



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

Escuela Internacional de Doctorado en Agroalimentación eID3
Programa de Ingeniería agraria, alimentaria, forestal y de
desarrollo rural sostenible

TESIS DOCTORAL

**Influencia de parámetros de vuelo y condiciones ambientales
en sensores livianos en visible e infrarrojo sobre
plataformas no tripuladas en aplicaciones geomáticas**

Influence of flight parameters and environmental conditions in
light sensors in visible and infrared on unmanned platforms in
geomatic applications

María Dolores Notario García

Dr Alfonso García-Ferrer Porras

Director

Dr Francisco Javier Mesas Carrascosa

Director

Fecha de depósito en el idep: 07/10/2019

TITULO: *INFLUENCIA DE PARÁMETROS DE VUELO Y CONDICIONES AMBIENTALES EN SENSORES LIVIANOS EN VISIBLE E INFRARROJO SOBRE PLATAFORMAS NO TRIPULADAS EN APLICACIONES GEOMÁTICAS*

AUTOR: *María Dolores Notario García*

© Edita: UCOPress. 2019
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/ucopress@uco.es>



TÍTULO DE LA TESIS: Influencia de parámetros de vuelo y condiciones ambientales en sensores livianos en visible e infrarrojo sobre plataformas no tripuladas en aplicaciones geomáticas

DOCTORANDO/A: María Dolores Notario García

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

Esta Tesis Doctoral ha tenido por objeto analizar el impacto en la calidad de los productos geomáticos generados a partir de imágenes capturadas por sensores embarcados en plataformas aéreas no tripuladas, siendo las aplicaciones evaluadas la medición de superficies en parcelas agrícolas como apoyo a los controles de la Política Agraria Comunitaria, la generación de ortofotografías para inventario del patrimonio histórico y la asistencia para detectar zonas posibles para realizar prospecciones arqueológicas.

Que tanto la metodología como el trabajo de investigación, las conclusiones y los resultados obtenidos son satisfactorios.

El doctorando ha desarrollado un trabajo de investigación adecuado, incorporando a su formación nuevas disciplinas, demostrando su capacidad e independencia en el trabajo que se debe requerir a todo egresado con el grado de doctor.

Sus trabajos de investigación han sido sometidos a una revisión por pares en revistas científicas de alto impacto, todas ellas correspondientes al índice JCR, cuartil uno.

Que derivado de esta Tesis Doctoral se han publicado los siguientes trabajos:

Revistas incluidas en SCI:

- Validation of measurements o land plot area using UAV imagery

Autores: Francisco Javier Mesas-Carrascosa*, María Dolores Notario-García, José Emilio Meroño de Larriva, Manuel Sánchez de la Orden, Alfonso García-Ferrer Porras.

Publicado en:

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 33, 270–279.

- An Analysis of the Influence of Flight Parameters in the Generation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Orthomosaicks to Survey Archaeological Areas

Autores: Francisco-Javier Mesas-Carrascosa *, María Dolores Notario García, Jose Emilio Meroño de Larriva, Alfonso García-Ferrer.

Publicado en:

Sensors, 2016, 16, 1838.

Aportaciones a congresos:

- Influencia de parámetros de vuelo en la generación de ortofotografías aplicadas a patrimonio histórico

Autores: F. Javier Mesas-Carrascosa, María Dolores Notario García, Inmaculada Clavero Rumbao, Manuel Sánchez de la Orden, Alfonso García-Ferrer.

Comunicación al XVI Congreso de la AET (Asociación Española de Teledetección), en Sevilla, 21-23 de Octubre de 2015.

Que se considera que el trabajo realizado cumple con los requisitos necesarios para su presentación y lectura.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 17 de septiembre de 2019.

Firma del/de los director/es

Fdo.: _____ Fdo.: _____

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, como no debe ser de otro modo, a mis directores, Francisco Javier Mesas Carrascosa y Alfonso García-Ferrer Porras, por su ayuda constante. Gracias por enseñarme tanto y por hacer esta Tesis posible.

Cuando algo requiere que le dediques el tiempo que pertenece a tu familia y amigos es imprescindible contar con gente que, lo entienda o no, te apoye y que te haga este recorrido más fácil, esa ha sido mi suerte. A Jesús por su ánimo y apoyo de forma incondicional, a mi Elenita por los consejos y ayuda de quien a pasado por lo mismo, y a mis padres, que siempre están ahí, por animar mi decisión de estar siempre formándome y estudiando.

Índice de Contenido

Indice de Figuras.....	10
Indice de Tablas.....	13
Capítulo 1. Introducción.....	15
1. Antecedentes históricos de la fotografía aérea y las plataformas no tripuladas.....	17
2. Teledetección.....	19
2.1 Sistemas de obtención de imágenes. Análisis de plataformas.....	19
2.1.1. Características fundamentales de las imágenes.	21
2.2 Sensores.....	23
2.2.1. Sensor RGB.....	25
2.2.2. Sensor Multiespectral.....	25
2.2.3. Sensor hiperespectral.....	26
2.2.4. Sensor de temperatura.....	27
2.2.5 Sensor LIDAR.....	28
3. Vuelos Uav. Imágenes aéreas.....	28
3.1 Procesado del vuelo UAV.....	31
4. Calidad de los datos espaciales.	34
4.1. Calidad de las imágenes.	35
5. Referencias.....	37
Objetivos y estructura de la Tesis.....	45
Capítulo 2. Validation of measurements of land plot area using UAV imagery.....	47
Abstract.....	49
Resumen.....	50
1. Introduction.....	51
2. Materials and Methods.....	54

2. Study sites	54
2.2 Field data collection	57
2.3 Statistical test for critical review of area measurements	59
2.3.1 The Cochran test	59
2.3.2 The Grubbs test for one outlier	60
2.3.3 The Grubbs test for two outliers	61
2.4 Data analysis	63
3. Results and Discussion	64
4. Conclusions	70
5. References	72
Capítulo 3. An Analysis of the Influence of Flight Parameters in the Generation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Orthomosaics to Survey Archaeological Areas	79
Abstract	81
Resumen	82
1. Introduction	83
2. Materials and Methods	86
2.1. UAV and Sensor Description	86
2.2. Study Site and UAV Flights	87
2.3. Photogrammetric Processing	90
2.4. Assessment of Spatial Quality	91
3. Results	92
3.1. Assessment of Absolute Positional Accuracy	96
3.2. Assessment of Relative Positional Accuracy	100
4. Conclusions	102
5. References	104

Capítulo 4. Identificación de elementos de subsuelo en excavaciones arqueológicas usando imágenes térmicas (o basada en termografía infrarroja)	109
Resumen.....	111
1.Introducción.....	113
2. Materiales y Métodos	115
2.1 Plataforma de vuelo y sensor empleados	116
2.2 Proceso fotogramétrico.....	119
2.3 Interpretación de resultados.....	119
3. Resultados	120
4. Conclusiones.....	124
5. Bibliografía.....	126
Capítulo 5. Futuras líneas de investigación, limitaciones y conclusiones finales.	129
1. Futuras líneas de investigación y limitaciones actuales	131
2. Conclusiones finales	132

Índice de Figuras

Figura 1-1. Fotografía aérea más antigua conservada (Boston, 1860).	17
Figura 1-2. Ejemplos de UAVs. a) Ala fija (E-300), b.1) Ala Rotativa, Multirotor (md4-1000), b.2) Ala Rotativa, Helicoptero (Geocopter), c) Globo aerostático.	21
Figura 1-3. Espectro electromagnético.	22
Figura 1-4. Sensores utilizados para Uavs. a) Cámara RGB, Sony Next 7, b) Cámara multispectral, Mini-MCA 6 Tetracam, c) Cámara hiperespectral, OCI-UAV, d) Cámara térmica, Gobi 640 XENICS.	24
Figura 1-5. Comparativa de puntos de apoyo.	30
Figura 1-6. Toma de datos para corrección atmosférica: a) paneles blanco, negro y spectralon, b) toma de muestra con espectroradiómetro, c) paneles sobre ortofotografía falso color.	31
Figura 1-7. Flujo de trabajo para procesamiento de datos obtenidos a partir de un vuelo UAV.	33
Figura 1-8: Ejemplo de mosaicos. Vuelo UAV modo corredor (a) sin balance radiométrico y (b) con balance radiométrico. Detalle del vuelo con discontinuidad radiométrica (c) y con continuidad radiométrica (d). Detalle del vuelo con (e) discontinuidad radiométrica y geométrica y (f) sin discontinuidades radiométricas y geométricas.	33
Figure 2-1. Overview of the study sites: (a) Posadas, (b) Castro del Río and (c) Librilla.	55
Figure 2-2. Images of land plots presenting different border conditions: (a) irregular shape with poor borders, (b) regular shape and (c) elongated shape with poor borders.	56
Figure 2-3. Flowchart outlier detection in area measurements taking into account ISO 5725-2.	62
Figure 2-4. Example of a reference land plot border (red line) along with the results of different digitizing sessions obtained by each operator (yellow lines). Yellow lines define a buffer around red line. (For interpretation of the	

references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.).....	65
Figure 2-5. Relationship between technical tolerance for each land plot and different factors: (a) plot area, (b) plot size, (c) shape factor, (d) border condition, (e) land use and (f) different flights conducted.	69
Figure 3-1. The MD4-1000 multi-rotor (Microdrones GmbH, Siegen, Germany) taking off over the study site.....	87
Figure 3-2. Overview of the study site.	88
Figure 3-3. Scheme of unmanned Aerial Vehicle (UAV) flights and processing.	88
Figure 3-4. Assessing spatial resolution: (a) Measuring using the total station; and (b) Samples of spatial details of the ground measurements. .	90
Figure 3-5. Relationship between altitude above ground level (AGL) and forward and side lap settings on: (a) Flight duration and (b) Number of images taken.	93
Figure 3-6. (a–d) The effects of illumination on images taken by UAV flights at midday (a, c) and early morning (b, d).	95
Figure 3-7. Effect of flight altitudes AGL on image coverage and quality. ...	96
Figure 3-8. (a–d) Root mean square error (RMSE) box plot graph factoring altitude AGL; forward and side lap (a, c) 80%–50% (b, d) 70%–40% and; processing (a, b) with or (c, d) without ground control points (GCPs).	98
Figure 3-9. Linear model analyzing forward and side lap settings against altitude AGL and RMSE.....	100
Figura 4-1. Situación lugar de estudio.	115
Figura 4-2. Polígono marcado sobre el área de interés dentro del yacimiento.	116
Figura 4-3. Detalle preparación de vuelo plataforma MD4-1000.	117
Figura 4-4. Detalles del material empleado: (a) estación de control y (b) sensor Gobi.....	118

Figura 4-5. Vista general de la ortofotografía (a) RGB y su (b) MDS y (c) termograma y su (d) MDS asociado.....	121
Figura 4-6. Detalle ortomosaicos generados mediante vuelo UAV: (a) sensor RGB y (b) sensor termográfico.....	122
Figura 4-7. Detalle de superposición ortofotografía RGB y termografía de la zona de estudio.....	123
Figura 4-8. Detalle comparativa RGB y termograma: (a) ortofotografía RGB, (b a d) termograma con expansión del contraste considerando diferentes valores máximos y mínimos de nivel digital.	124

Índice de Tablas

Table 2-1. Summary of statistical test to detect outliers in area measurements.....	66
Table 2-2. One-way ANOVA results for each characteristic of the plots and materials used.	67
Table 3-1. Results of the field-calibrated Sony NEX-7 (Sony Corporation, Minato, Tokyo, Japan).	87
Table 3-2. Flight durations and the number of images taken at different altitudes Above Ground Level (AGL) and forward and side lap settings.....	93
Table 3-3. Absolute positional accuracy results factoring altitude AGL, percentage of forward and side overlap and processing with or without GCPs.	97
Table 3-4. Relative horizontal spatial deviation.....	101

Capítulo 1

Introducción

1. Antecedentes históricos de la fotografía aérea y las plataformas no tripuladas.

Durante más de 150 años la fotografía aérea ha proporcionado los medios para ver la tierra a vista de pájaro si bien en su primer medio siglo de desarrollo se utilizó muy poco debido a su alto coste y riesgo. La primera fotografía aérea documentada fue tomada desde un globo en 1858 por Gaspard Félix Tournachon (Colwell, 1997), aunque la fotografía aérea más antigua que se conserva corresponde a la sacada por el fotógrafo estadounidense James Wallace Black en 1860, sobre la ciudad de Boston (Figura 1-1). El desarrollo e innovación en este campo fue avanzando a lo largo del tiempo, acelerándose por necesidades militares durante las I y II Guerras Mundiales, evolucionando a formatos más precisos sobre todo para su uso en reconocimiento (Malin and Light, 2007). En el año 1975 aparece la primera cámara digital con innumerables ventajas como la eliminación de la fase de revelado o la realización de copias con la misma calidad que el original (Pérez, 2005), facilitando el tratamiento digital de las mismas. No obstante, no sería hasta los años cuando se comenzó a usar esta tecnología en Geomática. Durante los últimos 30 años los avances técnicos en dispositivos electrónicos y la informática en el campo de la geomática han fomentado el uso de fotografía aérea como método de análisis cada vez más sofisticado.



Figura 1-1. Fotografía aérea más antigua conservada (Boston, 1860).

De forma simultánea a la evolución de la captura de información mediante imágenes es importante analizar el desarrollo de la aviación, incluyendo a las plataformas áreas no tripuladas (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAV). Estas aparecen con fuerza tras el diseño del primer aeroplano, alrededor de la Primera Guerra Mundial, presentando no obstante serias deficiencias propias de la tecnología del momento. Poco antes del final de la Segunda Guerra Mundial se incrementaría el interés de los servicios prestados por UAVs en misiones de reconocimiento del terreno, equipando a las plataformas de vuelo de cámaras. Pese al interés despertado, durante el periodo de la Guerra Fría (1947-1953) una de las mayores preocupaciones y motivo de cancelación de distintos programas UAV se basó en gran medida a las incidencias en las operaciones de lanzamiento y sobre todo de recuperación de la plataforma. Esto motivó el trabajar y el desarrollar nuevas arquitecturas en cuanto a plataformas para sortear inconvenientes relacionadas principalmente con la operación de aterrizaje. Así, se desarrollaron dispositivos de despegue vertical (Intwala and Parikh, 2015). Las décadas de los 80 y 90 supusieron la gran expansión de este tipo de vehículos, siendo este un periodo en el que se desarrollaron cargas de pago con sensores más avanzados y sofisticados que permitieron pensar en otro tipo de misiones, además de las de reconocimiento, como obtención de información cartográfica o eliminación de objetivos en misiones militares. Igualmente importante fue la mejora en los sistemas de guiado y recuperación en tierra, el aumento en el número de satélites destinados a servicios de posicionamiento así como la puesta en servicio de nuevos sistemas de navegación por satélite y la mejora de las comunicaciones de satélite. De este modo, todos los avances presentados han permitido aumentar el alcance de las operaciones y la mejora en la exactitud de la navegación.

Desde el año 2000 en adelante, los avances vinculados a plataformas de vuelo no tripuladas han estado vinculados al asentamiento de la tecnología, el desarrollo y uso de forma más estable de plataformas de tamaño medio y grande, así como la aparición de aquellas de tamaño pequeño, diseñadas principalmente para operaciones y actividades de carácter civil. Así, los avances de los últimos años han permitido que las plataformas UAV puedan ser catalogadas según distintos criterios como si

son más o menos ligeras que el aire, dirigidas por control remoto o totalmente autónomas, ala fija o multirotor, tipo de motor, entre otros.

2. Teledetección

Se define el término Teledetección como *“la medida o adquisición de información de alguna propiedad de un objeto o fenómeno, mediante un instrumento que no está en contacto físico directo con el objeto o fenómeno bajo estudio”* (Colwell, 1983). Si bien es cierto que el empleo de técnicas de Teledetección está cada vez más extendido para el análisis y gestión de los recursos naturales y culturales, también es cierto que la utilidad y validez de los resultados derivados se encuentra condicionado por las limitaciones en cuanto a resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes registradas.

La llegada al mundo civil de los Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS), junto con la miniaturización de sensores, posibilita un nuevo concepto de teledetección de muy alta resolución donde se puedan superar ciertas limitaciones, principalmente en dos niveles de resolución, espacial y temporal, siendo además una solución económicamente viable para aplicar en superficies inferiores a 80 has, según el sensor empleado.

2.1 Sistemas de obtención de imágenes. Análisis de plataformas.

En la actualidad existen distintos tipos de plataformas capaces de proporcionar información sobre las distintas superficies y elementos de la superficie terrestre, tales como satélites, aviones o avionetas tripuladas y no tripuladas. En el caso de éstas últimas, independientemente de la tipología de sistema o arquitectura de la plataforma elegida, resulta importante evaluar la utilización de estos sistemas. La realización de vuelos programados mediante UAS resulta ser una manera rápida y económica para realizar trabajos de inspección con una muy elevada resolución espacial y temporal, siendo esta última componente la de mayor interés dado que permite registrar la información de una localización en el preciso instante en que se necesita.

Los sistemas no tripulados se pueden clasificar según capacidad y altura de vuelo, siendo importante la elección de la plataforma de vuelo una vez definidas las necesidades y características del trabajo a desarrollar. De este modo es posible catalogar un UAV según distintos criterios como el tipo de motor empleado (combustión o eléctrico), si es o no más pesada que el aire, por el número de motores, etc. Atendiendo al modo de aterrizar y despegar es posible diferenciar entre plataformas de despegue y aterrizaje horizontal (Horizontal Take-off and Landing, HTOL), plataformas de despegue y aterrizaje vertical (Vertical Take-off and Landing, VTOL) y plataformas híbridas, combinando los dos tipos anteriores (Genzelis et al., 2016, Saeed et al., 2015). Independientemente de la tipología de la plataforma de vuelo y de la operación a desarrollar, el vehículo tiene una serie de módulos y componentes que permiten la navegación de la plataforma. De este modo, todos los subsistemas UAV necesitan de un sensor o un sistema de sensores de navegación que aporten una estimación completa de la geolocalización de la plataforma. Esta información se compone de las coordenadas tridimensionales de la plataforma, los vectores de velocidad en las tres direcciones y entre tres y nueve parámetros para la determinación de la actitud de la plataforma. Además de esta información, en caso de que el sistema empleado permita desarrollar operaciones de forma autónoma, es necesario un sistema de control y otro de guiado. Igualmente, de entre todas las arquitecturas posibles, las más empleadas hoy día y populares son las de tipo ala fija, como aviones y avionetas, de ala rotativa como helicópteros y multirrotores y globos, cometas, etc (Figura 1-2).

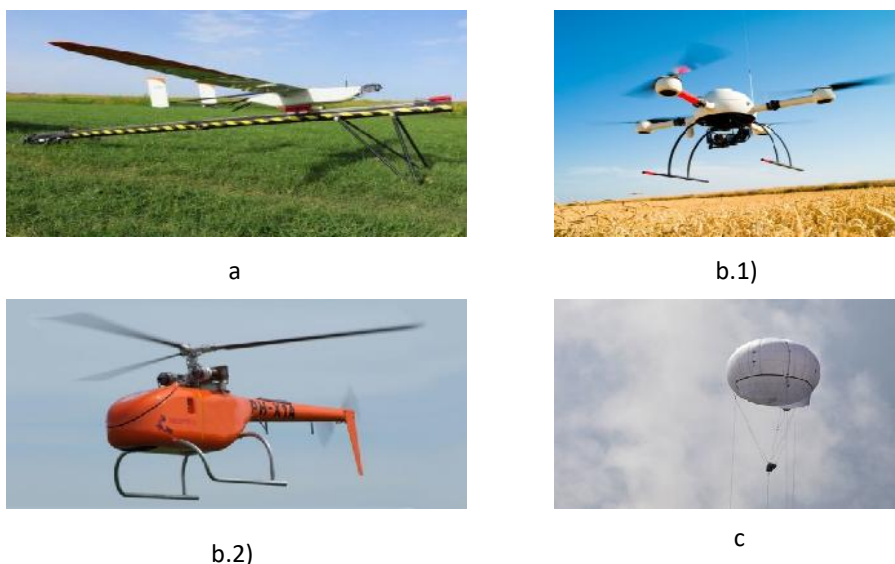


Figura 1-2. Ejemplos de UAVs. a) Ala fija (E-300), b.1) Ala Rotativa, Multirotor (md4-1000), b.2) Ala Rotativa, Helicoptero (Geocopter), c) Globo aerostático.

2.1.1. Características fundamentales de las imágenes.

Cuatro son los tipos de resolución que caracterizan una imagen: espacial, espectral, radiométrica y temporal. En cuanto a la primera de ellas, resolución espacial, se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen producida por un sensor remoto, siendo necesarios al menos 4 píxeles para detectar el objeto más pequeño (Hengl, 2006). Analizando las plataformas empleadas para la captura de imágenes, aquellas procedentes de aviones tripulados convencionales pueden llegar a alcanzar resoluciones submétricas (25cm) que han permitido, por ejemplo, cartografiar, en el caso de la agricultura, infestaciones de diversas malas hierbas en estado fenológico de floración en cultivos de girasol (Peña Barragan et al., 2007 y 2010) o en trigo (López Granados et al., 2006). Por otro lado, las imágenes multiespectrales provenientes de plataformas espaciales disminuyen la resolución espacial, siendo las que mejores resultados ofrecen en este sentido los satélites Ikonos o QuickBird con valores de hasta 60 cm, GeoEyes (1.64m /Pixel) y Quickbird (2.4 m/ Pixel). Las imágenes de satélites, si bien en ocasiones ofrecen resoluciones espaciales idóneas para determinadas aplicaciones presentan normalmente

el problema de la resolución temporal. Por lo tanto, existen ocasiones en que los datos que necesitamos requieren además de una adecuada resolución espacial de una mayor resolución temporal, no siendo ofrecida por este tipo de plataformas, bien por limitaciones técnicas o de viabilidad económica. González-Dugo et al. (2013) revisaron las diferentes plataformas para alcanzar determinados objetivos en agricultura y concluyeron que la adecuada información temporal junto con una elevada resolución espacial actualmente solo se consigue mediante la utilización de cámaras instaladas en UAS/RPAS.

La resolución espectral se refiere a la habilidad del sensor de distinguir y diferenciar entre distintas regiones del espectro electromagnético (Figura 1-3), siendo descrita básicamente por el número y anchura de las bandas espectrales que puedan discriminarse. Así, es posible distinguir entre sensores multispectrales, que generalmente capturan información entre 3 y 7 bandas de unos 100nm de ancho, y sensores hiperspectrales, los cuales adquieren información en varias decenas o centenas de bandas con una anchura de banda inferior a 5 nm.

