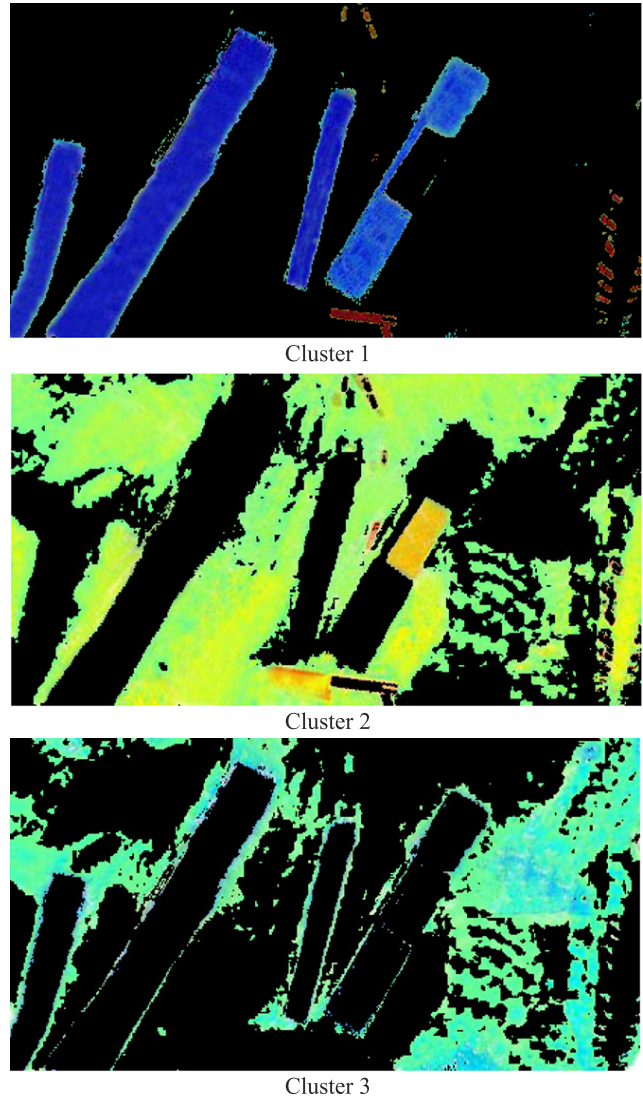


Fig. 7. Different clusters obtained after the conversion of the thermographic DTM to XYZ colour space.

sults are shown in Table 2, where an error lower than 5% can be seen for the three cases.

Table 2. Accuracy results of the proposed methodology.

Land use	Real value (m <sup>2</sup> )	Value from methodology (m <sup>2</sup> )	% deviation
Building roof	4.932	4.750	3.69
Low vegetation	12.644	13.240	4.71
Tall vegetation	8.391	8.050	4.06

## 5. Conclusions

This paper presents a methodology for the generation of a thermographic terrain model using a low-cost aerial platform, copter-type.

The result of the registration and mosaicking of the thermographies acquired from the air, followed by the use of the mosaic for texturing the digital terrain model, is

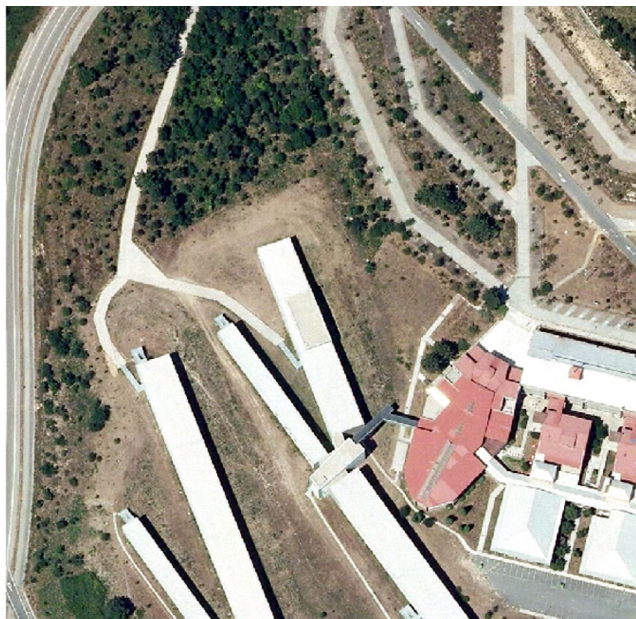


Fig. 8. Detail of the orthophoto containing the area under study. PNOA given by © Instituto Geográfico Nacional de España.

a thermographic DTM in which several analysis can be performed: the different spectral responses in the thermal infrared band of each type of terrain allows for the identification and segmentation of the different land uses existing in the area. What is more, the knowledge of the pixel size of the resulting thermographic DTM provides geometric information of the total area, and consequently, of the area corresponding to each land use.

Surface calculation is the base step for further studies such as heat losses of buildings, individually or in a medium scale (small towns, districts and neighbourhoods). In the agricultural field, the knowledge of the area covered per use increases the accuracy in crop calculation, as well as land and water management, and irrigation planning. On the other hand, the combination of the surface value with the topography given by the DTM, can be used for the quantification of forest masses and evaluation of possible future uses of the vegetation area.

The limitations of the proposed methodology are mainly technological: the area covered is limited by the flight autonomy of the aerial vehicle used, which is 15–30 minutes for the vehicles currently in the market, also depending on the mounted payload. Regarding data processing, the step of image registration increases significantly the working time due to the fact of being manual, which also makes the accuracy of the whole process dependent on the operator skills. Although the first drawback can only be solved by time and technological progress, the second drawback regarding manual processing can be dealt with future work, focusing on the automation of the feature extraction and the identification of corresponding entities between images.

Regarding the capabilities of the proposed methodology, future work will focus on the exploitation of the ther-

mographic DTM through the extraction of parameters of interest of each object present: coordinates of buildings, evaluation of heat islands, identification of tree species, evaluation of land state (water irrigation, terrain fertility), detection of buried objects, etc.

## Acknowledgements

Authors would like to give thanks to the Consellería de Economía e Industria (Xunta de Galicia), Ministerio de Economía y Competitividad and CDTI (Gobierno de España) for the financial support given through human resources grants (FPDI-2013-17516, FPU AP2010-2969), and projects (IPT2012-1092-120000, ITC-20133033, ENE2013-48015-C3-1-R). All the programs are co-financed by the Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER).

## References

1. T. Taylor, J. Counsell, and S. Gill, “Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography”, *Energ. Buildings* **66**, 222–231 (2013).
2. F. Asdrubali, G. Baldinelli, and F. Bianchi, “A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings”, *Appl. Energ.* **97**, 365–373 (2012).
3. E. Grinzato, N. Ludwig, G. Cadelano, M. Bertucci, M. Gargano, and P. Bison, “Infrared thermography for moisture detection: a laboratory study and in-situ test”, *Mater. Eval.* **69**, 97–104 (2011).
4. S. Chudzik, “Thermal diffusivity measurement of insulating material using infrared thermography”, *Opto-Electron. Rev.* **20**, 40–46 (2012).
5. P. Bison and E. Grinzato, “IR thermography applied to the assessment of thermal conductivity of building materials”, in *32<sup>th</sup> Thermosense*, Orlando, 2010.
6. P. Fokaides and S. Kalogirou, “Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-value) in building envelopes”, *Appl. Energ.* **88**, 4358–4365 (2011).
7. A. Bortolin, G. Cadelano, G. Ferrarini, and P. Bison, “Thermal performance measurement of the building envelope by infrared thermography”, *AITA Conference*, Torino, 2013.
8. S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, J. Martínez, and J. Armesto, “Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes”, *Automat. Constr.* **31**, 230–240 (2013).
9. Y. Ham and M. Golparvar-Fard, “EPAR: Energy Performance Augmented Reality models for identification of building energy performance deviations between actual measurements and simulation results”, *Energ. Buildings* **63**, 15–28 (2013).
10. M. Scaioni, E. Rosina, L. Barazzetti, M. Previtali, and V. Redaelli, “High-resolution texturing of building façades with thermal images”, in *34<sup>th</sup> Thermosense*, Baltimore, 2012.
11. L. Hoegner and U. Stilla, “Automatic generation of façade textures from terrestrial thermal infrared image sequences”, *QIRT*, Bordeaux, 2014.
12. F. Agüera, F. Aguilar, and M. Aguilar, “Using texture analysis to improve per-pixel classification of very high resolution



- images for mapping plastic greenhouses”, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing* **63**, 635–646 (2008).
13. J.E. Nichol and P. Hang To, “Temporal characteristics of thermal satellite images for urban heat stress and heat island mapping”, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing* **74**, 153–162 (2012).
  14. N. Haala, M. Cramer, F. Weimer, and M. Trittler, “Performance test on UAV based photogrammetric data collection”, *IAPRS* **38** (1/C22) 7–12 (2011).
  15. F. Neitzel and J. Klonowski, “Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system”, *IAPRS* **38** (1/C22), 39–44 (2011).
  16. M. Previtali, L. Barazzetti, and R. Brumana, “Thermographic analysis from UAV platforms for energy efficiency retrofit applications”, *J. Mobile Multimedia* **9**, 66–82 (2013).
  17. H. Xiang and L. Tian, “Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV)”, *Biosyst. Eng.* **108**, 174–190 (2011).
  18. M. Aguilar, F. Bianconi, F. Aguilar, and I. Fernández, “Object-based greenhouse classification from GeoEye-1 and WorldView-2 stereo imagery”, *Remote Sensing* **6**, 3554–3582 (2014).
  19. Wiki Mikrokopter: [mikrokopter.de](http://mikrokopter.de). Last access: 04/04/2013.
  20. D. Roca, S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, J. Armesto, and P. Arias, “Low-cost aerial unit for outdoor inspection of building façades”, *Automat. Constr.* **36**, 128–135 (2013).
  21. S. Lagüela, H. González-Jorge, J. Armesto, and J. Herráez, “High performance grid for the metric calibration of thermographic cameras”, *Measurement Science and Technology* **23**, 9 (2012).
  22. E. Coll, J. Martínez, and J. Herráez, “The determination matrix size for videogrammetry correlation”, *Conf. Advances in Signal Processing, Robotics and Communications*, pp. 56–59, Malta, 2001.
  23. S. Lagüela, J. Armesto, P. Arias, and J. Herráez, “Automation of thermographic 3D modelling through image fusion and image matching techniques”, *Automat. Constr.* **27**, 24–31 (2012).
  24. CIE, *Colorimetry*, CIE Publication 15.2, 2<sup>nd</sup> Ed, pp. 19–20, 56–58, Vienna, 1986.
  25. Instituto Geográfico Nacional. Centro Nacional de Información Geográfica: [www.ign.es](http://www.ign.es). Last access: 09/07/2014.



# **CAPÍTULO III**

## **INTEGRACIÓN DE SENSOR RGB EN UAV PARA APLICACIONES GEOMÁTICAS**



### **3. INTEGRACIÓN DE SENSOR RGB EN UAV PARA APLICACIONES GEOMÁTICAS**

#### **3.1. Geometric landslide analysis based on UAV platforms and Geographical Information System processing: Xunqueira slope, Spain.**

Esta sección del Capítulo III contiene el artículo *Geometric landslide analysis based on UAV platforms and Geographical Information Systems processing: Xunqueira slope, Spain* publicado en la revista *Dyna* en 2016.

##### **3.1.1. Resumen**

En este artículo se realiza un resumen de las diferentes técnicas (satélite, SAR, TLS) usadas para realizar estudios de deslizamientos de terreno teniendo en cuenta la morfología del terreno y las características geológicas y geométricas del mismo proponiendo la generación de un HR-DEM (High Resolution Digital Elevation Models) mediante UAV y fotogrametría para realizar un estudio preciso de la geometría y morfología del terreno.

La zona de estudio escogida consta de una vía de comunicación, situada en la provincia de Ourense, que en uno de sus laterales cuenta con un talud en el cual han tenido lugar dos desprendimientos en los meses anteriores al estudio, probablemente debidos a la inestabilidad del terreno y a las lluvias caídas en la zona.

Para la generación del HR-DEM se monta sobre un UAV multirrotor una cámara de 24 Mp con una focal de 16 mm con capacidad de obtener imágenes con un GSD 1.8 cm a 75 metros de altura. Se realiza un vuelo sobre la zona de estudio para tomar imágenes con un solape superior al

60% de forma que obtenemos un total de 265 imágenes a una altura media sobre el terreno de 75 metros. Tras el procesado de las imágenes mediante software fotogramétrico, se obtiene una nube de puntos de densidad 1322 puntos/ $m^2$  y una resolución de 2 cm/píxel con un error de 0.66 píxel. Para la georreferenciación se han empleado 8 puntos de control medidos mediante GPS y a continuación se genera el Modelo Digital de Superficie que será utilizado para el estudio SIG.

El HR-DEM se somete a un primer análisis calculando secciones transversales y longitudinales centradas en las dos zonas de estudio para identificar donde se produjo movimiento de material y, a continuación, se aplica un algoritmo de cálculo de dirección de flujo sobre el HR-DEM para obtener las direcciones de desplazamiento sobre la superficie del flujo de agua que permiten verificar que las zonas afectadas por deslizamientos son coincidentes con las zonas obtenidas mediante el cálculo matemático. Se apoyan los resultados con cálculos de pendiente y rugosidad de las zonas de estudio.

Como conclusión se demuestra la utilidad de los UAV para generación de datos espaciales de alta resolución, con alto nivel de detalle, que tratados mediante geo-procesos en software SIG permiten el cálculo de mapas (pendiente, rugosidad y flujo) con información de interés para el estudio de flujos y otros fenómenos que puedan afectar al terreno permitiendo detectar zonas potencialmente conflictivas y prever situaciones de riesgo en ellas.

### **3.1.2. Artículo II**

# Análisis geométrico de derrumbamiento basado en plataformas VANT y procesado SIG: Talud Xunqueira, España



## Geometric landslide analysis based on UAV platforms and GIS processing Xunqueira slope, Spain



Rabie El Bardai<sup>1</sup>, Susana Lagüela-López<sup>2,3</sup>, David Roca<sup>2</sup>, Higinio González-Jorge<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, University of Abdelmalek Essaâdi. BP 2121, Tetouan (Morocco)

<sup>2</sup> Applied Geotechnologies Research Group. University of Vigo. Rúa Maxwell s/n, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo (Spain)

<sup>3</sup> Department of Cartographic and Terrain Engineering. University of Salamanca. Polytechnic School of Ávila. Calle Hornos Caleros, 50. 05003 Ávila (Spain)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7972> | Recibido: 22/02/2016 • Aceptado: 06/06/2016

### ABSTRACT

• The geometry of landslide and subsidence events is important regarding the evaluation of their causes and the optimal decision making towards an effective reconstruction of the structure. Thus, different approaches have been taken for the measurement of geometry following advances in technology. In this paper, an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is used for the acquisition of geometrical information, while GIS processing is applied to the geomorphological analysis of landslides in a slope built for the construction of a road in Ourense, Northwest of Spain. The main advantage of the use of UAV is the high resolution data that can be provided by these platforms, due to the possibility of flying closer to the target than other aerial platforms. Consequently, these platforms are validated for the study of land movements of local scale, with the generation of surface roughness and flow direction maps with the data acquired.

• **Keywords:** slope stability, point clouds, UAV, landslide, GIS.

### RESUMEN

La geometría de fenómenos de deslizamiento y subsidencia del terreno es importante para la evaluación de sus causas y para la toma de decisiones óptimas de cara a la reconstrucción efectiva de la estructura. Por tanto, diferentes alternativas se han desarrollado en el tiempo para la medición de geometrías conforme a los avances tecnológicos. En este artículo, un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) es empleado para la adquisición de información geométrica, mientras que el procesado SIG se aplica al análisis geomorfológico de deslizamientos de tierra en un talud construido en una carretera en Ourense, Noroeste de España. La principal ventaja del uso del VANT es la información de alta resolución que puede ser adquirida desde estas plataformas, dada la posibilidad de volar más cerca de zonas de interés que desde otras plataformas aéreas. Por tanto, estas plataformas se validan para el estudio de movimientos de tierra a escala local, con la generación de rugosidad de superficie y de dirección de flujo a partir de los datos adquiridos.

**Palabras clave:** estabilidad de taludes, nube de puntos, VANT, desprendimiento, SIG.

### 1. INTRODUCCIÓN

Eventos como deslizamientos del terreno tienen un efecto importante en la seguridad de los habitantes del área, así como en su desarrollo socioeconómico [1]. Además de los efectos en las

vidas y en la rutina de la zona, los fenómenos de deslizamiento del terreno pueden afectar también a símbolos identificativos de la zona como el patrimonio histórico [2], causando un daño importante a la identificación histórica de las sociedades afectadas. Por tanto, con el objetivo de minimizar el efecto en la sociedad de los deslizamientos de terreno y otros fenómenos análogos, el conocimiento de su ocurrencia y el análisis de sus causas son esenciales de cara a optimizar la toma de decisiones con respecto a la realización de actuaciones de seguridad y restauración, así como de reorganización de las zonas habitadas afectadas. La gestión de los deslizamientos del terreno se realiza de diferentes maneras según el país. Por ejemplo, en los casos de Italia y Reino Unido, se emplean bases de datos espaciales locales [3], las cuales, en el caso del Reino Unido, se enriquecen de aportaciones de los usuarios a través de redes sociales [4].

Una de las principales causas de los deslizamientos del terreno son los cambios en el uso y la cobertura del mismo, especialmente en aquellos casos relacionados con el uso mediante actividades humanas, tanto la expansión urbana como la realización de explotaciones agrícolas [1, 5]. Por este motivo, una de las primeras fuentes de información para el estudio de estos eventos es la imagen satelital, con grandes capacidades para la observación de la Tierra y el monitoreo del terreno [6, 7]. Los últimos avances en la resolución tanto especial como temporal de estos sensores han permitido el alcance de nuevos objetivos en este campo [8].

Las limitaciones del uso de imagen satelital para la observación de la Tierra en condiciones atmosféricas no favorables ha provocado el uso de sensores Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR) [9, 10], que presentan ventajas con respecto de la cobertura espacial, así como de las resoluciones espacial y temporal [11], con respecto de los sensores de imagen (cámaras). Cuando la localización es muy específica y requiere mayor resolución espacial que la proporcionada desde satélite, se puede recurrir al uso conjunto de SAR terrestre y espacial [12] para un análisis profundo del evento.

Los sensores SAR terrestres pueden ser usados para monitoreo de deslizamientos de tierras [13], en conjunto con los sistemas de escaneado láser terrestre (Terrestrial Laser Scanning, TLS) [14]. Las ventajas de los TLS son su flexibilidad en la resolución temporal, su mayor resolución espacial, que alcanza milímetros, y el hecho de que la vegetación no limita la detección de los movimientos del terreno [15].

Sin embargo, el uso exclusivo de sensores terrestres requiere la realización de una campaña de adquisición y la dedicación del

tiempo asociado para evitar tener información detallada del talud pero escasa de la cuenca circundante. Por este motivo, se recurre a los vehículos aéreos para aligerar el proceso de adquisición de datos, ya que estos pueden adquirir información de las superficies superior e inferior del talud simultáneamente. Así, la información aérea sirve de complemento a la información de TLS, el cual puede adquirir la forma del talud con gran precisión y resolución. La referencia [16] evalúa el uso de imágenes aéreas como complemento de medidas con TLS, mientras que [17] presenta una revisión de las capacidades del LiDAR, tanto terrestre como aéreo, para el estudio de deslizamientos del terreno. En el caso de [18], los datos adquiridos, tanto aéreos como terrestres, son imágenes, mientras que el LiDAR sólo se usa desde tierra.

Dados estos factores, los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) aparecen como la solución para la adquisición de información con alta resolución espacial tanto del talud como de las superficies circundantes, debido a su capacidad para volar cerca de estos elementos. De este modo, se pueden generar modelos digitales de elevación de alta resolución (High-Resolution Digital Elevation Models, HRDEM) a partir de imágenes adquiridas desde plataformas VANT [19]; además, la disponibilidad de información visible de las imágenes hace posible el análisis de los materiales que se deslizaron y de las fracturas y fallas del terreno [20] que pudieran tener influencia en el evento. Otra ventaja de este tipo de plataformas es la posibilidad de obtener información de zonas de interés de peligroso o difícil acceso [21].

En este artículo, la información en formato imagen adquirida desde una plataforma VANT se procesa automáticamente para la generación del HRDEM de un talud en el que han tenido lugar dos deslizamientos de terreno, en diferentes posiciones. De este modo, es posible realizar el análisis geométrico de los deslizamientos a partir de las imágenes adquiridas con VANT. Así, se valida el uso de este tipo de plataformas para la adquisición de datos para el estudio geométrico de deslizamientos del terreno y otros eventos similares.

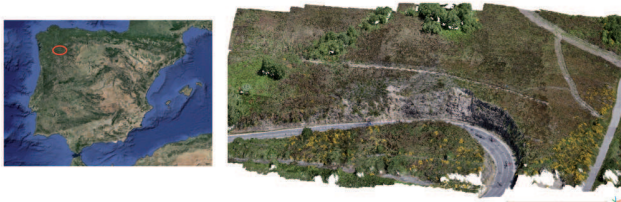


Figura 1. Localización de los deslizamientos

## 2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 2.1. CASO DE ESTUDIO

El área escogida como caso de estudio se encuentra en una carretera en las coordenadas 42°17'41"N, 7°35'19"O (Ourense, NO España), con un talud de 8 metros a un lado y una superficie de rellano plana al otro. El talud en estudio sufrió dos deslizamientos del terreno diferentes después de un período lluvioso en la primavera del año 2013. Su localización se muestra en la Fig. 1.

La geología del área de estudio está formada por pizarras fracturadas, sobre las que se colocaron capas sedimentarias [22]. En Galicia, las pizarras y los esquistos fueron desarrollados en el Paleozoico (542-229 Maños) [23]. Sin embargo, la mayoría de los elementos morfológicos observables en la actualidad se formaron en el Cenozoico [24, 25]. Desde la emersión de los territorios gallegos, estos han sido erosionados principalmente mediante procesos fluviales, marinos y glaciales [26]; además, el territorio de Galicia

está afectado por varias fracturas que provocan el debilitamiento del material rocoso [27], especialmente en el caso de pizarras y esquistos, por su propia naturaleza exfoliable.

En relación con esto, la hidrología del área es un factor de influencia para la ocurrencia de fenómenos de deslizamiento del terreno: el área pertenece a una Cuenca hidrográfica que se extiende hacia el este de la carretera, con una topografía que favorece la acumulación de agua consistente en un área plana en el medio de pendientes descendentes. Este hecho es especialmente importante dada la climatología del área, perteneciente al clima Mediterráneo continental. Esto implica que la diferencia de temperaturas entre verano e invierno está en torno a los 18°C, con precipitaciones importantes entre 400 y 600 mm de lluvia al año, concentrada en otoño y primavera [28].

En concreto, el período anterior a los deslizamientos ha sufrido dos períodos continuos de lluvia de 15 días de duración cada uno, con precipitaciones medias de 7.2 L/m<sup>2</sup> y 4.4 L/m<sup>2</sup>, respectivamente. El primer período fue el más severo, con valores máximos de lluvia de 33.8 y 18 L/m<sup>2</sup> en días consecutivos. Entre dichos períodos de lluvia, hubo un período de 16 días de sequía, aunque con una humedad relativa y temperatura medias de 60% y 11°C respectivamente, que no favorecieron el secado del terreno. La principal causa fue el elevado contraste térmico durante el día y la noche, en las que se alcanzaron temperaturas por debajo de 0 °C.

### 2.2. DESCRIPCIÓN DEL VANT Y METODOLOGÍA

La plataforma aérea usada para la realización de los vuelos en el estudio del área después de los deslizamientos de terreno ha sido proporcionada por HiSystems GmbH (Mikrokopter). Se trata de una plataforma con 8 rotores, de nombre Okto XL (Fig. 2). La elección de la misma ha sido motivada por los siguientes factores:

Alta carga de pago, de hasta 2 kg, que amplía la variedad de sensores a portar.

Robustez ante fallos gracias a los 8 rotores, de modo que es posible el vuelo después del fallo de 1 o 2 de ellos.

Maniobrabilidad.

El chasis de la plataforma está formado por tubos de sección cuadrada de aluminio, y una base formada por placas de fibra de carbono. El sistema funciona con ocho motores sin escobillas MK-3638, que permiten el desplazamiento tanto a izquierda como a derecha mediante la rotación correspondiente de las hélices, del tipo APC Slow Fly 12x3.8. Los motores se controlan de tal manera que las velocidades de rotación pueden establecerse de manera independiente para cada uno de ellos.

El control de la plataforma se realiza mediante el Control de Vuelo, una placa con un acelerómetro de tres ejes, un giróscopo de tres ejes, y un sensor de presión. Estos sensores tienen la función principal de calcular la altura y orientación de la plataforma, así como de mejorar su estabilidad y facilitar su control. Asimismo, la placa Navi Control dispone de un compás magnético y de un módulo GPS LEA-6H, mediante el cual se envía información al Sis-



Figura 2. Oktokopter XL equipado con la cámara Sony NEX7. La antena blanca pertenece al GPS usado para control del vuelo



tema de Control de Vuelo para afinar la posición medida por los sensores internos.

La adquisición de datos, en forma de campaña fotogramétrica, se realiza con una cámara Sony NEX7 montada en la plataforma. Esta cámara es escogida por su estabilidad, proporcionada por un sensor CMOS APS-C de 24.3MP, además de por su resolución: 6000x4000 pix. La distancia focal de la cámara es de 16mm, con un tamaño de pixel de 4µm. El control de la cámara es manual, de modo que el operador de la plataforma configura la adquisición (apertura de la lente, velocidad del shutter, enfoque) previamente al comienzo del vuelo. La principal ventaja de este modo de configuración es que permanece constante para todas las imágenes adquiridas durante un mismo vuelo.

El gimball de la cámara en la plataforma está giroestabilizado, permitiendo el giro de la cámara en 2 ejes, vertical y horizontal, siendo posible la adquisición de las imágenes desde puntos de vista oblicuo y cenital. En los casos de análisis de deslizamientos de terreno en un talud, se escoge el punto de vista cenital, con el objetivo de obtener información en el plano horizontal, con el mismo ángulo entre la cámara y las superficies que aparecen en las imágenes.

El vuelo fue realizado con una altura de vuelo media de 74m, cubriendo un área de 266x150m2 con 265 imágenes. Se establece esta configuración de vuelo para optimizar la adquisición de datos; pero en todos los casos debe prestarse atención a cumplir la normativa nacional de vuelo del país en el que se realice. En el caso específico de España, la normativa establece que el operador no debe perder la línea de vision con el VANT, estando a una distancia máxima del mismo de 500m, y una altura de vuelo máxima de 120m para el tipo de plataforma empleado en el estudio. Deben tenerse en cuenta otros factores tales como las condiciones meteorológicas, ya que, aunque la adquisición fotogramétrica tiene mejores resultados con cielos cubiertos, no se recomienda el vuelo del VANT en ocurrencia de precipitaciones. Las limitaciones con respecto de la velocidad del viento también son importantes, siendo 25 km/h el límite general de velocidad de racha con el que los VANT pueden volar.

Las imágenes adquiridas son sometidas a un proceso automático de orientación y registro basado en la extracción y búsqueda de correspondencia de puntos de control mediante el descriptor SIFT, de modo que se calcula la posición y orientación de la cámara para la adquisición de cada imagen. Este conocimiento permite el cálculo de las coordenadas tridimensionales de cada punto del terreno presente en más de 2 imágenes, mediante su cálculo a través del ajuste de mínimos del trazado de rayos. Las coordenadas GPS medidas durante el vuelo son introducidas en el procesado para la corrección de las posibles desviaciones.

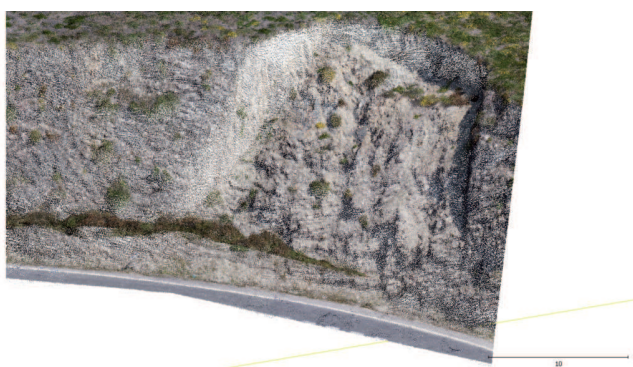


Figura 3. Detalle de la nube de puntos del deslizamiento del talud generada con las imágenes adquiridas con la cámara Sony Nex7 montada en la plataforma aérea Oktokopter XL

Estos principios fotogramétricos se aplican al procesado de las imágenes y cálculo de las coordenadas tridimensionales de cada pixel a través del software Agisoft PhotoScan [29], resultando en la generación de una nube de puntos, en la que cada punto se corresponde con un pixel de las imágenes [30]. Este proceso es conocido como "dense matching", y se basa en la ecuación proyectiva (Eq. 1):

$$x_k = C(D(R_i(X_k - S_i))) \quad (1)$$

Donde  $x_k$  es la proyección en la imagen del punto  $X_k$ ,  $R_i$  es la matriz de rotación, y  $S_i$  son los parámetros de orientación de la cámara en el momento de la adquisición.  $C$  y  $D$  son la matriz de la cámara y los parámetros de orientación interna (distancia focal, distorsiones radial y tangencial), respectivamente.

Asimismo, la información RGB contenida en las imágenes también se traspa a la nube de puntos, enriqueciendo su interpretación. La nube de puntos generada a partir de las imágenes adquiridas desde VANT presenta una densidad de puntos de 1322 puntos/m2 (Fig. 3), con una resolución de 0.02 m/pix y un error de 0.66 pix.

Se emplearon ocho puntos de control para la georreferenciación de la nube de puntos, marcados con placas rectangulares de dimensiones 0.20x0.20 m, situados en parejas en los bordes superior e inferior del talud, en diferentes posiciones. Las coordenadas del centro de los puntos de control fueron medidas con un GPS Trimble R8, en el Sistema de referencia ETRS89, proyección UTM29N. La precisión en la medida de los puntos de control es de 0.015m en X e Y (plano horizontal), y 0.025m en Z (precisión vertical). Así, el error final de posicionamiento en la nube de puntos es de 0.32m, o 0.00009pix (Tabla 1).

PUNTO	X ERROR (m)	Y ERROR (m)	Z ERROR (m)	ERROR (m)	ERROR (pix)
1	-0.133	-0.037	0.078	0.159	0.000107
2	-0.093	-0.129	0.047	0.166	0.000110
3	0.106	0.000	0.052	0.119	0.000099
4	-0.037	0.245	0.072	0.258	0.000066
5	0.135	0.156	0.561	0.598	0.000094
6	-0.334	-0.097	-0.065	0.353	0.000123
7	-0.014	0.261	0.083	0.274	0.000085
8	-0.118	-0.312	0.098	0.348	0.000074
TOTAL	0.151	0.186	0.210	0.319	0.000097

Tabla 1. Puntos de control

A continuación, la nube de puntos generada se procesa para la generación de un Modelo Digital de Superficies (MDS), pasando de un conjunto de puntos individuales a un modelo sólido continuo [31]. El MDS se genera mediante la triangulación de la nube de puntos, resultando en una resolución de 0.1666 m/pix con una densidad de puntos de 36.034 points/m2.

El MDS se convierte a su vez en un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) mediante la rasterización del primero con el método de vecinos naturales o natural neighbor. Este método genera una malla regular sobre el MDS, y calcula el valor de elevación de cada celda a partir de los valores de elevación de los puntos contenidos por la celda y sus puntos cercanos. El valor de cada celda se interpola aplicando un peso al valor de cada punto en función de sus áreas de influencia. [32] presenta una explicación más detallada del método. De este modo, evitando la introducción de distorsión geométrica, la precisión del MDS es del orden de 0.32m.

### 2.3. PROCESADO DE DATOS MEDIANTE SIG

El análisis espacio-morfológico del área en estudio se realiza con un Sistema de Información Geográfica, SIG. En este caso, se emplea el software ArcGIS®, debido a la idoneidad de sus herramientas disponibles para el objeto del estudio.

El estudio comienza con la extracción de secciones del MDE y de sus derivados, centradas en las posiciones de los deslizamientos. Esta operación se realiza con el objetivo de reducir el tiempo de los geoprocursos posteriores, y por tanto hacer el análisis de datos más asequible. Se utiliza la barra de herramientas 3D Analyst para crear perfiles a partir de las secciones del MDE: se crearon 6 perfiles del primer deslizamiento del talud, y 5 perfiles para el segundo (Fig. 4). Tanto el MDE como los perfiles se emplearon para el análisis de la geometría de los deslizamientos, usando la herramienta Spatial Analyst.

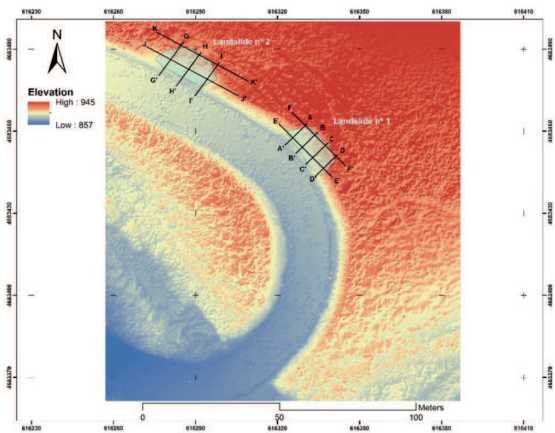


Figura 4. Perfiles verticales y horizontales extraídos para el análisis de los dos deslizamientos del talud en estudio

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 COMPARACIÓN ENTRE PERFILES TOPOGRÁFICOS DEL MDE

La Fig. 5 muestra dos grupos de perfiles topográficos de las áreas en las que han ocurrido deslizamientos del terreno. Los perfiles verticales AA', BB', CC' y DD' cruzan la zona de deslizamiento número 1 (164 m<sup>2</sup>) y el GG', HH' y II' cruzan la zona del número 2 (192 m<sup>2</sup>). Por otra parte, los perfiles horizontales EE' y FF' corresponden a la zona 1, mientras que JJ' y KK' lo hacen a la zona 2 (Fig. 6). Todos los perfiles comienzan y terminan en zonas no dañadas. De esta forma, los MDE generados permiten la generación de perfiles topográficos de alta resolución, donde se pueden detectar movimientos del terreno por debajo de 2 m.

En relación a esto, el análisis de los perfiles en la Fig. 6 muestra deslizamientos del terreno en la dirección Oeste, apareciendo pérdida del terreno a la izquierda del gráfico. Esta conclusión se alcanza después de comparar los perfiles desde la parte superior a la parte inferior del corte del talud, FF' frente a EE', y KK' frente a JJ'.

### 3.2. ALGORITMO DE DIRECCIÓN DEL FLUJO

El agua es uno de los mecanismos de activación más frecuentes en un deslizamiento de terreno, ya que reduce la fricción entre la base de roca y el sedimento superficial, lo que conjuntamente con la gravedad produce la caída de material colina abajo. Debido a la importancia del agua en los eventos de deslizamiento del terreno, el algoritmo D8 ha sido aplicado para estimar la dirección

del flujo. Se ha elegido este algoritmo debido a su simplicidad y capacidad para proveer una buena estimación de los resultados. Este algoritmo se basa en la existencia de ocho direcciones válidas de flujo, relacionadas con las ocho celdas adyacentes a cada celda del talud por las que circula el flujo de agua. Esta aproximación se refiere comúnmente al "modelo de flujo de ocho direcciones (D8)". El modelo sigue una metodología como la presentada en [33]. De forma particular, los resultados del "modelo de flujo D8" son representados por la Eq. 2, consistiendo en el cálculo de la

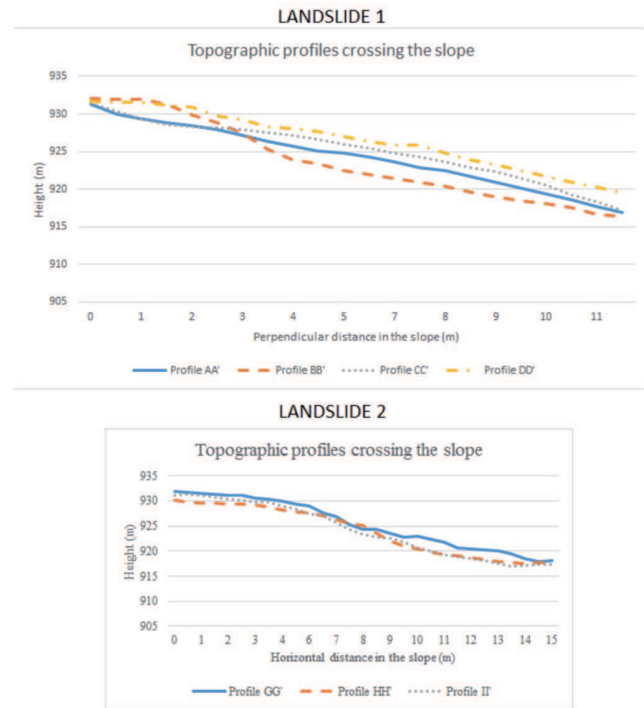


Figura 5. Perfiles topográficos en los dos deslizamientos del terreno

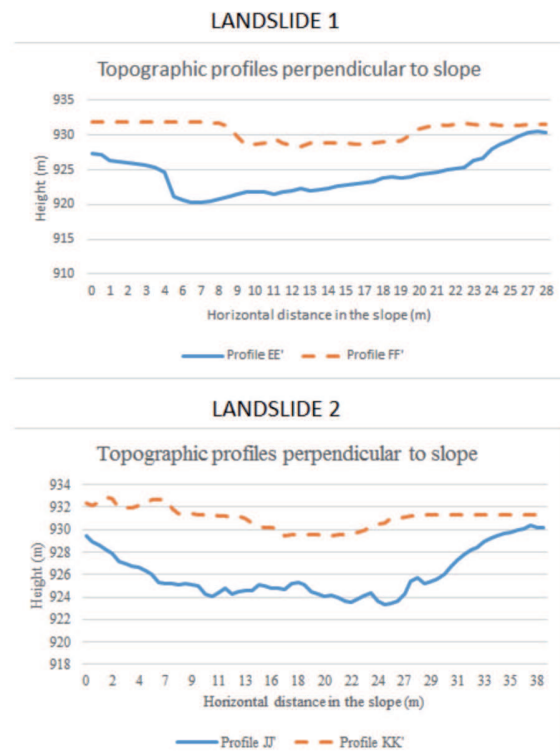


Figura 6. Perfiles topográficos a lo largo de los dos deslizamientos del terreno

máxima pendiente en la vecindad de cada punto bajo estudio. Si cada punto está rodeado por 8 vecinos (considerando una matriz 3x3 de puntos donde el punto bajo estudio ocupa la posición central), el gradiente  $S_{D8}$  se define como la máxima diferencia de altura,  $Z_9 - Z_i$  entre el punto bajo estudio (subíndice 9) y cada uno de sus vecinos (subíndice i).

$$S_{D8} = \text{Max}_{i=1,8} \frac{Z_9 - Z_i}{h\phi(i)} \quad (2)$$

Donde  $h\phi(i)$  presenta un valor de 1 para los vecinos E, S, O y N (correspondientes a  $i=2, 4, 6$  and  $8$ , respectivamente) y un valor de  $\sqrt{2}$  para los vecinos NE, SE, SO y NO (esto es,  $i=1, 3, 5$  and  $7$ ).

La Fig. 7 muestra la dirección del flujo de agua en base a un código de colores. La dirección preferente del primer deslizamiento es SO, mientras que el segundo deslizamiento no sigue esta dirección de forma tan precisa. La dirección del flujo en el segundo deslizamiento es muy similar a la dirección del flujo en la llanura cercana, y en ambos casos, se conduce el flujo de agua a la carretera, siguiendo la curva presente y continuando hacia el Oeste. El agua proviene del NE hacia el SO y una vez que alcanza la carretera sigue ese camino. Por este motivo, los taludes situados en la cara Norte de la carretera presentan una gran probabilidad de deslizamiento debido al flujo de agua, siendo mucho mayor que los taludes localizados en las caras Sur u Oeste. La Fig. 8 muestra una interpretación detallada de la relación entre la dirección del flujo y el deslizamiento.

### 3.3. RUGOSIDAD Y PENDIENTE DE LA SUPERFICIE

Se ha llevado a cabo un análisis de la rugosidad y pendiente de la superficie para maximizar la explotación de la información disponible.

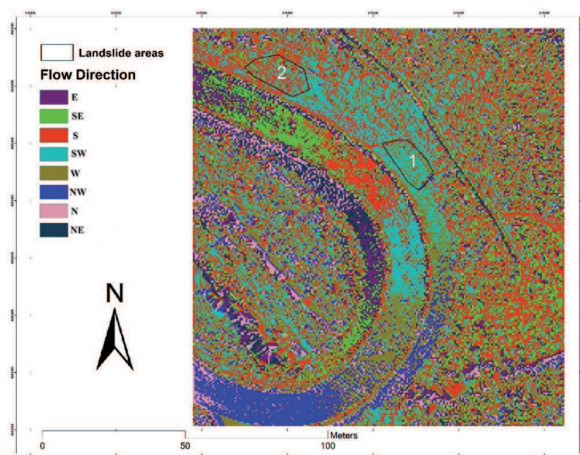


Figura 7. Resultados del algoritmo D8 aplicado al MDE del área. Los dos deslizamientos bajo estudio se señalan con un polígono

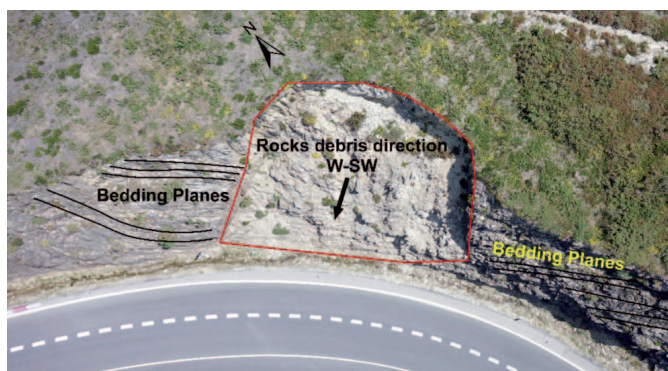


Figura 8. Interpretación de la morfología del deslizamiento 1

La Fig. 9 muestra un análisis de las pendientes en el área del deslizamiento. El código de colores desde el amarillo al azul oscuro representa valores de pendiente creciente, en grados. Los alrededores de la zona de estudio y la propia carretera son prácticamente planos, mientras que los taludes más verticales se encuentran en los laterales de la carretera. En estas zonas la inclinación es mayor de 60° (representada por el color azul oscuro). Sin embargo, en las zonas con deslizamiento, la inclinación se reduce a 40-60 grados, siendo según parece este ángulo el que muestra la estabilidad adecuada para el material. Entonces, se puede concluir, que la acción humana en la construcción de la carretera ha creado pendientes de mayor verticalidad que lo adecuado para la composición de materiales del talud. Si no se realizan actuaciones complementarias a nivel constructivo, los taludes no pueden mantener su verticalidad por encima de 60 grados.

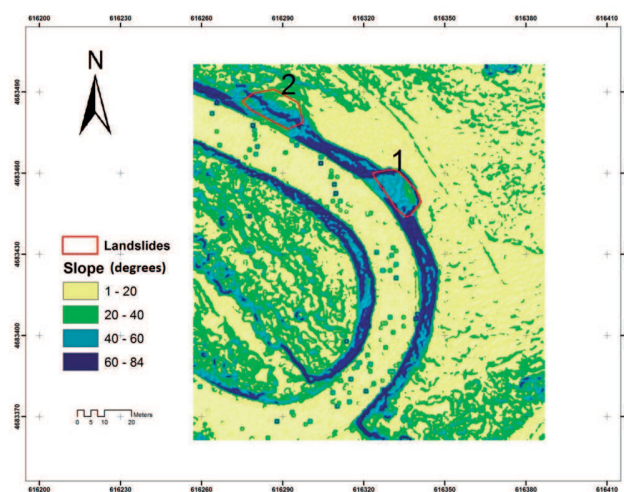


Figura 9. Análisis de pendiente en la zona de los deslizamientos. Los taludes más pronunciados aparecen en los laterales de la carretera

La rugosidad superficial en los taludes ha sido también analizada para caracterizar los deslizamientos a través del cálculo del desplazamiento medio de los valores de elevación de los planos de ajuste de las superficies.

$$R = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |h_n| \quad (3)$$

Donde N es el número de píxeles en relación al camino, tamaño 3x3, y  $h_n$  es la diferencia de elevación entre el pixel n-ésimo en relación al camino y los valores correspondientes.

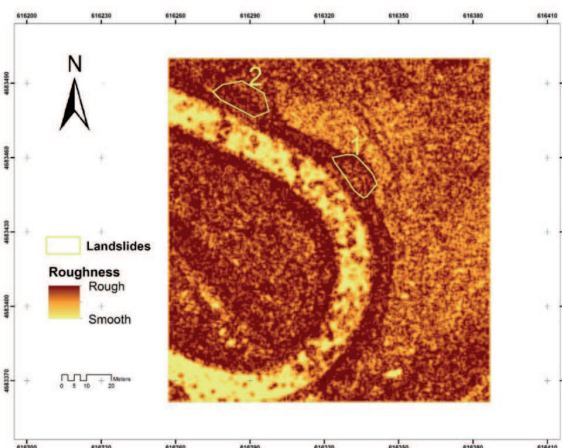


Figura 10. Mapa de rugosidad superficial del área bajo estudio

La Fig. 10 muestra los mapas de rugosidad basados en la aplicación de la Ecuación 3 para las áreas mostradas en la Fig. 9, aplicado al MDE. La rugosidad se muestra como una rampa de colores, donde los tonos claros representan superficies suaves y los tonos oscuros representan zonas rugosas.

Como se muestra en la Fig. 10, las zonas con deslizamientos se caracterizan por altos valores de rugosidad debido a la fuerte pendiente. La transición entre un nivel de elevación y el siguiente es continua. Este gráfico resulta muy útil para identificar características relativas a la rugosidad de escala elevada, aunque se debe resaltar que los taludes con rampas suaves aparecerán como terreno irregular.

#### 4. CONCLUSIONES

Este artículo presenta la aplicación de datos geomáticos adquiridos a partir de una plataforma aérea no tripulada para el análisis geométrico de deslizamientos de terreno en un talud de una carretera. Las imágenes adquiridas a partir de una plataforma tipo VANT se procesan empleando técnicas fotogramétricas para la generación de una nube de puntos del área bajo estudio, permitiendo un posterior análisis tridimensional. El análisis de los datos se lleva a cabo en un sistema SIG, que aparece como una herramienta útil para el estudio a través de la generación de mapas temáticos, como mapas de rugosidad o de dirección de flujo.

En el caso de estudio particular, los mapas de dirección de flujo fueron obtenidos utilizando el modelo de flujo basado en las 8 direcciones, que identifica las áreas del talud con una mayor pendiente descendente. Entonces, el flujo de agua aparece como la causa del deslizamiento. En comparación con la resolución de los datos adquiridos a partir de un avión, los VANT permiten generar conjuntos de datos de alta resolución y resultan de gran ayuda para este tipo de estudios. Además, la rugosidad superficial y los mapas de pendiente dan una idea de la continuidad entre los diferentes niveles de elevación. En consecuencia, los datos obtenidos a partir de los VANT son adecuados para la identificación de características de rugosidad de escala elevada y muestran potencia para diferenciar zonas de fallo del talud.

Por consiguiente el estudio llevado a cabo en este artículo valida el uso de plataformas aéreas no tripuladas para el análisis geométrico de taludes, lo que requiere una elevada resolución espacial y permite focalizar el análisis a escala local. Aunque los VANT solo pueden adquirir información sobre la superficie, el conocimiento superficial de la geometría es esencial para la realización de un análisis completo de estabilidad. Además, la inversión económica requerida para la adquisición de un VANT se está viendo cada vez más reducida por los avances en esta tecnología. La principal limitación del procedimiento es la extensión de los estudios que se pueden realizar utilizando una plataforma VANT, lo que obliga a la realización de varios vuelos si el análisis requiere trabajar con una zona de gran extensión.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Agencia Gallega de Innovación (Xunta de Galicia) y al Ministerio de Economía y Competitividad (Gobierno de España) el soporte financiero dado a través de los proyectos (IN852A 2014/58) y las becas (FPDI-2013-17516). Todos los programas están cofinanciados por el Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER).

Este trabajo también ha sido financiado por el proyecto Europeo: Erasmus Mundus Action 2 Partnership Lot 2 – Erasmus Mun-

us Green IT for the Benefit of Civil Society, código de proyecto 2012-2625/001-EMA2, coordinado por la Universidad de Vigo.

#### REFERENCIAS

- [1] Hamdan, F. Intensive and extensive disaster risk drivers and interactions with recent trends in the global political economy, with special emphasis on rentier states. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, pp. 273-289, 2015. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2014.09.004
- [2] Alcaraz, A, Krol, B, van Western C. Analysing the possible impact of landslides and avalanches on cultural heritage in Upper Svaneti, Georgia. *Journal of Cultural Heritage*, 13(4), p.p. 453-461, 2012. DOI: 10.1016/j.culher.2012.01.012
- [3] Ciampalini A, Raspini F, Bianchini S, Frodella W, et al. The landslide geodatabase of the Messina Province: a tool in the civil protection emergency cycle. *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, 35, p.p. 70-73, 2015.
- [4] Pennington C, Freeborough K, Dashwood C, Dijkstra T, Lawrie K. "The national landslide database of Great Britain: acquisition, communication and the role of social media". *Geomorphology*, 249, p.p. 44-51, 2015. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.03.013
- [5] Promper C, Puissant A, Malet JP, Glade T. Analysis of land cover changes in the past and the future as contribution to landslide risk scenarios. *Applied Geography*, 53, p.p. 11-19, 2014. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.05.020
- [6] Sivahghalati S, Saraf AK, Pradhan B, Jebur M, Tehrani M. Rule-based semi-automated approach for the detection of landslides induced by 18 September 2011 Sikkim, Himalaya, earthquake using IRS LISS3 satellite images. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1), p. 326-344, 2016. DOI: 10.1080/19475705.2014.898702
- [7] Stumpf A, Malet J, Allemand P, Ulrich P. Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pleiades satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 95, p.p. 1-12, 2014. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.05.008
- [8] Scaioni M, Longoni L, Melillo V, Papini M. Remote sensing for landslide investigations: an overview of recent achievements and perspectives. *Remote Sensing*, 6(10), p.p. 9600-9652, 2014. DOI: 10.3390/rs6109600
- [9] Colesanti C, Wasowski J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. *Engineering Geology*, 88, p.p. 173-199, 2006. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.013
- [10] Schlogel R, Doubre C, Malet J, Masson F. Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: A D-InSAR geomorphological interpretation method. *Geomorphology*, 231, p.p. 314-330, 2015. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.11.031
- [11] Lazecy M, Canasian F, Hlavacova I, Gurboga S. Practical application of satellite-based SAR interferometry for the detection of landslide activity. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, p.p. 613-618, 2015. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.113
- [12] Strozzi T, Raetz H, Wegmuller U, Papke J et al. Satellite and terrestrial Radar Interferometry for the measurement of slope deformation. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation*, p.p. 161-165, 2015.
- [13] Tarchi D, Casagli N, Fanti R, Leva D, Luzi G, Pasuto A, Pieraccini M, Silvano S. Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy. *Engineering Geology*, 68-1, p.p. 15-30, 2003. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00196-5
- [14] Prokop A, Panholzer H. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, p.p. 1921-1928, 2009.
- [15] Barbarella M, Fiani M. Landslide monitoring using terrestrial laser scanner: georeferencing and canopy filtering issues in a case study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(B5), p.p. 157-162, 2012.
- [16] Bitelli G, Dubbini M, Zanutta A. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *Proceedings of the XX ISPRS Congress, Commission V, WG V/2*, 2015.
- [17] Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellán A, Derron M, Loye A, Metzger R, Pedrazzini A. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 2010. DOI: 10.1007/s11069-010-9634-2.
- [18] Rothmund S, Niethammer U, Malet J, Joswig M. Landslide surface monitoring based on UAV and ground-based images and terrestrial laser scanning: accuracy analysis and morphological interpretation. *First Break*, 31(89), p.p. 81-87, 2013.
- [19] Kung O, Strecha C, Beyeler A, Zufferey J, Floreano D, Fua P, Gervais F. The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. *UAVg 2011: Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics*.
- [20] Walter M, Niethammer U, Rothmund S, Joswig M. Joint analysis of the Super-Sauze (French Alps) mudslide by nanoseismic monitoring and UAV-based remote sensing. *Frist Break*, 27(8), p.p. 75-82, 2009.
- [21] Niethammer U, James M, Rothmund S, Travelletti J, Joswig M. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and Results. *Engineering Geology*, 128, 2-11, 2012. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.03.012.
- [22] IGME. Instituto Geológico y Minero de España: <http://info.igme.es/cartografia/geologico1000.asp>. Last visit: 09/03/2015
- [23] Johnston S, Gutiérrez-Alonso G. The North American Cordillera and West European Variscides: contrasting interpretations of similar mountain systems. *Gondwana Research*, 17, p.p. 516-525, 2010.
- [24] De Vicente G, Vegas R. "Large-scale distributed deformation controlled topography along the Western Africa-Eurasia limit: tectonic constraints". *Tectonophysics*, 474, p.p. 124-143, 2009.
- [25] Martín-González F. Cenozoic activity in a Variscan basement: evidence from geomorphological markers and structural mapping (NW Iberian Massif). *Geomorphology*, 107(3), p.p. 210-225, 2009.
- [26] Vidal-Romani J, Vaqueiro M, Sanjurjo J. Granite landforms in Galicia. *Landscapes and Landforms of Spain, World Geomorphological Landscapes*, DOI: 10.1007/978-94-017-8628-7\_4.
- [27] Yepes J, Vidal-Romani J. Morphogenesis of the Ourense plains (NW of Spain). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 28, p.p. 263-283, 2003.
- [28] Meteogalicia: <http://www.meteogalicia.es/web/index.action>. Last visit: 16/02/2016
- [29] Agisoft Photoscan: <http://www.agisoft.com>
- [30] Rodríguez-González P, González-Aguilera D, López-Jiménez G, Picón-Cabrera I. Image-based modelling of built environment from an Unmanned Aerial Vehicle. *Automation in Construction*, 48, p.p. 44-52, 2014. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.08.010
- [31] Oliveira F, Piteri M, Meneguette M. Developing an open-source software system for the digital terrain model based on TIN. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 20(1), p.p. 117-131, 2014. DOI: 10.1590/S1982-21702014000100008
- [32] Sibson, R. A brief description of natural neighbor interpolation. Chapter 2 on *Interpolating Multivariate Data*. New York: John Wiley & Sons, 21-36, 1981.
- [33] Jenson S, Domingue J. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), p.p. 1593-1600, 1988.

## **3.2. UAV Photogrammetry application to the monitoring of rubble mound breakwaters**

Esta sección del Capítulo III contiene el artículo *UAV Photogrammetry application to the monitoring of rubble mound breakwaters* publicado en la revista de gran impacto *Journal of Performance of Constructed Facilities* en 2016.

### **3.2.1. Resumen**

En este artículo se presenta un nuevo procedimiento basado en fotogrametría sobre UAV para monitorización de muelles y diques de abrigo de puertos construidos en escollera de cubos de hormigón. Se hace un estudio sobre un caso real que permite validar y establecer los límites de la metodología en este campo de aplicación.