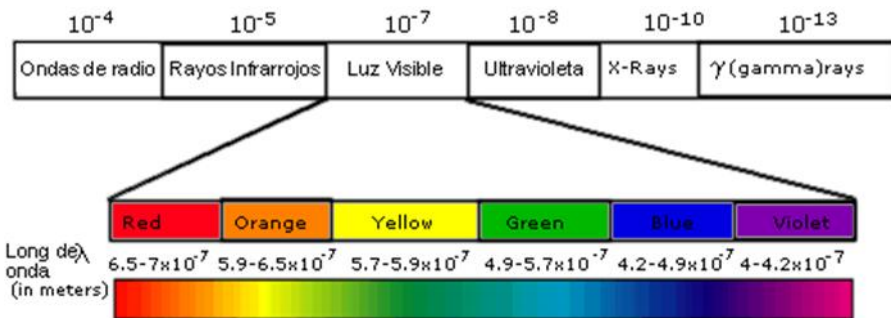


Figura 1-3. Espectro electromagnético.

La resolución temporal, es una medida acerca de cada cuanto tiempo está disponible un sistema de percepción remota para recoger información de un punto específico en la Tierra. Para la mayoría de los satélites la frecuencia de cobertura para cualquier sitio particular es igual a la duración en tiempo que le lleva dar la vuelta a la tierra. No siendo posible contar en numerosas ocasiones con una imagen justo en el momento de necesidad. En el caso de aviones tripulados, la posibilidad de disponer de

un avión preparado con cámaras RGB, multiespectrales o térmicas de alta resolución permite mejorar las prestaciones ofrecidas por las plataformas espaciales, abordando nuevas aplicaciones operativas con una mayor frecuencia de adquisición de imágenes. No obstante, el coste económico de operación hace que sea inviable en numerosas aplicaciones. Es en este caso cuando el uso de UAV tienen un gran potencial, adquiriendo información del territorio justo en el preciso momento en el que es necesario y a un coste económico inferior, pudiendo ser soportado normalmente por el proyecto a desarrollar.

2.2 Sensores

Durante la década de los 90, los sensores digitales formadores de imágenes se desarrollaron tanto para el uso general como el científico, avanzando tecnológicamente de forma vertiginosa a partir de entonces hasta nuestros días. En sus orígenes estos sensores no eran capaces de ofrecer la misma resolución espacial que sus homólogos analógicos. Sin embargo, con el paso de los años han alcanzado unas cuotas en cuanto a resolución espacial muy elevadas, reemplazando actualmente a la mayoría de los sistemas formadores de imágenes analógicos. La variedad de sensores a emplear a bordo de plataformas UAV de pequeño tamaño es similar al de las plataformas tripuladas, siendo posible emplear sensores RGB, multiespectrales, hiperespectrales, termográficos, Lidar y video.

A la hora de seleccionar el sensor adecuado para una determinada aplicación, además de tener en cuenta la resolución espectral y radiométrica del mismo, es importante considerar la tecnología de fabricación, el tipo de filtro empleado en la formación de la imagen o el modo de generación de la misma y los efectos derivados de este, siendo necesario en ocasiones desarrollar metodologías para corregir algunas características del sensor a través de procesos de calibración (Kelcey, 2012). Los aspectos a considerar en la elección de un sensor son diversos, normalmente el objetivo es la obtención de productos cartográficos, bien ortofotografías y/o modelos digitales de superficies (MDS) o de elevaciones (MDE). En primer lugar, es necesario determinar cuáles son las necesidades del proyecto a cubrir, este aspecto definirá la modalidad de sensor con el que trabajar (Figura 1-4): RGB, multiespectral, hiperespectral, termográfico, térmico o Lidar. Una vez

definida ésta se hace necesario evaluar que sensor es el más adecuado, considerando a nivel general los siguientes aspectos: dimensiones y peso del sensor, posibilidad de emplear objetivos intercambiables, velocidad de disparo y almacenamiento. Además de todo esto, en la elección de uso del sensor intervienen de forma conjunta factores tan variados como la resolución, calidad de la imagen, velocidad de operación del objetivo, aspectos geométricos y de iluminación, solape longitudinal y transversal, tamaño de las imágenes, tiempo de exposición, superficie cubierta por un fotograma, etc. Todo ello en armonía con los condicionantes técnicos que implique el trabajo o aplicación a desarrollar. Así, desde la primera década del 2000 se han empleado este tipo de cámaras de reducidas dimensiones embarcadas en pequeños aviones o helicópteros similares a los usados en radio control (Ambrosia et al., 2003; Lambers et al., 2007; Sugiura et al., 2005).



Figura 1-4. Sensores utilizados para Uavs. a) Cámara RGB, Sony Next 7, b) Cámara multiespectral, Mini-MCA 6 Tetracam, c) Cámara hiperespectral, OCI-UAV, d) Cámara térmica, Gobi 640 XENICS.

2.2.1. Sensor RGB

Esta familia de sensores son los más populares y usados como carga de pago embarcada en una plataforma UAV. Los sensores de color tradicionales suelen proporcionar tres bandas de información por cada imagen (rojo, verde y azul), tratando de imitar el proceso de visión del sistema humano y por tanto son capaces de medir la radiación electromagnética reflejada y/o emitida por la superficie terrestre dentro de la región visible (VIS) que se comprende entre 0,4 a 0,7 μm , azul (de 0,4 a 0,5 μm), el verde (de 0,5 a 0,6 μm) y el rojo (de 0,6 a 0,7 μm).

Es posible clasificar éstos en sensores compactos y réflex. Los primeros ofrecen unas dimensiones reducidas, son ligeros y fáciles en su uso. En cuanto a calidad de imagen, estos son menos evolucionados que los sensores digitales réflex de único objetivo (Digital Single Lens Reflex, DSLR), presentando además unos tiempos de exposición más elevados que los DSLR así como una tasa de refresco de imagen baja, generalmente 1 “frame” por segundo, aspectos que determinan que no sean los más adecuados para embarcar en una plataforma UAV. Por otro lado, los sensores DSLR presentan una serie de ventajas frente a los sensores compactos, características como un tamaño de sensor mayor, posibilidad de emplear distintos objetivos según necesidades, mayor sensibilidad, teniendo muchos de ellos un exposímetro integrado para la medida de la luz, etc.

Como resultado, el desarrollo constante de este tipo de cámaras para implementación en UAVs ha dado lugar a sensores de muy bajo peso y tamaño, con características técnicas cada vez más desarrolladas que permiten adecuarse a las necesidades de cada tipo de trabajo, dando lugar a numerosas aplicaciones en diversos campos (Peña et al., 2014; Ballari et al., 2015; Marcos et al., 2016; Berrío et al., 2018).

2.2.2. Sensor Multiespectral

En esta tipología existe un amplio rango de configuraciones, dimensiones, pesos y velocidades de adquisición de imágenes, siendo su uso dirigido principalmente a un usuario relacionado con el desarrollo de aplicaciones agronómicas. La elección del sensor debe ser dirigido no solo pensando en la resolución espacial ofrecida por este, siendo necesario

establecer previamente la región del espectro electromagnético en la que registra información. Algunos sensores ofrecen una resolución espectral de hasta 12 bandas, aunque por regla general oscila de 4 a 6, siendo posible seleccionar diferentes bandas mediante el empleo de filtros. Principalmente, estos sensores están diseñados para el estudio de parámetros relativos a la vegetación (Kharuf et al., 2018, Geipel et al., 2016, Cancela et al., 2016, Torres et al., 2015), por lo que las bandas espectrales registran información en las regiones del espectro electromagnético del verde, rojo e infrarrojo cercano, siendo estas las regiones donde la vegetación presenta su mayor respuesta de absorbancia y reflectancia.

El proceso para la toma de imágenes es similar a un vuelo fotogramétrico con sensor visible (RGB) en cuanto a los aspectos relativos a la posterior corrección geométrica de las imágenes y generación de ortomosaicos. Además, el tratamiento de estas imágenes no solo precisa de corrección geométrica, sino que son necesarias operaciones de calibración radiométrica necesarias para la obtención de datos válidos de reflectancia de los elementos presentes en las imágenes, sobre todo si el uso de los datos esta destinado a estudios multitemporales. Algunas aplicaciones de estos sensores son para monitoreo de los requerimientos nutricionales en agricultura (Gordillo et al., 2018) o ligadas a diagnostico fitosanitario (Hoyos et al., 2019).

2.2.3. Sensor hiperespectral

Esta tipología supone una versión tecnológicamente mas avanzada de los sensores multispectrales, registrando información en un mayor número de bandas espectrales de menor ancho. Pese a la riqueza de la información espectral ofrecida su uso no esta muy extendida por parte del usuario principalmente por dos motivos. En primer lugar, son sensores de un elevado coste económico, que necesita además de una importante cantidad de material auxiliar para su correcto funcionamiento. Además, son sistemas de elevado peso, condicionando el tipo de plataforma donde poder ser embarcados, si bien en los últimos años se han desarrollado sensores con un peso inferior a un kilogramo, lo cual ha permitido su empleo en UAS (Sandino et al., 2018). Esta modalidad de sensores es por lo general de tipo barrido siendo reducido el número de sensores de tipo frame (Aasen et al.,

2015). En el caso de las primeros el sensor registra la información a lo largo de una línea de terreno, generando cientos de píxeles individuales en cada línea de escaneo o eje X siendo el movimiento de avance de la plataforma de vuelo generada en su desplazamiento la información en el eje Y.

Al igual que los sensores multiespectrales, el desarrollo tecnológico ha permitido contar con sensores de dimensiones y peso más reducido si bien no se ha llegado actualmente a alcanzar los niveles de los sensores RGB convencionales. Este aspecto hace que no puedan ser empleados por cualquier tipo de plataforma UAV, necesitando de aeronaves de altas prestaciones. Junto con el propio sensor es necesario embarcar en la plataforma un sistema GPS/INS que proporcione datos de posición y orientación de cada una de las líneas registradas para su posterior corrección geométrica con una elevada calidad posicional. Ejemplos del uso de este sensor en plataformas UAV los tenemos en trabajos como, monitoreo medioambiental y de cultivos (Honkavaara et al., 2014 y Aasen et al., 2014) , detección de propiedades de cultivos (Constantin et al. 2015) o detección predictiva de plagas (Vanegas et al., 2018).

2.2.4. Sensor de temperatura

Dentro de esta categoría es posible emplear dos modalidades de sensores considerando como se registran los valores de temperatura: térmicos y termográficos. Mientras que el primero de ellos mide las diferencias de temperatura entre los distintos objetos presentes en la escena, es decir, es un sensor de tipo cualitativo, de manera que las imágenes adquiridas emplean su máximo rango dinámico de manera que cada imagen es independiente de las demás dado que trabaja en modo relativo. Por lo tanto, esta modalidad no es adecuada para la generación de termogramas. En el segundo tipo, sensores termográficos, se mide y registra las temperaturas de los objetos presentes en la escena, es decir, es un sensor de tipo cuantitativo, trabajando por lo tanto en modo absoluto de forma que las imágenes están relacionadas unas con otras, siendo posible su procesado desde un punto de vista fotogramétrico.

A diferencia de una cámara RGB, multi o hiperespectral, la cual depende de la luz para la creación de una imagen, una cámara térmica o termográfica es capaz de detectar diferencias de temperatura emitida y

convertirlas en una imagen térmica. Por lo tanto, estos sensores no necesitan una cantidad mínima de luz para la generación de la imagen. Esta información puede advertir sobre situaciones de estrés hídrico en las plantas (Santesteban et al., 2016, Hoffmann et al., 2016)), permitiendo detectar ciertos problemas fitosanitarios, y facilita la detección de otro tipo de situaciones de interés a nivel forestal, tales como localización de fauna (Prieto et al., 2014) o rescate de personas (Silvagni et al., 2017).

2.2.5 Sensor LIDAR

De todas las modalidades posibles de sensor a embarcar en una plataforma UAV esta es la que presenta una tecnología novel en cuanto a uso y explotación, existiendo pocos modelos en el mercado al igual que experiencias con los mismos. El sensor LIDAR necesita de una adecuada integración con otros subsistemas como el de posicionamiento y orientación, que al igual que en los sensores hiperespectrales deben ser de altas prestaciones en cuanto a exactitud y precisión se refiere, con objeto de orientar correctamente cada uno de los puntos registrados. De este modo, además de la adquisición del propio sensor es necesario adquirir el sistema de geolocalización y almacenamiento. Los problemas actuales de esta tecnología además de la necesidad de la integración residen en el corto alcance de los rayos, limitando la altura de vuelo y el elevado peso de toda la carga de pago. Pese a ello se están desarrollando aplicaciones aplicaciones en ingeniería civil (Kumar et al., 2017), para detección y clasificación de obstáculos (Sabatini et al., 2013), o generación de modelos 3D en edificios (Roca et al., 2014).

3. Vuelos UAV. Imágenes aéreas.

En la mayoría de las aplicaciones en el sector agroalimentario, el objetivo final al que van a ir destinados los datos registrados en un vuelo UAV será la generación de un producto cartográfico, bien sea una ortofotografía o un MDS/MDE sobre el que luego aplicar técnicas de teledetección y tratamiento digital de imágenes. La selección de la plataforma de vuelo UAV y el sensor a emplear debe realizarse en función de las necesidades a cubrir. Una vez establecidos estos dos aspectos se definirán los parámetros métricos del vuelo. La planificación de vuelo tiene

que contemplar tres dimensiones diferentes e importantes: relativas a la zona de vuelo, a la plataforma de vuelo y al producto cartográfico.

Siendo la finalidad de los datos registrados en un vuelo UAV la generación de productos cartográficos es necesario que estos estén referidos a un sistema de referencia de coordenadas, y por tanto referidos correctamente a un origen de coordenadas, con una correcta orientación y escala. Dos son las alternativas para alcanzar tal condición, orientación directa y medición de punto de control. El primero de ellos, orientación directa, consiste en emplear un receptor GNSS y una unidad inercial que permitan el posicionamiento y orientación de forma exacta y precisa de cada una de las imágenes, no siendo necesario la medición de puntos de control. Con carácter general las plataformas UAV no suelen llevar este tipo de tecnologías, siendo necesario en algunos casos realizar adaptaciones particulares con objeto de mejorar sus prestaciones (Turner et al., 2014).

En el caso general se hace necesario registrar las coordenadas de una serie de puntos de control correctamente distribuidos sobre la zona de trabajo. Estos puntos definen el marco geométrico del trabajo, siendo necesaria su identificación y marcado manual sobre las imágenes. Esta información, junto con un conjunto de puntos medidos con técnicas automáticas y la telemetría del vuelo, permitirá calcular la aerotriangulación del bloque fotogramétrico. Dada la importancia de estos puntos de apoyo es necesario tener en cuenta que han de aparecer bien definidos sobre las imágenes (Figura 1-5), correctamente distribuidos para cubrir la zona de trabajo y sus coordenadas han de ser obtenidas empleando metodologías e instrumentación que ofrezcan una exactitud mejor que el propio GSD de las imágenes.



Figura 1-5. Comparativa de puntos de apoyo.

Además de la planificación del vuelo en sí existen unas acciones previas y durante el vuelo independientes al tipo de plataforma de vuelo UAV empleada como son 1) contar con la habilitación requerida por la legislación vigente, 2) respetar alturas máximas de vuelo sobre el terreno, 3) tener unas mínimas condiciones meteorológicas que permitan una adecuada visibilidad y condiciones de viento, humedad y temperatura óptimos. Igualmente, es necesario elaborar un plan de vuelo operacional para cada ubicación de la estación de control (GCS), delimitar y señalar la zona de aterrizaje y despegue, gestionar de forma adecuada la energía suministrada por las baterías, inspeccionar la plataforma de vuelo, verificar que tanto la señal GNSS, el estado de la batería como la telemetría son adecuados, siendo necesario realizar un seguimiento continuo de estos parámetros durante el vuelo. Además del propio vuelo, es importante contar con unas condiciones adecuadas para el registro de las imágenes aéreas como son tener un cielo limpio sin nubes, y el Sol lo más alto cenital posible para reducir los efectos de las sombras arrojadas por los objetos sobre el terreno. Por lo tanto, la luz y las condiciones ambientales, así como las características del sensor, juegan un papel muy importante en la calidad de las fotografías obtenidas (Mahiny and Turner, 2007).

Lo especificado anteriormente es de carácter general y de aplicación para sensores RGB, multi/hiper-espectral y termográficos. Menos los sensores RGB el resto necesita de materiales y acciones que permitan realizar correcciones atmosféricas sobre las imágenes para que los resultados obtenidos radiométricamente sean lo más exactos posibles. Tales correcciones se realizan generalmente bien mediante la aplicación de modelos de transferencia radiativa a partir de la modelización de la columna de atmósfera entre el sensor y la superficie registrada (Berni et al., 2009, Berni et al., 2009) bien mediante medición in situ de superficies de calibración para posteriormente aplicar el método de empirical lines (Mesas et al., 2018). La Figura 1-6 resume la toma de datos para una corrección atmosférica mediante medidas in situ de reflectividad empleando paneles de referencia blanco y negro así como un panel spectralon mediante un espectralradiómetro de campo. Estas observaciones junto con los valores de los niveles digitales registrados en las ortofotografías producidas permiten calcular los parámetros para modelar el efecto atmosférico.

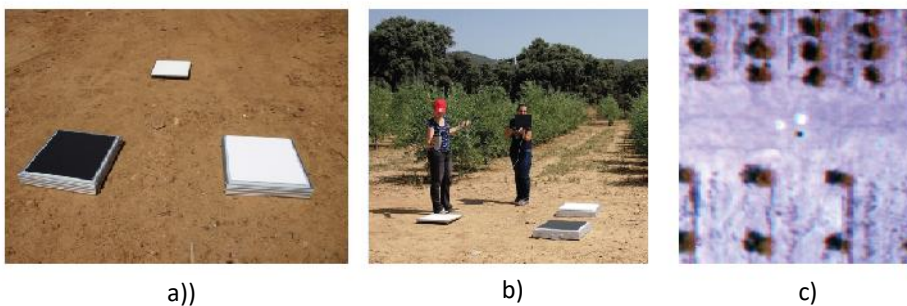


Figura 1-6. Toma de datos para corrección atmosférica: a) paneles blanco, negro y spectralon, b) toma de muestra con espectralradiómetro, c) paneles sobre ortofotografía falso color.

3.1 Procesado del vuelo UAV

El procesado de un vuelo fotogramétrico realizado con un UAV comprende las mismas fases de trabajo que un vuelo fotogramétrico con cámara métrica, entremezclándose hoy las técnicas fotogramétricas con las relativas a procesamiento digital de imágenes al trabajar en entornos digitales.

En el caso de plataformas UAV UAV es necesario aplicar un conjunto de técnicas a la hora de procesar el bloque fotogramétrico que contemple la inestabilidad de la plataforma, registrándose las imágenes con distintos ángulos y distancias respecto al objeto provocando cambios de escala, es decir, la toma de imágenes se realiza de forma desestructurada. A todo esto, hay que añadir la inestabilidad y falta de conocimiento de los sensores en lo que a los valores de sus parámetros internos se refiere. La consecuencia directa es que se hace necesario el empleo de software fotogramétrico específico para tales condiciones de adquisición en la toma de las imágenes. Cualquier aplicación informática empleada en el procesado de vuelos UAVs se apoya en una técnica basada en visión por computador denominada Structure from Motion (SfM) (Lowe, 2004), siendo posible la reconstrucción de una estructura tridimensional a partir de un conjunto de imágenes solapadas. De este modo, el flujo de trabajo está definido y es independiente al tipo de plataforma UAV, estando la calidad de los productos cartográficos generados, así como las distintas etapas del procesado para su obtención, relacionadas directamente con el plan de vuelo definido. Las fases o etapas en el procesado una vez realizado el vuelo depende del tipo de producto a generar (Figura 1-7). En el caso de la producción de una ortofotografía se descomponen en aerotriangulación (determinación de las coordenadas de un conjunto de puntos y parámetros de orientación externa de cada uno de los centros de disparo de las imágenes), generación de un MDS y/o un MDE, rectificación diferencial de cada una de las imágenes y finalmente el mosaicado de las imágenes (Figura 1-8). En el caso de querer generar una cartografía vectorial el proceso de trabajo una vez aerotriangulado el vuelo consiste en la propia fase de restitución fotogramétrica, si bien este tipo de tareas no son comunes en aplicaciones UAV.

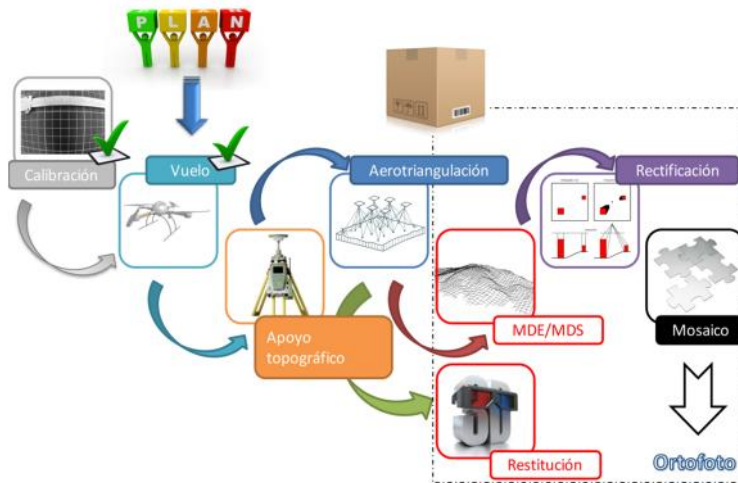


Figura 1-7. Flujo de trabajo para procesamiento de datos obtenidos a partir de un vuelo UAV.

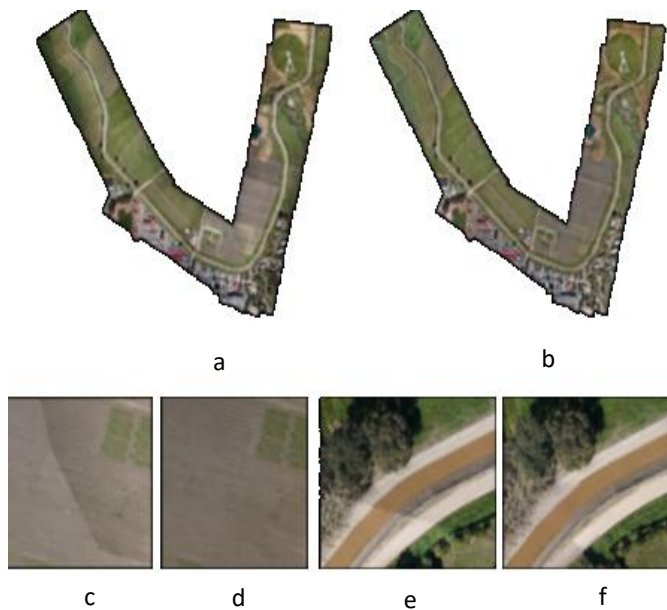


Figura 1-8: Ejemplo de mosaicos. Vuelo UAV modo corredor (a) sin balance radiométrico y (b) con balance radiométrico. Detalle del vuelo con discontinuidad radiométrica (c) y con continuidad radiométrica (d). Detalle del vuelo con (e) discontinuidad radiométrica y geométrica y (f) sin discontinuidades radiométricas y geométricas.