Se realiza la integración de la cámara y la preparación del vuelo para realizar la captura de datos con UAV, a una altura de vuelo de 25 metros con una cámara de 24.3 Mp y una lente con 16 mm de distancia focal, obteniéndose un total de 68 fotografías de forma cenital y oblicuas al espigón de la zona de estudio. Para el escalado y la ubicación geográfica se toman puntos de control con GPS en modo RTK obteniendo una precisión de 2 cm en planimetría y 3.5 cm en altimetría. El tratamiento de los datos para obtener la nube de puntos a utilizar en la monitorización se realiza con el software fotogramétrico Photogrammetry Workbench, utilizando el algoritmo ASIFT para detectar e identificar puntos correspondientes, la alineación de pares se realiza por medio del algoritmo Longuet-Higgins y posterior aplicación de las ecuaciones de colinealidad. Finalmente, se utilizan los puntos de control GPS para establecer la orientación absoluta del modelo.

Para establecer el límite de la técnica en la detección de movimiento, se aísla una cara de uno de los cubos y se realiza un ajuste a un plano minimizando la distancia de los puntos al plano mediante la siguiente ecuación:

$$E = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i)^2$$

Donde  $E$  es la suma de las distancias al cuadrado de los puntos al plano,  $a, b, c$  son los cosenos directores de la normal del plano de ajuste y  $(x_i, y_i, z_i)$  son puntos del plano, obteniéndose que las distancias de los puntos al plano forman una distribución gaussiana con una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 0.026 m ( $2 \sigma = 0.056$  m, 95%) estableciendo que un desplazamiento entre dos inspecciones superior a 0.056 m con un 95% de probabilidad se tratará de un movimiento de alguno de los bloques.

Por la geometría de construcción, se asume que el movimiento más probable vendrá dado por rotaciones entre cubos, descartándose para el algoritmo propuesto los movimientos por traslación. Teniendo esto en cuenta, se segmenta de forma manual uno de los cubos del dique, se establece su origen en el centro geométrico del mismo y se aplica un algoritmo para generar rotaciones en los tres ángulos (roll, pitch y yaw) en pasos de  $0.02^\circ$  desde  $0^\circ$  hasta  $10^\circ$ , considerando este valor como máximo asumiendo que la sensibilidad del método es mayor de este y por tanto nos permite detectar rotaciones superiores. A cada cubo rotado, se añade ruido gaussiano para simular la precisión del método y a continuación, utilizando un algoritmo de comparación de nubes de puntos organizadas y desorganizadas, se calcula el desplazamiento como mediciones en la componente z.

Se comprueba el número de puntos desplazados en función de la rotación aplicada, obteniéndose que para rotaciones entre  $0^\circ$  y  $4^\circ$  el número de puntos desplazados por rotaciones en yaw es superior, mientras que en rotaciones entre  $4^\circ$  y  $10^\circ$  los puntos desplazados por rotaciones en roll y pitch aumentan con respecto a las rotaciones en yaw. Se comprueba además que la cantidad de puntos que sobrepasan el umbral de detección

( $2 \sigma = 0.056 \text{ m}$ ) en cada uno de los ángulos de la prueba y para cada una de las rotaciones realizadas permite la detección de rotaciones inferiores a  $1^\circ$ .

Se concluye que la técnica desarrollada basada en fotogrametría con UAV permite la generación de datos de calidad para la realización de un estudio de desplazamientos de cubos basados en rotaciones de interés para la monitorización de diques, estableciéndose la precisión del desplazamiento en  $0.056 \text{ m}$  con un 95% de probabilidad y permitiendo detectar rotaciones inferiores a  $1^\circ$ .

### **3.2.2. Artículo III**



# UAV Photogrammetry Application to the Monitoring of Rubble Mound Breakwaters

Higinio González-Jorge, Ph.D.<sup>1</sup>; Iván Puente<sup>2</sup>; David Roca<sup>3</sup>; Joaquín Martínez-Sánchez, Ph.D.<sup>4</sup>; Borja Conde<sup>5</sup>; and Pedro Arias, Ph.D.<sup>6</sup>

**Abstract:** Monitoring of breakwaters is a key aspect to prevent failures that affect the safety and quality of service. Unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry gives low-cost and accurate geometric data, flexibility, and productivity to perform aerial surveys, although the weather conditions restrict flights for wind speeds above 50 km/h (the Mikrokopter system). Despite the promising potential of these systems, its ability to monitor movement of cubes in breakwaters has not yet proven. The UAV photogrammetry is tested for the research reported in this paper in the Baiona breakwaters (northwestern Spain). A SD of 0.026 m is obtained from the point cloud. The detection limit of the system is evaluated and rotations lower than 1° could be detected. This value is calculated from the measurable differences in height values after the virtual rotation of a single cube. The system provides the exact position where the movement of the cube is produced and can be easily integrated with geographic information system-based management systems. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000702. © 2014 American Society of Civil Engineers.

**Author keywords:** Unmanned aerial vehicle (UAV); Photogrammetry; Breakwaters; Surveying; Monitoring.

## Introduction

Ports are key infrastructures that serve as main hubs for channeling global trade. A port establishes a link between maritime and road/rail transportation, and allows freight shipping in a safe environment, protecting them from the marine environment (Segrelles 2000).

Traditionally, ports were built sheltered by coastal morphology. However, in recent years many outer ports were constructed due to the need of deeper seabed for larger vessels (Molinero-Guillén 2010; Corredor et al. 2013). These types of ports typically suffer severe attacks from waves that cause deterioration in the breakwater armoring, especially if maintenance is not properly performed. As it occurs with road pavements, gradual deterioration can often pass unnoticed until weak parts induce major damage. The earliest

evidences of deterioration include displacement, breakage, or loss of armor units that must be properly monitored to perform a correct maintenance management. The periodic monitoring of a breakwater also provides damage data which can be linked to the prevailing sea conditions during the monitoring period for increasing the understating of failure mechanisms, and improving design and maintenance techniques (Gómez-Martín and Medina 2006; Lomónaco et al. 2009; Burcharth et al. 2010; Van Gent and Van der Werf 2010).

Most of the methods used for the monitoring of breakwaters are based on geomatic [i.e., total station measurements, aerial photogrammetry, aerial light detection and ranging (LiDAR), and terrestrial LiDAR] and hydrographic techniques (i.e., multibeam echo-sounders and sidescan sonar). Typically, geomatic techniques are used to measure the emerged area of the breakwaters and hydrographic techniques for the submerged parts (Kluger 1982; Mitchell et al. 2011; Molinés et al. 2012). The combined use of both methodologies provides a complete monitoring of the infrastructure (emerged and submerged parts).

Despite the amount of geomatic techniques to monitor the emerged area of the breakwaters, they have some weaknesses that make it interesting to investigate other possibilities.

Total stations are accurate instruments (<2 mm), although their productivity is very low when many points must be measured since the human operator must waste time targeting for each measurement. A rubble mound breakwater (distances of several kilometers are common) includes many units to be surveyed and a detailed control of all the units will waste many working days.

Terrestrial LiDAR typically shows lower accuracy than total stations. However, this accuracy is enough for the monitoring of breakwaters since the displacement of the units is typically larger than several centimeters and its accuracy is lower than 6 mm (Gonzalez-Jorge et al. 2011). Its main advantage is the high spatial resolution of the system that provides a dense three-dimensional (3D) point cloud of the structure. Productivity is higher than that achieved by a total station since the data acquisition is done automatically without targeting by a human operator. However,

<sup>1</sup>Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering, School of Mining Engineering, Univ. of Vigo, Maxwell s/n, 36310 Vigo, Spain (corresponding author). E-mail: higinio@uvigo.es

<sup>2</sup>Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering, School of Mining Engineering, Univ. of Vigo, Maxwell s/n, 36310 Vigo, Spain. E-mail: ipuente@uvigo.es

<sup>3</sup>Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering, School of Mining Engineering, Univ. of Vigo, Maxwell s/n, 36310 Vigo, Spain. E-mail: davidroca@uvigo.es

<sup>4</sup>Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering, School of Mining Engineering, Univ. of Vigo, Maxwell s/n, 36310 Vigo, Spain. E-mail: joaquin.martinez@uvigo.es

<sup>5</sup>Dept. of Materials Engineering, Applied Mechanics and Construction, School of Industrial Engineering, Univ. of Vigo, Torrecedeira 86, 36208 Vigo, Spain. E-mail: bconde@uvigo.es

<sup>6</sup>Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering, School of Mining Engineering, Univ. of Vigo, Maxwell s/n, 36310 Vigo, Spain. E-mail: parias@uvigo.es

Note. This manuscript was submitted on July 18, 2014; approved on October 13, 2014; published online on November 18, 2014. Discussion period open until April 18, 2015; separate discussions must be submitted for individual papers. This paper is part of the *Journal of Performance of Constructed Facilities*, © ASCE, ISSN 0887-3828/04014194(8)/\$25.00.

the requirement to use different base stations during the survey is also a limiting factor due the relative low measurement range (150–200 m in comparison with ranges over 1 km for total stations). Other problem is related to the sensor point of view that generates many occlusions in the point cloud and does not provide the complete geometric data of the structure (this problem is shared with total stations). These occlusions come from the shadows that some cubes produce on those that are behind. Aerial point of view is always more efficient to avoid this problem than terrestrial point of view. In addition, these systems exhibit high price and high computational cost in data processing due to the millions of points to be managed (González-Jorge et al. 2011). Point clouds larger than 10 million data are common. The automatic data acquisition provides points from many areas of no particular interest than must be then filtered by the human operator.

Aerial and mobile LiDAR shows higher productivity than terrestrial LiDAR due to the fact they are mounted on mobile platforms (planes, helicopters, vans, or vessels). Accuracy depends not only on the quality of the laser but also on the global navigation satellite system (GNSS) solution. The GNSS solution in real time kinematics (RTK) mode provides accuracies around 2 cm in  $xy$  and 4 cm in  $z$  for high-performance systems, while LiDAR sensor give accuracies similar to those obtained with terrestrial systems (6 mm). Combined accuracy is poorer than that obtained from a terrestrial LiDAR system but enough for monitoring centimetric displacements of cubes in breakwaters. They do not present many occlusions because of its overhead point of view, especially those mounted on aerial systems. One of the main problems is the high cost of aerial and mobile LiDAR systems, and the cost of the plane or helicopter flights. Computation cost is also high because they provide point clouds even larger than those obtained from terrestrial LiDAR; 100 million points are common (Pirotti et al. 2013; Puente et al. 2013; Reif et al. 2013).

Aerial photogrammetry depicts some of the restrictions of aerial LiDAR due to the high cost of photogrammetric flights and photogrammetric cameras. Accuracy is lower than that in aerial LiDAR (between 5 and 10 cm is common); however, many ports in the world still use this systems to detect movements in breakwaters (Wiechert et al. 2010; Merchant 2012).

Unmanned aerial vehicles (UAVs) reach today high levels of development that allow its use in a robust and simple form, presenting very affordable prices, even for professional systems. Operators must take care with weather conditions, especially with wind speed in coastal areas. Flights are typically limit to speeds lower than 50 km/h. Low-cost UAVs allow professional features as waypoints navigation, battery autonomies near to 30 min, and the possibility of carrying payloads of around 2–3 kg. This payload allows including systems as digital cameras to perform aerial photogrammetry. Flight heights are smaller (30–50 m) than those from manned systems. As a result, simpler photographic equipment used in UAV systems can achieve the same precision of the traditional manned aerial photogrammetry. Unmanned aerial vehicles' photogrammetry has shown reliable applications for the inspection of large structures (<http://www.aibotix.com>), generation of digital terrain models, environmental studies, or cultural heritage inventory (Colomina et al. 2014; Nex et al. 2014).

The bibliography does not show applications of UAV photogrammetry to the monitoring of rubble mound breakwaters. Therefore, this paper presents an UAV photogrammetry procedure to monitor displacements in rubble mound breakwaters and the detection limit of the described procedure to prove the real possibilities of the methodology in this field of application.

## Materials and Methods

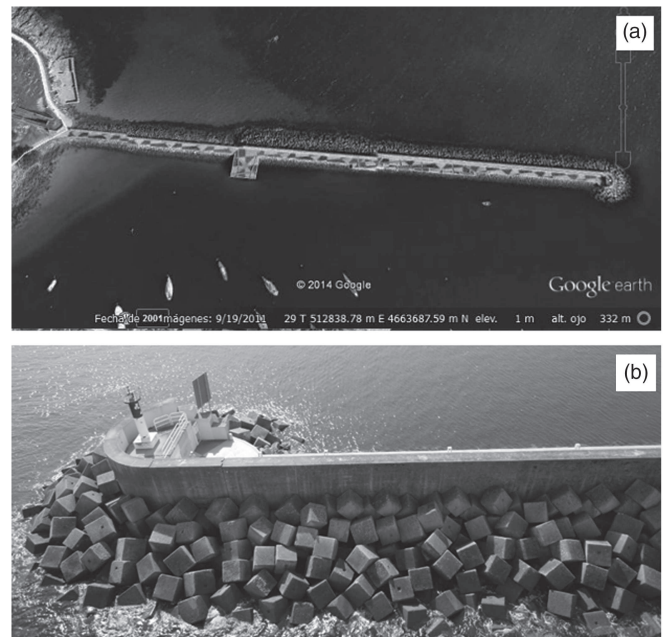
### Area of Study

The rubble mound breakwater used for the research reported in this paper is the one that protects the Port of Baiona, placed in northwestern Spain, on the Atlantic coast of Galicia (42.124792° N; –8.844616°E). Baiona is famous because on March 1, 1493, La Pinta ship arrived to its port in the return trip from the discovery of America (Christopher Columbus expedition). Nowadays Baiona is a touristic village and its port is mainly used for yachting. Baiona breakwaters (Fig. 1) are made of single-layer cubes of 1.2 m, whose main characteristics are 340-m long, a crest width and height of 8.4 and 8.5 m (respectively), and a structure base width of 21.7 m with a 49° slope angle. Baiona village suffers severe Atlantic storms during winter, causing significant deterioration in its civilian infrastructures, including the port. It is therefore important to develop monitoring procedures to improve the infrastructure management.

### Data Acquisition

The UAV system used for the research reported in this paper is a Mikrokopter Okto XL (<http://www.mikrokopter.de>; Fig. 2). It is a medium-cost UAV powered by eight brushless motors that includes carbon fiber/aluminum fuselage. The UAV includes a flight control with a global positioning system (GPS) positioning, three-axis accelerometer, three-axis gyroscope, magnetometer, and pressure sensor. A Sony Nex 7 camera (<http://www.sony.com/uk>) has been mounted on the aerial unit. This captures red-green-blue (RGB) images with 24.3-megapixel (Mpx) resolution. Mounted lens is a Sony SEL16F28 with a focal length of 16 mm (F2.8).

Data acquisition was first planned in the laboratory using georeferenced images and the planning software of the Mikrokopter system. The software generates GPS waypoints for the survey that are uploaded to the flight control of the Mikrokopter Okto XL. The breakwaters, UAV height (25 m), and the distance between waypoints were chosen in a way that images overlap approximately 75%.



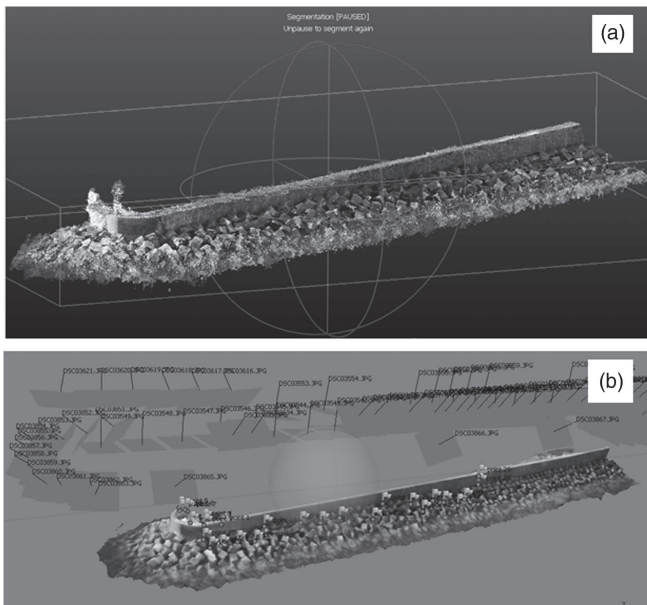
**Fig. 1.** (a) Baiona port and breakwaters, highlighted (© 2014 Google); (b) breakwaters detail (image by David Roca)



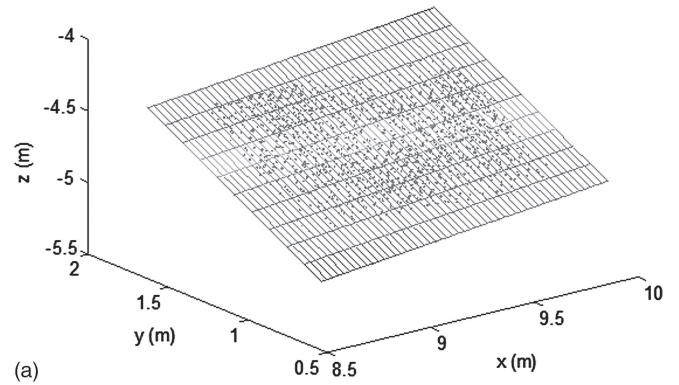
**Fig. 2.** Mikrokopter UAV with Sony Nex 7 during survey (image by Higinio González-Jorge)

This operation is essential for a proper post processing photogrammetric restitution. The human pilot is the responsible for the takeoff and landing operations. The surveying is done using the waypoints for an automatic navigation. A total of 68 images were acquired.

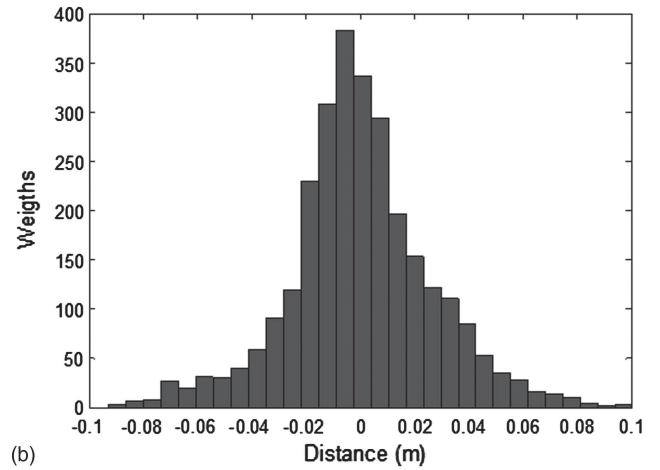
Ground references (28 points) are measured using a GPS Settop AL-102 to provide information for data registration. The GPS



**Fig. 3.** Three-dimensional model after *Photogrammetry Workbench* processing: (a) point cloud; (b) surfaces model; images were exported from the *Photogrammetry Workbench* software



(a)



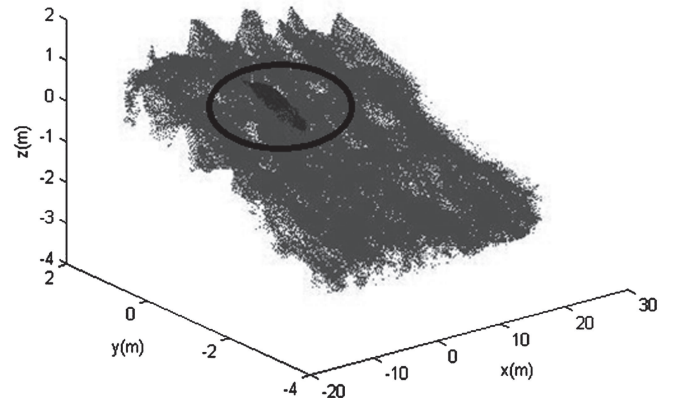
(b)

**Fig. 4.** (a) Plane fitting of the point cloud from a cube face; (b) distribution of distances between each individual point and the fitted surface

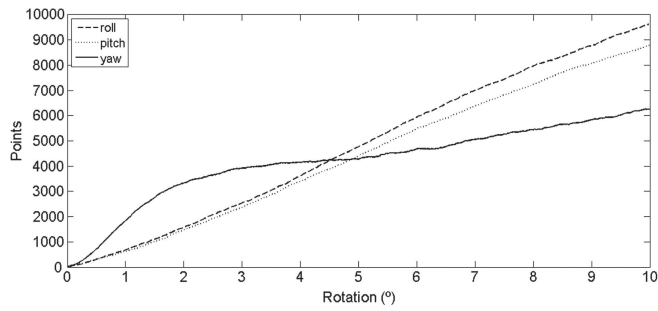
system was used in RTK mode with an accuracy of 2 cm in horizontal and 3.5 cm in vertical values.

### Data Processing

*Photogrammetry Workbench* from University of Salamanca (Spain) was used for image data processing (Atkinson 2001). The software uses computer vision algorithms for the automatic extraction of characteristic points of images. Because coastal



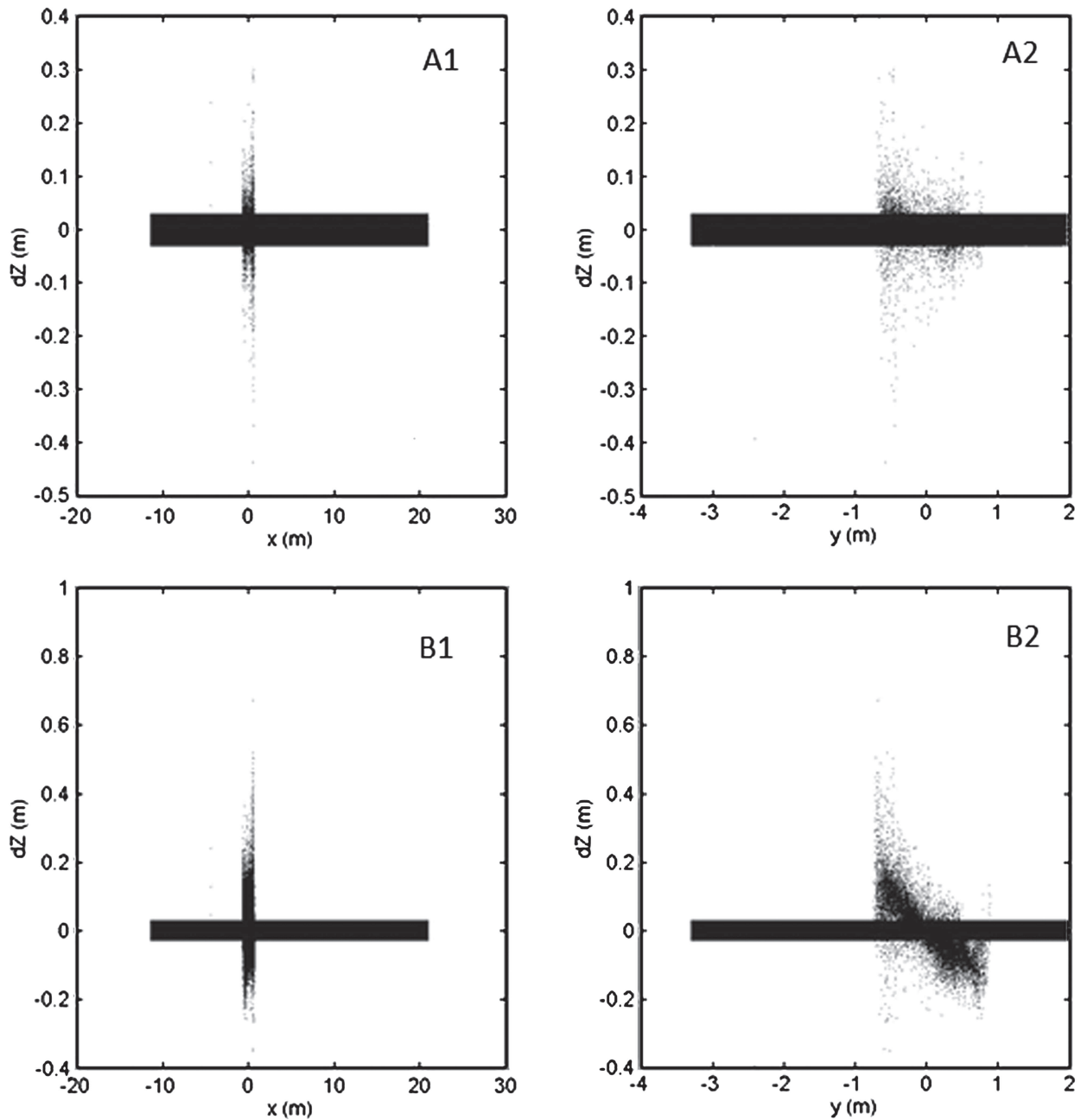
**Fig. 5.** Segmented unit (highlighted) and the rest of the armor units of the breakwaters



**Fig. 6.** Number of displaced points detected with roll, pitch, and yaw rotations between 0 and 10°

monitoring scenes usually present variations in scale and illumination, classical algorithms based on grey levels, such as area-based matching (ABM; Joglekar and Gedam 2012) and least-square matching (LSM; Gruen 1985), are useless. In this sense, the scale-invariant affine transform (SIFT) algorithm has been incorporated into *Photogrammetry Workbench* (Morel and Yu 2009). The ASIFT includes the consideration of two additional parameters that control the presence of images with different scales and rotations.

The correspondence points derived from the ASIFT algorithm are the input for the orientation procedure, which is performed in two steps, as follows: (1) a pairwise orientation is executed by relating the images to each other by means of the Longuet-Higgins (1987) algorithm, and (2) this initial and relative



**Fig. 7.** Differences in  $z$  values of the point cloud under roll rotation: (a) 1°; (b) 10°

approximation to the solution is used to perform a global orientation adjustment between all images by means of collinearity equations (Kraus 1993) which could include the determination of the camera parameters (self-calibration).

The absolute orientation is completed with the 28 GPS points previously measured. At the end of this process a georeferenced point cloud of the breakwaters is obtained (Fig. 3).

### Evaluation of the Detection Limit

The next step involves the evaluation of the detection limit using UAV, photogrammetry surveying of breakwaters. This test is essential to establish whether the accuracy provided by this technique is enough for monitoring small shifts in armor units.

The first step tests the precision of the UAV photogrammetry. One face of one cube of the armor is manually segmented using

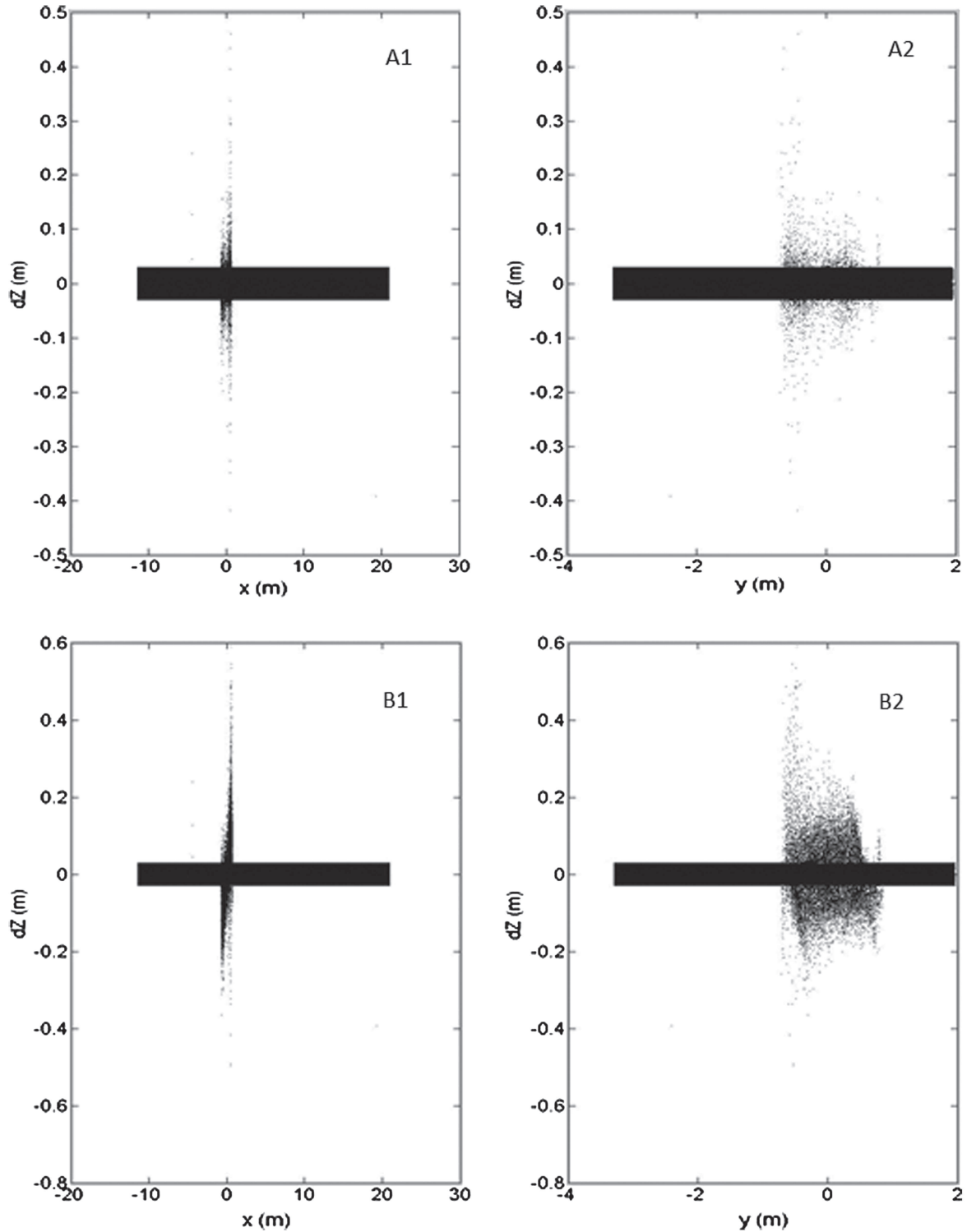


Fig. 8. Differences in  $z$  values of the point cloud under pitch rotation: (a)  $1^\circ$ ; (b)  $10^\circ$

cloud compare software. *Cloud Compare* is a 3D point cloud processing software including algorithms for registration, resampling, statistics computation, sensor management, interactive segmentation, and display enhancement.