4. Calidad de los datos espaciales.

La calidad de los datos geoespaciales siempre ha presentado un problema significativo en el campo de la Geomática. En los últimos años se ha experimentado un crecimiento importante en cuanto a la accesibilidad a la información geográfica, teniendo los usuarios un acceso más fácil a ellos al tiempo que los productores tienen una amplia gama de plataformas y sensores para obtener y producir tales datos. Este nuevo escenario ha generado múltiples perfiles de usuario con necesidades y requisitos particulares. Si es cierto, que actualmente el usuario demanda información con una elevada resolución temporal. Tal hecho hace que se estén produciendo continuamente datos y productos geográficos que han dado lugar a lo que se podría llamar industrialización de la producción cartográfica. En este nuevo escenario es necesario conocer la calidad del dato geográfico, viéndose afectada a lo largo de todo el proceso de adquisición, gestión, comunicación y uso de los datos geográficos. Collin y Smith (1994) separaron los errores según diferentes fases, que van desde la recopilación de datos hasta el uso de datos. De este modo, la información geográfica requiere de unos niveles de precisión y exactitud adecuados en sus componentes espacial, temporal, temática y topológica adecuados para la aplicación a la que van a ser destinados.

Los campos de aplicación de las imágenes registradas mediante UAV son amplios, desde la ingeniería civil al periodismo, cada una con unas necesidades diferentes. En el campo de la Geomática es posible generar ortofotos, modelos digitales del terreno y modelo de elevaciones, obteniendo cartografía, superficies cubicaciones, mediciones (Tsai et al, 2006). Actualmente un importante número de empresas relacionadas con la ingeniería tienen dentro de su estructura operacional un departamento de UAS/RPAS, para generación y levantamiento de información topográfica y cartográfica (Metni y Hamel, 2007). Por otra parte, en el campo de la multimedia la obtención de imágenes y videos aéreos para seguimiento y control de obras, publicidad, eventos, vigilancia de viviendas y recintos a día de hoy presenta una demanda cada vez más extendida (Gunn, 2005). En agricultura el uso de estas plataformas ha cobrado una relevancia importante, apareciendo numerosas investigaciones relativas al estudio y seguimiento de cultivos, sobre todo en todo en aspectos relacionados con

plagas, enfermedades y riegos. (Guillen-Climent et al., 2012, Zarco-Tejada et al., 2012), en esta misma línea también la tecnología UAV tiene interés en la gestión forestal, pudiendo desarrollar estudios relativos a hidrología y medioambiente (Casbeer et al., 2005).

En lo relativo a la conservación y patrimonio se están realizando catalogación de monumentos históricos, control y evolución del estado de conservación de éstos, además de la propia documentación arqueológica (Püschel et al., 2008; Ortiz,2013). En un escenario de trabajo totalmente diferente es posible desarrollar aplicaciones relativas a operaciones industriales como inspecciones termográficas para la industria realizando chequeos y verificaciones de paneles solares, tendidos eléctricos, torres de alta tensión, aerogeneradores...etc (Mesas-Carrascosa et al., 2017). Todos los casos de uso expuestos anteriormente se basan en el uso y explotación de las imágenes adquiridas por sensores a bordo de vehículos aéreos no tripulados, cada una de ellas con unas necesidades significativamente diferentes. De este modo, será necesario tener en cuenta el concepto de calidad definido por (Juran et al., 1974) como adecuación al uso a la hora de establecer esos criterios de calidad. En este enfoque la calidad es entendida como lo proximidad entre las características explícitas e implícitas de las características de los datos y las necesidades definidas por una aplicación / usuario (Devillers et al., 2005). Por lo tanto, un producto cartográfico podrá ser útil o no dependiendo del uso que se haga de él.

4.1. Calidad de las imágenes.

Las principales organizaciones que establecen normas y especificaciones son industriales o institucionales, estando el proceso dominado por dos sectores en el campo de la geomática: los organismos nacionales de cartografía y las empresas de software. La calidad de la información geográfica queda definida como la cualidad de un conjunto de información recogida que reúne entre sus atributos la exactitud, integridad, actualización, coherencia, relevancia, accesibilidad y confiabilidad necesarias para resultar útiles a las necesidades de un usuario para una aplicación determinada, de manera que un producto cartográfico puede ser útil o no dependiendo del uso que se haga de él. La información geográfica suele ser fuente de información que contribuye a la resolución de problemas

o la toma de decisiones, por lo tanto, la fiabilidad de los resultados se basa, en parte, en la aptitud para el propósito de la fuente de datos, así como en su interoperabilidad con otras fuentes de datos. Los usuarios necesitan considerar si una fuente de datos les proporcionará el tipo y la calidad de información necesaria en el contexto del uso previsto por lo que es importante conocer los objetivos de un proyecto para decidir qué plataformas, herramientas y que sensores usar. Por lo tanto, en los datos cartográficos obtenidos con UAV, como en los obtenidos con otras metodologías o plataformas, es importante evaluar la calidad de todos sus componentes, como ya se ha mencionado anteriormente, resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal.

La precisión espacial de las ortofotos UAV usualmente se reporta usando el error medio cuadrático (RMSE) (Niethammer et al., 2012; Tahar et al., 2012; Hashim et al., 2013). Sin embargo, también es interesante evaluar la calidad de tales ortofotos según las pruebas estándar utilizadas por las Agencias Nacionales de Cartografía (NMA). Cramer et al. (2013) proporcionaron una visión general del estado del arte sobre el uso del UAV por parte de algunas Agencias Nacionales europeas, las cuales pueden usar los UAV como una herramienta para actualizar las geodatabases, mejorando la resolución temporal de sus productos.

De todas las características de un producto cartográfico quizás la mas importante y la que todos los usuarios demandan en primer sea la relacionada con la componente posicional, clave para la interoperabilidad entre geodatabases (Church et al., 1998) y evaluada por todas las agencias productoras de cartografía (Jacobsson et al., 2002) a través de métodos estadísticos para controlarlo (Ariza López et al., 2008).

5. Referencias

- Aasen, H.; Bendig, J.; Bolten, A.; Bennertz, S.; Willkomm, M.; Bareth, G. (2014). Introduction and preliminary results of a calibration for full-frame hyperspectral cameras to monitor agricultural crops with UAVs. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7, ISPRS Technical Commission VII Symposium, 29 September – 2 October 2014, Istanbul, Turkey.
- Aasen, H.; Burkart, A.; Bolten, A.; Bareth, G. (2015). Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 108, 245-259.
- Ambrosia, V.G.; Wegener, S.S.; Sullivan, D.V.; Buechel, S.W.; Dunagan, S.E.; Brass, J.A.; Stoneburner, J.; Schoenung, S.M. (2003). Demonstrating UAV-Acquired Real-Time Thermal Data over Fires. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Number 4, pp. 391-402(12).
- Ariza Lopez, F.J.; Atkinson Gordo, A.D.; Rodriguez Avi, J. (2008). Acceptance curves for the positional control of geographic databases. Journal of Surveying Engineering, vol. 134, pag. 26–32.
- Ballari, D.; Acosta, E.; Espinoza, A.; Orellana, D.; Morocho, V.; Martin, M., Hardter, U.T. (2015). Análisis de imágenes Uav de las Islas Galápagos. Revista Geoespacial 12: 26-37.
- Berni, J. A.; Zarco-Tejada, P. J.; Suárez, L.; González-Dugo, V.; Fereres, E. (2009). Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci, 38(6), 6.
- Berni, J. A.; Zarco-Tejada, P. J.; Suárez, L.; Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing, 47(3), 722-738.

- Berrío Meneses, V.; Alzate Velásquez, D.F.; Ramón Valencia, J.A.; Ramón Valencia, J.L. (2018). Sistemas de optimización de las técnicas de planificación en agricultura de precisión por medio de drones. *Espacios*, Vol 39 (nº 45), Pag 18.

- Cancela, J.J.; González, X.P.; Rey, B.J.; Fandiño, M. (2016). Uso de imágenes multiespectrales para el manejo de la fertirrigación en *Vitis vinifera* cv. Albariño (Galicia). II Simposium Nacional de Ingeniería Hortícola, Automatización y Ticss en agricultura, Almería 10-12 Febrero.

- Casbeer, D.; Beard, R.; Mclain, T.; Li, S.; Mehra, R. (2005). Forest fire monitoring with multiple small UAVs. American Control Conference, June 8-10. Portland.

- Church, R.; Curtin, K.; Fohl, P.; Funk, C.; Goodchild, M.; Kyriakidis, P.; Noronha, V. (1998). Positional Distortion in Geographic Data Sets as a Barrier to Interoperation. Proceedings of ACSM Annual Conference, Baltimore, MD, USA, 1–5 March.

- Collins F.C. and Smith J.L. (1994). Taxonomy for error in GIS, Proceedings of the International Symposium on the Spatial Accuracy of Natural Resource Data Bases, Williamsburg, USA, ASPRS, p 1–7.

- Colwell, R.N. (ed.) (1983). *Manual of Remote Sensing*. Falls Church, Virginia.

- Colwell, R.N. (1997). History and place of photographic interpretation. In, Philipson, W.R. (ed.), *Manual of photographic interpretation*. 2nd edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, United States, p. 3-47.

- Constantin, D.; Rehak, M.; Akhtman, J.; Liebisch, F. (2015). Detection of crop properties by means of hyperspectral remote sensing from a micro UAV. *Bornimer Agrartechnische Berichte*, 88, 129-137.

- Cramer, M.; Bovet, S.; Gültlinger, M.; Honkavaara, E.; McGill, A.; Rijdsdijk, M.; Tabor, M.; Tournadre, V. (2013). On the use of RPAS in national mapping—The EUROSDR point of view. *International Archives of the*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2, 93–99.

- Devillers, R.; Bédard, Y.; Jeansoulin, R. (2005). Multidimensional management of geospatial data quality information for its dynamic use within GIS. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(2), 205-215.
- Geipel, J.; Link, J.; Wirwahn, J.A.; Claupein, W. (2016). A Programmable Aerial Multispectral Camera System for In-Season Crop Biomass and Nitrogen Content Estimation. *Agriculture*, 6, 4.
- Genzelis, L.; Murillo, M.; Giovanini, L. (2016). Modelado y control de un vehículo aéreo no tripulado híbrido. AADECA 2016 - Semana del Control Automático – 25º Congreso Argentino de Control Automático, 1 al 3 de Noviembre- Buenos Aires, Argentina.
- Goldman, D.B. (2010). Vignette and exposure calibration and compensation. *Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol 32. No.12.
- Gonzalez-Dugo, V.; Zarco-Tejada, P.; Nicolás, E.; Nortes, P.A., Alarcón, J.J.; Intrigliolo, D.S. and Fereres, E. (2013). Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture*. Volumen 14, Issues 6, pp 660-678.
- Gordillo, V.M.; Flores, H.; Ortiz, C.A.; Arteaga, R.; Macedo, A.; Rubiños, J.E. (2018). Uso De Vant En El Monitoreo De Requerimientos Nutricionales. IV Congreso Nacional De Riego Y Drenaje Comeii 2018 Aguascalientes, Ags., Del 15 Al 18 De Octubre.
- Guillen-Climent, M.L.; Zarco-Tejada, P.; Berni, J.A.J; North, P.R.J.; Villalobos, F.J. (2012). Mapping radiation interception in row-structured orchards using 3D simulation and high-resolution airborne imagery acquired from a UAV. *Precision Agriculture* August 2012, Volume 13, Issue 4, pp 473–500.
- Gunn, D.V.; Warm, J.S.; Nelson, W.T.; Bolia, R.S.; Schumsky, D.A.; Corcoran, K.J. (2005). Target Acquisition With UAVs: Vigilance Displays and Advanced

Cuing Interfaces. *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 47, pages 488-497.

- Hashim, K.A.; Darwin, N.H.; Ahmad, A.; Samad, A.M. (2013). Assessment of low altitude aerial data for large scale urban environmental mapping. *Proceedings of 2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications (CSPA)*, Kuala Lumpur, 8–10 March; pp. 229–234.

- Hengl, T. (2005). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*. Volumen 32. Issue 9. Pages 1283-1298.

- Hoffmann, H.; Nieto, H.; Jensen, R.; Guzinski, R.; zarco-Tejada, P.; Friborg, T. (2016). Estimating evaporation with thermal UAV data and two-source energy balance models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 697-713.

- Honkavaara, E.; Hakala, T.; Markelin, L.; Jaakkola, A.; Saari, H.; Ojanen, H.; Pölonen, I.; Tuominen, S.; Näsi, R.; Rosnell, T.; Viljanen, N. (2014). Autonomous hyperspectral Uas photogrammetry for environmental monitoring applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1, ISPRS Technical Commission I Symposium, 17 – 20 November, Denver, Colorado, USA.

- Hoyos, J.E.; Posada, W.; Cerón, M.F. (2019). Use of multispectral photography to assess the phytosanitary status of kikuyu grass (*Cechrus clandestinus* (Hochst ex Chiov) Morrone). *Acta Agron.* 68 (1) p 61-67.

- Intwala, A.; Parikh, Y. (2015). A Review on Vertical Take Off and Landing (VTOL) Vehicles. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)* ISSN: 2349-2163, Issue 2, Volume 2.

- Jakobsson, A.; Vauglin, F. (2002). Report of a Questionnaire on Data Quality in National Mapping Agencies; CERCO Working Group on Quality, Comité Européen des Responsables de Cartographie Officielle: Marne-la-Vallée, France.

- Juran, J.M.; Gryna, F.M.J.; Bingham, R.S. (1974). *Quality Control Handbook*; McGraw-Hill: New York, NY, USA.

- Kelcey, J.; Lucieer, A. (2012). Sensor correction and radiometric calibration of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing. In The 12th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Vol. 39, pp. 393-398).
- Kharuf-Gutiérrez, S.; Hernández-Santana, L.; Orozco-Morales, R.; Aday-Díaz, O.; Delgado-Mora, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. RIELAC, Vol 39, Pag. 79-91.
- Kumar, G.A.; Patil, A.; Patil, R.; Park, S.; Chai, Y. (2017). A LiDAR and IMU Integrated Indoor Navigation System for UAVs and Its Application in Real-Time Pipeline Classification. *Sensors*, 17, 1268.
- Lambers, K.; Eisenbeiss, H.; Sauerbier, D.; Kupferschmidt, D.; Gaisecker, T.; Sotoodeh, S.; Hanusch, T. (2007). Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. *Journal of Archaeological Science*. Volume 34, Pages 1702-1712.
- López-Granados, F.; Jurado-Expósito, M., Peña-Barragan, J.M. and García-Torres, L. (2006). Using remote sensing for identification of late-season grass weed patches in wheat. *Weed Science* 54(2):346-353.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110.
- Mahiny, A.S.; Turner, B.J., (2007). A Comparison of Four Common Atmospheric Correction Methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Number 4. , pp. 361-368(8).
- Malin, D. and Light, D.L. (2007). Aerial photography. In Peres, M.R. (ed.), *Focal encyclopedia of photography*. 4th edition. Elsevier, Amsterdam, p. 501-504.
- Marcos Robles, J.L.; Gil Do Campo, M.L.; Ortíz Sanz, J.; Martínez Rodríguez, S.; Garrido Lournaga, F.; Sánchez Sastre, L.F.; Hernández Navarro, S.; Clérigo Pérez, Z.; Ortíz Sanz, L. (2016). Determinación de biomasa en parcelas de

cultivos herbáceos mediante cámaras ópticas elevadas por medio de vehículos aéreos no tripulados (UAV). Congreso Iberoamericano de Investigación Cualitativa, Investigación Cualitativa en Ingeniería y Tecnología, Volumen 4.

- Mesas-Carrascosa, F.J.; Verdú Santano, D.; Pérez Porras, F.; Meroño-Larriva, J.E.; and García-Ferrer, A. (2017). The Development of an Open Hardware and Software System Onboard Unmanned Aerial Vehicles to Monitor Concentrated Solar Power Plants. *Sensors*, 17(6), 1329.

- Mesas-Carrascosa, F. J.; Pérez-Porras, F.; Meroño de Larriva, J.; Mena Frau, C.; Agüera-Vega, F.; Carvajal-Ramírez, F.; García-Ferrer, A. (2018). Drift correction of lightweight microbolometer thermal sensors on-board unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing*, 10(4), 6.

- Metni, N.; Hamel, T. (2007). A UAV for bridge inspection: Visual servoing control law with orientation limits. *Automation in Construction*, Volume 17, pages 3-10.

- Niethammer, U.; James, M.R.; Rothmund, S.; Travelletti, J.; Joswig, M. (2012). UAV-based remote sensing of the super-sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, Volume 128, 2–11.

- Ortiz, P. (2013). Digitalización automática del patrimonio arqueológico a partir de fotogrametría. *Virtual Archaeology Review (VAR)*. Volumen 4 Número 8. ISSN: 1989-9947.

- Peña, J.M.; Torres-Sánchez, J.; Serrano-Perez, A.; López-Granados, F. (2014). Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). *Revista de teledetección, Asociación Española de Teledetección* 42, 39-47.

- Peña-Barragán, J.M.; López-Granados, F.; Jurado-Expósito, M; and García-Torres, L. (2007). Mapping *Ridolfia segetum* patches in sunflower crop using remote sensing. *Weed Research*, 47: 164-172.

- Peña-Barragan, J.M.; López-Granados, F.; Jurado-Expósito, M. and García-Torres, L.

(2010). Sunflower yield related to multitemporal aerial photography, land elevation and weed infestation. *Precision Agriculture*, 11: 568-585.

- Pérez, I. J. (2005). Ortofoto verdadera (true-ortho) y lidar , el posible futuro de la cartografía catastral urbana. Madrid- España. Recuperado de: http://www.catastro.minhap.es/documentos/publicaciones/ct/ct53/05-CATASTRO_53.pdf

- Prieto, R.; Méndez, E.; Vales, J.J.; Pino, I.; Carpintero, I.R.; Granado, L.; Montoya, G.; Giménez de Azcárate, F.; Cáceres, F.; Moreira, J.M. (2014). Aplicación de UAV a la detección de fauna como soporte a los censos cinegéticos. *REDIAM. Revista de Teledetección, Asociación Española de Teledetección* 41, 121-131.

- Püschel, H., Sauerbier, M., Eisebeiss, H. (2008). A 3d model of castle Landenberg (CH) from combined photogrammetric processing of terrestrial and UAV- based Images. *International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37, 93-98.

- 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, Volume XL-5, ISPRS Technical Commission V Symposium*, 23 – 25, Riva del Garda, Italy.

- Sabatini, R.; Richardson, M.A.; Roviato, E. (2013). Development and Flight Test of an Avionics Lidar for Helicopter and UAV Low-Level Flight. *J Aeronaut Aerospace Eng* 2: 114.

- Saeed, A.S.; Younes, A.B. ; Islam, S. ; Dias, J. ; Seneviratne, L. ; Cai, G. (2015). A review on the platform design, dynamic modeling and control of hybrid UAVs. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. 9-12 June. Denver, CO, USA.

- Sandino, J.; Pegg, G.; Gonzalez, F.; Smith, G. (2018). Aerial mapping of forests affected by pathogens using UAVs, hyperspectral sensors, and artificial intelligence. *Sensors*, 18(4), 944.

- Santesteban, L.G.; Di Gennaro, S.F.; Miranda, C.; Royo, J.B.; Matese, A. (2016). Utilización de imágenes térmicas de alta resolución para estimar la variabilidad del estado hídrico de un viñedo. II Simposium Nacional de Ingeniería Hortícola, Automatización y Tics en Agricultura, Almería, 10-12 de Febrero.

- Silvagni, M.; Tonoli, A.; Zenerino, E.; Chiaberge, M. (2017). Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain avalanche events. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 8, nº 1, 18-33.

- Sugiura, R.; Noguchi, N.; Ishii, K. (2005). Remote-sensing Technology for Vegetation Monitoring using an Unmanned Helicopter. *Biosystems Engineering*, Volume 90, Issue 4, Pages 369-379.

- Tahar, K.N.; Ahmad, A. (2012). A simulation study on the capabilities of rotor wing unmanned aerial vehicle in aerial terrain mapping. *International Journal of Physical Science*, Volume 7, 1300–1306.

- Torres Galindo, A.K.; Gómez Rivera, A.F.; Jiménez López, A.F. (2015). Development of a multispectral system for precision agriculture applications using embedded devices. *Sistemas & Telemática*, vol. 13, núm. 33, pp. 27-44.

- Tsai, M.L.; Chiang, K.W.; Huang, Y.W.; Lin, Y.S.; Tsai, J.S.; Loc, C.F.; Linc, Y.S.; Wud, C.H. (2006). The Development of a Direct Georeferencing Ready UAV based photogrammetry platform. Commission I, ICWG I/V Unmanned Vehicle Systems (UVS) for Mapping and Monitoring Applications.

- Vanegas, F.; Bratanov, D.; Powel, K.; Weiss, J.; González, F. (2018). A Novel Methodology for Improving Plant Pest Surveillance in Vineyards and Crops Using UAV-Based Hyperspectral and Spatial Data. *Sensor*, 18, 260.

- Zarco-Tejada, P.J.; González-Dugo, V.; Berni, J.A. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, Volume 117, Pages 322-337.

Objetivos y estructura de la Tesis

El interés despertado por el uso de los sensores embarcados en plataformas de vuelo no tripuladas en el campo de la geomática es la base de este trabajo de investigación. Esta tesis doctoral se basa en que, para introducir o afianzar el uso de una nueva tecnología, es necesario conocer aspectos como su comportamiento en distintos ámbitos de trabajo, así como su eficacia intentando optimizar la metodología empleada. Además de conocer el alcance de la calidad de los productos generados es necesario optimizar la metodología de adquisición de la información de manera que se mejore el apoyo a la toma de decisiones, minimizando los tiempos de respuesta al tiempo que se maximice la calidad de la información aportada. Creemos que es posible determinar condiciones ambientales y físicas de la operatividad del sistema que posibiliten las aplicaciones geomáticas en distintos sectores donde la calidad métrica, posicional y espectral esté garantizada.