A plane is fitted using a least-square algorithm implemented in *MatLAB* software (Fig. 4). The distance  $d_i$  of any point  $x_i, y_i$  from the least-square best-fit plane is given by

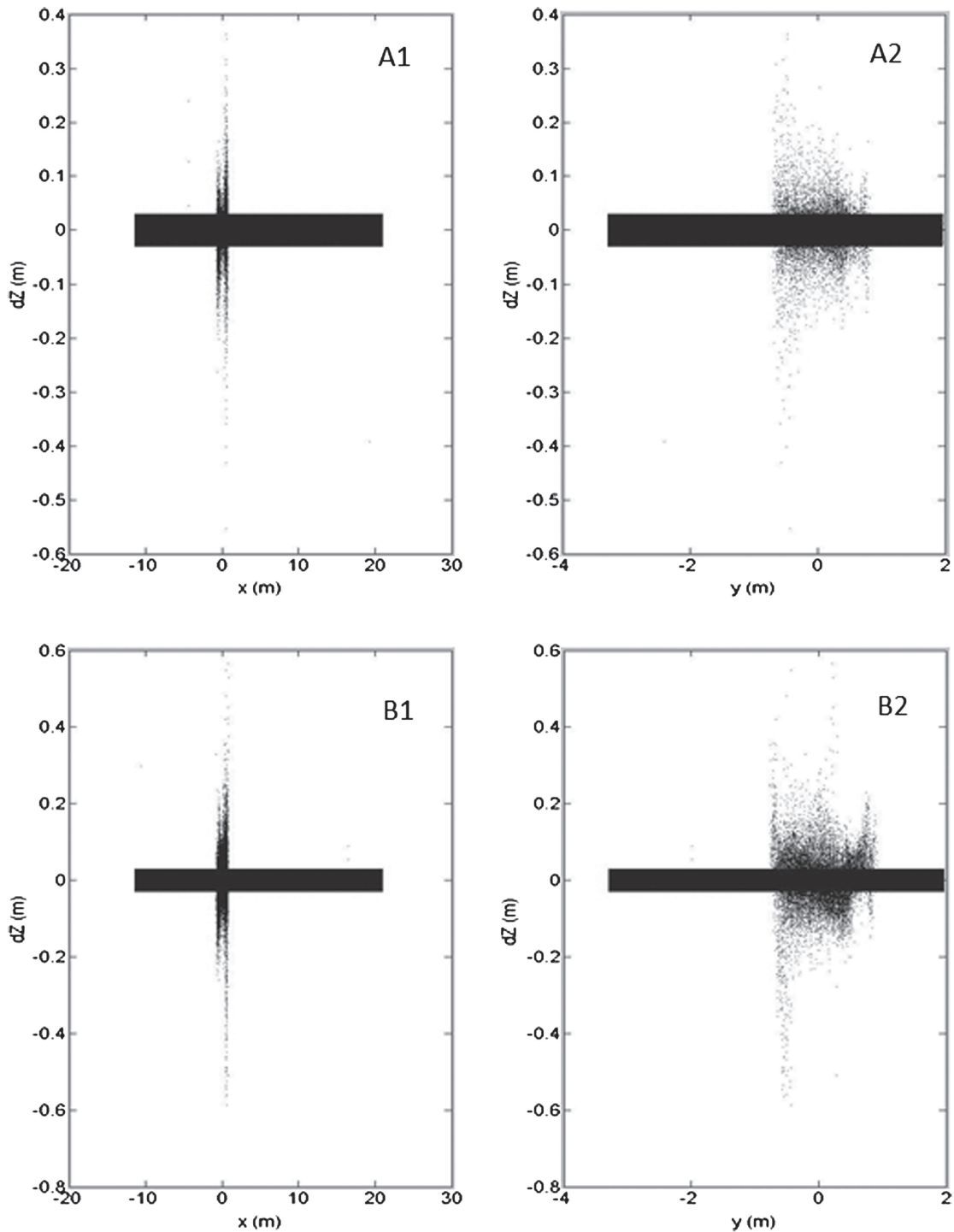
$$d_i = ax_i + by_i + cz_i \quad (1)$$

where the direction cosines of the normal to the plane are  $(a, b, c)$ . The function used to minimization is therefore

$$E = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i)^2 \quad (2)$$

where  $E$  = sum of the squared distances; and  $n$  = number of points.

Distances  $d_i$  between the points and the fitted surface show a Gaussian distribution with a SD ( $\sigma$ ) of 0.026 m ( $2\sigma = 0.052$  m;



**Fig. 9.** Differences in  $z$  values of the point cloud under yaw rotation: (a)  $1^\circ$ ; (b)  $10^\circ$

95% coverage). According to this, any changing distance over 0.052 m between two inspection surveys could be indicative of an armor unit displacement with a probability of 95%. This value will be assumed as the threshold to provide an alert in monitoring of breakwaters system. Other errors like point cloud registration are not taken into account because they are typically lower than 0.005 m.

The subsequent step consists in the determination of the detection limit of the system (the minimum movement that can be distinguished). The movement of an armor unit can be decomposed in six main components; three translations and three rotations. However, due to the block to block interaction, the spatial rotation is the most probable movement. There is no flat foundation surface beneath the cubes so in this paper only rotational movements are evaluated.

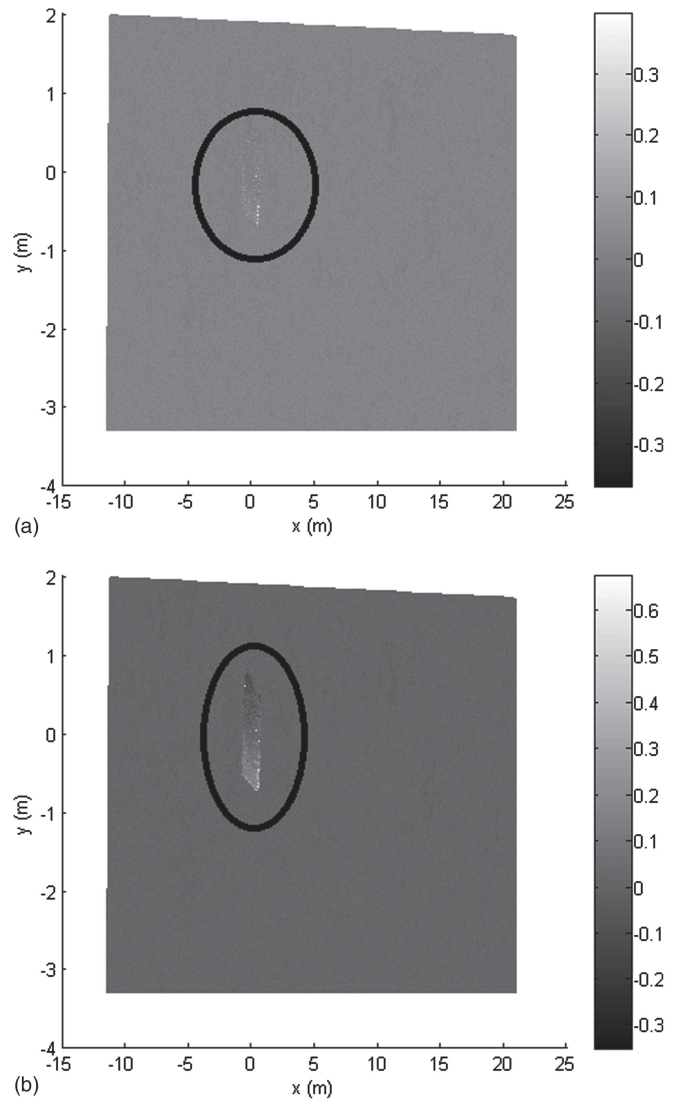
Additional steps of the procedure include the following:

- Point cloud preparation for simulation. A single cube is manually segmented from the point cloud (Fig. 5). In this way, the movement of the cube is allowed by referring to the original point cloud using rotation matrices. These separated point clouds are later used as the inputs to the algorithm developed to check the sensitivity of the UAV photogrammetry method.
- Rotation of the previously segmented armor cube. A rotation center is established in the geometrical center of the cube. A rotation loop is programmed from 0 to 10° with a step of 0.02° (roll, pitch, and yaw angles). It is assumed that the sensitivity of the method will be better than 10°, so higher angles are not tested.
- Generation of Gaussian noise. Only data from one survey could be used for the evaluation of the detection limit since there are not more data available. The precision of the method was previously calculated (Fig. 4) with the plane fitting. This data is used to provide the Gaussian noise. Once one rotation step is done, Gaussian noise is applied to the whole point cloud according to the precision data, including the rotated armor cube. Thus, although only one point cloud is used, the lack of precision during different surveys is taken into account in the calculations.
- Displacement detection. Every point cloud of the breakwater unit generated after each step rotation (including Gaussian noise) is compared with the input survey data. For the comparison, the unorganized point clouds are converted into organized point clouds using a nearest neighbor algorithm. This algorithm, also known as proximal interpolation, approximates the value of a  $z$  data for a nongiven point in an  $xy$  organized network by the  $z$  value of the nearest  $xy$  data in the unorganized point cloud (Bolstad 2008). Hence, the differences between points can be computed as differences in the  $z$  data values. Differences over 0.052 m ( $2\sigma$ ) could be measurable by the UAV photogrammetry technique. They are correlated with the roll, pitch, and yaw rotation of the cube.

## Results and Discussion

Fig. 6 shows the number of points that can be detected for a certain rotation angle. These points represent differences against the original point cloud higher than 0.052 m. Even for small rotations of the cube (around 0.1°) some evidence of movement can be detected (around 100 points over the threshold). The number of points displaced increases with the angular rotation. For smaller angles (between 0 and 4°), evidences of yaw rotation are more important than evidences of roll and pitch rotation. This trend changes for angles higher than 5°, where roll and pitch show more displaced points.

Figs. 7–9 show the differences in  $z$  values for roll, pitch, and yaw rotations of the cube (angles 1 and 10°). The differences in



**Fig. 10.** Image of  $z$  changes for roll rotations of (a) 1°; (b) 10°; area where the block is rotated is highlighted; right grayscale shows the  $z$  displacement (codified in meters)

$z$  increase with the increasing of rotation angle in all directions. This is related to the greater number of points that are above the detection threshold (Fig. 6). A significant number of points still appear around  $dz = 0 \pm 0.052$  m that correspond to those whose difference is within the system error. Graphs from Figs. 8–10 allow the precise location of the displaced cubes. This type of information could be of great help to improve the maintenance and management of breakwaters because it allows the damage location.

Fig. 10 shows a range image where the color bar indicates the differences in  $z$  values between the initial survey and the data generated after 1 and 10° roll rotations. This type of image appears very visual and easy to understand, also being easily incorporated into a GIS program.

## Conclusions

An UAV low-cost photogrammetry technique is developed for monitoring rubble mound breakwaters. It appears as a productive and reliable technique if wind conditions keep below 50 km/h

(Mikrokoetter system). The system is tested at the Baiona port in northwestern Spain.

The SD of the technique was evaluated on the flat face of one of the cubes with values of 0.026 m ( $2\sigma = 0.052$  m; 95% coverage). The detection limit of the technique was measured creating artificial rotations in roll, pitch, and yaw for one specific cube. Gaussian noise was introduced in the simulation taking into account the SD of the survey to make the results more reliable, according to the precision data obtained from the survey.

Changes in the point cloud after rotations were monitored calculating the distances between both datasets. The detection of any difference in height is assumed that come from the rotation of the cube. The technique shows that rotations even lower than  $1^\circ$  could be detected. These angular differences produce dimensional changes in  $z$  higher than 10 cm. These changes could be easily monitored since there are over the SD of the measurements.

It is recommended to study in further works the influence of the accuracy of the UAV photogrammetry method with camera resolution, flight height, focal length, and the position of GPS controls points.

## Acknowledgments

The writers want to give thanks to the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness, and Xunta de Galicia for the financial support given; and Human Resources programs (BES-2010-034106 and IPP055—EXP44) and project (Grant No. EM2013/005).

## References

- Atkinson, K. B. (2001). *Close range photogrammetry and machine vision*, Whittles, Dunbeath, U.K.
- Bolstad, P. (2008). *GIS fundamentals: A first text on geographic information systems*, Atlas, Ashland, OH.
- Burcharth, H. F., Andersen, T. L., and Medina, J. R. (2010). "Stability of cubipod armoured roundheads in short-crested waves. A comparison between cubipod and cube armour stability." *Coastal Eng.*, 32, 1–10.
- Cloud Compare v2.5.4.1 [Computer software]. License GNU GPL.
- Colomina, I., and Molina, P. (2014). "Unmanned aerial systems for photogrammetry remote sensing: A review." *ISPRS J. Photogramm.*, 92, 79–97.
- Corredor, A., Santos, M., Peña, E., Maciñeira, E., Gómez-Martín, M. E., and Medina, J. (2013). "Designing and constructing cubipod armored breakwaters in the ports of Malaga and Punta Langosteira (Spain)." *Proc., Institution of Civil Engineers (ICE) Coasts, Marine Structures and Breakwaters Conf.*, London.
- Gómez-Martín, M. E., and Medina, J. R. (2006). "Damage progression on cube armored breakwaters." *Proc., Int. Conf. on Coastal Engineering (ICCE)*, 5229–5240.
- González-Jorge, H., Riveiro, B., Armesto, J., and Arias, P. (2011). "Standard artifact for the geometric verification of terrestrial laser scanning systems." *Opt. Laser Technol.*, 43(7), 1249–1256.
- Gruen, A. (1985). "Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique." *South Afr. J. Photogramm. Remote Sens. Cartogr.*, 14(3), 175–187.
- Joglekar, J., and Gedam, S. (2012). "Area based image matching methods—A survey." *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, 2(5), 2250–2459.
- Kluger, J. W. (1982). "The monitoring of rubble mound breakwater stability using a photographic survey method." *Coastal Eng.*, 2164–2170.
- Kraus, K. (1993). "Photogrammetry." *Fundamentals and standard processes*, Dümmler, Bonn, Germany.
- Lomónaco, P., Vidal, C., Medina, J. R., and Gómez-Martín, M. E. (2009). "Evolution of damage roundheads protected with cube and cubipod armour units." *Proc., Institution of Civil Engineers (ICE) Coastal, Marine Structures and Breakwaters Conf.*, London, 169–180.
- Longuet-Higgins, H. C. (1987). "A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections." *Readings in computer vision: Issues, problems, principles, and paradigms*, M. A. Fisher and O. Firschein, eds., Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 61–62.
- MatLAB [Computer software]. Natick, MA, Mathworks.
- Merchant, D. C. (2012). "Aerial camera metric calibration. History and status." *Proc., American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) Annual Conf.*, Bethesda, MD, 380–389.
- Mitchell, T., and Chang, M. (2011). "Utilizing vessel based mobile LiDAR and bathymetry survey techniques for survey of four southern California breakwaters." *Coastal Eng. Pract.*, 957–969.
- Molinero-Guillén, P. (2010). "Construction of large port infrastructures at the north of Spain." *Proc., del Congreso de Ingeniería Civil*, Madrid, Spain, 1–20.
- Molinés, J., Piedad-Herea, M., Pérez, T., and Medina, J. R. (2012). "Laser scanner technique to quantify randomness in cube and cubipod armour layers." *Coastlab Conf.*, P. Troch, V. Stratigaki, and S. De Roo, eds., Universiteit Gent, Ghent, Belgium.
- Morel, J. M., and Yu, G. (2009). "ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison." *SIAM J. Imag. Sci.*, 2(2), 438–469.
- Nex, F., and Remondino, F. (2014). "UAV for 3D mapping applications: A review." *Appl. Geomatics*, 6(1), 1–15.
- Photogrammetric Workbench 1.0 [Computer software]. Spain, Univ. of Salamanca.
- Pirotti, F., Guarmeri, A., and Vettore, A. (2013). "State of the art of ground and aerial laser scanning technologies for high-resolution topography of the earth surface." *Eur. J. Remote Sens.*, 46(1), 66–78.
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., and Arias, P. (2013). "Review of mobile mapping and surveying technologies." *Measurement*, 46(7), 2127–2145.
- Reif, M. K., Wozencraft, J. M., Dunkin, L. M., Sylverter, C. S., and Macon, C. L. (2013). "A review of U.S. Army Corps of Engineers airborne coastal mapping in the Great Lakes." *J. Remote Sens. Great Lakes Other Inland Waters*, 39(S1), 194–204.
- Segrelles, J. A. (2000). "The ports, the global economy and planning." *Geog. J. Uruguay*, 117–137.
- Van Gent, M. R. A., and Van der Werf, I. M. (2010). "Stability of breakwater roundheads during construction." *Coastal Eng.*, 32, 1–15.
- Wiechert, A., and Gruber, M. (2010). "Ten years large format digital aerial cameras: A review." *Proc., American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) Annual Conf.*, Bethesda, MD, 217–221.



# CAPÍTULO IV

## INTEGRACIÓN DE SENSOR LIDAR EN UAV PARA APLICACIONES GEOMÁTICAS



## 4. INTEGRACIÓN DE SENSOR LIDAR EN UAV PARA APLICACIONES GEOMÁTICAS

### 4.1. Novel aerial 3D mapping system based on UAV platforms and 2D laser scanners

Este capítulo contiene el artículo *Novel aerial 3D mapping system based on UAV platforms and 2D laser scanners* publicado en la revista de gran impacto *Journal of Sensors* en 2016.

#### 4.1.1. Resumen

En este artículo se presenta un nuevo sistema de captura basado en la integración de un escáner láser 2D (LiDAR 2D), una IMU y un sensor GNSS sobre un UAV de tipo multirrotores para la generación de nubes de puntos en tres dimensiones, directamente georreferenciadas, realizando una evaluación de la exactitud y precisión obtenidas. Se trata de un desarrollo previo que sirve para establecer la base de conocimiento para el trabajo realizado en la última fase del proyecto de Tesis Doctoral.

La obtención de información 3D típicamente se puede realizar con imágenes, usando técnicas fotogramétricas, y con equipos láser escáner 3D estáticos, basados en la rotación de un espejo sobre 2 ejes sobre el que se refleja un haz generado por el emisor que es reflejado sobre las superficies y hace llegar al receptor. Con la evolución de los sistemas de posicionamiento basados en sensores inerciales y dispositivos GNSS, se posibilita el uso de sistemas 2D montados sobre vehículos para la generación de nubes de puntos masivas 3D, generadas en combinación con el movimiento de la plataforma. Sobre UAVs se han montado cámaras RGB-D, láser escáner 2D usando algoritmos SLAM para la determinación

del posicionamiento y sistemas láser escáner junto a cámaras para estimación de la orientación. Sin embargo, todas las soluciones presentan limitaciones para su uso en exteriores.

Con el objetivo de salvar las limitaciones de los sistemas previos se desarrolla un nuevo equipo basado en un láser escáner 2D, una unidad GNSS para el posicionamiento absoluto y un sensor inercial para la medición de la orientación relativa, todos equipos de bajo coste y con unas características físicas adaptadas al montaje en UAV con carga de pago limitada a 2 Kg.

El sistema hardware desarrollado realiza la sincronización de datos entre el láser 2D, el sensor inercial y el GNSS usando como referencia el tiempo GPS. La captura se realiza almacenando los datos binarios brutos de los sensores en una memoria interna gestionada por el propio microcontrolador interno y se habilita la opción de recepción de correcciones diferenciales para que el sistema GNSS pueda trabajar en modo RTK (Real Time Kinematics) aumentando su precisión, todo gestionado desde la unidad de tierra mediante un enlace radio y una aplicación Android desarrollada para este propósito.

En el post-proceso de datos se genera la nube de puntos 3D a partir de las mediciones puntuales del láser y su correspondiente orientación y posición determinada por la unidad inercial y GNSS respectivamente. Para ello se hace uso del modelo matemático de los sistemas LiDAR aplicando las matrices de rotación para transformar los puntos medidos en el sistema de referencia del láser al sistema de referencia global y aplicando las matrices de calibración entre sensores. El resultado es una nube de puntos directamente georreferenciada.

Se comprueba la calidad de los datos obtenidos mediante dos metodologías diferentes: la exactitud en medidas geométricas de elementos físicos y en valor absoluto mediante coordenadas geográficas de los datos.

Las mediciones geométricas de los edificios sobre los que se realiza el ensayo, utilizando como valor de referencia la medición de un láser escáner fijo con precisión inferior a 2 mm, confirman un error inferior al 5% en la medida de distancia, generalmente provocado por la precisión del

sistema inercial. Es importante destacar que la geometría de los puntos en forma de líneas influye en la medida, en este caso, de la altura del edificio usado para el estudio, mientras que en la dirección de avance, la exactitud es superior al estar directamente relacionada, por el proceso de captura de los datos, con la medición en RTK del sistema GNSS de mayor precisión.

La exactitud en valor absoluto se obtiene mediante la medición de una superficie irregular en la que se ubican siete puntos de control que son medidos de forma independiente mediante un receptor GNSS en modo VRS (Virtual Reference Station), obteniendo que la desviación máxima es inferior a 0.40 m en todos los ejes. Se comprueba que el error en esta medición está influenciado por la menor precisión en la medida del sensor inercial del ángulo de heading.

Se puede concluir que el sistema desarrollado y los datos generados por el mismo tienen una calidad acorde a las especificaciones de los sensores y se valida la utilidad del sistema integrado, comprobando la calidad de los datos generados y estudiando los parámetros que influyen en esta.

#### **4.1.2. Artículo IV**

## Research Article

# Novel Aerial 3D Mapping System Based on UAV Platforms and 2D Laser Scanners

**David Roca, Joaquín Martínez-Sánchez, Susana Lagüela, and Pedro Arias**

*Applied Geotechnologies Research Group, University of Vigo, 36310 Vigo, Spain*

Correspondence should be addressed to David Roca; davidroca@uvigo.es

Received 3 August 2015; Accepted 10 December 2015

Academic Editor: Banshi D. Gupta

Copyright © 2016 David Roca et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The acquisition of 3D geometric data from an aerial view implies a high number of advantages with respect to terrestrial acquisition, the greatest being that aerial view allows the acquisition of information from areas with no or difficult accessibility, such as roofs and tops of trees. If the aerial platform is copter-type, other advantages are present, such as the capability of displacement at very low-speed, allowing for a more detailed acquisition. This paper presents a novel Aerial 3D Mapping System based on a copter-type platform, where a 2D laser scanner is integrated with a GNSS sensor and an IMU for the generation of georeferenced 3D point clouds. The accuracy and precision of the system are evaluated through the measurement of geometries in the point clouds generated by the system, as well as through the geolocation of target points for which the real global coordinates are known.

## 1. Introduction

The availability of 3D point clouds from objects is a key aspect regarding their inventory and the performance of posterior geometric analysis and other types of analysis such as energy use in buildings [1, 2], presence and dimension of cracks in bridges and roads [3, 4], and presence of defects in smaller objects or elements such as welding [5].




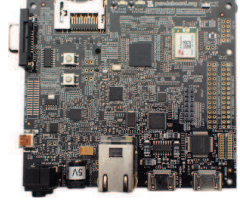
Point clouds can be generated using different methodologies and devices: on the one hand, photogrammetry techniques can be applied for the orientation of the images and the extraction of the 3D coordinates of the point represented by each pixel through the computation of the ray intersection [6]. On the other hand, there is the possibility of performing the direct measurement of the 3D coordinates of points through the use of laser scanning devices. Most of them consist of a moving head (rotation in the  $z$ -axis) with a rotating mirror inside (rotation in its  $x$ -axis). The two axes of rotation provoke the deviation of the laser ray emitted, which travels through the space, returning to the head after encountering an object. The result is directly the 3D coordinates of each point of the area around the position of the laser scanner [7, 8].

However, development in positioning sensors, from Inertial Measurement Units (IMU) to GNSS, has encouraged

the appearance of mobile platforms for the generation of massive 3D point clouds. Most options are terrestrial and their displacement is based on a wheeled structure, which can be a car or a van [9, 10], or a platform specifically designed for indoor works [11].

Regarding aerial platforms, advances in the recent years have increased the possibilities towards the integration of sensors for different purposes. One option is the integration of RGB-D cameras, such as Kinect sensors, in the aerial platform, in such a way that small 3D point clouds are acquired [12, 13]. The main drawbacks of this procedure are that data processing must be performed for the registration of contiguous point clouds and that their main application is limited to indoor scenes due to the poor performance of these devices in outdoor conditions. Thus, some versions integrate both a LiDAR sensor (2D laser scanner) for the measurement of geometry and a photographic camera for the acquisition of images [14, 15]. This way, positioning of the system relies on LiDAR data processing and image orientation, based on photogrammetry and computer vision algorithms. These cases used a relative coordinate system, unless ground control points are measured with a GPS device and used for the absolute orientation of the images. Another common option is the implementation of rotation in the laser, with the same purpose of the rotating head in a terrestrial laser scanner: the

TABLE 1: Technical characteristics of the sensors used for 3D mapping in the Aerial System.

Spatial IMU	Trimble BD920	Hokuyo UTM-30LX	Pandaboard
			
3-axis accelerometer 3-axis gyroscope Magnetometer	220 channels GPS and GLONASS 1 Ethernet, 4 Serial Precision (RTK mode): 8 mm horizontal, 15 mm vertical	Scanning principle: Time-of-Flight Measurement range: <30 m Measurement angle: 270° Resolution: 0.25°/1 mm	Dual-core ARM Cortex-A9 a 1.2 GHz 1 GB DDR2 RAM 2 USB, 1 Ethernet
Precision for orientation: <1°	Antenna Trimble AV34 Gain: 43 dB	Scanning rate: 40 Hz Precision: 30 mm	LINUX OS

generation of 3D point clouds due to the fusion of all the 2D sections acquired in the same position [16, 17]. In these cases, some approaches rely completely on the IMU for the computation of the trajectory of the flight [18], whereas other approaches focus on the alignment of the 2D point clouds for the determination of the positions from which they were acquired. This approach is commonly known as SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [19].

There are different algorithms for SLAM, although the majority of them can only be applied to indoor scenes due to the higher presence of characteristic elements [20] than outdoor scenes. Other SLAM algorithms established the displacement of the laser on the horizontal plane, in such a way that the measurement is limited to horizontal and vertical surfaces, with no possibility of measuring ramps, or even staircases [21]. What is more, the applications of SLAM-based platforms are limited to mapping and navigation, disregarding the third dimension of space. In order to measure in 3D, the platform must either integrate a second LiDAR sensor in a perpendicular position regarding the first [22] or implement rotation to it [17].