En base a este planteamiento general los objetivos de esta Tesis Doctoral se concretan en los siguientes:

-) Analizar el potencial y las capacidades de uso de los productos obtenidos de imágenes aéreas mediante vuelos UAV.
-) Analizar la influencia de parámetros de vuelo trabajando con sensores, multispectrales y RGB en productos geomáticos.
-) Analizar la influencia de las condiciones ambientales y parámetros de vuelo en la captura de información con sensores termográficos.
-) Determinar las condiciones y características óptimas de vuelo para diferentes ámbitos de trabajo.

Para alcanzar estos objetivos el presente trabajo queda estructurado en 5 capítulos. En el **Capítulo 1**, capítulo actual, se hace una introducción sobre plataformas aéreas, sensores y procesos, siendo en los capítulos siguientes donde se desarrolla el núcleo de la investigación de esta Tesis doctoral. En el **Capítulo 2** se analiza el potencial de uso de imágenes de muy alta resolución obtenidas con UAV para medir el área de parcelas agrícolas y su aplicación en el control y supervisión de las políticas agrarias.

El **Capítulo 3** evalúa la influencia de distintos parámetros de vuelo para la obtención de productos cartográficos de calidad para su uso, describiéndose la configuración y especificaciones técnicas necesarias para un UAV con sensor de imagen a bordo. En el **Capítulo 4** se estudia el uso de sensores térmicos y RGB embarcados en plataformas UAV para trabajos en el campo del patrimonio. Por último, en el **Capítulo 5** se presentan las conclusiones generales y futuras líneas de investigación, permitiendo tener una visión de la contribución científica al conocimiento del presente trabajo.

Derivados de esta Tesis doctoral se han llevado a cabo las siguientes publicaciones, dos artículos y una comunicación a Congreso:

- Mesas-Carrascosa, F.J.; Notario-García, M.D.; Meroño-de la Riva, J.E.; Sánchez-de la Orden, M.; García-Ferrer Porras, A. (2014). *Validation of measurements of land plot area using UAV imagery*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 33, 270–279.
- Mesas-Carrascosa, F.J.; Notario-García, M.D.; Meroño-de la Riva, J.E.; M.; García-Ferrer Porras, A. (2016). *An Analysis of the Influence of Flight Parameters in the Generation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Orthomosaics to Survey Archaeological Areas*. Sensors, 16, 1838.
- Mesas-Carrascosa, F.J.; Notario-García, M.D.; Clavero-Rumbao, I.; Sánchez-de la Orden, M.; García-Ferrer, A. (2015). *Influencia de parámetros de vuelo en la generación de ortofotografías aplicadas a patrimonio histórico*. XVI Congreso de la AET (Asociación Española de Teledetección), Sevilla, 21-23 Octubre 2015.

Capítulo 2

Validation of measurements of land plot area using UAV imagery

Francisco Javier Mesas-Carrascosa*, María Dolores Notario-García, José Emilio Meroño de Larriva, Manuel Sánchez de la Orden, Alfonso García-Ferrer Porras

Department of Graphic Engineering and Geomatics. University of Cordoba, Campus de Rabanales, 14071 Cordoba, Spain

Publicado en:

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 33, 270–279.

Abstract

This paper analyzes the potential use of very high resolution UAV imagery to measure the area of land plots to monitor land policies. The method used to monitor land is to measure the area of a set of land plots. Compared to traditional methods based on Global Navigation Satellite System (GNSS) measurements or imagery obtained from aerial or satellite platforms, UAV systems lead to improved cost savings in this task without losing accuracy. The tests were conducted on 25 plots representing all the characteristics of a region (e.g. size, shape, border conditions and land use). We determined technical tolerance as a buffer using ISO 5725. We also assessed the relationship between the buffers obtained for the land plots and the characteristics of the plots. Technical tolerance in the digitized plots was within the range established by the European Union. This result shows the validity of UAV systems for land policy monitoring.

Resumen

Este trabajo analiza el potencial de uso de imágenes de alta resolución obtenidas con UAV para medir el área de parcelas agrícolas para su supervisión en políticas agrarias. El método usado para control de parcelas es la medida del área de cada una de las parcelas agrícolas. En comparación con los métodos tradicionales, basados en el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), mediciones o imágenes obtenidas desde plataformas aéreas o satelitales, los sistemas de vehículos aéreos no tripulados llevan a un ahorro de costes en la mejora de esta tarea sin perder precisión. Las pruebas se realizaron en 25 parcelas que representan todas las características de una región (por ejemplo, tamaño, forma, condiciones de los bordes y uso de la tierra). Se determinó la tolerancia técnica como un buffer usando la norma ISO 5725. También se evaluó la relación entre los buffers obtenidos para las parcelas y las características de las parcelas. La tolerancia técnica en las parcelas digitalizadas estaba dentro del rango establecido por la Unión Europea. Este resultado demuestra la validez de los sistemas de vehículos aéreos no tripulados para control de políticas agrarias.

1. Introduction

A number of governments and the European Union (Union, 2004) have underlined the need to use measuring instruments that are controlled by law. In this regard, the methods used to measure areas of land plots using Global Navigation Satellite Systems (GNSS) or aerial and spatial images must be evaluated to determine their technical tolerance as a buffer. In fact, Article 30.1 of EU Commission Regulation No. 796/2004 establishes that the measurement area shall not exceed either 5% of the land plot or a buffer of 1.5 m applied to its perimeter. Also, the maximum tolerance with regard to each land plot shall not, in absolute terms, exceed 1 ha. The European Union has developed technical notes to define an approach for the validation of area measurement methods to provide a standardized way to estimate the tools use for area measurements based in ISO 5725 (Kay and Sima, 2009). In this context UAV orthophotos have not been evaluated yet to know if they are valid as a method to measure areas of land plots for monitoring land policies. These land policies define a set of rules on good agricultural and environmental condition designed to prevent soil erosion or to ensure a minimum level of maintenance. These conditions set a percentage of the plot area that has to comply to different characteristics, therefore is important to measure plot area properly. These measurement instrument have some problems related with the monitoring process. GNSS requires a large effort to evaluate all the controlled land. On the other hand, aerial or satellite images sometimes are not taken in the necessary moment. UAV can be an alternative where we can fly controlled land when it is necessary.

Satellite and aircraft-based systems are the two platforms most commonly used to collect image data. The imagery is used to derive information to create maps, digital terrain models and orthophotos (Beekhuizen and Clarke, 2010; Jianwei et al., 2011; Pieczonka et al., 2011; Reinartz et al., 2011; Saadat et al., 2011). These platforms ensure the spatial and spectral quality of the data be used in projects where its geographical extent makes impossible to derive them by traditional on-ground survey. Users can measure coordinates, distances, areas and radiances and can also use the data as support for decision-making (Meddens et al., 2011). Depending on the use we make of the data provided by onboard sensors, these platforms may or may not be adequate because of their spatial,

spectral, radiometric or temporal resolution. When very high spatial resolution is required, depending on the application current satellite-based products have a limited application because they have insufficient spatial resolution (Seelan et al., 2003; Woodcock and Strahler, 1987). High-resolution satellites are not adequate if we need to detect small objects with a size of 0.20 m or less, for example. Conversely, very high spatial resolution imagery such as that obtained using metric aerial cameras tends to have low spectral resolution. Therefore, it is difficult to develop applications to assess crops status or conditions.

Traditionally, cameras onboard aircraft systems have been developed to obtain metric image data and spectral data has been given less importance. However, digital metric cameras make it possible to use spectral information to generate remote sensing products (Corbane et al., 2012; Forzieri et al., 2013). In addition, both aerial and satellite systems have the common problem of temporal resolution. Some satellite systems, like Landsat or Spot, imply long revisit periods and airborne systems have high economic costs that sometimes make them impossible to fly when it is necessary because of financial limitations (Herwitz et al., 2004). Many applications such as precision farming or irrigation scheduling require timely availability of data and in some case even real-time data (Berni et al., 2009). The importance of the temporal variable of the data to support a decision is crucial in many applications (Inmon, 2005) such as fire monitoring or precision agriculture (Merino et al., 2012; Zhang and Kovacs, 2012). The direct consequence of using manned or satellite platforms is that the success of tasks that require decision-support tools is jeopardized because of their dependence on both spatial and temporal data (Shaw, 2005).

Over the last decade, significant changes have occurred in the field of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and the civil and military interest of such platforms has become evident (Nonami, 2007). The public sector is aware of the benefits of using UAVs for civil applications (Dalamagkidis et al., 2008; Zaloga, 2007). For example, UAVs can work in hazardous conditions, darkness, extreme heat and a host of other conditions that may pose significant risks to manned aircraft. Several organizations and agencies are introducing UAVs into their systems to assist maritime search and rescue missions or civil security operations (Ryan and Hedrick, 2005; Samuel, 2005).

A few examples of applications in which UAVs are being used successfully are detection and monitoring of forest fires, regular inspection of infrastructures, traffic surveillance, disaster management and civil protection and precision agriculture (Ambrosia et al., 2003; Candamo et al., 2009; Coifman et al., 2006; Garcia-Ruiz et al., 2013; Lan et al., 2010; Maza et al., 2011; Merino et al., 2006; Metni and Hamel, 2007; Quaritsch et al., 2010). Since 2000, the utilization of UAVs in photogrammetry have become common. This new scenario can be explained by the spread of the low-cost combined Global Positioning System / Inertial Navigation System (GPS/INS). As a result, it is possible to obtain georeferenced products with a spatial accuracy within centimeters (Chiabrando et al., 2011; Siebert and Teizer, 2014). It is therefore necessary to know the quality of the data.

The high spatial quality of UAV orthophotos is not always guaranteed, image blurred due to extreme movement of the platform or improper overlap because of failure in the storage system can cause local problems in the product (Samad et al., 2013; Zongjian, 2008). Sensors used on board UAVs have several shortcomings that can affect accuracy of the photogrammetric products. Although there are orientation systems on-board UAV with centimeter level accuracy, (Turner et al., 2014), these are not normally used to reach this level of accuracy although in the near future they will be an inexpensive, achievable system (Colomina and Molina, 2014). Other shortcomings include the lack of vertical adjustment of the aerial camera and the unknown or variable interior orientation of the camera. These factors affect point position accuracy but do not necessarily decrease the accuracy of area measurements. The area measured from an orthophoto acquired with a UAV system can be used as evidence in court, to assess territorial changes, or can be entered into a database. Hence, in order to use this information it is necessary to know the measurement tolerance used as a buffer to apply it as a technical standard.

The overall objective of the present research was to evaluate area measurement accuracy in orthophotos obtained from UAV imagery. It was applied the ISO 5725-1 and 5725-2. ISO 5725-1, titled 'Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results', provides the general principles necessary to accurately assess measurement methods, results, applications and practical estimations. ISO 5725-2, titled 'Basic method for

the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method', defines the general principles to take into account in design experiments for the numerical estimation of the precision of measurement. These standards are used in many applications such as water monitoring, validation of quantitative chemical methods or metrology (Botta et al., 2012; Hitchins, 2011; Pavese, 2009). The hypothesis is that the error on area is a function of the error on each point that defines the perimeter, dividing the error on area by the perimeter we obtain an error around the plot perimeter. This error must not depend on the parcel but on the tool, in our case the UAV orthophotos. We used these standards to estimate the accuracy of UAVs at measuring plot area in a standardized way. This paper is organized as follows: Section 2 describes the materials and methods, Section 3 addresses the results and discussion, and Section 4 presents the conclusions.

2. Materials and Methods

2.1 Study sites

Data used in this study were collected from three experimental areas. These areas were located in the regions of Andalusia and Murcia, Spain. These areas have typical continental Mediterranean climate, characterized by long dry summers, mild winters and a relatively flat relief.

The first study site was located in Posadas, Spain, 37° 48' N, 5° 04' W (Figure 2-1.a). In this site we selected eight plots with herbaceous and woody crops ranging from 0.6 to 15 ha and a slope lower than 1%. Herbaceous crops corresponded to winter cereal stubble (*Triticum durum* L.) with a crop height of 15-20 cm, also other plots were left the land fallow. Woody crops were orange trees (*Citrus sinensis* cv Navelina) planted at a spacing of 6x3 m. The plots had regular shapes, typically with clearly defined borders, except for plots near the river, whose borders were hidden by shadows. This site was flown on January 2009.

The second study site was located in Castro del Río, Spain, 37° 42' N, 4° 30' W (Figure 2-1.b). In this site we selected four plots that had woody crops with a surface ranging from 1 to 29 ha and a slope about 3%. Woody crops corresponded to olive cultivar (cv.) Picual at a spacing of 6x4m. Three

plots had regular shapes and the largest one had an irregular shape. Plot borders were generally clear, except in the largest land plot, where there were tall trees in the top limit casting shadows. The flight date was May, 2009.

The third study site was located in Librilla, Spain, $37^{\circ} 51' N$, $1^{\circ} 19' W$ (Figure 2-1.c). In this site we selected thirteen plots with herbaceous and woody crops and ranged from 0.3 and 14, showing a slope of 3%. Woody crops corresponded to lemon tree (*Citrus limon* cv Verna) at a spacing of 6x5 m, olive cultivar (cv.) Serrana de espadan at a spacing 7x5 m and pistachio (*Pistacia vera* L.) at a spacing of 7x6 m. Herbaceous crops corresponded to *Avena sativa* L., at the moment of the flight the height of plants was 30 cm. The flight was made on June, 2009.

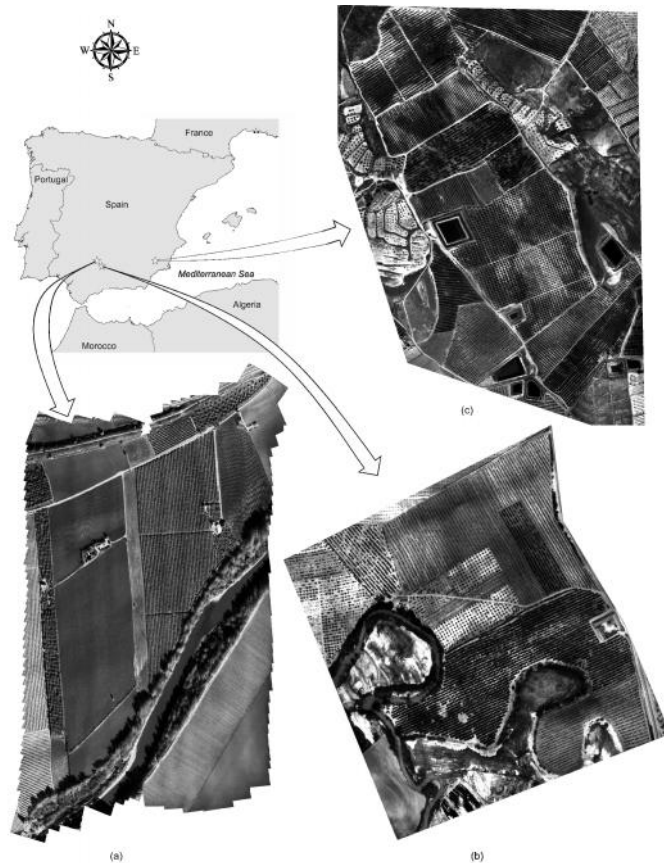


Figure 2-1. Overview of the study sites: (a) Posadas, (b) Castro del Río and (c) Librilla.

The plots of each area were characterized by different sizes, shapes, border conditions and land uses. They were classified into three sizes: small, medium and large. Land plots of less than 0.5 ha were considered small (S), those with an area between 0.5 and 1.5 ha were considered medium (M) and those of more than 1.5 ha were considered large (L). As shape factor we used the ratio between perimeter / area ratio because it describes the relationship between area and boundary length, providing useful information about the edge effect that may be present in a specific plot (Cook, 2002; Salas et al., 2003). The shape factor was divided into three levels, defined using the ratio between the area and the perimeter of the land plot. Level 1 (S1) corresponded to a shape factor less than 0.4, that is, elongated land plots. In Level 2 (S2), the shape factor ranged between 0.4 and 0.6. In Level 3 (S3), the shape factor was above 0.6. Figure 2-2 shows samples of land plots taking into account border conditions and the land use factor. Two types of border conditions were considered: good conditions, with clearly defined borders (Figure 2-2.b), and bad conditions, with shadows and poorly defined borders (Figure 2-2.a and Figure 2-2.c). Finally, the land use factor, established in the field campaign, was divided into herbaceous crops (HC) (Figure 2-2.a and Figure 2-2.c) and woody crops (WC) (Figure 2-2.b). With these characteristics, all the situations in a real-life scenario were covered. In the present study, all the possible situations were taken into account.

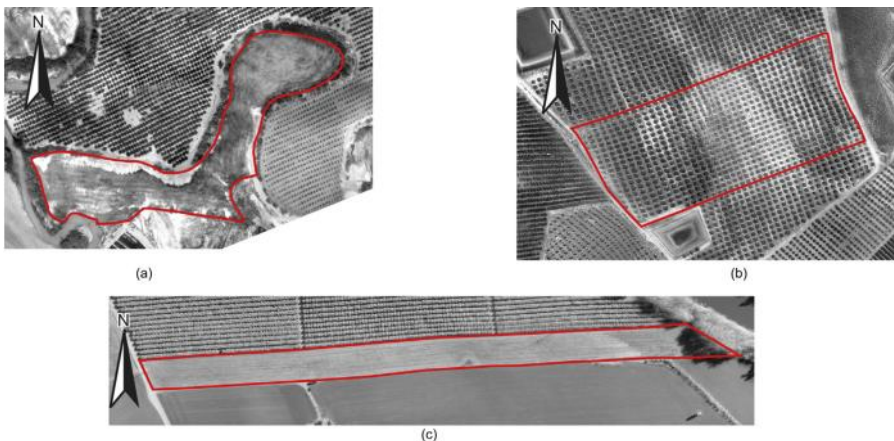


Figure 2-2. Images of land plots presenting different border conditions: (a) irregular shape with poor borders, (b) regular shape and (c) elongated shape with poor borders.

2.2 Field data collection

Flights were conducted with an UAV operated by Spanish Laboratory for Research Methods in Quantitative Remote Sensing (Quantalab, IAS-CSIC, Spain) (Berni et al., 2009; Zarco-Tejada et al., 2012). The UAV used for imagery acquisition had a 2-m wingspan for a fixed-wing platform at 5.8 kg take-off weight (mX-SIGHT, UAV Services and Systems, Germany). UAV platform was controlled by an autopilot system (AP04, UAV Navigation, Madrid, Spain) that provided autonomous navigation based on coordinates programmed during the mission planning. Flight conditions were the same for the three sites, they were conducted on windless days at the same time, close to 12.00 p.m.

A 6-band multispectral camera (Mini-MCA-6, Tetracam, Inc., USA) installed in a UAV was flown at 150 m above ground to acquire images from the different study sites. This sensor was selected because it is useful for support monitoring land policies taken into account its spatial and spectral information. Like other sensors we can produce an orthophoto to digitize plots. It is not the best type of sensor from a geometric point of view but in other ways it is quite versatile because we can determinate land use, crop or crops status in a plot using its six spectral bands. The spectral bands were centered at 490, 550, 680, 720, 800 and 900 nm. The image resolution of this sensor is 1280x1024 pixels with a 10-bit radiometric resolution and an optical focal length of 9.6 mm per channel. Pixel size is 5.2 μ m x 5.2 μ m and the camera weighs 700 g.

The geometric calibration of the sensor was performed using Bouguet's camera calibration toolbox (Bouguet, 2001). All the flight images were processed using a photogrammetric technique. The exterior orientation of each image was used as an initial approximation for the aerotriangulation.

In each flight, handmade control points were measured in the corners of the photogrammetric block in order to set the reference coordinate system in orthophotographies. These points were measured using a dual frequency GNSS receivers.

Automatic tie points were extracted using the SIFT algorithm (Lowe, 2004) and made by Quantlab. The next step was to calculate the aerial triangulation making a bundle adjustment. All the images were loaded with the auxiliary data (camera calibration, ground control points and tie-points) into the Leica Photogrammetric Suite (LPS, Leica Geosystems Switzerland) to run the triangulation adjustment. We did not extract tie points with LPS as Eisenbeiss et al., (2005) because of poorly constrained camera positions or changes in light conditions. Once exterior orientation was calculated a digital surface model was generated and an orthophoto with a spatial resolution of 0.1 x 0.1 m. In these two processes we used LPS.

We obtain a reference value of the area of each plot to compare it with the area measured from UAV orthophotos using GNSS receivers. These references values were used for outlier detection, therefore they have to show an uncertainty at least three times better than the area obtained by UAV orthophoto (FGDC, 1998). For this reason, the coordinates of the vertexes of each reference land plot can be determined using a centimeter-level survey such as GNSS observation or total station measurements. We used a Leica 1200 GNSS receiver to collect the vertexes that defined each plot border with a carrier-phase tracking mode. To reach this accuracy we used two receivers: one was a reference station from the GNSS RAP network of the Institute of Statistics and Cartography of Andalusia, Spain, and the other as a rover. We used the Stop & Go technique for relative positioning with GPS (Loghavi and Behzadi Mackvandi, 2008; Ramos et al., 2007). We measured the singular vertexes that defined the border of land plots to calculate their reference areas accurately.

We developed digitization guidelines to help in the process of on-screen digitization of the boundaries of plots from the UAV orthophoto to avert inconsistencies in the capture of information of plot boundaries. This requires developing a measurement protocol by digitizing each land plot on the screen.

Five unskilled operators from the School of Agronomy and Forestry Engineering of the University of Cordoba participated in the experiment. Each operator received a guidance document that explained how to measure a land plot, showing a view of each land plot with its borders

delimited, the codes of the land plots and a proper on-screen display scale. The protocol must clearly define the scale of the images displayed on the screen and the maximum distance between two successive digitized vertices. Thereby, in order for the results to be comparable, the operators involved in the experiment worked in the same conditions. It is important to establish a randomized order for digitizing land plots to reduce the memorization of land plot boundaries as much as possible. The operators were given the sequence of land plots to digitize every day. This sequence changed from one repetition to another. Each operator generated five laboratories, term used by ISO 5725 to group a set of measurements. Each set had four measurements, so each land plot was measured one hundred times.

The software used for digitization was ArcMap 9.3 by Esri. Each operator generated a shapefile for each measurement. Each measurement was checked to verify file names and codes and to ensure that no land plots were omitted. After this, the data were exported to a spreadsheet to be analyzed.

2.3 Statistical test for critical review of area measurements

The first stage of data analysis is the critical review of the area measurements in orthophotos obtained from UAV imagery to identify and address irregularities or outliers using ISO 5725-2. Outliers are defined as original value of area for a plot that deviate too much from comparable values of an area. To detect outliers using ISO 5725-2, the observations are pooled into groups according to a pooling factor called 'laboratory'. We used three statistical tests: the Cochran test (Hossain et al., 2011) and the Grubbs test for one and two outliers (Confalonieri, 2010).