In order to overcome the limitations of SLAM regarding outdoor scenes and geometry, this paper presents a methodology for 3D modelling of outdoor scenes based on data acquired by a LiDAR sensor mounted on an aerial platform, copter-type. The system is able to acquire the 3D coordinates of points, including slopes and inclined surfaces, common in outdoor scenes. In order to minimize the number of LiDAR sensors in the platform and consequently reduce the payload to its minimum, the system consists of a 2D laser scanner and a GNSS receiver. This way, 3D point clouds are generated by the combination of the 2D scans with the displacement measured by GNSS as the third dimension. The direct measurement of the GNSS receiver in the global reference system allows the direct absolute orientation of the 3D point clouds with no need for artificial ground control points.

This paper is organized as follows: Section 2 describes the equipment, and the procedures for data acquisition and data processing. Section 3 incorporates the results obtained after different measurements for the validation of the system. Last,

Section 4 presents the conclusions reached after the analysis of the Aerial 3D Mapping System is proposed.

## 2. Materials and Methods

*2.1. Sensor Integration.* The system presented in this paper consists of an aerial platform, copter-type, equipped with a 2D laser scanner for the measurement of point coordinates and an IMU (Inertial Measurement Unit) for the measurement of the position and orientation of the platform, and, thus, of the 2D laser scanner.

The platform chosen as the base of the system is a Mikrokoopter Okto-XL. It is an eight-propeller platform, with a brushless motor for the control of each propeller, in such a way that propellers are individually controlled. The platform presents a payload of 2.5 kg, and a flying autonomy up to 20 minutes. The platform is remotely controlled, with communication with the remote control on the band of 2.4 GHz.

Data acquisition for 3D mapping is performed through the incorporation of the following sensors to the platform:

- (i) 2D laser scanner, Hokuyo, model UTM-30LX.
- (ii) IMU Advanced Navigation, Spatial model.
- (iii) GNSS Receiver, Trimble BD920, with RTK, DGNSS, and SBAS modes [23].
- (iv) Embedded processor Pandaboard.

Technical characteristics of the sensors are included in Table 1.

Data acquisition is controlled from a tablet device, which communicates with the Aerial 3D Mapping System through a wireless communication module, in the channel of 433 MHz. What is more, the embedded processor is equipped with a 3G module for receiving GPS corrections of the position of the platform, in the NTRIP protocol. The GNSS receiver Trimble BD920 imports the corrections received, which are used for the precise computation of the position of the system, in real time. Data from the laser (scanning sections), IMU, and GPS after corrections are stored on-board, in a storage system



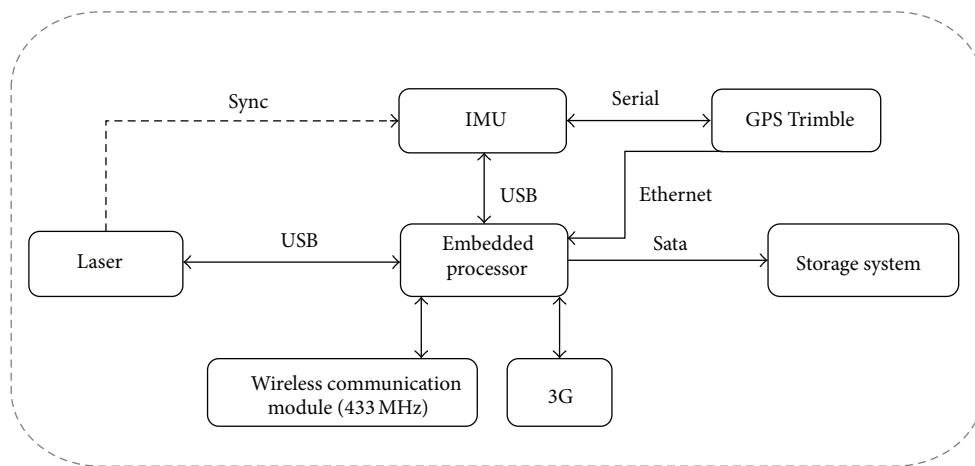


FIGURE 1: Communication between sensors.

consisting of an external portable memory. Figure 1 shows a schema of the different connections between sensors.

As shown in Figure 1, every measurement of the laser is associated with a measurement of the IMU and the GNSS receiver, making possible the posterior generation of a 3D point cloud. The synchronization is performed through a trigger-out signal sent by the laser every time a measurement is performed. The signal is received by the IMU, which sends its measures and resends the order of acquisition to the GNSS receiver.

In order to avoid the entrance of flying elements and dust in the electronics of the system, all the components are protected by an aluminium box, 2 mm thick, with the exception of the laser and the GNSS antenna. The box is affixed to the UAV with a tappet, also made in aluminium. The laser sensor is placed in such a way that the  $90^\circ$  with no measurement are oriented upwards. This way, no information is missed from the area of interest (ground and vertical elements such as buildings, trees); in addition, there is no record of the wing and the motors of the vehicle, which could disturb the point cloud appearing as points with no interest. Figure 2 shows the system developed for aerial 3D mapping.

The positions of both the GPS antenna and the laser scanner are calibrated with respect to the IMU, so that the respective measurements of global and 2D coordinates are referred to the same origin in the system and their integration is possible.

**2.2. Data Acquisition.** While the flight is controlled with the remote control by the operator, data acquisition is controlled from the tablet device, with a software specifically developed by the authors for this operation. Different screen captures of the software are shown in Figure 3.

The software is developed in such a way that data acquisition is controlled with buttons “Start” and “Stop”. In addition, the number of measurements can be followed in real time (top of the screen, legends “NumSurvey” and “NumScans”, together with the measurements of the IMU sensor for both positioning and orientation (latitude, longitude and height,



FIGURE 2: Aerial 3D Mapping System developed.

and roll, pitch and yaw)). Regarding the GNSS, the “Status” legend shows at every moment the quality of the GNSS positioning. In particular, the green light for acquisition is given when the acquisition mode is RTK Fixed, as shown in Figure 3(b).

When global positioning is optimal (RTK Fixed), the “Start” button can be pressed. In this moment, the laser data acquisition starts, and all the measurements by the IMU, the GNSS receiver, and the laser are stored.

**2.3. Data Processing.** Given the high precision of data acquisition, data processing is a simple procedure. The position and orientation of the aerial system in each laser measurement are known through the measurements of the IMU and the GNSS sensors associated. Thus, the procedure for the generation of the 3D point clouds of the area flown consists in the placement of each laser measurement (a 2D point cloud) in the position of the UAV in the moment of the acquisition, projected with the orientation of the UAV. Consecutive 2D point clouds are projected to their respective positions, taking into account that the displacement line is the 3rd dimension of the point cloud. The projection of each point is determined by the measurement of angle and distance from the IMU provided by the laser scanner, and the angles of roll, pitch, and

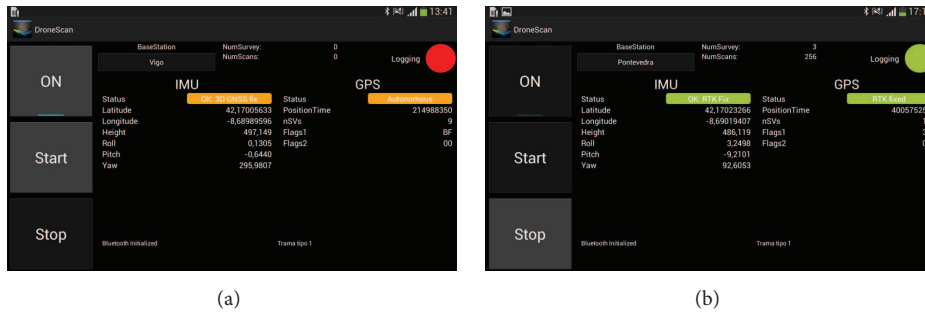


FIGURE 3: Screen captures of the software developed for controlling data acquisition. (a) System not working. (b) System logging data.

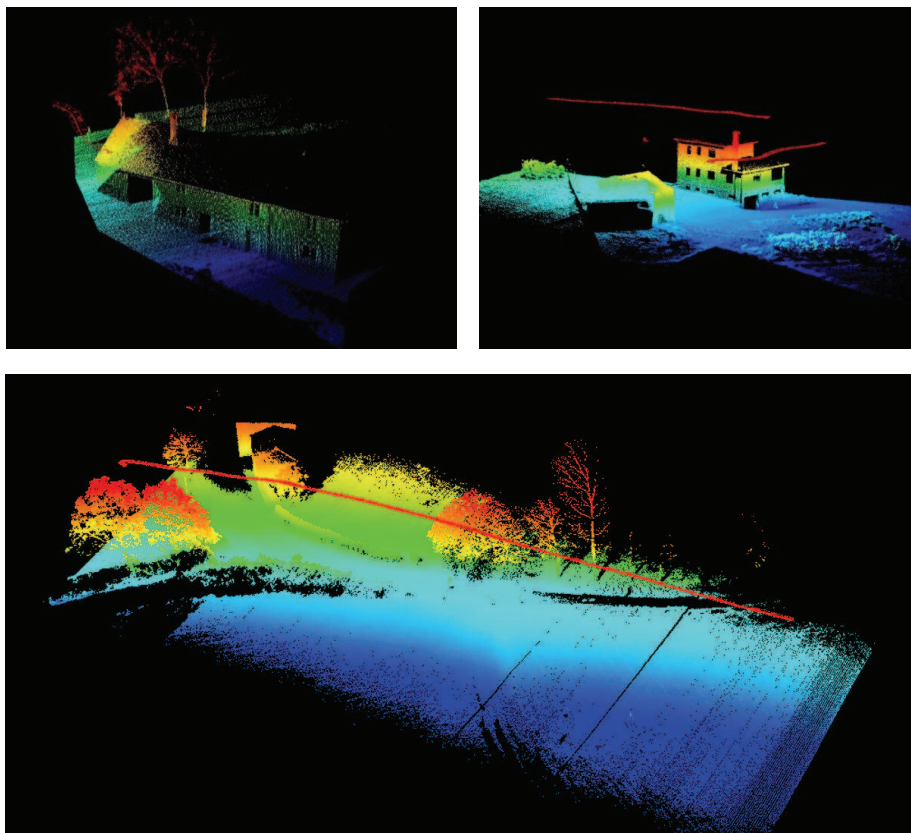


FIGURE 4: Example of point clouds acquired from the Aerial 3D Mapping System developed. The red line shows the path followed by the system in the different flights required for the complete coverage of the buildings. Colour is applied according to different levels of height.

yaw measured by the IMU in each position. Figure 4 shows some examples of 3D point clouds of buildings acquired from the Aerial 3D Mapping System.

### 3. Results and Discussion

The performance of the Aerial 3D Mapping System is evaluated in two ways. On the one hand, the quality of the 3D point cloud is analysed through its comparison with a point cloud of the same buildings acquired with a terrestrial laser scanner FARO Focus<sup>3D</sup>. This way, the accuracy of the geometry acquired by the proposed system is calculated. On the other hand,

the quality of the global positioning of the system is evaluated through the comparison of the 3D coordinates of seven target points between the point cloud generated and independent GPS measurements.

*3.1. Relative Measurements.* Two different single-houses were acquired with the Aerial 3D Mapping System and with a terrestrial laser scanner FARO Focus<sup>3D</sup> X330. The high accuracy in the 3D measurement of scenes of the latter (2 mm) makes it the optimal option for being considered as a reference. The measurement of the Aerial 3D Mapping System consists in following a flying path surrounding the buildings, at a flying

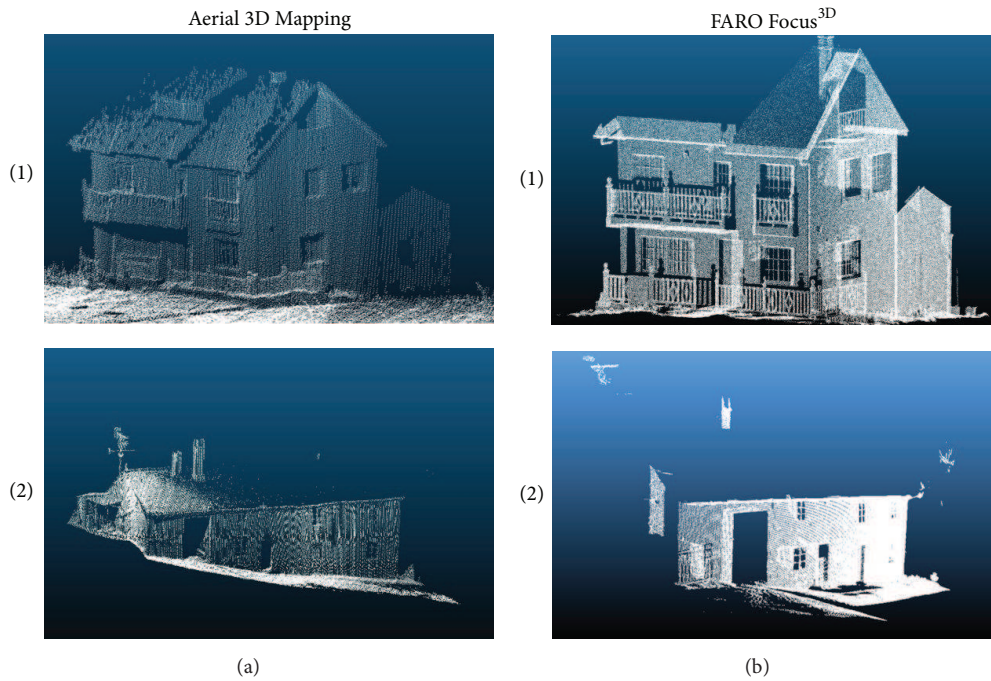


FIGURE 5: 3D point clouds acquired of buildings (1) and (2) used for the validation of the system proposed. (a) Point clouds from the Aerial 3D Mapping System. (b) Point clouds from TLS FARO Focus<sup>3D</sup> X330. The main difference is the lack of information from the roofs in the point clouds of the latter.

TABLE 2: 3D dimensions of buildings in Figure 5; comparison between the point cloud acquired with FARO Focus<sup>3D</sup> and the Aerial 3D Mapping System proposed. Differences over 5% are highlighted in bold.

Building	System	Height	Diff <sub>H</sub> (%)	Length	Diff <sub>L</sub> (%)	Width	Diff <sub>W</sub> (%)
1	FARO	5.30 m	3.60%	9.00 m	1.10%	6.80 m	<b>5.90%</b>
	Aerial 3D	5.11 m		8.90 m		6.45 m	
2	FARO	4.72 m	1.48%	21.21 m	3.06%	9.62 m	3.11%
	Aerial 3D	4.72 m		21.86 m		9.32 m	

height 1-2 m over the building. Height is dependent on the horizontal distance between the Aerial System and the building, given that the two parameters, height and horizontal distance, determine the view angle of the laser sensor. In order to acquire information of the façades and the roof, the recommended view angle of the laser sensor is between 30° and 50°.

Regarding FARO Focus<sup>3D</sup> X330, data acquisition is performed from one scan position, located next to one corner of the building. This way, information about the main façade and one lateral façade is acquired. With respect to the roofs, which appear in the point clouds acquired by the Aerial 3D Mapping System, the information acquired by the FARO Focus<sup>3D</sup> is limited to some points visible by the laser from the scan position.

The point clouds resulting from the data acquisitions are shown in Figure 5, while the results of their geometrical evaluation are shown in Table 2.

Results show that the error in the measurement of the Aerial 3D Mapping System is under 5% except for one measurement. What is more, the highest accuracy is found for

the measurement of the length. The higher accuracy in this dimension, which depends on the measurement of the GNSS and the computation of the displacement of the system, shows the quality of the performance of RTK mode. On the other hand, the lower accuracy in the measurement of the height of the building can be due to the fact that it can only be measured in one scanning section, the one coincident with the top of the roof, with no security for its coincidence with the real higher section of the building. On the contrary, this measurement presents high accuracy in the point clouds acquired with FARO Focus<sup>3D</sup>, since they present several points for each position, including the top of the roof. However, the highest error is found in the width of the buildings. The cause of this highest error is that the width measurement is a combination of measurements of the laser and the GNSS, resulting in the integration of the error from the two sources.

**3.2. Absolute Positioning.** The quality of the global positioning of the system is evaluated through the measurement of the 3D coordinates of 7 control targets, consisting of white

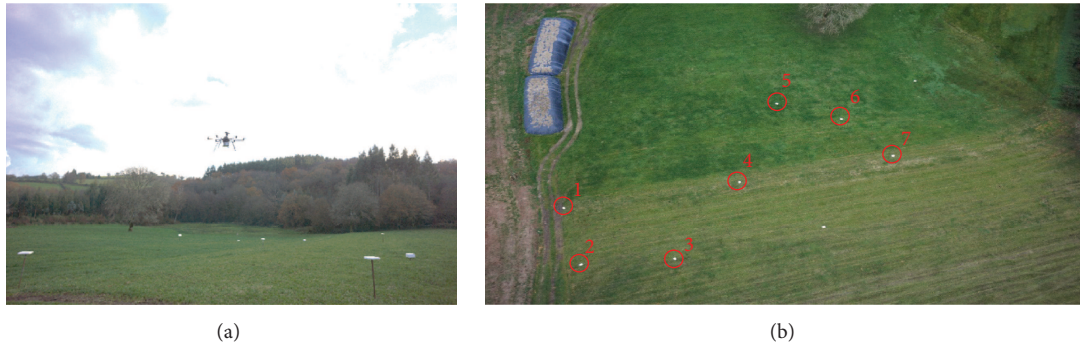


FIGURE 6: (a) Side view of the forest clearing with control targets at different heights. (b) Top view of the forest clearing; the position of the targets is highlighted in red.

TABLE 3: Mean deviation values between the coordinates measured by the system proposed and the reference values measured with GPS Trimble R8 for each point. All units are in [m].

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Mean
Dev. $x$	0.150	0.202	0.368	0.113	0.275	0.110	0.454	0.239
Dev. $y$	0.259	0.186	0.438	0.206	0.394	0.152	0.723	0.337
Dev. $z$	0.187	0.182	0.230	0.287	0.167	0.144	0.211	0.201

rectangular plates placed at different heights (between 0.20 and 1.40 m). The targets were homogeneously distributed in a forest clearing, as shown in Figure 6. With the aim of performing a statistical analysis, the coordinates of the targets are measured in 10 different flights, performed at 8–10 m height. The GNSS sensor of the aerial system received online corrections from one station: the official national base located at an approximate distance of 30 km.

The reference for the coordinates of the targets is set on the independent measurement performed directly on the targets using a GPS Trimble R8. Thus, the spatial coordinates of the seven targets are measured in the ten flights, and their values are compared with the reference values (i.e., values from the measurements performed with GPS Trimble R8). Mean deviations from the measurements of the Aerial 3D Mapping System with respect to the reference values are 0.239 m in the  $x$ -axis, 0.337 m in the  $y$ -axis, and 0.201 m in the  $z$ -axis. Mean deviation values for the 10 measurements of each point are shown in Table 3.

The highest mean deviation, for all points except point 2, is in the  $y$ -axis. What is more, Point 7 is the one with the highest deviation both in  $x$ - and in  $y$ -axis, due to an error in the measurement of the heading angle by the IMU, which is the measurement in which the IMU presents the worst performance [24]. In all cases, precision is higher than 0.5 m, with the only one exception of point 7, for which precision in the  $y$ -axis is 0.723 m.

#### 4. Conclusions

This paper presents the development and integration of a novel Aerial 3D Mapping System, constituted by an aerial platform, copter-type, and a 2D laser scanner for the measurement of point coordinates in outdoor scenes. Position

of the system during acquisition is measured with a GNSS sensor, which accepts corrections from GPS stations, both local (positioned by the operators) and official, provided they communicate using NTRIP protocol. In addition, orientation of the system is measured by an IMU, which also calculates the trajectory of the system in case GNSS signal is lost. Thus, the final objective of the system is the generation of 3D point clouds of the area under study, with coordinates in the global coordinate system. The global coordinate system used in this paper is ETRS89, with UTM projection and time zone being dependent on the location (from 29 to 31 in the case of Spain).

With the presented configuration, and using GPS corrections from an official base, precision in global positioning is under 0.400 m in all axes, being the worst precision measured in the  $y$ -axis with a value of 0.337 m. Thus, the system provides results with a precision 10 times lower than the theoretical precision provided by GPS RTK mode, which is 1–2 cm. This decrease in precision is caused by errors in the measurements of the IMU, which influence the projection of each point to its 3D position. The IMU is the sensor that introduces higher deviations, especially in the measurement of the heading angle, which is the one with the worst performance.

Regarding the generation of 3D point clouds and the accuracy of their geometry, two houses were measured, and the evaluation of their dimensions with respect to those measured by a terrestrial laser scanner results in error below 5% for most cases. Regarding the different dimensions measured, the highest error is found in the width of the buildings. The reason for this higher error is that this dimension is transversally measured by the laser, and the orientation of the points is calculated from the values of translation and rotation between positions of the system, instead of being directly measured. This fact highlights the importance of a proper flight planning, in which the key dimensions of the object of interest are

measured directly by the system (either by the laser scanner or by the GNSS in case the measurement is parallel to the trajectory of the Aerial System).

Improvements to the Aerial 3D Mapping System would imply the integration of an IMU with better technical characteristics, as well as a laser scanner with capacity to measure at higher frequencies, so that more scans are measured in each flight and thus the error produced in the measurement of the dimensions of the objects is reduced. Regarding the generation of 3D point clouds, future work will focus on the processing step, through a procedure of plane extraction in consecutive 2D sections for the adjustment of the points to fit the plane, resulting in the generation of more accurate 3D models.

### Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

### Acknowledgments

The authors would like to thank the Ministerio de Economía y Competitividad and CDTI (Gobierno de España) for the financial support given through human resources grants (FPDI-2013-17516, PTQ-13-06381), and projects (ENE2013-48015-C3-1-R). All the programs are cofinanced by the Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER).

### References

- [1] M. Previtali, L. Barazzetti, R. Brumana et al., "Automatic façade modelling using point cloud data for energy-efficient retrofitting," *Applied Geomatics*, vol. 6, no. 2, pp. 95–113, 2014.
- [2] L. Díaz-Vilariño, S. Lagüela, J. Armesto, and P. Arias, "Semantic as-built 3d models including shades for the evaluation of solar influence on buildings," *Solar Energy*, vol. 92, pp. 269–279, 2013.
- [3] L. Truong-Hong and D.-F. Laefer, "Application of terrestrial laser scanner in bridge inspection: review and an opportunity," in *Proceedings of the 37th IABSE Symposium on Engineering for Progress, Nature and People*, pp. 2713–2720, Madrid, Spain, September 2014.
- [4] H. Guan, J. Li, Y. Yu et al., "Iterative tensor voting for pavement crack extraction using mobile laser scanning data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 3, pp. 1527–1537, 2015.
- [5] M. Rodríguez-Martín, S. Lagüela, D. González-Aguilera, and P. Rodríguez-González, "Procedure for quality inspection of welds based on macro-photogrammetric three-dimensional reconstruction," *Optics and Laser Technology*, vol. 73, pp. 54–62, 2015.
- [6] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and I. Harley, *Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications*, Whittles Publishing, Dunbeath, UK, 2006.
- [7] B. Riveiro, P.-B. Lourenço, D.-V. Oliveira, H. González-Jorge, and P. Arias, "Automatic morphologic analysis of quasi-periodic masonry walls from LiDAR," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2015.
- [8] D. González-Aguilera, A. Muñoz-Nieto, J. Gómez-Lahoz, J. Herrero-Pascual, and G. Gutierrez-Alonso, "3D digital surveying and modelling of cave geometry: application to paleolithic rock art," *Sensors*, vol. 9, no. 2, pp. 1108–1127, 2009.
- [9] I. Puente, H. González-Jorge, J. Martínez-Sánchez, and P. Arias, "Review of mobile mapping and surveying technologies," *Measurement*, vol. 46, no. 7, pp. 2127–2145, 2013.
- [10] S. I. El-Halawany and D. D. Lichti, "Detection of road poles from mobile terrestrial laser scanner point cloud," in *Proceedings of the International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM '11)*, pp. 1–6, IEEE, Xiamen, China, January 2011.
- [11] S. Zancajo-Blazquez, S. Lagüela-Lopez, D. Gonzalez-Aguilera, and J. Martinez-Sanchez, "Segmentation of indoor mapping point clouds applied to crime scenes reconstruction," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 10, no. 7, pp. 1350–1358, 2015.
- [12] D. Roca, S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, J. Armesto, and P. Arias, "Low-cost aerial unit for outdoor inspection of building façades," *Automation in Construction*, vol. 36, pp. 128–135, 2013.
- [13] S. Lange, N. Sünderhauf, P. Neubert, S. Drews, and P. Protzel, "Autonomous corridor flight of a UAV using a low-cost and light-weight RGB-D camera," in *Proceedings of the 6th AMiRE Symposium*, Bielefeld, Germany, May 2011.
- [14] B. Yang and C. Chen, "Automatic registration of UAV-borne sequent images and LiDAR data," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 101, pp. 262–274, 2015.
- [15] B. Jutzi, M. Weinmann, and J. Meidow, "Weighted data fusion for UAV-borne 3D mapping with camera and line laser scanner," *International Journal of Image and Data Fusion*, vol. 5, no. 3, pp. 226–243, 2014.
- [16] S. Huh, D. H. Shim, and J. Kim, "Integrated navigation system using camera and gimbaled laser scanner for indoor and outdoor autonomous flight of UAVs," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '13)*, pp. 3158–3163, IEEE, Tokyo, Japan, November 2013.
- [17] D. Droschel, M. Schreiber, and S. Behnke, "Omnidirectional perception for lightweight UAVs using a continuously rotating 3D laser scanner," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, no. 1, pp. 107–112, 2013.
- [18] F.-J. Pei, H.-Y. Li, and Y.-H. Cheng, "An improved FastSLAM system based on distributed structure for autonomous robot navigation," *Journal of Sensors*, vol. 2014, Article ID 456289, 9 pages, 2014.
- [19] K. Sibilski and M. Kmiecik, "VTOL UAV optically aided indoor attitude estimation with a complementary filter for the special orthogonal group  $SO_3$ ," in *Proceedings of the 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Grapevine, Tex, USA, January 2013.
- [20] J. Yin, L. Carlone, S. Rosa, and B. Bona, "Graph-based robust localization and mapping for autonomous mobile robotic navigation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA '14)*, pp. 1680–1685, IEEE, Tianjin, China, August 2014.
- [21] G. Vosselman, "Design of an indoor mapping system using three 2D laser scanners and 6 DOF SLAM," *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 2, no. 3, pp. 173–179, 2014.
- [22] Y.-K. Wang, J. Huo, and X.-S. Wang, "A real-time robotic indoor 3D mapping system using dual 2D laser range finders," in

*Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference (CCC '14)*, pp. 8542–8546, IEEE, Nanjing, China, July 2014.

- [23] N. Ward, “Future of IALA DGNS,” in *Proceedings of the Institute of Navigation, National Technical Meeting*, vol. 1, pp. 184–187, January 2006.
- [24] V. Bistrov, “Performance analysis of alignment process of MEMS IMU,” *International Journal of Navigation and Observation*, vol. 2012, Article ID 731530, 11 pages, 2012.

# **CAPÍTULO V**

## **DESARROLLO DE PRODUCTO**





## 5. DESARROLLO DE PRODUCTO

### 5.1. Introducción

La línea técnico-industrial de esta Tesis Doctoral se desarrolla durante los últimos años de la misma motivada por la experiencia del trabajo en empresa y el conocimiento de las necesidades y demandas del mercado, tanto en lo relativo a solicitud de nuevos productos y servicios, como la importancia de ajustarse a plazos de tiempo muy ajustados.

Con el propósito de poner en valor la investigación previa y el conocimiento adquirido en la etapa investigadora, se decide dar el paso al desarrollo de un equipo comercializable, que integre las principales novedades en lo relativo a sensórica, fijando como objetivo diseñar y desarrollar un producto comercializable.