2.3.1 The Cochran test

The Cochran test is used to check if it can be assumed that variances for area between replicates are equal for each level of the pooling factor on a given land plot. This test is based on homogeneity of variance under repeatability conditions. It only tests the highest value in a set of standard deviations. It is therefore used to verify the existence of measurements with standard deviations that are exceptionally large and would inflate the

estimate of the repeatability standard deviation if retained. Let $\hat{\sigma}_1^2, \dots, \hat{\sigma}_p^2$ be the variances for level i in a given land plot and $\hat{\sigma}_{\max}^2$ the largest variance; the Cochran test statistic (C) is:

$$C = \frac{\hat{\sigma}_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p \hat{\sigma}_i^2} \quad (1)$$

If the test statistic in a certain item lies between its 5% and 1% critical values, the entry is called a statistical straggler. If the test statistic is greater than its 1% critical value, the item is called a statistical outlier.

2.3.2 The Grubbs test for one outlier

The Grubbs test is used to verify the existence of measurements that are exceptionally high or low compared to the mean value and would therefore inflate the estimate of the reproducibility standard deviation if retained.

Given a set of n area measured in ascending order x_1, x_2, \dots, x_n with mean \bar{x} and standard deviation $\hat{\sigma}$, the Grubbs test for one outlier for the minimum (G_{\min}) and maximum value (G_{\max}) is:

$$G_{\min} = \frac{\bar{x} - x_1}{\hat{\sigma}}; G_{\max} = \frac{x_n - \bar{x}}{\hat{\sigma}} \quad (2)$$

G_{\min} and G_{\max} are the standardized distances from the mean to the largest and the smallest values. If G is the largest of the two values, G is considered a straggler if it is greater than its 5% critical value and less than or equal to its 1% critical value. It is considered an outlier if it is greater than its 1% critical value.

2.3.3 The Grubbs test for two outliers

The aim of this test is to check if the two largest or smallest observations are considered outliers. For the largest value, G is calculated as:

$$G = \frac{s_{nZ1,n}^2}{s_0^2} \quad (3)$$

where

$$s_0^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \quad (4)$$

$$s_{nZ1,n}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} x_i^2 - \bar{x}_{nZ1,n}^2 \quad (5)$$

$$\bar{x}_{pZ1,p} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} x_i \quad (6)$$

G is considered a straggler if it is smaller than its 5% critical value and larger than or equal to its 1% critical value. G is considered an outlier if it is smaller than its 1% critical value.

Figure 2-3 shows the sequence for using the Cochran and Grubbs tests to detect outliers, defining which test should be calculated depending of the type of error and how. The Cochran test statistic is calculated first. Three different situations may happen:

1. If the Cochran test shows the existence of outliers, the Grubbs test statistic for one outlier is calculated. If identifies any outliers, the

outliers are eliminated. Otherwise, the whole set is eliminated. The Cochran test statistic is calculated again and the process is repeated.

2. If the Cochran test shows the existence of stragglers, the Grubbs test statistic for one outlier is calculated. If it identifies any outliers, they are discarded and the Cochran test is repeated. If the Grubbs test does not identify any outliers, the evaluation goes on to calculate the Grubbs test statistic on set means.
3. If no outliers or stragglers are found, the process goes on to calculate the Grubbs test statistic on set means.

At this stage, the mean of each set is calculated and the Grubbs test statistic is calculated. If a set is an outlier, it is discarded and the test is repeated. If a set is not an outlier, the Grubbs test statistic for two outliers is calculated. This test is the last statistical control to guarantee the absence of outliers in the area measurements of each land plot.

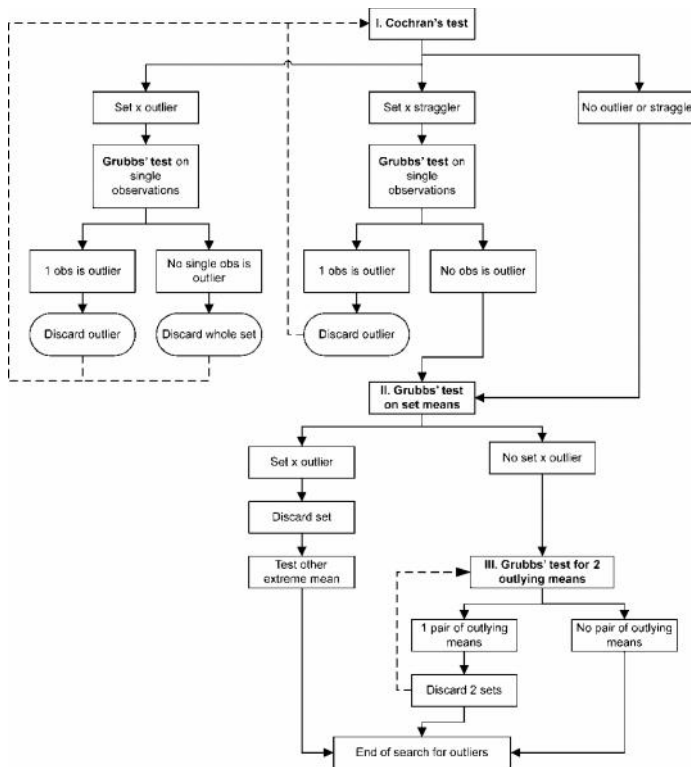


Figure 2-3. Flowchart outlier detection in area measurements taking into account ISO 5725-2.

2.4 Data analysis

The Cochran test and the Grubbs test focus on the precision of measurements. Precision refers to the closeness of two or more measurements to each other. The next stage was to check for biases in the area values of each plot. We used Student's T for this purpose. If there are not outliers or biases, the mean area value or expected area value of a plot is equal to its reference area value.

The purpose of the next stage was to check for possible effects of different factors on the buffer of each land plot. The factors analyzed were the operators, size, shape, border conditions, land uses of plots and different flights used.

From a statistical point of view, the model showed a random effect. For this reason, the area values of each land plot were analyzed using ANOVA statistical tools to determine whether there were any differences between the data. This implied testing whether means were equal or not.

Finally, repeatability and reproducibility limits were calculated. The repeatability limit is defined as the value less than or equal to which the absolute difference between two test results obtained under repeatability conditions may be expected to be with a probability of 95%. Repeatability conditions are conditions where independent test results are obtained with the same method on identical test items in the same laboratory by the same operator using the same equipment within short intervals of time. The repeatability variance of a land plot (S_r^2) is equal to:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n n_{ij} s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n n_{ij}} \quad (7)$$

where n_{ij} and s_{ij} are the number of measurements and standard deviation for laboratory j of operator i .

The reproducibility limit is defined as the value less than or equal to which the absolute difference between two test results obtained under reproducibility conditions may be expected to be with a probability of 95%. Reproducibility conditions are conditions where test results are obtained with the same method on identical test items in different laboratories with different operators using different conditions. The reproducibility variance (S_R^2) of land plot j is:

$$s_{Rj}^2 = \sum s_{rj}^2 + \Gamma s_{Lj}^2 \quad (8)$$

where s_{Lj}^2 is the variance between sets of measurements acquired on land plot j .

The reproducibility limit of measurements acquired on land plot j is:

$$R_j = 2.8 s_{Rj} \quad (9)$$

Finally, technical tolerance as a buffer is calculated as the reproducibility limit divided by the perimeter of the land plot. In the absence of significant differences in the results, an arithmetic mean of the buffer for all land plots is taken as the final buffer value of the area measurements.

3. Results and Discussion

The digitization result for one land plot taking into account all the repetitions made for all the operators is presented in Figure 2-4. The red line indicates the contour obtained by GPS receiver, which is the reference contour. Yellow lines indicate the results of different digitized contours, which are close to the red line but do not match it exactly. The digitized contours defining a buffer appear around the border of the reference land plot. Taking into account the buffers of all land plots, technical tolerance was calculated to determine the uncertainty in the measurement of surfaces.

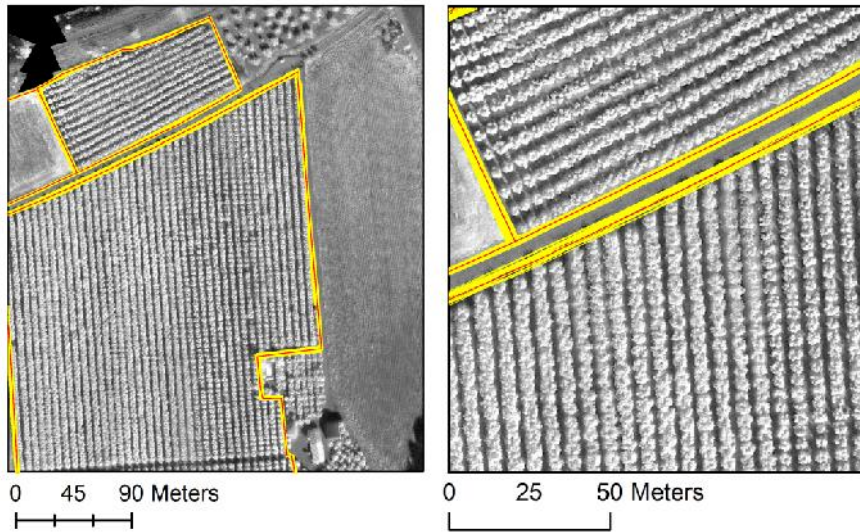


Figure 2-4. Example of a reference land plot border (red line) along with the results of different digitizing sessions obtained by each operator (yellow lines). Yellow lines define a buffer around red line. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

First of all, we verified that the differences between the reference area and the measurement areas obtained by digitizing UAV orthophotos were less than 5% of the reference area. Later, the methodology proposed in ISO 5725-2 and described in section 2.3 was used to identify outliers and other irregularities in the digitized data for each land plot. Table 1 resumes the values obtained in each test used to identify irregularities for each plot. First of all, the Cochran test was calculated for each land plot; no outliers or stragglers were detected and therefore no data were discarded. The next analysis was the Grubbs test and, again, no outliers or stragglers were identified. Although the operators were unskilled, no outliers were found because an effort was made to develop digitization guidance and explain the software used. Therefore, it was not necessary to discard any measurements or laboratories.

Table 2-1. Summary of statistical test to detect outliers in area measurements.

Plot	Cochran test	Grubbs test one outlier		Grubbs test two outlier		t-student
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	
1	0,180	1,174	1,510	0,110	0,101	0,923
2	0,161	1,081	1,919	0,101	0,003	1,005
3	0,128	1,386	1,411	0,055	0,023	1,332
4	0,120	1,495	1,454	0,057	0,020	1,121
5	0,144	1,459	1,469	0,112	0,094	0,069
6	0,122	1,868	1,652	0,102	0,031	0,786
7	0,140	1,931	1,104	0,081	0,069	1,297
8	0,123	1,402	1,375	0,052	0,037	1,449
9	0,121	1,380	1,647	0,083	0,019	1,204
10	0,120	1,822	1,450	0,082	0,086	0,880
11	0,127	1,505	1,620	0,056	0,031	1,237
12	0,122	0,999	1,731	0,110	0,087	0,150
13	0,104	1,842	0,761	0,086	0,034	1,540
14	0,126	1,689	1,836	0,079	0,075	0,402
15	0,124	1,470	1,707	0,099	0,026	1,162
16	0,123	1,565	1,325	0,099	0,005	0,870
17	0,153	1,959	1,548	0,112	0,052	0,243
18	0,124	0,946	1,272	0,101	0,074	1,017
19	0,123	1,456	1,947	0,098	0,074	0,143
20	0,113	1,695	1,275	0,096	0,040	1,464
21	0,125	1,302	1,904	0,109	0,083	1,293
22	0,122	1,916	1,153	0,100	0,073	0,560
23	0,126	1,668	1,311	0,092	0,010	1,517
24	0,115	1,379	1,604	0,076	0,007	0,679
25	0,118	1,265	1,907	0,096	0,058	0,333

Individual relative errors were calculated for each land plot using the reference area. In each land plot, the errors had a normal distribution and mean error was close to zero. The errors were subjected to Student's T test for each land plot. Results revealed that the mean value of the errors for the 25 land plots did not significantly differ from 1 and therefore that the data were not biased. After that, each land plot was analyzed to detect the influence of different factors on the results. First, we analyzed the

relationship between the operators and the results. The ANOVA tests for each land plot showed no relationship between them, that is, the methodology could be applied by any technician in an organization and results would be similar. The next step was to calculate the reproducibility limit and the derived buffer of each land plot.

Six one-way ANOVAs were conducted on the 25 buffers obtained to verify the possible existence of a relationship between the results and the characteristics of the land plots (i.e. area, shape, visibility conditions and land use) the different flights made and the influence of operators. Table 2 shows the results for each test ANOVA and the behavior of each characteristic is presented in Figure 2-5. Regarding size, measurements of the area of small plots may have a low absolute error and a high relative error at the same time. Conversely, those of large plots may have a high absolute error and a low relative error. In general terms, if we compare two land plots, the buffer obtained can be expected to be smaller in the smallest land plot. Figure 2-5.a shows that this is true in a general context; yet, the largest land plots had smaller buffer values than six land plots with a smaller area. At the same time, these values were close to the mean buffer. This behavior in the buffer results may be due to some characteristics of the land plots or the flights used. Therefore, a large land plot does not necessarily have a larger buffer than a smaller land plot.

Table 2-2. One-way ANOVA results for each characteristic of the plots and materials used.

Characteristics	classes	F-critical	F
Size	3	3,00	2,75
Shape	3	3,00	2,62
Border condition	2	3,85	2,19
Land use	2	3,85	2,11
Flights	3	3,00	2,54
Operator	5	2,38	1,99

The results taking into account three classes of size are presented in Figure 2-5.b. The largest buffer value – 2.14 m – was found in class L, while the smallest buffer value – 0.50 m – was found in class S. In general terms

and using a classification of the size of land plots, the buffer value increased with the size of land plots.

Taking into account the shape factor (Figure 2-5.c), results of a one-way ANOVA showed no relationship between such factor and buffer values. We noted that the median values in the three classes (i.e. S1, S2 and S3) were similar: 1.11 m, 0.90 m and 1.12 m respectively. In Class S3, when the ratio between the area and the perimeter increased, the standard deviation decreased. Therefore, land plots with non-elongated shapes had rather similar values. At the same time, buffer values increased as land plots became more elongated. This was accompanied by an increase in the dispersion of the values obtained. Class S2 had a larger standard deviation and a larger buffer than Class S3 because these land plots corresponded to more elongated shapes. Finally, Class S1 had the largest deviation and the largest buffer because this class represented the most elongated land plots. However, the smallest buffer values were not found in Class S3, which corresponded to regular shapes. Therefore, the error in the area of a plot is independent of its shape.

The border condition (Figure 2-5.d) was not a relevant factor to take into account in the behavior of the buffer. The highest and lowest buffer values as well as the median value were similar. The results of median values showed that results did not differ if the limits of the land plots had shadows, trees or unclear boundaries. This is due to the great detail of the orthophotos generated with UAV flight systems compared to conventional photogrammetric flights. Other authors have problems with this factor using satellite images, Pluto-Kossakowska et al. (2008) show problems with shadows using Cartosat-1 images resulted in overestimation of the area.

Taking land use into account (Figure 2-5.e), the boundaries of herbaceous crops are better defined than those of woody crops. This is because, in herbaceous crops, the crop reaches the border of the plot, while in woody crops, trees are not located on the boundary, causing uncertainty in the delineation of the border. However the land use factor showed the same behavior as the border condition factor. Median buffer values for herbaceous crops and woody crops were 1.12 m and 1.13 m respectively. Maximum and minimum buffer values were also quite similar in both cases.

The only difference was observed in the standard deviation. Herbaceous crops had a smaller standard deviation than woody crops because their boundaries were better defined. However, this aspect did not affect the value of the buffer. This result was consistent with the results of the border condition factor obtained in the present study.

Finally, we examined whether any of the flights influenced our results. As shown in Figure 2-5.f, results of the three flights showed similar median values and the same behavior regarding extreme values and standard deviations. Therefore, the buffer was independent of the flights. Therefore UAVs can fly to capture images to produce orthophotos when it is necessary and over different crops and the results in area measurements are going to be the same value, so the flowchart of processing can be reproduced with constant results.

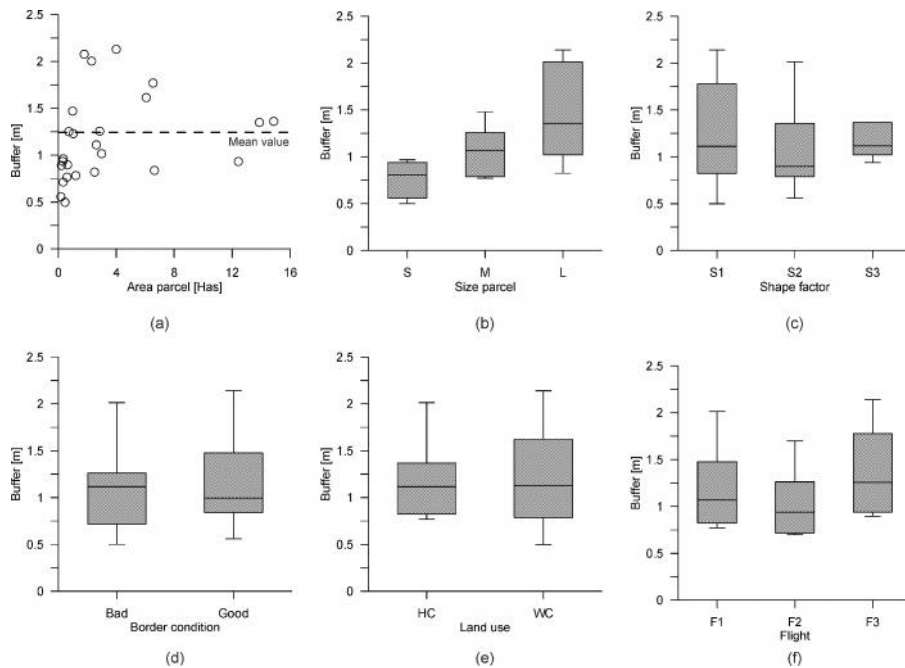


Figure 2-5. Relationship between technical tolerance for each land plot and different factors: (a) plot area, (b) plot size, (c) shape factor, (d) border condition, (e) land use and (f) different flights conducted.

The results obtained indicate that, overall, there was a relationship between the area and the shape of the land plots and the buffer, but this behavior cannot be generalized because in this study large or elongated plots did not necessarily have a high buffer value. Land use and the border condition did not show any relationship with the buffer. Moreover, buffer values were independent of the operators and the flights conducted, so the assessment can be reproduced in time and yield very similar results. Finally, the mean reproducibility limit of all land plots was 1.21 m, which is lower than the maximum value established by the European Union. Therefore, UAV orthophotos can be used to measure the area of land plots for land policy monitoring as satellite images or GNSS receiver. Focusing on images, different authors have evaluated the accuracy of a particular satellite platform like Ikonos or Cartosat to be used in monitoring land policies (Hejmanowska et al., 2008, Pluto-Kossakowska et al., 2008).

Once UAVs show they are a useful tool to produce adequate orthophotos to be used in monitor land policies it would be necessary to study the influence of setting flight parameters in the measurement of area and how they are linked to technical characteristics of a particular sensor.

4. Conclusions

In this study we analyzed the potential use of very high resolution UAV imagery to measure the area of land plots with the purpose of monitoring land policies. Such measurements are currently made by using either GNSS equipment or aerial or satellite images. The use of GNSS equipment requires a large effort because it is necessary to visit all the land controlled. The use of aerial or satellite images makes it possible to measure large areas of land at the same time, although the problem is temporal resolution. In many cases, the images are not taken at the time of interest due to high financial costs. This paper proposes an alternative to the utilization of UAV platforms to measure the area of land and thus increasing temporal resolution. However, it is necessary to know whether the results of measurements have an admissible error to use them for land policy monitoring, being able to measure area or percentage of plot that complies to the requirements. Technical tolerance was determined as the average value of the reproducibility limit of a set of land plots. In addition, we

determined the possible relationship between the individual results for each land plot and their characteristics (i.e. size, shape, land use or border conditions). We also examined the relationship between the results, the different operators who digitized the images in the study and the flights performed. No relationship was found. Technical tolerance was 1.21 m. In the European Union, UAV orthophotos have been found to be valid to measure the area of land plots and could be used by member States as an additional source of information for land policy monitoring.

Due to the continuous progress made in UAV platforms and sensors, future studies should explore the influence of the type of UAV system (i.e. flexible, fixed or rotary wing) and the sensors selected on plot area measurements.

Acknowledgments

The present study was supported in part by Project AGL2010-15506 (MINECO, European Regional Development Fund) and Project CONV 149/08 22008019 (Regional Ministry of Agriculture and Fisheries of Andalusia, Spain).

5. References

- Ambrosia, V.G.; Wegener, S.S.; Sullivan, D.V.; Buechel, S.W.; Dunagan, S.E.; Brass, J.A.; Stoneburner, J.; Schoenung, S.M. (2003). Demonstrating UAV-acquired real-time thermal data over fires. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69, 391-402.
- Beekhuizen, J.; Clarke, K.C. (2010). Toward accountable land use mapping: Using geocomputation to improve classification accuracy and reveal uncertainty. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12, 127-137.
- Berni, J. A.; Zarco-Tejada, P. J.; Suárez, L.; González-Dugo, V.; Fereres, E. (2009). Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.* 38(6), 6.
- Botta, F.; Lepot, B.; Leoz-Garziandia, E.; Morin, A. (2012). Estimation of sampling uncertainty in lake-water monitoring in a collaborative field trial. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 36, 176-184.
- Bouguet, J., (2001). Camera calibration toolbox for matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ (accessed 1 Apr. 2014).
- Candamo, J.; Kasturi, R.; Goldgof, D. (2009). Using color profiles for street detection in low-altitude UAV video, in: Henry, D.J. (Ed.), *Proc. SPIE 7307, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications VI*, Orlando, Florida, USA.
- Coifman, B.; McCord, M.; Mishalani, R.; Iswalt, M., Ji, Y. (2006). Roadway traffic monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Intelligent Transportation Systems* 153, 11-20.
- Colomina, I.; Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92, 79-97.