El producto a desarrollar será un sistema LiDAR aéreo para uso en UAV con cámara RGB y multiespectral. El equipo debe ser completamente funcional, tanto a nivel hardware como software, y su manejo deberá poder ser realizado por cualquier operario con un conocimiento mínimo del sistema.

Este desarrollo se enmarca dentro del proyecto de investigación UFOREST, correspondiente a la convocatoria Interconecta 2016 en el que la empresa Ingeniería Insitu SL participa como subcontratista.

En este capítulo se hará un resumen por la trayectoria del proyecto de desarrollo de producto. Se comienza con la etapa de definición de requisitos, para continuar con las fases de diseño y desarrollo, y finalmente la fase de validación de resultados

## **5.2. Definición de requisitos**

La definición de requisitos del sistema a desarrollar se realiza de forma previa a la etapa de diseño, para dejar documentadas todas las funcionalidades que se le requieren al equipo. De esta forma, se establecen los principales requerimientos, algunos de los mismos especificados por el proyecto de investigación, tanto a nivel funcional como no funcional.

### **5.2.1. Requisitos funcionales**

Se enumera, a continuación, un resumen de los principales requisitos funcionales fijados para el sistema a desarrollar:

- Precisión absoluta inferior a 10 cm RMSE.
- Tasa de escaneo superior a 300000 puntos/seg.
- Doble retorno.
- Altura de vuelo para operación entre 40 y 60 metros AGL.
- Peso del sistema completo inferior a 2.5 Kg.
- Tamaño compacto, máximo 200 x 200 x 300 mm.
- Sistema de acople Plug&Play.
- Rango de alimentación de entrada de 15 a 30 V.
- Consumo inferior a 30W.
- Integración de cámara RGB tipo Sony Alpha 7 RII.
- Integración de cámara multiespectral tipo Micasense RedEdge.
- Software para control de captura LiDAR y cámaras.
- Software para postproceso de los datos.

### **5.2.2. Requisitos no funcionales**

A continuación, se enumeran, los principales requisitos no funcionales fijados para el sistema divididos por bloques:

- **Disponibilidad.** El sistema a desarrollar debe poder operar en cualquier momento y cualquier lugar, 24 horas y 7 días.
- **Robustez.** El sistema debe tener una tasa de fallos baja, inferior a 0.5%.
- **Simplicidad de proceso.** El proceso de operación del sistema a desarrollar deberá ser simple y realizable por un operario con una formación básica de menos de 10 horas.
- **Rendimiento.** El rendimiento de escaneo, en términos de productividad del sistema, no podrá estar limitado por el sistema, sino por las plataformas de vuelo sobre las que se instale.
- **Estabilidad.** Los desarrollos de firmware y software asociados deberán ser estables, con tasas de fallos inferiores al 0.05%.
- **Funcionalidad.** La operativa del sistema debe ser práctica y sencilla, siendo útil para trabajar en todos los escenarios para los que ha sido diseñado.

### **5.3. Diseño**

El diseño del sistema es la parte clave para obtener un producto acorde a las necesidades establecidas. Para realizar un correcto diseño se hace una división del sistema en diferentes bloques funcionales, tanto hardware como software. En concreto se consideran los siguientes grandes bloques:

- **Hardware embarcado.** Contempla todos los dispositivos hardware embarcados: sensores de captura, microcontroladores, electrónica de control y sistema de almacenamiento.
- **Hardware de comunicaciones inalámbrico.** Incluye el sistema de comunicaciones entre el sistema embarcado y la estación de tierra.
- **Firmware del sistema embarcado.** Software autoejecutable del microcontrolador que controla los sensores y el funcionamiento general del sistema.
- **Software de control del sistema embarcado.** Software de la estación de tierra para controlar de forma remota el equipo embarcado.
- **Software para post-proceso de los datos.** Software para su uso post-misión de captura para el tratamiento y la obtención de los datos proporcionados por los sensores.

El diseño se realiza bloque por bloque teniendo en cuenta las relaciones entre ellos. A continuación se profundiza en los detalles fundamentales del diseño de cada una de las partes.

#### **5.3.1. Hardware embarcado**

El hardware embarcado está definido por los siguientes sensores principales:

- Sistema Inercial Applanix APX-15
- LiDAR Velodyne VLP-16
- Cámara Sony Alpha7 o similar (de montaje opcional)
- Cámara Micasense RedEdge (de montaje opcional)

Las cámaras de montaje opcional pueden ser montadas o no a elección del usuario, pero el sistema es diseñado para su uso con una, otra o ambas a la vez.

Se realiza un estudio de las características técnicas de cada uno de los sensores a embarcar, teniendo en cuenta los principales aspectos técnicos que se definen a continuación.

- Consumo de energía, nominal y valores de pico.
- Niveles lógicos de las señales de control y entrada/salida.
- Interfaces de comunicación y conectividad.
- Protocolos de comunicación y control.

Se diseña un sistema hardware donde un microcontrolador se encarga de la gestión de todos los sensores y una tarjeta electrónica para la conexión, alimentación y comunicación entre ellos.

El microcontrolador estará conectado de forma directa e indirecta con todos los sensores a través de las interfaces de E/S que se detallan a continuación.

- Applanix APX-15.
  - Puerto Ethernet 10/100 Mbps
  - Puertos I/O digitales (Señal TTL adaptada)
- Velodyne VLP-16.
  - Puerto Ethernet 10/100 Mbps
- Cámara Sony Alpha7
  - Puerto I/O digitales. (Señal TTL adaptada)
- Cámara Micasense Red Edge
  - Puerto Ethernet 10/100 Mbps
  - Puerto I/O digitales (Señal TTL adaptada)

Las conexiones indirectas se realizan a través de la tarjeta electrónica. En esta se realizan las siguientes operaciones principales.

- Adaptación de niveles de señales entre sensores y cámaras.
- Conexión directa de sensores.
- Ruteo de comunicaciones entre sensores.
- Sistema de encendido/apagado

- Sistema de alimentación
- Interfaces hardware con usuario (leds y pulsador)

Para una comprensión sencilla se adjunta un esquema de bloques con las interfaces principales entre sensores y una imagen del layout de la tarjeta electrónica diseñada.

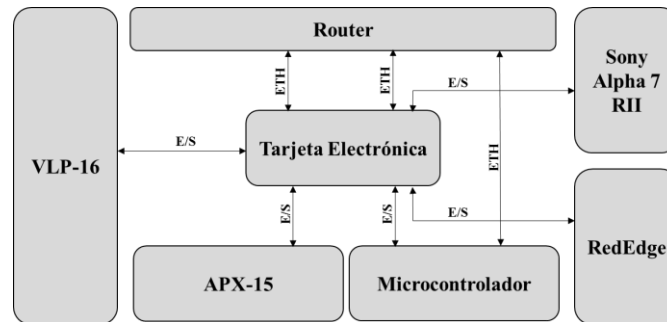


Figura 1. Diagrama de bloques del hardware

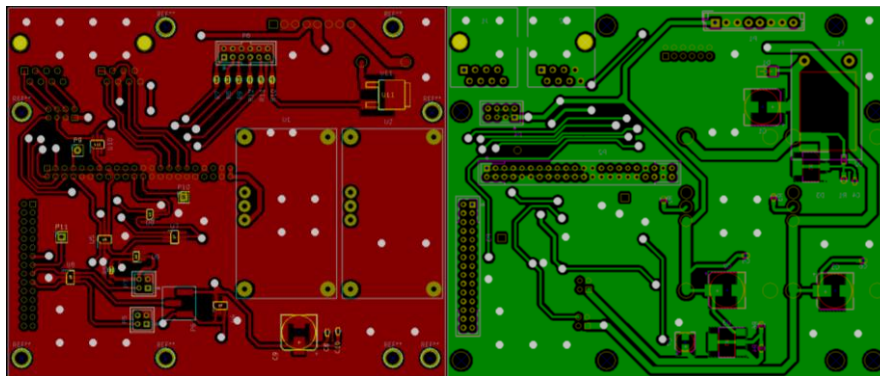


Figura 2. Layout de la tarjeta electrónica.

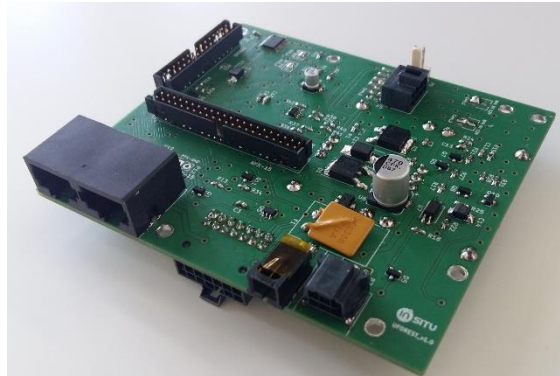


Figura 3. Tarjeta electrónica

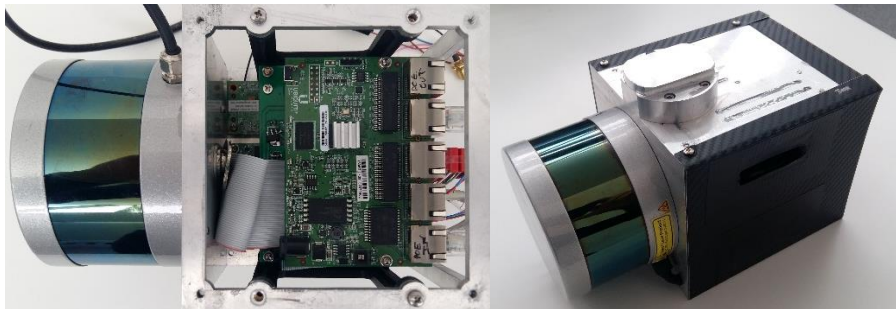


Figura 4. Vista superior del sistema con los principales componentes (izquierda) y dispositivo prototipo montado (derecha).



Figura 5. Prototipo del sistema embarcado en UAV.

### **5.3.2. Hardware de comunicaciones inalámbrico**

El hardware de comunicaciones se refiere al sistema de comunicaciones que establece un canal de comunicación entre el sistema embarcado en el UAV y la estación de control en tierra, para posibilitar su configuración y manejo remoto.

En la fase de diseño se ha tenido en cuenta la normativa relativa al uso del espectro electromagnético y se han estudiado diferentes bandas de frecuencias para establecer el canal de comunicaciones (Orden ETU/1033/2017, 2017). En este sentido, se ha considerado que la normativa es cambiante y difiere entre países, por lo que en esta etapa de diseño se marca como requisito la necesidad de tener un canal de comunicaciones basado en el protocolo Ethernet (802.3) con protocolos TCP/IP y UDP. Para ello se seleccionará un hardware adecuado que establezca el enlace de comunicaciones a través del canal y protocolo conveniente, pero de forma transparente al usuario.

En el caso del equipo diseñado, configurado para operar en Europa, se selecciona el siguiente hardware de comunicaciones:

- Estación embarcada.
  - Interfaz de red: 10/100 Mbps (802.3)
  - Interfaz de radio: 5 GHz (802.11a/n)
- Estación de tierra.
  - Interfaz de red: 10/100 Mbps (802.3)
  - Interfaz de radio: 5 GHz (802.11a/n)

Se diseña el sistema de tal forma que la interfaz radio sea transparente y el usuario únicamente vea el sistema como una conexión con protocolo 802.3.

### **5.3.3. Firmware del sistema embarcado**

El diseño del firmware del sistema embarcado es una de las partes fundamentales del sistema, es el encargado de la gestión de los sensores



embarcados, la comunicación entre ellos, la configuración y el almacenamiento de los datos.

Se hace un diseño modular, donde cada módulo gestiona comunicaciones e interfaces de cada uno de los sensores. Los módulos y funciones principales son las siguientes.

- **Módulo APX-15.** Se encarga de la gestión y configuración del sistema inercial Applanix, recepción y gestión/tratamiento de los datos en tiempo real y para post-proceso.
- **Módulo VLP-16.** Se encarga de la gestión, configuración, comprobaciones de estado y/o error y almacenamiento de la información del sistema LiDAR.
- **Módulo de comunicaciones.** Se encarga de gestionar la comunicación entre el sistema embarcado y la estación de control. A través de este módulo se establecen todas las comunicaciones, envío de datos en tiempo real y recepción de parámetros para configuraciones.
- **Módulo sensores.** Se encarga de la configuración de señales de disparo y retorno de los sensores en base a la configuración establecida por la estación de control.
- **Módulo de gestión.** Se encarga de la gestión de todos los módulos anteriores a través del lanzamiento de procesos de ejecución y establecimiento de las interfaces de comunicación entre los diferentes módulos.

Se diseña el sistema para comunicación e intercambio de datos entre los diferentes módulos las siguientes tecnologías.

- Memoria compartida.
- Semáforos.
- Colas de mensajes.

El firmware está compuesto por un único driver que se ejecuta en el microcontrolador al iniciar este y lanza el módulo de gestión. En ese momento, este módulo es el encargado de lanzar los diferentes procesos de cada uno de los módulos de forma ordenada para que el sistema funcione acorde a las especificaciones de diseño.

#### **5.3.4. Software de control del sistema embarcado**

La aplicación de escritorio para el control remoto del sistema embarcado será un programa con una interfaz gráfica de usuario (GUI, del inglés Graphical User Interface) que realiza las siguientes funciones:

- **Estación de control y telemetría.** Sirve como estación de control de telemetría de todas las variables fundamentales del sistema embarcado y control del mismo.
- **Establecer comunicación con el sistema remoto.** Se diseña de forma que el sistema remoto envíe paquetes UDP periódicamente y este software los recibe para tener información en tiempo real del sistema y representarla en la estación de telemetría.
- **Enviar comandos al sistema remoto.** Se establece comunicación mediante protocolo TCP/IP con el sistema remoto para el envío de los paquetes de comandos al sistema remoto. Se utiliza el protocolo TCP/IP orientado a conexión para garantizar la transmisión de la información.
- **Enviar configuración al sistema remoto.** Se establece la comunicación a través del protocolo TCP/IP para el envío de paquetes de configuración de sensores. Al igual que en caso anterior, se garantiza la transmisión de la información gracias al uso de TCP/IP

Se implementa como una a través de una librería dinámica (DLL) encargada de las funcionalidades y una interfaz gráfica de usuario que interactúa con el sistema a través de la librería.

### 5.3.5. Software para el post-proceso de datos

El software de post-proceso es, junto con el hardware y firmware, un elemento fundamental del sistema. Para su correcto diseño se divide en siete módulos principales:

- **Input de datos.** Recibe los ficheros directamente generados por el hardware: trayectoria (en tiempo real o post-procesada, archivo \*.out), archivos de rango y telemetría del LiDAR (archivos \*.vdf y \*.vtf)
- **Validación datos de entrada.** Se encarga de validar, formatos e integridad de los archivos de entrada.
- **Filtro de datos.** Posibilita la realización de filtrado de los datos de entrada teniendo en cuenta las siguientes características:
  - Tiempo GPS de inicio y fin.
  - Rango de distancia del LiDAR.
  - Ángulo de incidencia del LiDAR.
  - Haz interno del LiDAR
- **Calibración de sistema.** Permite editar fichero de calibración interno y aplicarla a los datos de salida.
- **Georreferenciación directa.** Módulo encargado de la georreferenciación directa de los datos de LiDAR en función del archivo de calibración y archivo de trayectoria del sistema (NGA, 2011) (Habib, Kersting, Shaker, & Yan, 2011).
- **Salida de datos.** Permite seleccionar formato de salida de datos.
- **Interfaz gráfica.** Permite el uso amigable del software por parte de un usuario.

La implementación se realizará con la creación de una librería dinámica (DLL) en C++ con una clase para cada uno de los módulos descritos y una interfaz gráfica implementada con el framework de Qt.

## **5.4. Validación y resultados**

Una vez implementado las diferentes partes del sistema, hardware, firmware y software, se procede al proceso de validación para certificar el cumplimiento de los requisitos establecidos y la validación de los resultados del producto acorde a las especificadores fijadas inicialmente.

### **5.4.1. Validación del sistema**

Se realiza el proceso de validación del software y firmware por un lado y del hardware por otro.

- **Software y firmware.** Se validan las clases y funciones tanto del software de control y post-proceso como del firmware que controla el hardware de captura. Para la realización de la validación se realizan las siguientes pruebas:
  - **Pruebas unitarias.** Se realizan sobre cada clase individualmente.
  - **Prueba de integración.** Se realiza sobre cada conjunto de clases integradas.
- **Hardware.** Se realiza la comprobación de las diferentes señales del hardware mediante generador de señales y osciloscopio para verificar el correcto comportamiento de ellas. Se presta especial atención a los siguientes elementos:
  - **Señales.** Niveles lógicos acordes a entradas y salidas.
  - **Alimentación.** Comprobación de la correcta regulación de las diferentes tensiones de alimentación en función de la carga.
  - **Velocidades puerto.** Validación de las velocidades de los diferentes puertos de comunicación.

Una vez validados de forma individual software, firmware y hardware e integrado este en un único conjunto se realiza el test del sistema conjunto a todos los elementos.

En el **test del sistema** se realizan comprobaciones funcionales del conjunto de utilidades para las que el sistema está diseñado. Las principales se describen a continuación:

- Comunicación entre todos los módulos y sensores.
- Control remoto, incluidas todas las funcionalidades de configuración, inicio y parada de captura.
- Almacenamiento de datos.
- Control de sensores.
- Fiabilidad y robustez del sistema.

Además de validar el funcionamiento correcto del sistema, en los test del sistema se fuerzan errores tanto del hardware como del software y firmware para validar el correcto funcionamiento en casos de error provocados por fallos en el hardware de los sensores conectados. De esta forma se asegura la funcionalidad aún incluso con fallas del hardware del equipo.

#### 5.4.2. Calibración y Resultados

Antes de la realización del **test de aceptación** del sistema se realiza la calibración del equipo. El proceso de calibración es fundamental para lograr las precisiones y exactitudes requeridas, por este motivo se desarrolla un protocolo de calibración (Yuan, y otros, 2014). Una vez calibrado el equipo, se realiza un vuelo sobre una zona de prueba con elementos de control sobre los que se valida la precisión y exactitud del equipo.

El **protocolo de calibración** se realiza sobre el conjunto LiDAR-IMU, ambos son equipos que permanecen anclados de forma solidaria y permanente, siendo los componentes principales del sistema. La calibración de las cámaras no es llevada a cabo, pues estas no están ancladas de forma permanente al conjunto LiDAR-IMU, siendo esta calibración responsabilidad del operador cada vez que realice una captura con estos equipos instalados. En (Wallace, Lucieer, Watson, & Turner, 2012) recurren a imágenes de vídeo de alta resolución para la calibración

del sistema, pero este procedimiento resta flexibilidad al requerir la integración de la cámara de vídeo en todos los vuelos de adquisición.

Para la correcta calibración del conjunto LiDAR-IMU se deben tener en cuenta los seis parámetros fundamentales de traslación y rotación.

Los parámetros de traslación se obtienen de forma directa del diseño mecánico, pues la precisión de montaje es significativamente inferior (2-3 mm) a la precisión del sensor inercial (2-5 cm RMSE) y el propio LiDAR (3 cm RMSE).

Los parámetros de rotación (roll, pitch y yaw) entre el sistema de referencia del LiDAR y la IMU se obtienen mediante un vuelo de calibración de la siguiente forma:

1. Roll: vuelo sobre superficies planas en la misma dirección y sentidos opuestos
2. Pitch: vuelo sobre superficies en pico (tejados) en sentido transversal a este, en una única dirección y sentidos opuestos.
3. Yaw: vuelos en dos direcciones separadas 50 metros y paralelas entre si y vuelos sobre una misma zona con estructuras rectangulares con pasadas a 90°.

De este modo, una elección adecuada de los escenarios de calibración asegura el buen resultado de esta, en contraste con metodologías como las de (Guo, y otros, 2017), en la que los planos de calibración dependen de la correcta ejecución de giros del LiDAR en el proceso.

Se finaliza la calibración del equipo calculando los offsets angulares en cada uno de estos parámetros y se almacenan en el fichero de configuración del hardware.

La validación del equipo se realiza mediante un vuelo sobre una superficie de 5 Ha con puntos de control distribuidos por todo el área. Los puntos de control son medidos en RTK contra la misma base que se realiza el post-proceso de los datos del sistema. Para la validación se realiza el siguiente procedimiento, que incluye la comprobación de la exactitud de las coordenadas en los 3 ejes, necesaria para asegurar la calidad de productos tanto en tres como en dos dimensiones (Glennie, 2008):

1. Se realiza post-proceso de la trayectoria.
2. Se genera nube de puntos de la zona de vuelo.
3. Se genera MDE del área.
4. Se comprueba exactitud en cota del punto de control y el MDE.
5. Se comprueba exactitud en planimetría en punto de control (mediante ajuste a centro de circunferencia ayudado por intensidad del retorno).

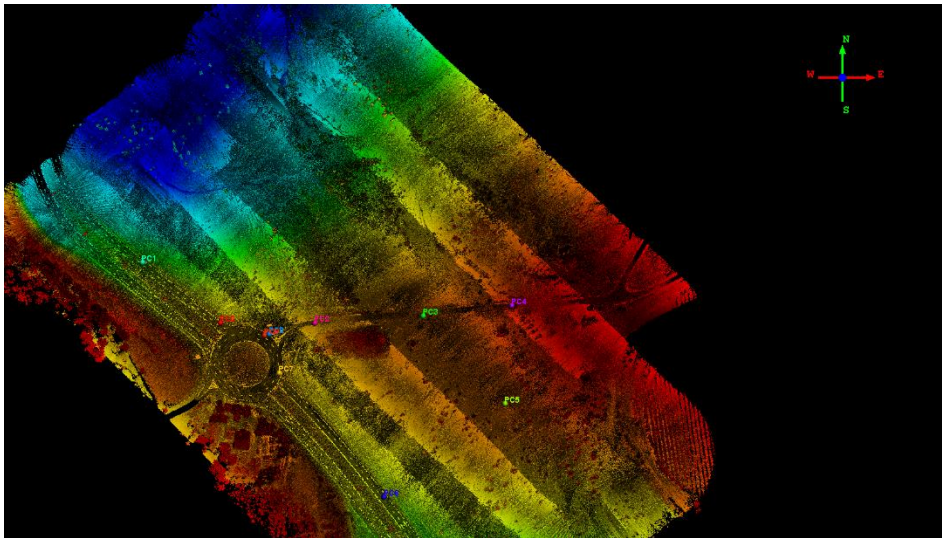


Figura 6. Vista en planta superficie de validación con puntos de control.

A continuación se muestra la tabla con las precisiones obtenidas en cada punto.

	TRIMBLE R8			LIDAR		
	X	Y	Z	X	Y	Z
PC0	544892,426	4661104,807	118,518	544892,443	4661104,775	118,505
PC1	544824,309	4661157,050	115,321	544824,316	4661157,088	115,344
PC2	544974,075	4661104,604	119,085	544974,053	4661104,631	119,106
PC3	545067,756	4661110,762	121,200	545067,796	4661110,762	121,241
PC4	545144,140	4661119,772	123,302	545144,167	4661119,798	123,290
PC5	545138,449	4661035,225	121,496	545138,534	4661035,233	121,534
PC6	545033,744	4660953,897	116,531	545033,761	4660953,889	116,537
PC7	544943,253	4661061,400	118,841	544943,191	4661061,404	118,895
PC8	544934,640	4661094,936	118,616	544934,689	4661094,934	118,674
PC9	544930,559	4661094,051	118,751	544930,570	4661094,031	118,766

Tabla 1. Precisión obtenida en puntos de control.

De acuerdo con los datos anteriores se obtiene un error medio de 5.2 cm y una desviación estándar de 2.5 cm.

En el caso de estudio, se obtiene una densidad de 330 puntos/m<sup>2</sup> con una velocidad de 5 m/s y altura aproximada del vuelo de 45 metros AGL.

De los estudios realizados sobre la calidad del dato del sistema se puede concluir que el sistema cumple con las especificaciones para las que ha sido diseñado siendo un equipo con un elevado potencial para captura masiva de nubes de puntos 3D.

A continuación, se muestran capturas de nubes de puntos obtenidas con el sistema desarrollado en distintos ámbitos de aplicación.

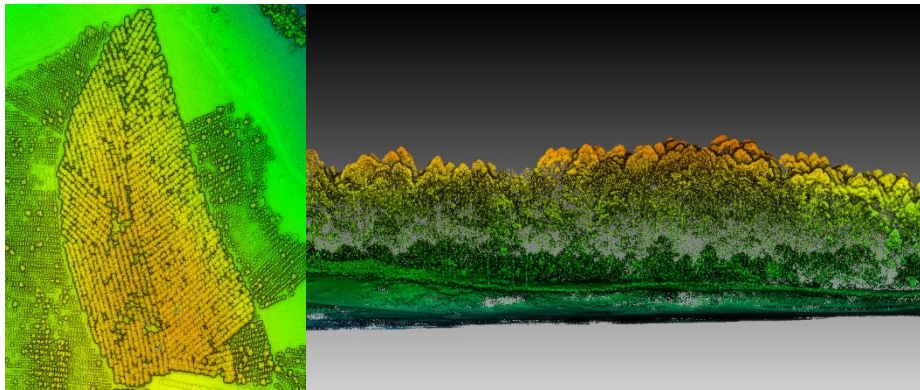


Figura 7. Nube de puntos de superficie forestal. Vistan en planta (izquierda) y perfil (derecha).

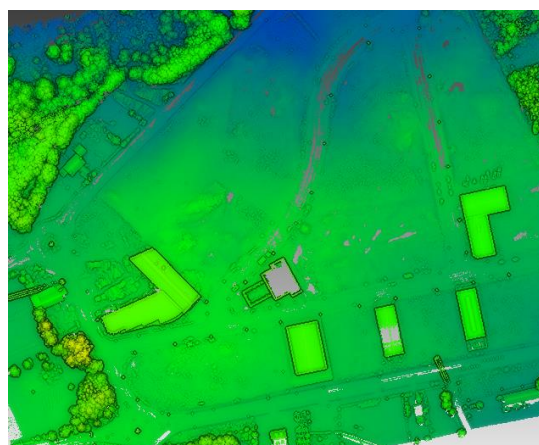


Figura 8. Nube de puntos de zona semiurbana. Vistan en planta.



# CAPÍTULO VI

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO



## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### 6.1. Conclusiones

Esta Tesis Doctoral aborda el uso de diferentes tecnologías de captura de información geoespacial desde el punto de vista aéreo, sobre vehículos no tripulados, para desarrollar nuevas técnicas de procesado y tratamiento de datos, ampliando las posibilidades de utilización de estos instrumentos y creando nuevas utilidades. Los procedimientos metodológicos desarrollados, así como los resultados del trabajo de investigación, han sido publicados en cuatro artículos de revistas científicas. Asimismo, los diferentes elementos necesarios y diseñados para el desarrollo de la investigación han sido sujeto de patentes de invención.

Además, resultado del éxito del trabajo de investigación inicial, se ha desarrollado un equipo comercial de captura de datos LiDAR de bajo coste, actualmente introducido en el mercado.

En este capítulo se realiza un resumen de los principales resultados obtenidos a lo largo del trabajo de investigación, divididos entre las dos etapas investigadora e industrial, así como una breve descripción de las líneas de trabajo futuro para los próximos años.

#### 6.1.1. Etapa científico-investigadora

A continuación se enumeran los principales resultados obtenidos durante la etapa investigadora de esta Tesis Doctoral.

- Durante el trabajo de investigación, se ha adquirido un amplio conocimiento del funcionamiento de los vehículos aéreos no tripulados, tanto referente a las principales características técnicas, como a sus ventajas e inconvenientes. Este conocimiento es evidenciado, tanto en los artículos científicos publicados, en donde

se adaptan e integran sobre uno de estos vehículos, un conjunto de sensores para la obtención de datos de diversa tipología en diferentes entornos de trabajo, como en las patentes y modelos de utilidad diseñados a lo largo del período de investigación.