- Confalonieri, R. (2010). Monte Carlo based sensitivity analysis of two crop simulators and considerations on model balance. *European Journal of Agronomy* 33, 89-93.
- Cook, E.A. (2002). Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. *Landscape and Urban Planning* 58, 269-280.
- Corbane, C.; Jacob, F.; Raclot, D.; Albergel, J.; Andrieux, P. (2012). Multitemporal analysis of hydrological soil surface characteristics using aerial photos: A case study on a Mediterranean vineyard. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 18, 356-367.
- Chiabrando, F.; Nex, F.; Piatti, D.; Rinaudo, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). *Journal of Archaeological Science* 38, 697-710.
- Dalamagkidis, K.; Valavanis, K.P.; Piegl, L.A. (2008). Current Status and Future Perspectives for Unmanned Aircraft System Operations in the US. *J Intell Robot Syst* 52, 313-329.
- Eisenbeiss, H.; Lambers, K.; Sauerbier, M.; Zhang, L. (2005). Photogrammetric documentation of an archaeological site (Palpa, Peru) using an autonomous model helicopter. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34, 238-243.
- FGDC, (1998). *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*.
- Forzieri, G.; Tanteri, L.; Moser, G.; Catani, F. (2013). Mapping natural and urban environments using airborne multi-sensor ADS40–MIVIS–LiDAR synergies. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23, 313-323.
- Garcia-Ruiz, F.; Sankaran, S.; Maja, J.M.; Lee, W.S.; Rasmussen, J.; Ehsani, R. (2013). Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees. *Computers and Electronics in Agriculture* 91, 106-115.

- Hejmanowska, B.; Drzewiecki, W.; Wróbel, A. (2008). ISO5725-2 standard application to verification of orthophoto-based impervious surface area and imperviousness factor determination. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37, 1329-1334.
- Herwitz, S.R.; Johnson, L.F.; Dunagan, S.E.; Higgins, R.G.; Sullivan, D.V.; Zheng, J.; Lobitz, B.M.; Leung, J.G.; Gallmeyer, B.A.; Aoyagi, M.; Slye, R.E.; Brass, J.A. (2004). Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. *Computers and Electronics in Agriculture* 44, 49-61.
- Hitchins, A.D. (2011). The determinacy of reproducibility assessments of qualitative microbial food borne pathogen methods detecting a few microbes per analytical portion. *Food Microbiology* 28, 1140-1144.
- Hossain, M.K.; Strezov, V.; Chan, K.Y.; Ziolkowski, A.; Nelson, P.F. (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management* 92, 223-228.
- Inmon, W.H. (2005). *Building the data warehouse*. Wiley.
- Jianwei, W.; Sun, J.; Wei, Y.; Stilla, U. (2011). Building boundary improvement for true orthophoto generation by fusing airborne LiDAR data, *Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2011 Joint*, pp. 125-128.
- ISO 5725-1, (1994). *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 1: General principles and definitions.*, Geneva, Switzerland.
- ISO 5725-2, (1994). *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method.*, Geneva, Switzerland.
- Kay, S.; Sima, A. (2009). *Area measurement validation scheme*. JRC Technical Notes.

- Lan, Y.; Thomson, S.J.; Huang, Y.; Hoffmann, W.C.; Zhang, H. (2010). Current status and future directions of precision aerial application for site-specific crop management in the USA. *Computers and Electronics in Agriculture* 74, 34-38.
- Loghavi, M.; Behzadi Mackvandi, B. (2008). Development of a target oriented weed control system. *Computers and Electronics in Agriculture* 63, 112-118.
- Lowe, D. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60, 91-110.
- Maza, I.; Caballero, F.; Capitán, J.; Martínez-de-Dios, J.; Ollero, A. (2011). Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications. *Journal of intelligent & robotic systems* 61, 563-585.
- Meddens, A.J.H.; Hicke, J.A.; Vierling, L.A. (2011). Evaluating the potential of multispectral imagery to map multiple stages of tree mortality. *Remote Sensing of Environment* 115, 1632-1642.
- Merino, L.; Caballero, F.; Martínez-de-Dios, J.R.; Maza, I.; Ollero, A. (2012). An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement. *Journal of intelligent & robotic systems* 65, 533-548.
- Merino, L.; Caballero, F.; Martínez-de Dios, J.R.; Ferruz, J.; Ollero, A. (2006). A cooperative perception system for multiple UAVs: Application to automatic detection of forest fires. *Journal of Field Robotics* 23, 165-184.
- Metni, N.; Hamel, T. (2007). A UAV for bridge inspection: Visual servoing control law with orientation limits. *Automation in Construction* 17, 3-10.
- Nonami, K. (2007). Prospect and Recent Research & Development for Civil Use Autonomous Unmanned Aircraft as UAV and MAV. *Journal of System Design and Dynamics* 1, 120-128.
- Pavese, F. (2009). About the treatment of systematic effects in metrology. *Measurement* 42, 1459-1462.

- Pieczonka, T.; Bolch, T.; Buchroithner, M. (2011). Generation and evaluation of multitemporal digital terrain models of the Mt. Everest area from different optical sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, 927-940.
- Pluto-Kossakowska, J.; Grandgirard, D.; Zieliński, R.; Kay, S. (2008). ASSESSMENT OF THE AREA MEASUREMENT ON CARTOSAT-1 IMAGE. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37, 1315-1322.
- Quaritsch, M.; Kruggl, K.; Wischounig-Strucl, D.; Bhattacharya, S.; Shah, M.; Rinner, B. (2010). Networked UAVs as aerial sensor network for disaster management applications. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 127, 56-63.
- Ramos, M.I.; Gil, A.J.; Feito, F.R.; García-Ferrer, A. (2007). Using GPS and GIS tools to monitor olive tree movements. *Computers and Electronics in Agriculture* 57, 135-148.
- Reinartz, P.; Müller, R.; Schwind, P.; Suri, S.; Bamler, R. (2011). Orthorectification of VHR optical satellite data exploiting the geometric accuracy of TerraSAR-X data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, 124-132.
- Ryan, A.; Hedrick, J.K. (2005). A mode-switching path planner for UAV-assisted search and rescue, *Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference on*, pp. 1471-1476.
- Saadat, H.; Adamowski, J.; Bonnell, R.; Sharifi, F.; Namdar, M.; Ale-Ebrahim, S. (2011). Land use and land cover classification over a large area in Iran based on single date analysis of satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, 608-619.
- Salas, W.A.; Boles, S.H.; Froking, S.; Xiao, X.; Li, C. (2003). The perimeter/area ratio as an index of misregistration bias in land cover change estimates. *International Journal of Remote Sensing* 24, 1165-1170.
- Samad, A.M.; Kamarulzaman, N.; Hamdani, M.A.; Mastor, T.A.; Hashim, K.A. (2013). The potential of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for civilian and

mapping application, System Engineering and Technology (ICSET), 2013 IEEE 3rd International Conference on, pp. 313-318.

- Samuel, W. (2005). UAVs in Community Police Work, UAVs - Civil and Commercial Applications I. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Arlington, Virginia.

- Seelan, S.K.; Laguette, S.; Casady, G.M.; Seielstad, G.A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. Remote Sensing of Environment 88, 157-169.

- Siebert, S.; Teizer, J. (2014). Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. Automation in Construction 41, 1-14.

- Turner, D.; Lucieer, A.; Wallace, L. (2014). Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 52, 2738-2745.

- Union, E. (2004). Directive 2004/22/EC of the European Parliament and of the Council of 31 March 2004 on measuring instruments, Official Journal of the European Union, L 135/1, 30.4.2004.

- Woodcock, C.E.; Strahler, A.H. (1987). The factor of scale in remote sensing. Remote Sensing of Environment 21, 311-332.

- Zaloga, S. (2007). Getting civil with UAVs: How soon? Unmanned Systems 25, 24-26.

- Zarco-Tejada, P.J.; González-Dugo, V.; Berni, J.A.J. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. Remote Sensing of Environment 117, 322-337.

- Zhang, C.; Kovacs, J. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. Precision Agric 13, 693-712.

- Zongjian, L. (2008). UAV for mapping—low altitude photogrammetric survey. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing, China

Capítulo 3

An Analysis of the Influence of Flight Parameters in the Generation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Orthomosaics to Survey Archaeological Areas

Francisco-Javier Mesas-Carrascosa *, María Dolores Notario García, Jose Emilio Meroño de Larriva, Alfonso García-Ferrer

Department of Graphic Engineering and Geomatics. University of Cordoba, Campus de Rabanales, 14071 Cordoba, Spain

Publicado en:

Sensors, 2016, 16, 1838.

Abstract

This article describes the configuration and technical specifications of a multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) using a red–green–blue (RGB) sensor for the acquisition of images needed for the production of orthomosaics to be used in archaeological applications. Several flight missions were programmed as follows: flight altitudes at 30, 40, 50, 60, 70 and 80 m above ground level; two forward and side overlap settings (80%–50% and 70%–40%); and the use, or lack thereof, of ground control points. These settings were chosen to analyze their influence on the spatial quality of orthomosaicked images processed by Inpho UASMaster (Trimble, CA, USA). Changes in illumination over the study area, its impact on flight duration, and how it relates to these settings is also considered. The combined effect of these parameters on spatial quality is presented as well, defining a ratio between ground sample distance of UAV images and expected root mean square of a UAV orthomosaick. The results indicate that a balance between all the proposed parameters is useful for optimizing mission planning and image processing, altitude above ground level (AGL) being main parameter because of its influence on root mean square error (RMSE).

Resumen

Este artículo describe la configuración y especificaciones técnicas de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) multirroto que utiliza un sensor rojo-verde-azul (RGB) para la adquisición de imágenes necesarias para la producción de ortomosaicos para uso en aplicaciones arqueológicas. Se programaron varias misiones de vuelo: altitudes de vuelo a 30, 40, 50, 60, 70 y 80 m sobre el nivel del suelo; dos configuraciones de superposición lateral y frontal (80% -50% y 70% -40%); y el uso, o falta de ellos, de puntos de control de tierra. Estas configuraciones se eligieron para analizar su influencia en la calidad espacial de las imágenes orto-procesadas por Inpho UASMaster (Trimble, CA, EE. UU.). También se consideran los cambios en la iluminación del área de estudio, su impacto en la duración del vuelo y cómo se relaciona entre sí estos ajustes. Se muestra también el efecto combinado de estos parámetros sobre la calidad espacial, definiendo un ratio entre la distancia de las imágenes al suelo y la raíz cuadrada media esperada de un ortomosaico. Los resultados indican que un equilibrio entre los parámetros propuestos es útil para optimizar la planificación de la misión y el procesamiento de las imágenes, siendo la altura sobre el nivel del suelo (AGL) el principal parámetro debido a su influencia en el error cuadrático medio (RMSE).

1. Introduction

Traditional archaeological site surveys are a time-consuming effort proportional to the difficulty of access of the site being investigated. Prospective sites are identified based on oral tradition, written records or inspection using images (Schinding and Gibbes, 2014). Once a prospective site is identified, fieldwork starts to detect evidence of human activity. With images, these have usually been registered by sensors on board two traditional platforms, satellite and manned aircraft (Fryer et al., 2007; Rosa and Nicola, 2006). These platforms present problems with spatial resolution applied to archaeology. One of the limiting factors of satellite images is the difficulty to detect small- or even medium-sized details like sites smaller than a hectare (Altaweel, 2005). There are also reasons to be cautious about the effectiveness of satellite imagery in detecting prehistoric sites lacking a long history of occupation (Wilkinson et al., 2006). On the other hand, manned aircraft are able to supply images with better spatial resolution but no higher than at a 1:500 scale. Moreover, the economical cost of aerial photogrammetry is usually too high for small surveyed areas (Chiabrando et al., 2011).

Currently, unmanned aerial vehicles (UAVs) are an alternative for the acquisition of images with a very high spatial resolution for documenting archeological areas (Verhoeven, 2009). UAVs are classified with different characteristics like range, endurance, mass and architecture. Generally, most common UAV categories used in civil applications are micro and mini UAVs with a mass of less than 5 and 150 kg, respectively.

Other characteristics, like endurance or range, depend mainly on the type of platform architecture, for example multicopter, fixed wing and balloon.

Different types of UAVs have been used successfully to survey archeological areas such as helium balloons (Mozas-Calvache, 2012), blimp (Gomez-Lahoz and Gonzalez-Aguilera, 2009), kites (Bogacki et al., 2008), fixed wing (Bendea et al., 2007) and rotor wing (Sauerbier and Eisenbeiss, 2010). In mapping, UAV flight parameters are critical in obtaining adequate spatial quality on the derived geomatic products to survey archeological

sites. The correlation between flight parameters, spatial quality and photogrammetric processing of images acquired by metric sensors have been well studied in classic photogrammetry (Paparoditis et al., 2006). Accuracy assessment of digital elevation models (Müller et al., 2014) or the influence of Ground Control Points (GCPs) in aerial-triangulation (Ackermann, 1992), among others, have contributed to defining a standardized processing framework.

In contrast, UAV photogrammetry for research applications is still at an early stage (Pajares, 2015). One consequence of this is that operational frameworks for working with UAV platforms are not defined in some aspects and applications. The operational framework depends on the type of UAV platform, sensors on board and case of use. Ref. (Mesas-Carrascosa et al., 2014) analyzes the potential of UAVs for measuring area of land plots for monitoring land policies, Ref. (Mesas-carrascosa et al., 2014) explored the positional quality of orthophotos obtained by a UAV following the requirements of National Mapping Agencies, and Ref. (Mesas-Carrascosa et al., 2015) defines specifications to acquire remote images using a six-band multispectral sensor on board a UAV for use in precision agriculture. Regarding cultural heritage, UAVs have rarely been used in scientific research (Hendrickx et al., 2011). Parameters like altitude above ground level (AGL), number of GCPs, or the percentage of forward-lap and side-lap determine the spatial quality of orthomosaics.

One of the most important parameters in an UAV flight is altitude AGL. It determines the pixel size on the registered images, flight duration and area covered. Firstly, it is necessary to define the spatial quality requirements for the orthomosaics to achieve the ideal pixel size in the images registered by the sensor. In general, at least four pixels are required to detect the smallest detail in an image (Hengl, 2006). In selecting altitude AGL, sufficiently fine spatial resolution has to be guaranteed and, at the same time, as much surface as possible has to be covered. Very low altitude AGL UAV flights generate very high spatial resolution images but cover a limited area and therefore increase flight duration. As a result, the UAV operation has to be fragmented into different flights due to battery life, causing variations in illumination, the appearance or disappearance of

shadows, saturated images, depending on the type of materials present, and so on.

As in traditional photogrammetry, the algorithms used process overlapping images acquired from multiple viewpoints. Mainly, these techniques are based on imaging techniques called structure from motion (SfM) (Szeliski, 2011). SfM photogrammetry differs from conventional photogrammetric approaches by calculating internal camera parameters (focal length, principal point and distortion coefficients), camera position and orientation. SfM algorithms need a large number of overlapping images to cover the area of interest (Micheletti et al., 2015; Fonstad et al., 2013), which impacts flight duration. High percentages of forward and side overlap increase flight duration because it is necessary to capture more images for each individual lap and to increase the number of total laps. However, this improves the spatial quality of geomatic products. All of these parameters affect battery life and thus a balance between spatial quality, forward and side overlap and flight time duration is necessary.

Finally, GCP distribution and its influence on the spatial quality of orthomosaics in traditional platforms is well described (Wang et al., 2012). With UAVs, the number and distribution of GCPs are not standardized, being analyzed by (Carvajal et al., 2016). The consequence is that the number of GCPs may covers a broad range, from just four GCPs to more than 100 GCPs (Agüera et al., 2015; Zhang et al., 2011). In addition, Ref. (Küng et al., 2011) analyzes the accuracy of UAV orthomosaics without GCPs, with the resulting root mean square error (RMSE) being higher than one meter.

To our knowledge, no detailed investigation has been conducted regarding the influence of UAV flight parameters such as altitude AGL, forward and side overlap, and the use or lack of GCPs on the spatial quality of orthomosaics using a red–green–blue (RGB) on board a multi-rotor UAV to be used in surveying archaeological areas. This paper defines the technical specifications for working with a multi-rotor UAV to obtain an accurate spatial orthomosaics to be used to survey archeological areas.

The manuscript is divided in the following sections: in Section 2, the technology, study area, and the materials and methods are described. In Section 3, results are presented, followed by conclusions in Section 4.

2. Materials and Methods

2.1. UAV and Sensor Description

The unmanned aerial vehicle used for mapping was a MD4-1000 multi-rotor (Microdrones GmbH, Siegen, Germany) (Figure 3-1). This UAV is a vertical takeoff and landing aircraft of an entirely carbon design. The system has a maximum payload of 1.2 kg. It uses 4 _ 250 W gearless brushless motors powered by a 22.2 V battery. It reaches a cruising speed of 12.0 m/s and a maximum climb speed of 7.5 m/s. Its maximum wind tolerance is up to 12.0 m/s, registering steady picture up to 6 m/s. Flight duration depends on sensor weight and weather conditions. For this project, the multi-rotor UAV was equipped with a Sony NEX-7 RGB sensor (Sony Corporation, Minato, Tokyo, Japan) with a 16 mm lens. The camera weighs 353 g including the camera body, card and battery and provides a 23.5 _ 15.6 mm image (6000 _ 4000 pixels). The sensor was field calibrated and the results used in

this research are summarized in Table 3-1. With this sensor, the UAV's flight duration is approximately 30 min. During the flight, the sensor registers vertical images. The image trigger is activated by the UAV's autopilot flight settings. For each shot, the UAV autopilot sends a signal to the sensor to register an image and simultaneously timestamps and records the GPS location and navigation angles (yaw, roll and pitch) on a Secure Digital Card (SD-Card). This information will be used for the initial values in photogrammetric processing.



Figure 3-1. The MD4-1000 multi-rotor (Microdrones GmbH, Siegen, Germany) taking off over the study site.

Table 3-1. Results of the field-calibrated Sony NEX-7 (Sony Corporation, Minato, Tokyo, Japan).

Parameters	Value	Parameters	Value
Focal length (mm)	16.6286	Radial	0.0290259
Principal point—X (mm)	12.2712	Distortion K2	
		Radial	-0.0338008
Principal point—Y (mm)	7.76064	Distortion K3	
		Tangential	-0.00162188
Radial Distortion K1	-0.0108059	Distortion T1	
		Tangential	-0.00094999
		Distortion T2	

2.2. Study Site and UAV Flights

The study area was approximately 1.13 ha (101 _ 112 m) in size and was conducted in Torreparedones, an old Iberian and Roman town situated between the Guadalquivir river and the Guadajoz river in the province of Córdoba (Southern Spain) (37_450 N, 4_220 W) (Figure 3-2). This settlement has been continuously populated between the 2nd Century Before Christ (BC) and the 16th Century Anno Domini (AD). It reached its peak during the

Iberian and Roman period as a municipality and played an important role in the commercial trade routes throughout the southern and Eastern territories of the Peninsula as well as in the development of metallurgy. Evidence of public buildings like shrines and a forum have been found in the archaeological remains.

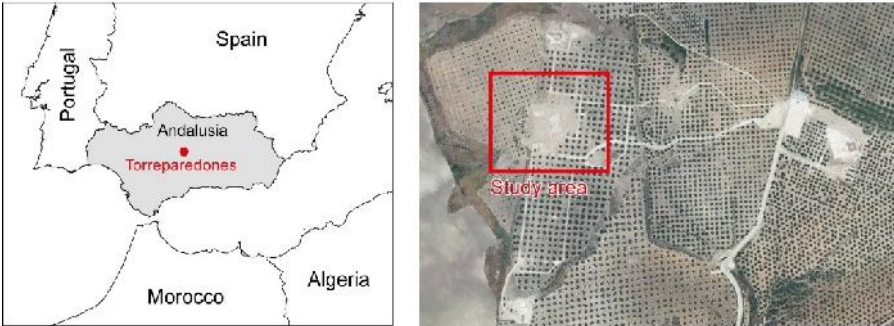


Figure 3-2. Overview of the study site.

Several flights above the remains were planned following the scheme presented below in Figure 3-3, which combines different flight altitudes, overlap settings and the use, or lack thereof, of GCPs. Descriptions of flight parameters and their formula are widely available, for example (Kraus, 2007).

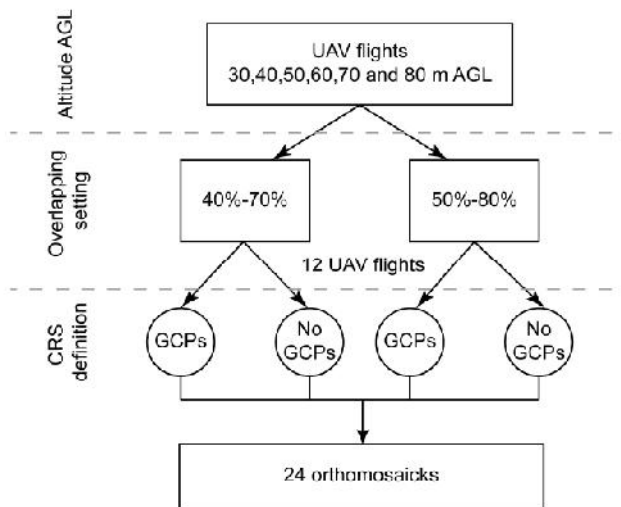


Figure 3-3. Scheme of unmanned Aerial Vehicle (UAV) flights and processing.

One of the most important flight parameters is altitude AGL. In this study, a set of flight missions were flown at altitudes of 30, 40, 50, 60, 70 and 80 m AGL. Each altitude AGL is linked to a specific ground sample distance (GSD) values. In this study, GSD ranged from 0.7 cm X pixel⁻¹ at 30 m AGL, to 2.0 cm X pixel⁻¹ at 80 m AGL. Additionally, two different forward-lap and side-lap settings were used: 80%-50% and 70%-40%. In combining these settings, twelve missions were flown in total. All UAV flights were carried out under the same wind conditions, the wind speed being equal to 2 m/s.

In addition, all UAV flights were planned in such a way that each point in the study area was captured in at least 3 images. Thus, the accuracy of the orthomosaics was only dependent on altitude AGL and forward and side lap settings.

Afterwards, each UAV flight was processed with and without GCPs. In the former case, GCPs and the georeferencing information registered by the UAV's autopilot were used in the aerial triangulation phase to accurately place the photogrammetric block into a coordinate reference system (CRS). In the latter case, the aerial triangulation was processed with the information registered by the UAV's autopilot, and nothing more. In using, or not using, GCPs with the information from the 12 flights, a total of 24 orthomosaics were produced to assess spatial quality.

The coordinates of each GCP in the study area were determined by using traditional topography methodologies instead of global navigation satellite system (GNSS) sensors. This decision was made because the precision and accuracy of GCP coordinates have to be greater than the GSD of UAV flights. In this context, a GNSS sensor receiving real-time corrections does not obtain results greater than 2 cm. This value is higher or equal to the GSD of UAV flights, and, therefore, GNSS was rejected. GCPs were chosen in the corners of the study area, one for each corner, and another in the center. Each GCP was set with an artificial target and measured using a total station Leica TC805 (Leica Geosystem AG, Heerbrugg, Switzerland) (Figure 3-4a) with an angle accuracy equal to 50 0 and a distance measurement precision equal to $\pm (3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$.

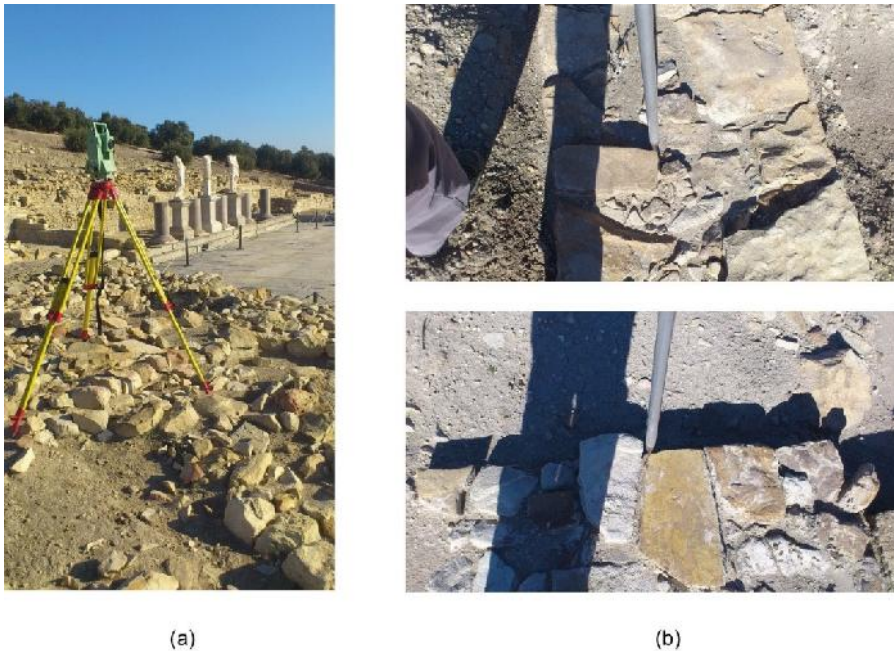


Figure 3-4. Assessing spatial resolution: (a) Measuring using the total station; and (b) Samples of spatial details of the ground measurements.

2.3. Photogrammetric Processing

The photogrammetric processing is divided into 4 phases: (1) aerial triangulation; (2) Digital Surface Model (DSM) generation; (3) rectification of individual images; and, lastly (4) orthomosaicking.

Aerial triangulation is the basic method for analyzing aerial images in order to calculate the three-dimensional coordinates of object points and the exterior orientation of the images (Yuan et al., 2009). This process allows the absolute orientation of the entire photogrammetric block to be calculated. To perform the bundle adjustment, algorithms based on “Structure from Motion” (SfM) techniques are used. SfM algorithms operate with the same basic fundamentals of stereoscopic photogrammetry.

However, it differs from traditional photogrammetry in the geometry of the scene, camera positions and orientation. Using UAV platforms, this is resolved using highly redundant information extracted

from a set of multiple high percentage overlaps that register the three-dimensional structure of the scene (Snavely et al., 2006). In a first stage, SfM techniques extract individual features in each image of the photogrammetric block, which are afterward matched to their corresponding feature in the other images of the photogrammetric block. These features are used to determine the relative position of the sensor during the flight, which allows the position and orientation for each individual sensor to be calculated. At this stage, the spatial quality of the results depends on the quality of the geolocation sensor, GNSS sensor and IMU sensor. In general, the attributed geolocational accuracy of images taken on commercial UAVs is medium to low. Therefore, in this study, geolocation was calculated via aerial-triangulation. To improve the spatial quality of the results, a group of GCPs were distributed over the study area. These GCPs were measured on field with a greater spatial accuracy than GSD.

Once aerial-triangulation was calculated, a DSM was generated in three stages: feature extraction, multi-image matching and blunder detection (Chiabrando et al., 2012). DSM and external orientation were used to orthorectify each image. Finally, individual orthorectified images were mosaicked to obtain an UAV orthomosaic of the entire study area. Each orthomosaic was produced with a GSD equal to the corresponding GSD of each UAV flight.

The photogrammetric processing was performed using Inpho UASMaster (Trimble, CA, USA) (Inpho Uasmaster, 2016).

2.4. Assessment of Spatial Quality

Spatial accuracy is the accuracy of the position of a feature related to Earth (ISO, 2013) and can be described in absolute or relative terms. Absolute accuracy is defined as the closeness of reported coordinate values to values accepted as or being true. Relative accuracy is defined as the closeness of the relative spatial positions of features in a dataset to their respective relative spatial positions accepted as or being true.

Before the UAV flights, 150 check points were measured in the study area to assess the absolute and relative spatial accuracies (Figure 4b). The check points' coordinates were obtained using a total station in the same manner as the GCPs (Figure 4a) and were well-defined and well distributed. These coordinates were used as ground reference values to assess the spatial quality of the orthomosaics.

All check point locations were digitized on screen via the produced orthomosaics. These coordinates were obtained using Quantum GIS (QGIS, 2016). Both sets of ground and orthomosaic coordinates were compared to determine the spatial quality.

Absolute positional accuracy was assessed by RMSE, which is used to estimate positional accuracy (Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2015). Relative positional accuracy was assessed using the methodology developed by the Department of Defense of the United States (Mapping, Charting and Geodesy Accuracy, 2016). Subsequently, all possible check point pair combinations were determined. Afterwards, the absolute and relative errors in the X and Y dimensions of each check point were calculated. These errors were used to calculate both the relative standard deviations on each axis and the relative horizontal standard deviation (RHSD).

3. Results

A total of two single flights missions were flown, one for each forward and side lap setting. Once the UAV completed the initial altitude, it ascended 10 m and flew the same area again. This process repeated until all programmed altitudes were covered. Table 3-2 summarizes the duration of, and number of images taken from, each UAV flight with each flight having a different altitude AGL and forward and side overlap setting. In Table 3-2, time duration expresses the duration of the flight for an individual altitude AGL, without time spent taking off and landing. Table 2 demonstrates, as altitude

AGL increases, flight duration and the number of images taken as a decrease because each image covers more area, and, therefore, fewer laps and images are needed. This occurs independently of the forward and side

overlap settings, although higher percentages increase flight time and number of imagen taken. The longest UAV flight was 7 min and 35 s at 30 m AGL with 80%-50% forward and side overlap. Figure 3-5 shows an exponential correlation between altitude AGL, flight duration (Figure 5a) and the number of images taken (Figura 5b). Inversely, as altitude AGL was reduced, flight duration and the number of images taken exponentially increased.

Table 3-2. Flight durations and the number of images taken at different altitudes Above Ground Level (AGL) and forward and side lap settings

Altitude AGL (m)	Forward/Side Lap 70%-40%		Forward/Side Lap 80%-50%	
	Time Duration	Num Images	Time Duration	Num Images
30	0:07:12	27	0:07:35	34
40	0:02:40	12	0:06:03	27
50	0:02:12	10	0:03:08	14
60	0:01:52	8	0:02:44	12
70	0:00:46	4	0:00:56	5
80	0:00:33	3	0:00:56	5

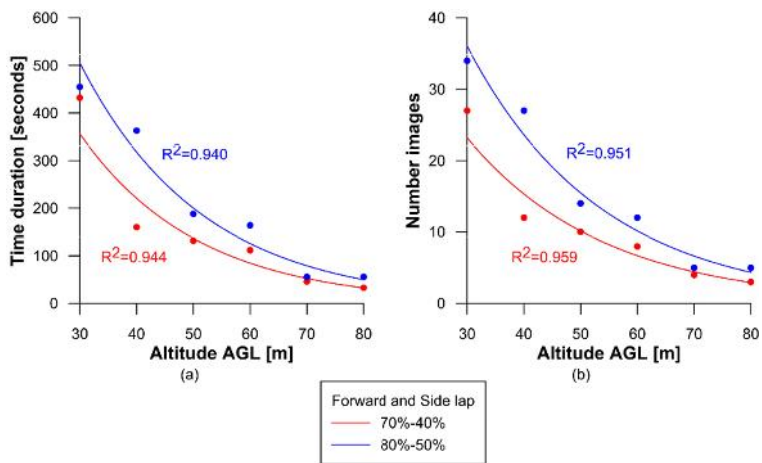


Figure 3-5. Relationship between altitude above ground level (AGL) and forward and side lap settings on: (a) Flight duration and (b) Number of images taken.

The shape of the study área in relation to the percentage of forward and side overlap also effects the duration of UAV flights. In this study, there was a significant time difference at 40 m AGL due to the forward and side

overlap settings. Fewer laps were needed to cover the área of study at 70%-40% because more distance needed to be covered between laps at 80%-50%. At higher altitudes AGL, for example 70 or 80 m, the differences in flight duration were reduced due to only one lap being needed to capture both forward and side overlap, which reduced the number of images taken.

Another factor that effects flight duration is illumination. Sometimes, elements may appear in the study área which can produce shadows depending on the direction of the flight. Moreover, some materials, like marble, reflect light intensely, resulting in highly saturated images. Consequently, flying within limited timeframes may be necessary to avoid problems caused by illumination. Therefore, reducing flight times while simultaneously maintaining orthomosaic spatial quality is of interest.

Figure 3-6 compares images taken in the early morning (7:15 a.m.) and again close to midday (11:30 a.m.) at the same altitude AGL. Elements such as walls (Figure 3-6a, b) or columns (Figure 3-6c, d) project shadows if the images are taken at midday (Figure 3-6a,c). On the other hand, if taken in the early morning, images do not contain shadows (Figure 3-6b, d). Because sun elevation is reduced and objects do not drop shadows, as such images are darker. One option, to avoid shadows, is to fly when the sun is at the zenith position. In this case, it is necessary to take into account the coordinates of study área and day of the year to know when the sun is at this position. However, in this case, problems can arise with materials like marble, which can saturate images leading difficulties in visual interpretation. As an example, in Figure 3-6c, it is more difficult to identify individual elements at the top of the Wall compared to Figure 3-6d.

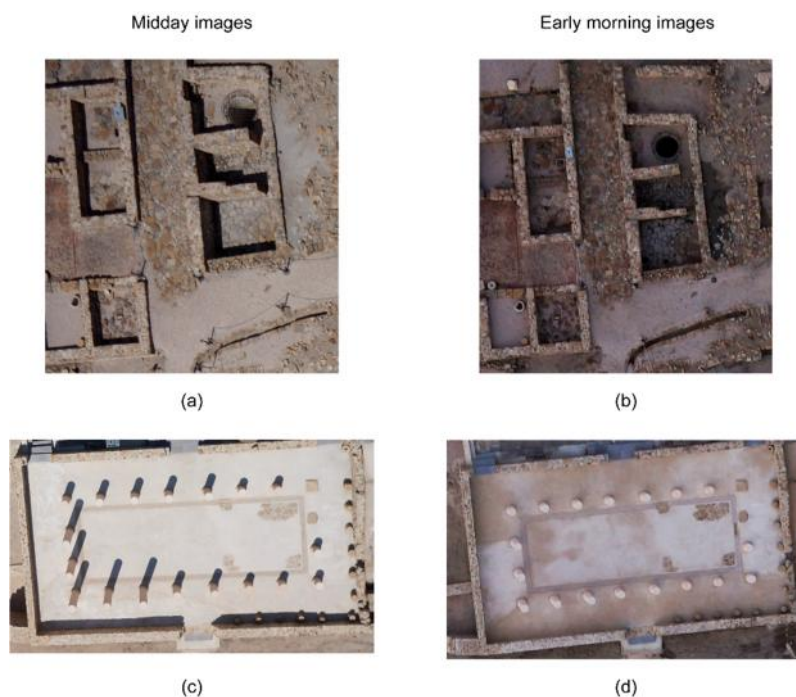


Figure 3-6. (a–d) The effects of illumination on images taken by UAV flights at midday (a, c) and early morning (b, d).

Figure 3-7 shows an example of two sets of images of two different areas taken at different altitudes AGL and demonstrates that, as altitude AGL increases, the área covered by each image increases, reducing flight duration. On the other hand, the quality of spatial resolution and border definition of individual elements improve as altitude AGL decreases. At 30 m, element boundaries are well defined and recognizable in an individual context, while at higher altitude. AGL, definition incrementally diffuses, and it becomes more difficult to define individual elements. However, this does not mean that UAV flights at high altitude AGL are not useful in archaeological utilities, and it depends on the need of the user. The geomatic product requirements of an archaeological area needing only a general map, which typically meets or exceeds user expectations, are not the same as those of a specific site prospection. Therefore, product features are said to possess “fitness for use” if they are able to serve their purposes (Juran et al., 2010).

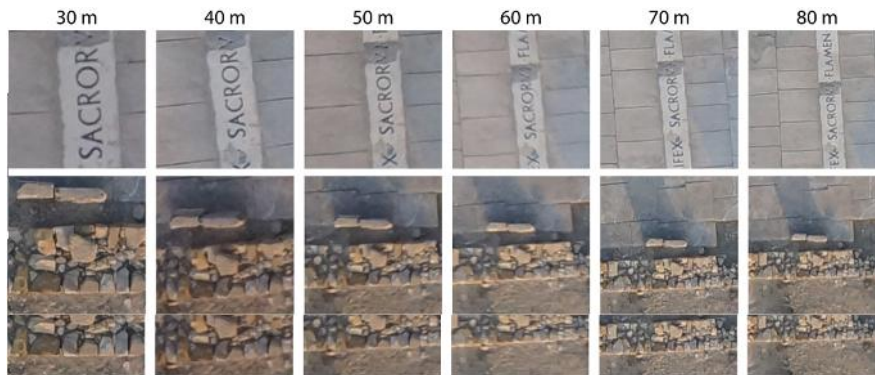


Figure 3-7. Effect of flight altitudes AGL on image coverage and quality.

From the point of view of image interpretation, altitudes equal to 80 m AGL or higher allow valuable information to be gained for a general analysis of the entire work area and surroundings although details less than 2 cm in size are more difficult to properly identify. Conversely, lower altitude AGL flights allow details to be better studied at the cost of increased flight duration.

3.1. Assessment of Absolute Positional Accuracy

Table 3-3 summarizes the results of the absolute positional accuracy assessment factoring: (1) altitude AGL; (2) forward and side lap settings; and (3) processing with and without GCPs. Error ranges from 3.8 cm (30 m altitude AGL and 80%–50% overlap settings with GCPs) to 934.2 cm (80 m altitude AGL and 70%–40% overlap settings without GCPs). In Figure 8, the same factors from Table 3 are applied to error box plots. Figure 8a, b show a lower RMSE where GCPs were used than Figure 8c, d where GCPs were not used, these results being independent of altitude AGL and forward and side lap setting.

Table 3-3. Absolute positional accuracy results factoring altitude AGL, percentage of forward and side overlap and processing with or without GCPs.

Altitude AGL (m)	GSD (cm)	Forward/End Lap (%)	GCP RMSE (cm)	No GCP RMSE (cm)
30	0.7	80%/50%	3.8	507.8
		70%/40%	5.4	178.0
40	1	80%/50%	5.9	138.4
		70%/40%	6.3	73.3
50	1.2	80%/50%	6.2	99.2
		70%/40%	6.5	53.8
60	1.5	80%/50%	6.9	120.7
		70%/40%	6.8	151.9
70	1.7	80%/50%	9.6	179.6
		70%/40%	9.2	229.0
80	2	80%/50%	9.5	179.6
		70%/40%	10.0	934.2

AGL: Above Ground Level, GSD: Ground Sample Distance, GCP: Ground Control Point, RMSE: Root Mean Square Error.

The absolute positional accuracy of orthomosaics produced without GCPs depends on the accuracy of the navigation system of the UAV. Currently, these systems generally have an accuracy of about 1 to 2 m, which is not accurate enough for direct georeferencing. Therefore, GCPs are necessary to properly define the coordinate reference system. Alternatively, integrating an accurate direct georeferencing system onto a UAV platform would allow the elimination of GCPs (Turner et al., 2014). Although most commercial UAVs are not equipped with an accurate direct georeferencing system, there are UAVs in the market with this capability, which will likely be a more common solution in the future.

As altitude AGL increased, errors also increased when GCPs were used (Figure 3-8a, b). This behavior was constant independent of forward and side overlap settings. From 30 m to 40 m AGL, flights showed a positional accuracy of less than 5 cm. From 50 m to 60 m AGL, the RMSE was around 6 cm. RMSE was higher than 9 cm with altitudes 70 m AGL and up. This suggests that, as the altitude AGL increases, GSD of images increases, which is reflected in RMSE. On the other hand, the orthomosaics where GCPs were not used (Figure 3-8c, d) showed random RMSE behavior due to the lack of geometric constraints of calculating aerial-triangulation which was because the RMSE depended on the accuracy of the UAV's navigational system, suggesting lower altitude AGL flights and the use of GCPs give better absolute positional accuracy.

With the forward and side overlap settings, higher percentages (Figure 3-8a) resulted in lower RMSE for all UAV flights. The cause of this may be that there was more redundant information to extract tie points. SfM algorithms applied to UAV flights show better results when using a high redundant bundle adjustment based on matching features in multiple overlapping images. As in (Westoby et al., 2012), all individual flights with a forward and side lap equal to 80%–50%, respectively, showed better results than a 70%-40% configuration. These improved results were more evident at lower altitudes AGL.

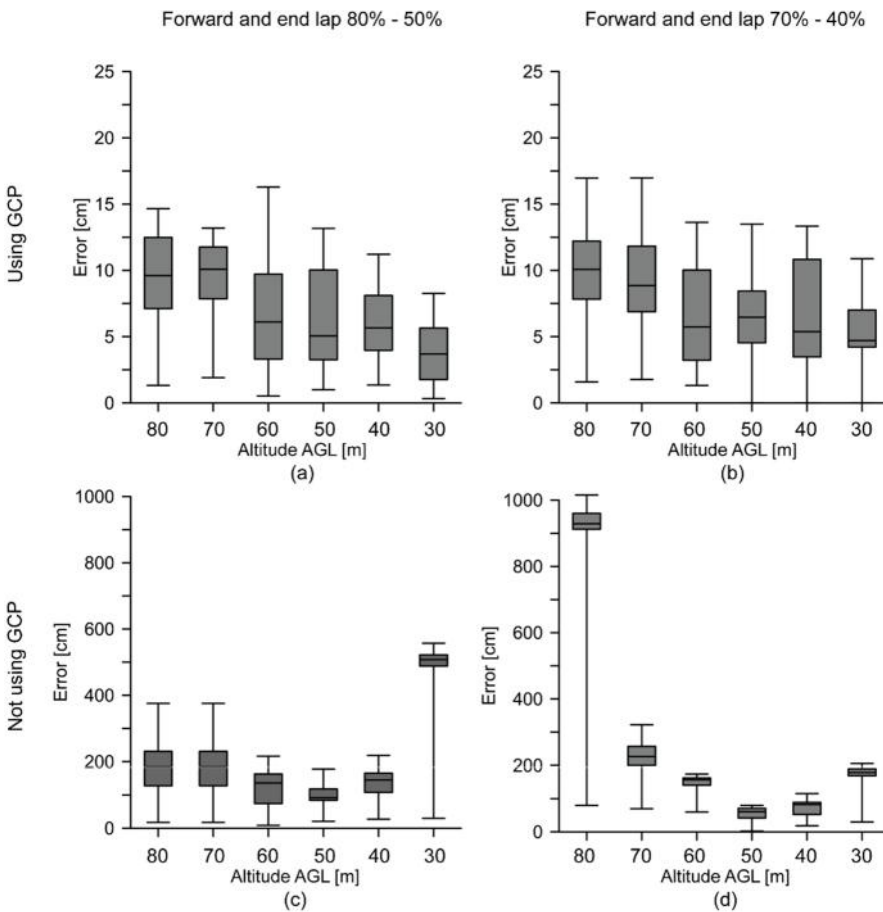


Figure 3-8. (a–d) Root mean square error (RMSE) box plot graph factoring altitude AGL; forward and side lap (a, c) 80%–50% (b, d) 70%–40% and; processing (a, b) with or (c, d) without ground control points (GCPs).

Figure 3-9 shows the forward and side overlap setting related to altitude AGL and RMSE in the flights where GCPs were used. Altitude AGL and RMSE show a linear relationship with a correlation coefficient higher than 0.9, independently of forward and side lap settings. The two linear models represented tend to converge. At lower altitudes AGL, the distance between both adjusted lines is greater while tending to converge as altitudes AGL increases. The higher forward and side overlap settings correlate with a lower RMSE having more influence on RMSE at lower altitudes AGL. On the other hand, Figure 3-9 also shows that altitude AGL has more impact on RMSE than forward and side overlap settings.

Also in Figure 3-9, GSD is represented by a continuous line, which has a moderate slope compared to the linear models of error, representing its correlation to RMSE. The mean ratio between RMSE and GSD of all UAV flights in this study was 5, suggesting that the expected RMSE of an UAV orthomosaic is five times greater than GSD of images. Ref. (Nex and Remondino, 2014) obtained a ratio of 3.7 in an experiment on an archaeological site. This difference between results may be due to the fact that they used circular targets as their well-defined check points, while, in this study, in order to approximate an applied assessment, elements of archaeological interest were used as intersection and corner check points that are more diffuse and therefore more difficult to locate and measure.

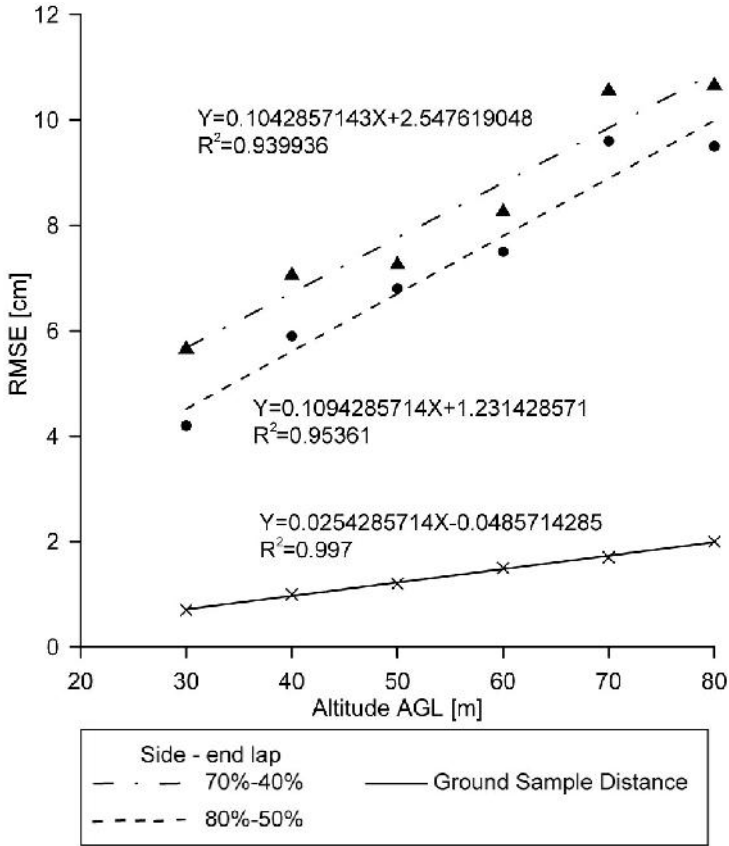


Figure 3-9. Linear model analyzing forward and side lap settings against altitude AGL and RMSE.