- En el campo de la termografía, se adquiere un amplio conocimiento del funcionamiento de los sensores termográficos, tanto los principios físicos que permiten que estos capten la radiación en la banda del infrarrojo térmico, como de su funcionamiento interno y de los principios matemáticos necesarios para digitalizar y trabajar con esta información. Además, en cuanto al tratamiento de los datos, se desarrollan nuevas técnicas de procesado que, usando UAVs como plataforma de captura, permiten su uso en nuevos ámbitos de trabajo. Este conocimiento, queda evidenciado en el capítulo II de esta Tesis Doctoral, en el desarrollo del artículo científico publicado.
- En el campo de la imagen RGB para su uso con técnicas fotogramétricas, se diseñan metodologías flexibles de obtención de datos de diferentes tipologías de estructuras con UAVs para generación de modelos 3D de alta resolución y precisión, evidenciadas en el capítulo III de esta Tesis Doctoral, donde en diferentes escenarios de uso, se generan datos de calidad gracias a la optimización del movimiento del sensor y del diseño del vuelo del UAV realizada fruto del conocimiento de la técnica.
- En la línea de trabajo fotogramétrica, se desarrollan novedosas técnicas de tratamiento de datos que permiten el uso de equipos de bajo coste, basados en cámaras RGB y UAVs, para aplicaciones de alto valor añadido, como son los geo-procesos sobre software SIG, en el capítulo III.1, y la medida de movimientos en escolleras de diques de abrigo, en el capítulo III.2, ambas probadas y validadas en escenarios reales.
- En la línea de trabajo con sensores LiDAR, se adquiere un amplio conocimiento tanto de los principios físicos de funcionamiento del sensor como de la integración necesaria para su uso en plataformas móviles. Esto último centrado en los sensores necesarios y en los

problemas matemáticos para obtener la georreferenciación directa, todo reflejado en el capítulo IV de esta Tesis Doctoral.

- En líneas generales, a lo largo del trabajo investigador de esta Tesis Doctoral, se realizan desarrollos orientados a dar valor añadido a datos obtenidos por diferentes sensores montados en UAVs, incrementando los campos de aplicación tanto de las plataformas aéreas no tripuladas como de los datos multisensoriales adquiridos desde las mismas, con novedosos protocolos de vuelo para adquisición de datos, y novedosos puntos de vista para la información.

Fruto de los resultados obtenidos durante el período de investigación de esta Tesis Doctoral, podemos obtener las siguientes conclusiones:

- El uso de UAVs ofrece novedosos puntos de vista para la obtención de datos geomáticos pero también introduce ciertos inconvenientes, tales como carga de pago limitada, presencia de vibraciones, particularidades de desplazamiento, etc; que deben ser salvados en función del sistema montado mediante soluciones específicas para poder aprovechar al máximo los datos obtenidos por este medio.
- La fotogrametría ha sido una de las primeras técnicas aplicadas desde plataformas UAV, siendo la que presenta menos limitaciones dado el avance de la tecnología de los sensores fotogramétricos, que permiten adquirir información de elevada resolución incluso a grandes distancias. Sin embargo, los productos fotogramétricos pueden verse perjudicados por las vibraciones en la plataforma UAV, que hacen que los bordes de los elementos no se adquieran con claridad en la imagen, afectando de este modo a la información geométrica procesada, tanto en planimetría como tridimensional.
- La adquisición de imágenes termográficas desde UAV abre el abanico de posibilidades de aplicación de la técnica, gracias a la posibilidad de disponer de datos de temperaturas desde un punto de vista novedoso. Sin embargo, las vibraciones del propio UAV pueden introducir imprecisiones en las imágenes debido al alto

tiempo de exposición necesario, especialmente en la definición de márgenes, dificultando su aplicación para la explotación geométrica e incluso medición puntual de temperatura. Asimismo, debe prestarse especial atención a la altura de vuelo y la resolución espacial necesaria en las termografías para la aplicación, dado que la baja resolución de las cámaras termográficas con respecto de las cámaras fotográficas hace que las alturas de vuelo se vean limitadas, y con ello, se incrementa el tiempo necesario de vuelo.

- La integración de sensores LiDAR en plataformas UAV constituye la solución tecnológica que cubre el hueco entre la adquisición de datos LiDAR terrestre y la adquisición con LiDAR aéreo, pues supone una adquisición desde un punto de vista cenital, pero a escala asimilable al láser escáner terrestre. No obstante, la adquisición con sensores LiDAR desde UAV presenta en la actualidad una importante limitación con la carga de peso, que hace que los sensores LiDAR integrables en esta plataforma no presenten una precisión y resolución espaciales comparables a sus homólogos terrestres. Asimismo, debe prestarse especial atención a los datos de posición adquiridos, mediante antenas GNSS y unidades inerciales, pues la precisión y exactitud de la trayectoria son esenciales en el caso de generación de nubes de puntos tridimensionales a partir de los datos adquiridos.
- Para todas las técnicas, debe prestarse atención a factores ambiente, tales como la posición del sol en el momento de la adquisición de datos, pues la incidencia de radiación solar directa en la superficie en estudio puede provocar incidencias tales como: (1) invalidez de los valores de temperatura medidos con la cámara termográfica; (2) relación señal a ruido del haz del sensor LiDAR baja, dando como resultado unas coordenadas erróneas para las zonas afectadas; (3) sobreexposición de la imagen adquirida con cámara fotogramétrica, perdiendo información RGB de la superficie afectada.

En general, el uso de cada técnica sobre UAV tiene sus particularidades y limitaciones que pueden ser perfectamente descubiertas y salvadas mediante un amplio conocimiento de todo el proceso, desde la obtención

del dato, pasando por el tratamiento y finalizando con la presentación del resultado final.

### **6.1.2. Etapa técnico-industrial**

En esta sección se presentan las principales resultados obtenidas durante la última etapa de industrialización y desarrollo de producto de esta Tesis Doctoral.

- En relación al conocimiento adquirido en la etapa investigadora, este se pone en práctica a través del desarrollo y posterior puesta en mercado de un equipo LiDAR para UAV de bajo coste, pasando por todas las fases de desarrollo de producto.
- Se consigue dar el difícil salto de pasar de prototipo de laboratorio a producto final, siendo este totalmente funcional y con un desarrollo tal que posibilita su uso por cualquier operario con una formación básica.
- Se aplica el conocimiento adquirido para conseguir la integración de diferentes tecnologías, utilizando sensores de bajo coste y reduciendo los costes de integración, haciendo que su funcionamiento sea sólido y robusto, y permitiendo la comercialización del equipo.
- Se valida una metodología de calibración del equipo totalmente funcional que permite de forma ágil, la calibración de cada unidad montada.

Como producto de esos resultados y del trabajo realizado en esta etapa podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Las innumerables casuísticas de un escenario real que, en un contexto de investigación rara vez se contemplan, hace que la dificultad de trasladar los desarrollos de investigación a un producto de mercado sea muy alta y conlleve un esfuerzo que pocas veces obtiene sus resultados.

- El sistema desarrollado está a la vanguardia en cuanto a sistemas de mapeado LiDAR para UAV. La evolución de este equipo, y otros equipos para UAV, deberá pasar por la reducción de peso y volumen de forma que se facilite la instalación en plataformas con menor capacidad de carga de peso o directamente tener un aumento de la autonomía en las misiones.
- El desarrollar un producto del que no se tienen unos valores de referencia sobre cómo han de ser sus resultados, por ejemplo valores de precisión en coordenadas absolutas, hace que todos los desarrollos se centren en intentar mejorar unos resultados que probablemente no puedan ser mejorados, bien por limitaciones de los equipos utilizados, bien por otros factores, provocando una dificultad para establecer el límite hasta donde el sistema puede llegar. El buscar este límite cuando, como es el caso depende de multitud de factores, hace que sea de vital importancia un análisis escrupuloso de cada una de las fuentes de error y sus características.

Como conclusión final y en líneas generales, se puede afirmar que la dificultad suele encontrarse en hacer funcionar de forma conjunta y robusta muchas pequeñas funcionalidades, métodos o tareas, a veces muy simples pero que, en conjunto con el resto, suelen verse afectadas por infinidad de casuísticas que hay que saber detectar, contemplar y afrontar para desarrollar un producto fiable, robusto y eficiente.



## 6.2. Trabajo Futuro

Después del trabajo realizado durante los años en los que se ha desarrollado esta Tesis Doctoral, se pueden abrir nuevas líneas de investigación y desarrollo que complementen este trabajo realizado y, en algunos casos, amplíen el mismo. En este sentido, a continuación se hace una exposición de las principales temáticas que se consideran de interés para su desarrollo futuro.

En primer lugar, se considera necesario incidir con mayor profundidad en el conocimiento de la teoría de la fotogrametría y, concretamente, en las técnicas de georreferenciación directa. En los trabajos abordados durante este proyecto de Tesis Doctoral se ha utilizado la georreferenciación basada en puntos de control sobre el terreno. Se considera ahora de utilidad el posibilitar la georreferenciación directa de cara a ampliar la funcionalidad del equipo LiDAR de bajo coste, con la calibración de la cámara RGB y, de esta forma, facilitar la reducción de costes en aplicaciones que no requieran de la máxima precisión posible.

En relación a las técnicas de calibración, a lo largo de este trabajo de Tesis Doctoral, se han llevado a cabo calibraciones de los sensores utilizados, generalmente calibraciones geométricas de lentes, desplazamientos de sistemas de referencia y desviaciones angulares, en general a través de metodologías manuales o semi-manuales. En relación con esto, concretamente con el equipo desarrollado, la técnica de calibración semi-manual utilizada debería ser objeto de automatización para, una vez capturados los datos en un escenario de calibración, los algoritmos de forma autónoma calculasen las desviaciones angulares de los diferentes sistemas de referencia necesarios permitiendo realizar este proceso de forma desasistida. Del mismo modo, la inclusión de la cámara RGB propuesta y el uso de la georreferenciación directa, debería ser abordado para obtener una herramienta de calibración automática que facilite este trabajo.

Por otro lado, la continua evolución de los sistemas de cartografiado, están derivando hacia el montaje de sistemas híbridos que permiten su funcionamiento montados en diferentes plataformas de captura, tanto

aéreas y terrestres como marinas. En este sentido, la evolución natural del sistema LiDAR desarrollado para su montaje en UAV deberá estar enfocada a su montaje en este tipo de plataformas permitiendo incluso su funcionamiento en interiores o zonas sin cobertura GNSS, dotándolo de funcionalidades SLAM. De esta forma, se obtendría un producto versátil, manteniendo la filosofía de bajo coste, y que resolvería la mayoría de las necesidades del mercado actual y en los próximos años.

Además de la hibridación, las técnicas de fusión y combinación de datos de diferentes sensores están ampliamente demandadas, por lo que a nivel aplicación, sería de interés el desarrollo de técnicas que permitan extraer información combinada de la fusión de sensores como el LiDAR, las cámaras RGB o las cámaras multiespectrales, actualmente ya integrados en el equipo a nivel hardware, pero sin desarrollar metodologías para el uso combinado de sus datos.

## REFERENCIAS



## 7. REFERENCIAS

- Agogino, A., Parker, C., & Tumer, K. (2012). Evolving large scale UAV communication system. *Proceedings of the 14th annual conference on Genetic and evolutionary computation* , 1023-1030.
- Akturk, E., & Oguz Altunel, A. (2018). Accuracy assessment of a low-cost UAV derived digital elevation model (DEM) in a highly broken and vegetated terrain. *Measurement*.
- Arias, Pedro. (2003). *Fotogrametría de objeto cercano por métodos simples. Aplicación al estudio de las construcciones agroindustriales tradicionales*. España: Universidad de Vigo.
- Baek, D., Won Seo, I., Song Kim, J., & Nelson, J. M. (2019). UAV-based measurements of spatio-temporal concentration distributions of fluorescent tracers in open channel flows. *Advances in Water Resources*.
- Bristeau, P.-J., Callou, F., Vissière, D., & Petit, N. (2011). The Navigation and Control technology inside the AR.Drone micro UAV. *IFAC Proceedings Volumes*, 1477-1484.
- Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal - AESA. (2017). *Marco Regulatorio para Operaciones con Drones*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- Dydek, Z., Annaswamy, A., & Lavrestky, E. (2013). Adaptive Control of Quadrotor UAVs: A Design Trade Study With Flight Evaluations. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1400-1406.

- Eisenbeiss, H. (2004). A Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System Overview and image Acquisition. *International Workshop on "Processing and Visualization using Hig-Resolution Imagery"*, 11.
- Gebrehiwot, A., Hashemi-Beni, L., Thompson, G., Kordjamshidi, P., & Langan, T. E. (2019). Deep Convolutional Neural Network for Flood Extent Mapping Using Unmanned Aerial Vehicles Data. *Sensors*.
- Glennie, C. (2008). Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. *Journal of Applied Geodesy*, 147-157.
- Guo, Q., Su, Y., Hu, T., Zhao, X., Wu, F., & Li, Y. (2017). An integrated UAV-borne lidar system for 3D habitat mapping in three forest ecosystems across China. *International Journal of Remote Sensing*, 2954-2972.
- Guo, Y., Senthilnath, J., Wu, W., Zhang, X., Zeng, Z., & Huang, H. (2019). Radiometric Calibration for Multispectral Camera of Different Imaging Conditions Mounted on a UAV Platform. *Sustainability*.
- Habib, A. F., Kersting, A. P., Shaker, A., & Yan, W.-Y. (2011). Geometric Calibration and Radiometric Correction of LiDAR Data and Their Impact on the Quality of Derived Products. *Sensors*.
- Hamrelius, T. (1992). Accurate temperature measurement in thermography. *QIRT*, 39-45.
- Hernández-López, D., Felipe-García, B., González-Aguilera, D., & Arias-Pérez, B. (2013). An Automatic Approach to UAV Flight Planning and Control for Photogrammetric Applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 87-98.
- Jaud, M., Letortu, P., Théry, C., Grandjean, P., Costa, S., Maquaire, O., . . . Le Dantec, N. (2019). UAV survey of a coastal cliff face – Selection of the best imaging angle. *Measurement*.

- Johansen, T., Cristofano, A., Sorensen, K., Hansen, J., & Fossen, T. (2015). On estimation of wind velocity, angle-of-attack and sideslip angle of small UAVs using standard sensors. *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 15291654.
- Korchenko, A. G., & Illyash, O. S. (2013). The generalized classification of Unmanned Air Vehicles . *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)* , 14030141 .
- Lagüela, S., Díaz-Vilariño, L., & Roca, D. (2016). Infrared Thermography: Fundamentals and Applications. In B. Riveiro, & M. Solla, *Non-destructive techniques for the evaluation of structures and infrastructures*. Taylor & Francis.
- Lagüela, Susana. (2014). *Geomatic and Thermographic techniques for the inspection and diagnosis of historic structures towards their introduction in Integrated Management Systems*. España: Universidad de Vigo.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2006). *Close Range Photogrammetry - Principles, techniques and applications*. Whittles Publishing.
- Mademlis, I., Mygdalis, V., Nikolaidis, N., & Pitas, I. (2018). Challenges in Autonomous UAV cinematography: an overview. *IEEE*.
- Martinez, O. A., & Cardona, M. (2018). State of the Art and Future Trends on Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE*.
- McIntosh, G., & Huff, R. (2018). Emissivity considerations for thermographic fieldwork: why table values don't work . *Thermosense: Thermal Infrared Applications XL*, 1066107.
- Ministerio de Fomento. (2018). *Plan estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021*.

- NGA. (2011). *Light Detection and Ranging (LIDAR) Sensor Model Supporting Precise Geopositioning*.
- Orden ETU/1033/2017. (2017). *BOE*.
- Padró, J.-C., Carabassa, V., Balagué, J., Brotons, L., Alcañiz, J. M., & Pons, X. (2018). Monitoring opencast mine restorations using Unmanned Aerial System (UAS) imagery. *Science of the Total Environment*.
- Pastor, E., López, J., & Royo, P. (2007). UAV Payload and Mission Control Hardware/Software Architecture. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 3-8.
- Pastor, E., López, J., & Royo, P. (2007). UAV Payload and Mission Control Hardware/Software Architecture . *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 3-8.
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*.
- Rajic, N., & Street, N. (2015). A performance comparison between cooled and uncooled infrared detectors for thermoelastic stress analysis. *Quantitative InfraRed Thermography*, 207-221.
- Real Decreto 1036/2017. (2017). *BOE*.
- Riveiro, B., González-Jorge, H., Conde, B., & Puente, I. (2016). Laser Scanning Technology: Fundamentals, Principles and Applications in Infrastructure. In B. Riveiro, & M. Solla, *Non-destructive techniques for the evaluation of structures and infrastructures*. Taylor & Francis.
- Roca, D., Armesto, J., Lagüela, S., & Díaz-Vilariño, L. (2014). LIDAR-EQUIPPED UAV FOR BUILDING INFORMATION MODELLING . *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 523-527.



- 
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used . *Remote Sensing*, 1606.
- Sun, K.-C., Zeng, Q.-h., Liu, J.-y., & Dai, Y.-t. (2018). Real-time estimation of atmospheric disturbance for unmanned helicopter based on multi-source navigation data . *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)* , 17823246 .
- Tulldahl, H. M., & Larsson, H. (2014). Lidar on small UAV for 3D mapping . *Proceedings Volume 9250, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VIII; and Military Applications in Hyperspectral Imaging and High Spatial Resolution Sensing II*, 925009.
- van der Sluijs, J., Kokelj, S. V., Fraser, R. H., Tunnicliffe, J., & Lacelle, D. (2018). Permafrost Terrain Dynamics and Infrastructure Impacts Revealed by UAV Photogrammetry and Thermal Imaging. *Remote Sensing*.
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., & Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing*, 1519-1543.
- Yuan, F., Li, G., Li, D., Qi, Z., Qiu, W., & Tan, J. (2014). Airborne LIDAR borsight error calibration based on surface coincide. *IOP Conf. Series: Earth and Enviromental Science*. IOP Publishing.
- Zhu, Y., Wu, Z., Park, Y., Fan, X., Bai, D., Zong, P., . . . Ahn, K.-H. (2019). Measurements of atmospheric aerosol vertical distribution above North China Plain using hexacopter. *Science of the Total Environment*.
-



# APÉNDICE A

## INDEXACIÓN Y FACTOR DE IMPACTO DE LAS PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



## INDEXACIÓN Y FACTOR DE IMPACTO DE LAS PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

### Artículo I:

- *Aerial Thermography from Low Cost UAV for the Generation of Thermograpich Digital Terrain Models*

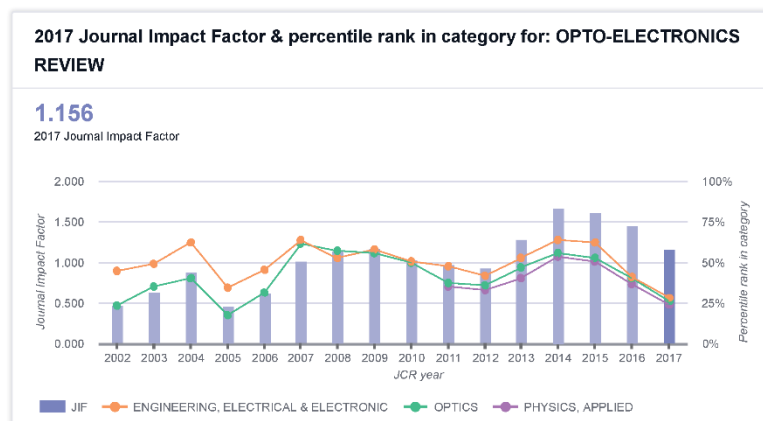
Revista:	<b>Opto-Electronics Review</b>
Editorial	<b>Elsevier</b>
ISSN:	<b>1230-3402</b>
Factor de impacto (2014):	<b>1.667</b>
Ranking:	<b>90/249 (Engineering, Electrical &amp; Electronic)</b>
Cuartil:	<b>Q2</b>

InCites Journal Citation Reports

Page 1 of 1

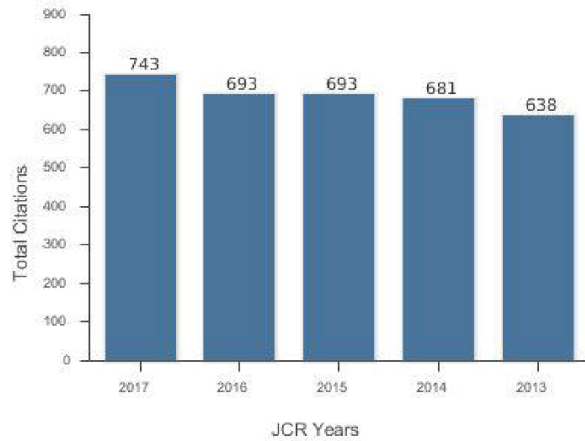


2017 Journal Performance Data for: OPTO-ELECTRONICS REVIEW



Journal Profile: OPTO-ELECTRONICS REVIEW

Essential Science Indicators : Total Citations Graph



Journal Citation Report : Impact factor

JCR Year	ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC			OPTICS			PHYSICS, APPLIED		
	Rank	Quartile	JIF Percentile	Rank	Quartile	JIF Percentile	Rank	Quartile	JIF Percentile
2017	187/260	Q3	28.269	70/94	Q3	26.064	112/146	Q4	23.630
2016	155/262	Q3	41.031	56/92	Q3	39.674	95/148	Q3	39.149
2015	98/257	Q2	62.062	43/90	Q2	52.776	73/145	Q3	50.000
2014	90/249	Q2	64.058	39/87	Q2	55.747	68/144	Q2	53.125
2013	119/248	Q2	52.821	45/83	Q3	46.386	82/136	Q3	40.674
2012	142/243	Q3	41.770	52/80	Q3	35.625	87/128	Q3	32.422
2011	130/245	Q3	47.143	50/79	Q3	37.342	82/125	Q3	34.800
2010	123/247	Q2	50.405	40/78	Q3	49.358	NA	NA	NA
2009	104/248	Q2	57.927	32/71	Q2	55.634	NA	NA	NA
2008	109/229	Q2	52.620	28/64	Q2	57.031	NA	NA	NA
2007	83/227	Q2	63.656	25/64	Q2	61.719	NA	NA	NA
2006	114/206	Q3	44.903	39/58	Q3	31.250	NA	NA	NA
2005	137/208	Q3	34.375	46/55	Q4	17.273	NA	NA	NA
2004	80/209	Q2	61.962	33/54	Q3	39.815	NA	NA	NA
2003	106/205	Q3	48.537	35/53	Q3	34.968	NA	NA	NA
2002	114/203	Q3	44.089	42/54	Q4	23.148	NA	NA	NA

Essential Science Indicators : Total Citations

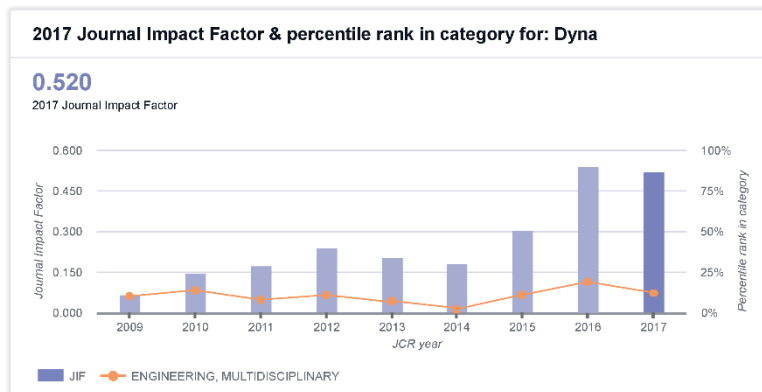
JCR Year	ENGINEERING
2016	547/861-Q3
2017	577/867-Q3
2012	432/827-Q3
2013	440/837-Q3
2014	451/838-Q3
2015	486/850-Q3

**Artículo II:**

- *Geometric landslide analysis based on UAV platforms and Geographical Information Systems processing: Xunqueira slope, Spain*

Revista:	<b>Dyna</b>
Editorial	<b>Federación Asociaciones Ingenieros Industriales España</b>
ISSN:	<b>0012-7361</b>
Factor de impacto (2016):	<b>0.541</b>
Ranking:	<b>70/85 (Engineering, Multidisciplinary)</b>
Cuartil:	<b>Q4</b>

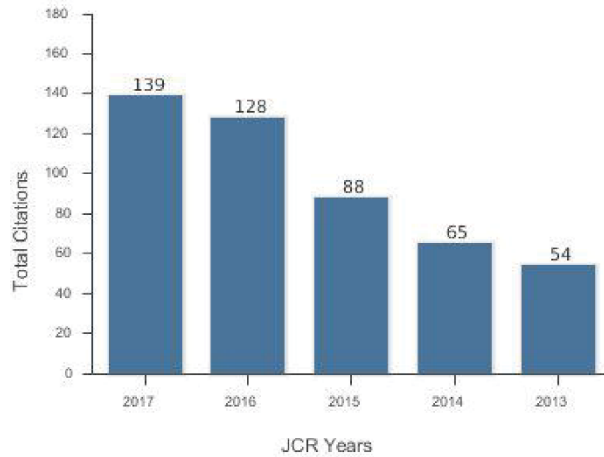
2017 Journal Performance Data for: Dyna



InCites Journal Citation Reports Clarivate Analytics

Journal Profile: Dyna

Essential Science Indicators : Total Citations Graph



Journal Citation Report : Impact factor

JCR Year	ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY		
	Rank	Quartile	JIF Percentile
2017	76/86	Q4	12.209
2016	70/85	Q4	18.235
2015	77/85	Q4	10.000
2014	84/85	Q4	1.785
2013	82/87	Q4	6.322
2012	81/90	Q4	10.558
2011	84/90	Q4	7.222
2010	78/87	Q4	13.218
2009	72/79	Q4	9.484

Essential Science Indicators : Total Citations

JCR Year	ENGINEERING
2016	813/891-Q4
2017	831/897-Q4

JCR Year	ENGINEERING
2012	772/827-Q4
2013	793/837-Q4
2014	787/838-Q4
2015	804/850-Q4



**Artículo III:**

- *UAV Photogrammetry application to the monitoring of rubble mound breakwaters*

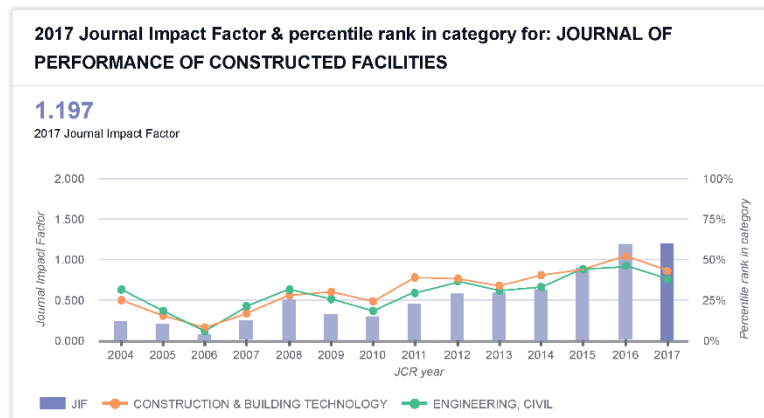
Revista:	<b>Journal of Performance of Constructed Facilities</b>
Editorial	<b>ASCE</b>
ISSN:	<b>0887-3828</b>
Factor de impacto (2016):	<b>1.192</b>
Ranking:	<b>30/61 (Construction &amp; Building Technology)</b>
Cuartil:	<b>Q2</b>

InCites Journal Citation Reports

Page 1 of 1



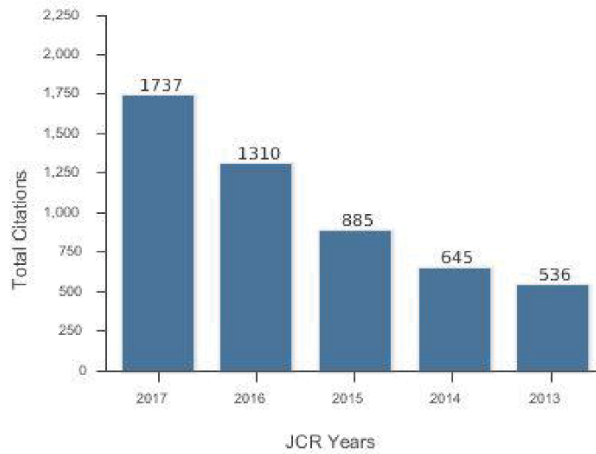
2017 Journal Performance Data for: JOURNAL OF PERFORMANCE OF CONSTRUCTED FACILITIES



InCites Journal Citation Reports Clarivate Analytics

Journal Profile: JOURNAL OF PERFORMANCE OF CONSTRUCTED FACILITIES

Essential Science Indicators : Total Citations Graph



Journal Citation Report : Impact factor

JCR Year	CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY			ENGINEERING, CIVIL			
	Rank	Quantile	JIF Percentile	Rank	Quantile	JIF Percentile	
2017	36/82	Q3	42.742	80/128	Q3		37.891
2016	30/51	Q2	51.839	88/125	Q3		46.000
2015	35/81	Q3	43.443	71/126	Q3		44.048
2014	36/59	Q3	39.831	85/125	Q3		32.400
2013	39/58	Q3	33.621	87/124	Q3		30.242
2012	36/57	Q3	37.719	78/122	Q3		36.475
2011	35/56	Q3	38.393	84/118	Q3		29.237
2010	41/53	Q4	23.565	95/115	Q4		17.828
2009	35/49	Q3	29.582	80/106	Q4		25.000
2008	28/38	Q3	27.632	63/91	Q3		31.319
2007	29/34	Q4	16.176	71/89	Q4		20.787
2006	31/33	Q4	7.576	79/83	Q4		5.422
2005	27/31	Q4	14.916	66/69	Q4		16.125
2004	24/31	Q4	24.194	55/79	Q3		31.013

JCR Year	ENGINEERING
2016	422/881-Q2
2017	399/807-Q2
2012	476/827-Q3
2013	474/837-Q3
2014	468/838-Q3
2015	436/850-Q3

**Artículo IV:**

- *Novel aerial 3D mapping system based on UAV platforms and 2D laser scanners*

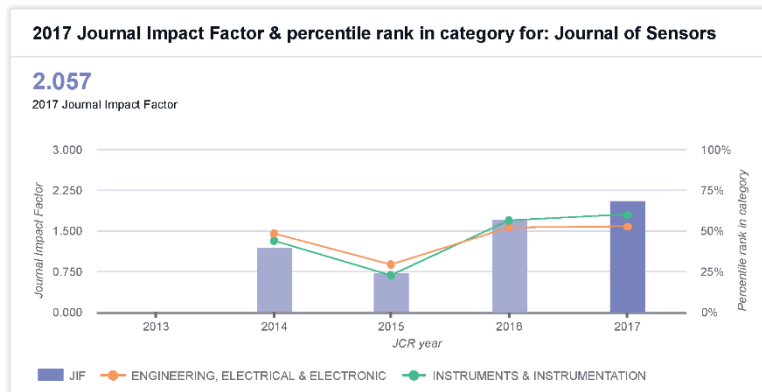
Revista:	<b>Journal of Sensors</b>
Editorial:	<b>Hindawi</b>
ISSN:	<b>1687-725X</b>
Factor de impacto (2016):	<b>1.704</b>
Ranking:	<b>26/58 (Instruments &amp; Instrumentation)</b>
Cuartil:	<b>Q2</b>

InCites Journal Citation Reports

Page 1 of 1



2017 Journal Performance Data for: Journal of Sensors

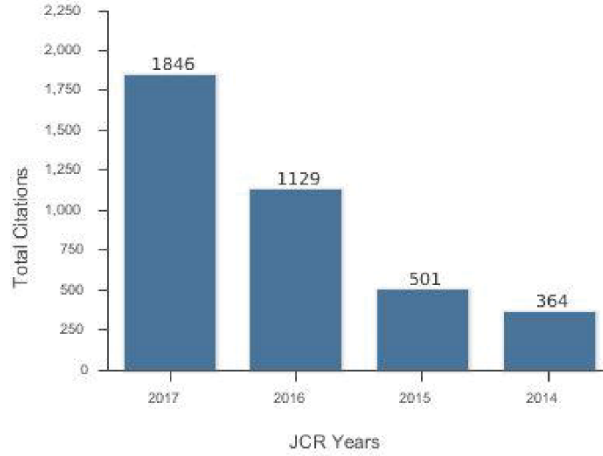


InCites Journal Citation Reports



Journal Profile: Journal of Sensors

Essential Science Indicators : Total Citations Graph



Journal Citation Report : Impact factor

JCR Year	ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC			INSTRUMENTS & INSTRUMENTATION		
	Rank	Quartile	JIF Percentile	Rank	Quartile	JIF Percentile
2017	123/280	Q2	52.885	25/51	Q2	59.638
2016	126/282	Q2	52.089	28/58	Q2	56.034
2015	183/257	Q3	28.988	44/59	Q4	22.321
2014	130/249	Q3	47.992	32/56	Q3	43.750

Essential Science Indicators : Total Citations

JCR Year	ENGINEERING
2016	451/861-Q3
2017	388/897-Q2
2014	580/838-Q3
2015	552/850-Q3

# APÉNDICE B

## DESARROLLOS



## DESARROLLOS

### EQUIPO LIDAR PARA UAV

**Tipo:** Hardware

**Descripción:**

Dispositivo LiDAR para vehículos aéreos no tripulados que integra un sensor Velodyne VLP16, sistema inercial Applanix APX-15, electrónica de control y sistema de comunicaciones inalámbricas.

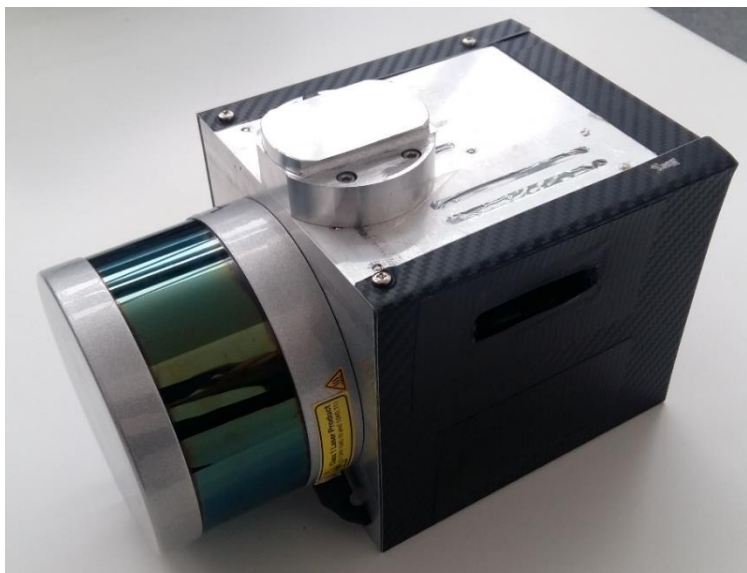
**Aplicaciones:**

Ingeniería civil, forestal, mantenimiento de líneas eléctricas, cartografía, geomática, etc.

**Características técnicas:**

- Precisión absoluta: 0.05m RMSE @ 45 m
- Rango: 2 – 100 m
- Doble retorno: Strongest – Last
- Tamaño: 210 x 110 x 110 mm
- Peso: 1.8 Kg
- Voltaje entrada: 14-30V
- Potencia nominal: 25W

**Imágenes:**



**Figura Ap.B.1:** Imagen dispositivo LiDAR.



**Figura Ap.B.2:** Dispositivo montado sobre UAV en campo de pruebas.



## UFOREST\_MANAGER

**Tipo:** Software

**Descripción:**

Software para control remoto del dispositivo LiDAR para vehículos aéreos no tripulados.

**Aplicaciones:**

Monitorización y control remoto del dispositivo LiDAR, configuración de los sensores, inicio y fin de líneas de escaneo, etc. Se realiza la comunicación mediante protocolos UDP y TCP.

**Características técnicas:**

- Control de adquisición
  - Sistema
  - Inercial
  - LiDAR
  - Posición
  - Orientación
- Configuración del sensor
  - Frecuencia escaneo
  - Ángulo escaneo
  - Frecuencia
- Configuración de las cámaras
  - Tiempo o distancia
  - Intervalo
  - Frame rate máximo
- Inicio/parada captura datos sistema inercial
- Inicio/parada de línea
- Borrado de disco remoto
- Shutdown sistema

Imágenes:

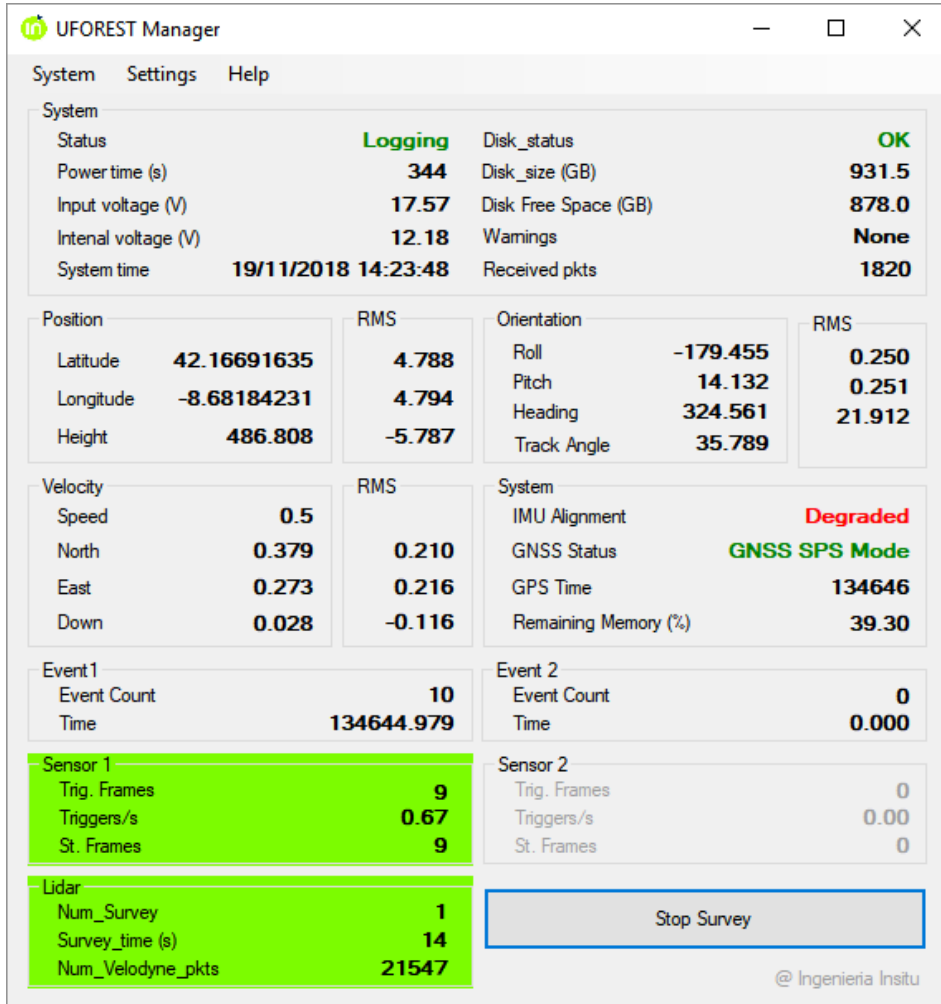


Figura Ap.B.3: Interfaz de usuario software UforestManager

## UFOREST\_PROCESSDATA

**Tipo:** Software

**Descripción:**

Software de postproceso para georreferenciación directa de los datos del dispositivo LiDAR.

**Aplicaciones:**

Obtención de nubes de puntos 3D en sistema de referencia WGS84 a partir de fichero de trayectoria y mediciones de rango del sensor LiDAR.

**Características técnicas:**

- Ficheros de entrada:
  - Trayectoria: Archivos .out
  - LiDAR: Archivos .vdf y .vtf
- Ficheros de salida:
  - Nube de puntos: Archivo .las
  - Nube de puntos: Archivo .txt
- Parámetros de calibración:
  - Offset x,y,z LiDAR
  - Offset angular LiDAR
- Parámetros de configuración líneas:
  - Selección timestamp inicio y fin de línea.
  - Selección distancia LiDAR
  - Selección ángulo Nadir.
  - Selección láser interno
  - Selección retorno salida.
- Salida de datos en fichero \*.las usando el sistema de referencia WGS84.

Imágenes:

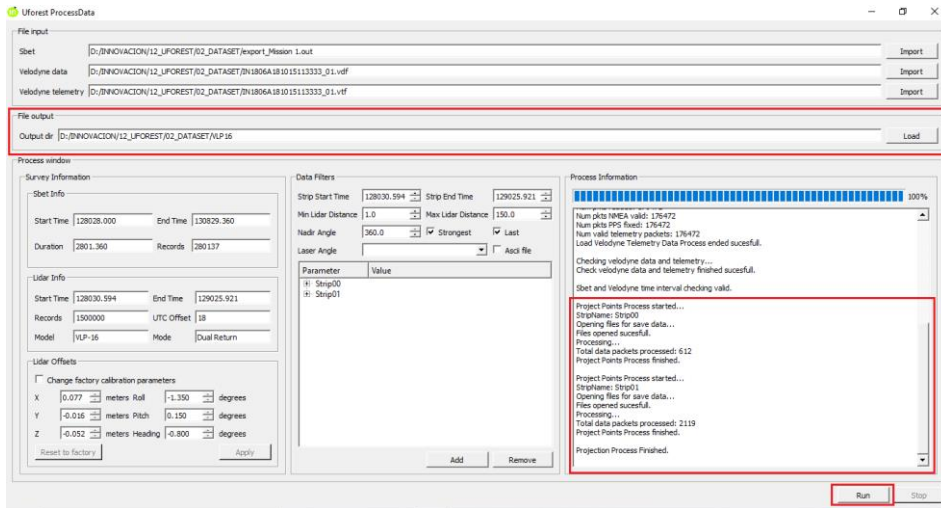


Figura Ap.B.4: Interfaz de usuario software Uforest\_ProcessData

# APÉNDICE C

## PATENTES



## PATENTES

### Patente I:

**Título:** Sistema de protección de hélices para vehículo aéreo no tripulado

**Tipo:** Patente de invención

**Nº de solicitud:** P201400927

**Nº de publicación:** ES2571061

**Titulares:** Universidad de Vigo

**Fecha de Expedición:** 24/11/2016

#### Resumen:

El sistema de protecciones en fibra de carbono para multi-rotores en configuración de ocho rotors, compuesto por la protección y las dos pletinas unidas entre ellas por tornillos.

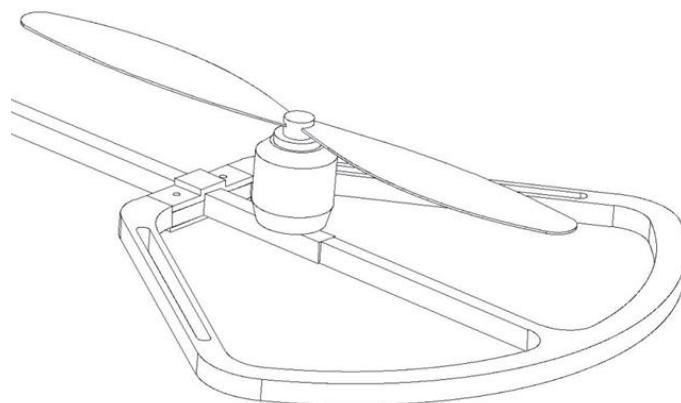


Figura 1. Sistema de protección patentado



MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, ENERGIA  
Y TURISMO



Oficina Española  
de Patentes y Marcas

Nº SOLICITUD: **P201400927**

Nº PUBLICACIÓN: **ES2571061**

**TITULAR/ES:**

UNIVERSIDADE DE VIGO

FECHA EXPEDICIÓN: 24/11/2016

### TÍTULO DE PATENTE DE INVENCIÓN

Cumplidos los requisitos previstos en la vigente Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes, se expide el presente TÍTULO, acreditativo de la concesión de la Patente de Invención. La solicitud ha sido tramitada y concedida con realización del Informe sobre el Estado de la Técnica y **sin examen previo** de los requisitos sustantivos de patentabilidad.

Se otorga al titular un derecho de exclusiva en todo el territorio nacional, bajo las condiciones y con las limitaciones previstas en la Ley de Patentes. La duración de la patente será de **veinte años** contados a partir de la fecha de presentación de la solicitud (20/11/2014).

La patente se concede sin perjuicio de tercero y sin garantía del Estado en cuanto a la validez y a la utilidad del objeto sobre el que recae.

Para mantener en vigor la patente concedida, deberán abonarse las tasas anuales establecidas, que se pagarán por años adelantados. Asimismo, deberá explotarse el objeto de la invención, bien por su titular o por medio de persona autorizada de acuerdo con el sistema de licencias previsto legalmente, dentro del plazo de cuatro años a partir de la fecha presentación de la solicitud de patente, o de tres años desde la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial, aplicándose el plazo que expire más tarde.



Fdo.: Ana María Redondo Mínguez  
Jefe/a de Servicio de Actuaciones Administrativas  
(P.D. del Director del Departamento de Patentes e I.T., resolución 05/09/2007)



## Patente II:

**Título:** Sistema de dispersión de líquido en vehículo aéreo no tripulado

**Tipo:** Patente de invención

**Nº de solicitud:** P201400928

**Nº de publicación:** ES2571005

**Titulares:** Universidad de Vigo

**Fecha de Expedición:** 24/11/2016

### Resumen:

Sistema de fumigación por control remoto que se compone de un dispersor integrado a un vehículo aéreo no tripulado. Las órdenes de funcionamiento se consiguen vía receptora de radio que envía las órdenes al relé de activación vía microprocesador.

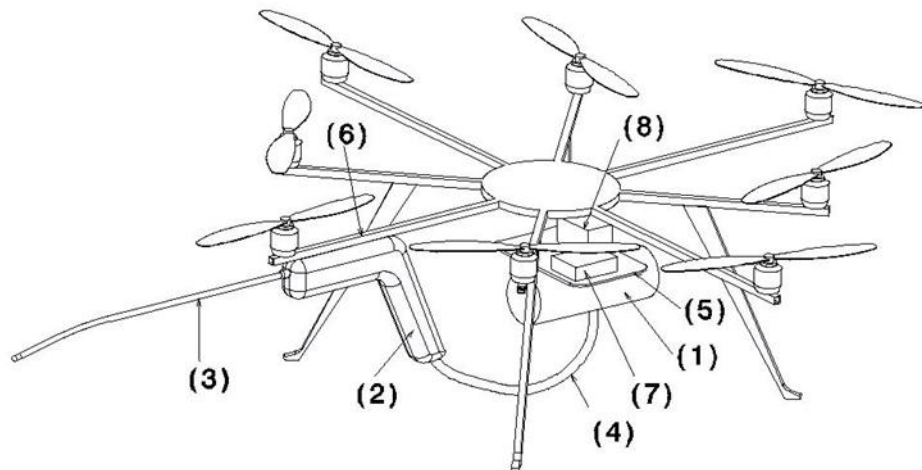


Figura 2. Sistema de fumigación.



MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, ENERGIA  
Y TURISMO



Oficina Española  
de Patentes y Marcas

Nº SOLICITUD: **P201400928**

Nº PUBLICACIÓN: **ES2571005**

**TITULAR/ES:**

UNIVERSIDADE DE VIGO

FECHA EXPEDICIÓN: 24/11/2016

**TÍTULO  
DE  
PATENTE DE INVENCIÓN**

Cumplidos los requisitos previstos en la vigente Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes, se expide el presente TÍTULO, acreditativo de la concesión de la Patente de Invención. La solicitud ha sido tramitada y concedida con realización del Informe sobre el Estado de la Técnica y **sin examen previo** de los requisitos sustantivos de patentabilidad.

Se otorga al titular un derecho de exclusiva en todo el territorio nacional, bajo las condiciones y con las limitaciones previstas en la Ley de Patentes. La duración de la patente será de **veinte años** contados a partir de la fecha de presentación de la solicitud (20/11/2014).

La patente se concede sin perjuicio de tercero y sin garantía del Estado en cuanto a la validez y a la utilidad del objeto sobre el que recae.

Para mantener en vigor la patente concedida, deberán abonarse las tasas anuales establecidas, que se pagarán por años adelantados. Asimismo, deberá explotarse el objeto de la invención, bien por su titular o por medio de persona autorizada de acuerdo con el sistema de licencias previsto legalmente, dentro del plazo de cuatro años a partir de la fecha presentación de la solicitud de patente, o de tres años desde la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial, aplicándose el plazo que expire más tarde.



Fdo.: Ana María Redondo Mínguez  
Jefe/a de Servicio de Actuaciones Administrativas  
(P.D. del Director del Departamento de Patentes e I.T., resolución 05/09/2007)

### Patente III:

**Título:** Sistema de acoplamiento entre vehículos aéreos no tripulados y estructuras tipo viga para medición por contacto

**Tipo:** Patente de invención

**Nº de solicitud:** P201400965

**Nº de publicación:** ES2572181

**Titulares:** Universidad de Vigo

**Fecha de Expedición:** 24/11/2016

#### Resumen:

El sistema de acoplamiento entre vehículos aéreos no tripulados y estructuras tipo viga, consistente en una protección superior con cuatro elementos a modo de tren de aterrizaje invertido, que anclada a las barras que forman el fuselaje del vehículo aéreo no tripulado permite la protección de las palas.

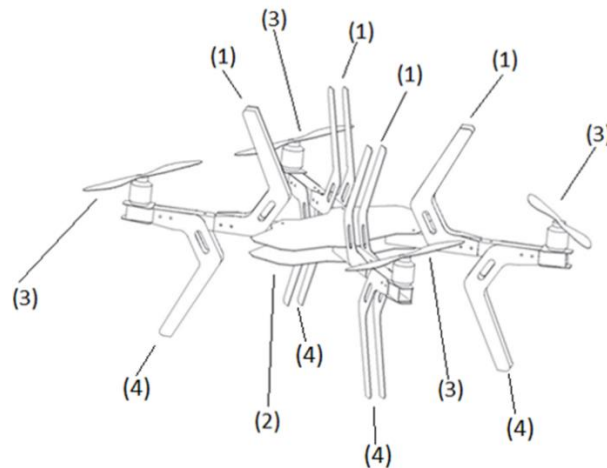


Figura 3. Sistema de acople patentado



MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, ENERGIA  
Y TURISMO



Oficina Española  
de Patentes y Marcas

Nº SOLICITUD: **P201400965**

Nº PUBLICACIÓN: **ES2572181**

TITULAR/ES:

UNIVERSIDADE DE VIGO

FECHA EXPEDICIÓN: 24/11/2016

### TÍTULO DE PATENTE DE INVENCION

Cumplidos los requisitos previstos en la vigente Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes, se expide el presente TÍTULO, acreditativo de la concesión de la Patente de Invención. La solicitud ha sido tramitada y concedida con realización del Informe sobre el Estado de la Técnica y **sin examen previo** de los requisitos sustantivos de patentabilidad.

Se otorga al titular un derecho de exclusiva en todo el territorio nacional, bajo las condiciones y con las limitaciones previstas en la Ley de Patentes. La duración de la patente será de **veinte años** contados a partir de la fecha de presentación de la solicitud (28/11/2014).

La patente se concede sin perjuicio de tercero y sin garantía del Estado en cuanto a la validez y a la utilidad del objeto sobre el que recae.

Para mantener en vigor la patente concedida, deberán abonarse las tasas anuales establecidas, que se pagarán por años adelantados. Asimismo, deberá explotarse el objeto de la invención, bien por su titular o por medio de persona autorizada de acuerdo con el sistema de licencias previsto legalmente, dentro del plazo de cuatro años a partir de la fecha presentación de la solicitud de patente, o de tres años desde la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial, aplicándose el plazo que expire más tarde.



Fdo.: Ana María Redondo Mínguez  
Jefe/a de Servicio de Actuaciones Administrativas  
(P.D. del Director del Departamento de Patentes e I.T., resolución 05/09/2007)

## Patente IV:

**Título:** Sistema de alimentación alámbrico para vehículos aéreos no tripulados

**Tipo:** Patente de invención

**Nº de solicitud:** P201400966

**Nº de publicación:** ES2572188

**Titulares:** Universidad de Vigo

**Fecha de Expedición:** 24/11/2016

### Resumen:

El sistema de alimentación alámbrico para vehículos aéreos no tripulados, consistente en un cable de alimentación que une el vehículo aéreo no tripulado con una batería de alimentación en tierra a través de un enrollador.

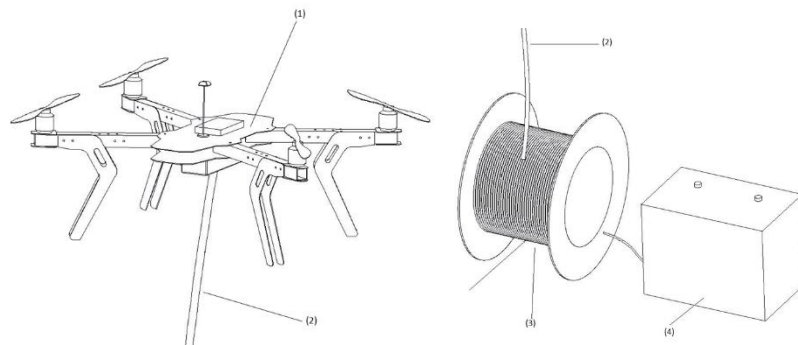


Figura 4. Sistema de alimentación alámbrico.



MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, ENERGIA  
Y TURISMO



Oficina Española  
de Patentes y Marcas

Nº SOLICITUD: **P201400966**

Nº PUBLICACIÓN: **ES2572188**

TITULAR/ES:

UNIVERSIDADE DE VIGO

FECHA EXPEDICIÓN: 24/11/2016

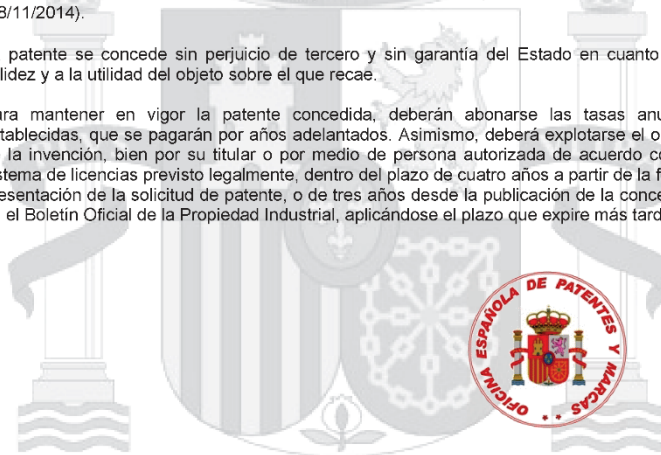
### TÍTULO DE PATENTE DE INVENCION

Cumplidos los requisitos previstos en la vigente Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes, se expide el presente TÍTULO, acreditativo de la concesión de la Patente de Invención. La solicitud ha sido tramitada y concedida con realización del Informe sobre el Estado de la Técnica y **sin examen previo** de los requisitos sustantivos de patentabilidad.

Se otorga al titular un derecho de exclusiva en todo el territorio nacional, bajo las condiciones y con las limitaciones previstas en la Ley de Patentes. La duración de la patente será de **veinte años** contados a partir de la fecha de presentación de la solicitud (28/11/2014).

La patente se concede sin perjuicio de tercero y sin garantía del Estado en cuanto a la validez y a la utilidad del objeto sobre el que recae.

Para mantener en vigor la patente concedida, deberán abonarse las tasas anuales establecidas, que se pagarán por años adelantados. Asimismo, deberá explotarse el objeto de la invención, bien por su titular o por medio de persona autorizada de acuerdo con el sistema de licencias previsto legalmente, dentro del plazo de cuatro años a partir de la fecha presentación de la solicitud de patente, o de tres años desde la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial, aplicándose el plazo que expire más tarde.



*Ana R*

Fdo.: Ana María Redondo Mínguez  
Jefe/a de Servicio de Actuaciones Administrativas  
(P.D. del Director del Departamento de Patentes e I.T., resolución 05/09/2007)