3.2. Assessment of Relative Positional Accuracy

Referring to relative positional accuracy (Table 3-4), RHSD was stable when GCPs were used to define the coordinate reference system in the aerial triangulation phase, ranging from 4.5 cm to 6.5cm, increasing as altitudes AGL increased and with both forward and side lap settings. RHSD showed lower values with the higher forward and side lap setting.

Table 3-4. Relative horizontal spatial deviation.

GCPs	Forward-End Lap	Altitude AGL (m)					
		30	40	50	60	70	80
Whit	70%-40%	5.1	5.5	6.1	6.2	6.2	6.5
	80%-50%	4.5	4.5	4.9	5.0	5.3	5.1
Without	70%-40%	44.0	63.3	56.7	38.1	44.4	88.8
	80%-50%	21.4	33.4	19.7	6.9	42.5	16.6

Without GCPs, RHSD showed random behavior similar to the results obtained in the absolute positional accuracy assessment above. As such, the orthomosaics obtained only using data from the UAV navigation system were rotated, translated and scaled respecting the coordinate reference system. These products were not useful even in a relative coordinate system because any linear or surface measurement is not going to appear correct because the coordinate system was not well defined.

Therefore, designing a UAV flight plan requires defined technical specifications related to illumination, resolution and spatial quality. These parameters have to be considered equally to produce an adequate UAV orthomosaic. Illumination and material effects e.g., marble and image saturation, define the time frames for flying, which is important if the time frames are narrow and flights have to be short. In regards to spatial accuracy, the expected RMSE is five times greater than the GSD registered on flight. AGL is the parameter that mainly influences RMSE. While using higher forward and side overlap settings guarantee greater positional accuracy, flight duration will be increased. Finally, if the navigation system of the UAV is inaccurate, it is necessary to use GCPs, even if the orthomosaics are going to be used in a relative coordinate system.

In this manuscript, spatial resolution of UAV orthomosaics has been assessed to survey archaeological areas. Another useful geomatic product in archaeology is model digital surface (MDS). These models can be generated using passive sensors, as we explain and use in this manuscript, or by active sensors like LiDAR. LiDAR sensors can be mounted on manned

platforms, airborne and terrestrial (Williams et al., 2013) or unmanned platforms (Wallace et al., 2012), and have been used successfully in archaeological prospection (Carter et al., 2016). Future works should be performed to compare MDS obtained by LiDAR and aerial imagery and assessing spatial resolution of LiDAR sensor onboard UAV and the influence of flight parameters.

4. Conclusions

This study has shown that UAV systems are useful complements for archaeological mapping, such as GNSS measurements or aerial photogrammetry among others. The main objective of this investigation was to analyze the configuration and technical specifications of a multi-rotor UAV equipped with a RGB sensor to produce accurate orthomosaics to be applied in archaeological applications.

Concerning spatial resolution, flight altitude AGL is an important parameter because of the degree detail achieved in the orthomosaic image to be used to for analysis and study in an archaeological context. Additionally, adequate values of altitude AGL and forward and side overlap settings have to be applied because of their impact on flight duration and positional accuracy of absolute and relative RMSE obtained. Our results have shown a ratio between RMSE and GSD of UAV flights equal to 5. Whenever possible, higher percentages of forward and side overlap are recommended for UAV flights. Other flight planning configurations, including transversal laps, can be carried out in future works to study their impact on flight duration and accuracy of results. Moreover, if the UAV's navigation system is not accurate enough, GCPs can be used instead, recalling that even if working in a relative coordinate reference system, any linear or superficial measurement is not going to be accurate without GCPs.

The use of navigation systems based on differential-GPS can be an alternative to GPC measurements to be taken into account, assessing its influence in spatial resolution.

The results herein presented can be used to configure flight missions using a RGB sensor onboard a multi-rotor UAV to maximize the spatial positional accuracy of orthomosaics to be used in archaeological mapping.

Acknowledgments: The authors would like to thank the Campus de Excelencia Internacional en Patrimonio for financial support via project “Determinación de parámetros óptimos en vuelos UAV aplicados a la caracterización métrica de yacimientos arqueológicos” of the “Proyectos de referencia internacional Campus de excelencia internacional en patrimonio, PATRIMONIUN-10”.

5. References

- Ackermann, F. (1992). Operational rules and accuracy models for GPS-aerotriangulation. *Arch. ISPRS* 1992, 1, 691–700.
- Agüera, F.; Carvajal, F.; Pérez, M.; Orgaz, F. (2015). Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. *Biosyst. Eng.*, 132, 19–27.
- Altaweel, M. (2005). The use of ASTER satellite imagery in archaeological contexts. *Archaeol. Prospect.*, 12, 151–166.
- Bendea, H.; Chiabrandò, F.; Giulio Tonolo, F.; Marenchino, D. (2007). Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV. The augusta bagienorum test site. In *Proceedings of the XXI International CIPA Symposium*, Athens, Greece, 1–6 October.
- Bogacki, M.; Malkowski, W.; Misiewicz, K. (2008). Kite Aerial Photography (KAP) as a Tool for Completing GIS Models. Ptolemais (Libya) Case Study. In *Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management, Proceedings of the 1st International EARSeLWorkshop*, CNR, Rome, Italy, 30 September–4 October; Lasaponara, R., Masini, N., Eds.; pp. 329–332.
- Carter, W.E.; Shrestha, R.L.; Fernandez-Diaz, J.C. (2016). Archaeology from the air. *Am. Sci.*, 104, 28–35.
- Carvajal, F.; Agüera, F.; Martínez, P.J. (2016). Effects of image orientation and GCP distribution on unmanned Aerial vehicle photogrammetry projects on a road cut slope. *J. Appl. Remote Sens.*, in press.
- Chiabrandò, F.; Nex, F.; Piatti, D.; Rinaudo, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: Two tests in the Piedmont region (Italy). *J. Archaeol. Sci.*, 38, 697–710.

- Fonstad, M.A.; Dietrich, J.T.; Courville, B.C.; Jensen, J.L.; Carbonneau, P.E. (2013). Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surf. Process. Landf.*, 38, 421–430.

- Fryer, J.; Mitchell, H.; Chandler, J. (2007). *Applications of 3D Measurements from Images*; Whittles Publishing: Caithness, UK.

- Gomez-Lahoz, J.; Gonzalez-Aguilera, D. (2009). Recovering traditions in the digital era: The use of blimps for modelling the archaeological cultural heritage. *J. Archaeol. Sci.*, 36, 100–109.

- Hendrickx, M.; Gheyle, W.; Bonne, J.; Bourgeois, J.; De Wulf, A.; Goossens, R. (2011). The use of stereoscopic images taken from a microdrone for the documentation of heritage—An example from the Tuekta burial mounds in the Russian Altay. *J. Archaeol. Sci.*, 38, 2968–2978.

- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Comput. Geosci.*, 32, 1283–1298.

- Inpho Uasmaster. Available online:

<http://www.trimble.com/geospatial/inpho-uasmaster.aspx> (accessed on 1 October 2016).

- International Organization for Standardization (ISO). *Geographic Information—Data Quality*; ISO: London, UK, 2013; Volume 19157.

- Juran, J.M.; De Feo, J.A. (2010). *Juran's Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence*, 6th ed.; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA.

- Küng, O.; Strecha, C.; Beyeler, A.; Zufferey, J.-C.; Floreano, D.; Fua, P.; Gervais, F. (2011). The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. In *Proceedings of the UAV-g 2011-Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics*, Zürich, Switzerland, 14–16 September.

- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry—Geometry from Images and Laser Scans*; Walter de Gruyter: Goettingen, Germany.

- Mapping, Charting and Geodesy Accuracy. Available online: http://earth-info.nga.mil/publications/specs/printed/600001/600001_Accuracy.pdf (accessed on 1 June 2016).

- Mesas-Carrascosa, F.J.; Notario-García, M.D.; de Larriva, J.E.M.; de la Orden, M.S.; Porras, A.G.-F. (2014). Validation of measurements of land plot area using UAV imagery. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.* 33, 270–279.

- Mesas-Carrascosa, F.J.; Rumbao, I.C.; Berrocal, J.A.B.; Porras, A.G.-F. (2014). Positional quality assessment of orthophotos obtained from sensors onboard multi-rotor UAV platforms. *Sensors*, 14, 22394–22407.

- Mesas-Carrascosa, F.-J.; Torres-Sánchez, J.; Clavero-Rumbao, I.; García-Ferrer, A.; Peña, J.-M.; Borra-Serrano, I.; López-Granados, F. (2015). Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaicks by UAV to support site-specific crop management. *Remote Sens.* 7, 12793–12814.

- Micheletti, N.; Chandler, J.H.; Lane, S.N. (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. In *Geomorphological Techniques*; Clarke, L.E., Nield, J.M., Eds.; British Society for Geomorphology: London, UK; Chapter 2, Section 2.2; pp. 1–12.

- Mozas-Calvache, A.T.; Pérez-García, J.L.; Cardenal-Escarcena, F.J.; Mata-Castro, E.; Delgado-García, J. (2012). Method for photogrammetric surveying of archaeological sites with light aerial platforms. *J. Archaeol. Sci.*, 39, 521–530.

- Müller, J.; Gärtner-Roer, I.; Thee, P.; Ginzler, C. (2014). Accuracy assessment of airborne photogrammetrically derived high-resolution digital elevation models in a high mountain environment. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 98, 58–69.

- Nex, F.; Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Appl. Geomat.* 6, 1–15.
- Paparoditis, N.; Souchon, J.-P.; Martinoty, G.; Pierrot-Deseilligny, M. (2006). High-end aerial digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 60, 400–412.
- Pajares, G. (2015). Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 81, 281–329.
- Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS): Bethesda, MD, USA, 2015; Volume 81, pp. A1–A26.
- QGIS. Available online: <http://www.qgis.org/en/site/> (accessed on 27 October 2016).
- Rosa, L.; Nicola, M. (2006). On the potential of quickbird data for archaeological prospection. *Int. J. Remote Sens.*, 27, 3607–3614.
- Sauerbier, M.; Eisenbeiss, H. (2010). UAVs for the documentation of archaeological excavations. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38, 526–531.
- Schindling, J.; Gibbes, C. (2014). Lidar as a tool for archaeological research: A case study. *Archaeol. Anthropol. Sci.*, 6, 411–423.
- Snavely, N.; Seitz, S.M.; Szeliski, R. (2006). Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. *ACM Trans. Graph.*, 25, 835–846.
- Szeliski, R. (2011). Structure from motion. In *Computer Vision: Algorithms and Applications*; Springer: London, UK; pp. 303–334.

- Turner, D.; Lucieer, A.;Wallace, L. (2014). Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 52, 2738–2745.
- Verhoeven, G.J.J. (2009). Providing an archaeological bird's-eye view—An overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in Archaeology. *Archaeol. Prospect.*, 16, 233–249.
- Wallace, L.; Lucieer, A.;Watson, C.; Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sens.*, 4, 1519–1543.
- Wang, J.; Ge, Y.; Heuvelink, G.B.M.; Zhou, C.; Brus, D. (2012). Effect of the sampling design of ground control points on the geometric correction of remotely sensed imagery. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.*, 18, 91–100.
- Westoby, M.J.; Brasington, J.; Glasser, N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, J.M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.
- Wilkinson, K.N.; Beck, A.R.; Philip, G. (2006). Satellite imagery as a resource in the prospection for archaeological sites in central Syria. *Geoarchaeology*, 21, 735–750.
- Williams, K.; Olsen, M.J.; Roe, G.V.; Glennie, C. (2013). Synthesis of transportation applications of mobile LiDAR. *Remote Sens.*, 5, 4652–4692.
- Yuan, X.; Fu, J.; Sun, H.; Toth, C. (2009). The application of gps precise point positioning technology in Aerial triangulation. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 64, 541–550.
- Zhang, Y.; Xiong, J.; Hao, L. (2011). Photogrammetric processing of low-altitude images acquired by unpiloted aerial vehicles. *Photogramm. Rec.*, 26, 190–211.

Capítulo 4

Identificación de elementos de subsuelo en excavaciones arqueológicas usando imágenes térmicas (o basada en termografía infrarroja)

Resumen

En los trabajos de prospección y excavación arqueológica es importante la detección de elementos a nivel de subsuelo con objeto de facilitar estas acciones de forma más precisa y rápida. En el presente capítulo se estudia el uso de imágenes térmicas de alta resolución a partir de un vuelo UAV para la detección de elementos bajo el suelo en una excavación arqueológica. La base metodológica presentada se basa en el principio de que existe una diferencia térmica apreciable en la superficie del suelo, dependiendo de las características de los elementos a nivel de subsuelo y de su distinta capacidad de absorción o transmisión del calor. La campaña de campo consistió en realizar vuelo UAV tanto con sensor termográfico como RGB sobre una zona anexa a un complejo arqueológico, para, una vez procesados realizar una comparativa entre ambos productos para detectar elementos subsuperficiales. Los resultados demuestran la presencia de posibles elementos estructurales que deberán ser contrastados mediante una intervención arqueológica.

1. Introducción

La termografía infrarroja transforma la energía térmica emitida por los objetos en la banda infrarroja del espectro electromagnético en una imagen visible. Esta característica presenta un gran potencial para ser explotada en muchos campos para ensayos no destructivos en ingeniería civil (Marchetti et al., 2008, Meola et al., 2005), en patrimonio cultural (Avdelidis y Moropoulou, 2004), en medicina (Di Carlo, 2004) y en la agricultura (Sepulcre-Cantó et al., 2006). Otras aplicaciones se realizan para estudios ambientales como teledetección infrarroja de emisiones volcánicas (Watson et al., 2004), clima urbano y estudios ambientales (Weng, 2009) o para la evaluación del agua en ríos y arroyos (Torgersen et al., 2001). Un estudio de termografía constituye una situación compleja debido a la naturaleza física misma de la medición por la cámara, la complejidad del objeto observado, la existencia de transferencias de calor entre este sistema (objeto observado) y el medioambiente que lo rodea, y la existencia de otras posibles fuentes de calor. Diversos estudios enfocados a la mejora de las imágenes térmicas (Agam et al., 2007) y los avances en la tecnología han hecho que el uso de termografía permita de una manera relativamente sencilla la evaluación no destructiva de materiales.

Habiendo estudios que demuestran ya desde los años setenta el potencial de la termografía aérea para obtención de datos del subsuelo (Berlin et al., 1977, Fourteau and Tabbagh, 1979) no existe una aplicación generalizada de uso de imágenes térmicas en la arqueología debido sobre todo a las barreras económicas y tecnológicas, que aunque cada vez son menores aún siguen siendo limitantes.

Lo interesante de la obtención de imágenes térmicas de una superficie para poder determinar que hay en el subsuelo es que cada elemento debido a su composición y humedad emite, transmite y refleja una radiación infrarroja diferente, de manera que existe la posibilidad de distinción de elementos en subsuelo, es decir hay una diferencia entre características de los restos enterrados y el entorno en el que están enterrados (Eppelbaum, 2009).

Varios estudios demuestran que la termografía puede detectar características en o cerca del suelo, tales como pozos, zanjas, límites de campo, así como características arquitectónicas enterradas hasta medio metro por debajo del suelo (Lunden, 1985).

En este capítulo se lleva a cabo un vuelo con UAV para la recopilación de imágenes térmicas de manera que se pueda diseñar un flujo de trabajo eficiente para el procesado fotogramétrico y así evaluar finalmente la efectividad de esta tecnología para reconocimiento de las zonas de subsuelo en arqueología. La unión de cámara térmica y dron para descubrimiento de elementos en subsuelo no es del todo nueva, aunque si reciente, en este estudio analizamos un protocolo de intervención, que nos permita la detección de elementos enterrados, determinando altura óptima de vuelo, tiempo y cobertura de suelo entre otras características para llevar cabo un trabajo eficiente. Varios estudios demuestran el interés de trabajar con UAV para estudios arqueológicos (Hill et al., 2014, Verhoeven et al., 2013) y al mismo tiempo los avances en el software de procesamiento de imágenes hacen más sencillo el proceso de mosaicado, georeferenciación y ortorectificación de imágenes (De Reu et al., 2013), hechos que están transformando la documentación arqueológica. Se añade a todo esto la mejora de las cámaras térmicas, reduciendo tamaños, dando mayor resolución espacial y sensibilidad térmica. Las principales características de una cámara infrarroja son la sensibilidad térmica (importante para detectar contrastes térmicos), la precisión (determina como de precisa es la medida de un objeto en relación a su verdadera temperatura), la resolución espacial (característica importante cuando se trata de descubrir defectos de tamaño reducido) y la frecuencia de la imagen (importante cuando el sistema observado es un buen conductor de calor, lo que implica tiempos característicos muy breves).

Los resultados demuestran el gran potencial de esta técnica de termografía aérea en arqueología, revelando elementos enterrados de gran interés para este tipo de estudios.

2. Materiales y Métodos

El ensayo se ha realizado en el yacimiento y santuario de Torreparedones, conjunto arqueológico andaluz ubicado entre los términos municipales de Baena y Castro del Río, en la campiña cordobesa ($37^{\circ}45'17''$ N, $04^{\circ}22'39''$ O, ETRS89) (Figura 4-1), presentando una elevación media de 579.60 m sobre el nivel del mar. La superficie total del yacimiento romano es de 10.5 hectáreas, representando el área excavada actualmente únicamente el 1.5 % del total del complejo.

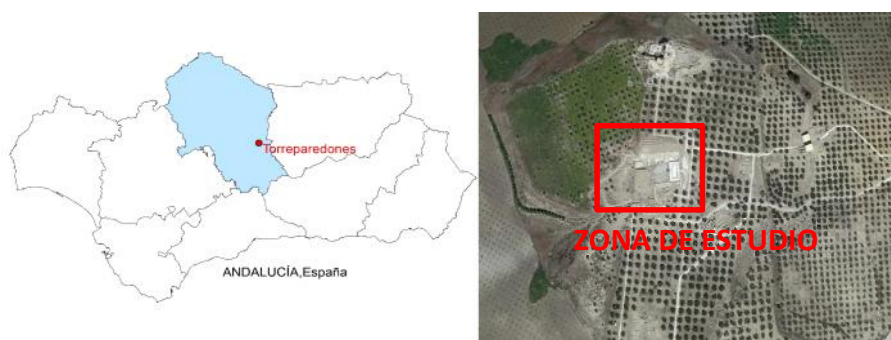


Figura 4-1. Situación lugar de estudio.

La zona de interés sobre la que se realizó el vuelo se encuentra aún sin excavar, situada al Oeste de la plaza del foro (Figura 4-2). Concretamente se ubica donde recientemente se han hallado nuevas calles que la rodean y se presuponen por parte de la dirección de la excavación y de los arqueólogos que trabajan en la misma, que existen ruinas enterradas en la zona. Sobre dicha zona se programaron dos vuelos UAV, uno empleando un sensor RGB y otro termográfico. El interés de usar este último se basó encontrar y localizar algún patrón térmico que indique la presencia de ruinas en subsuelo.



Figura 4-2. Polígono marcado sobre el área de interés dentro del yacimiento.

2.1 Plataforma de vuelo y sensor empleados

Se ha empleado la plataforma de vuelo MD4-1000, perteneciente a la casa comercial alemana microdrones GmbH (Microdrones GmbH, Siegen, Alemania) (Figura 4-3). Esta plataforma es de tipo quadrotor con un bastidor mono carbono robusto que protege los cuatro motores brushless de 250W cada uno alimentados por una batería de 22.2 v. La plataforma integra sensores de inclinación, acelerómetros, giróscopos y receptor GNSS de tal forma que puede reproducir y recorrer correctamente rutas de vuelo programadas y modificar automáticamente los parámetros para adaptarlos a las condiciones reales del momento de ejecución del vuelo a medida que avanza en sus desplazamientos. Tiene la capacidad de despegue vertical, siendo su autonomía de vuelo, condicionada por la carga de peso, aproximadamente de unos 30 minutos para un sensor con un peso de 250 gr, pudiendo soportar hasta un máximo de 1.2 Kg de carga. Alcanza una velocidad de crucero de 12.0 m/s y una velocidad máxima de ascenso de 7.5 m/s.



Figura 4-3. Detalle preparación de vuelo plataforma MD4-1000.

La plataforma de vuelo opera acompañada de una estación base en tierra que contiene receptores de radio y vídeo desde la cual es posible controlar la telemetría de la plataforma, pudiendo llevar en todo momento un seguimiento en tiempo real del nivel de batería, altura, distancia, calidad de la señal GNSS o la señal de control remoto entre otros. La herramienta que utiliza esta estación de control para gestionar toda la información de vuelo se corresponde con el software mdCockpit, con el que se desarrolla igualmente el plan de vuelo (Figura 4-4.a).

Se realizaron sobre la zona de interés dos vuelos UAV con dos sensores diferentes, RGB y termográfico. El primero de ellos permitió obtener una ortofotografía en color verdadero donde poder identificar los elementos visibles presentes en la zona de vuelo. El segundo permitió ofrecer un termograma de la misma zona con objeto de poder detectar algún patrón de temperatura no relacionado directamente con los objetos y elementos presentes en la ortografía RGB. En el caso del primer vuelo, RGB, se empleó una cámara Sony Nex7 equipada con un objetivo de distancia focal igual a 16 mm, registrando imágenes mediante un sensor de 23.5 x 15.6 mm y un tamaño de imágenes de 6000x4000 píxeles. El peso total, incluido el cuerpo de la cámara y la batería, fue igual a 353 gramos. En

el segundo de los vuelos se empleó como carga de pago un sensor termográfico Gobi-640-GigE (Xenics nv, Leuven, Bélgica) (Figura 4-4.b). Este se corresponde con una cámara térmica de alta resolución no refrigerada calibrada para operar a 16 bits en un rango dinámico entre -20°C a 120°C , siendo su resolución espectral igual a 0.05°C . Presenta una distancia focal de 18 mm y tamaño de pixel de $17\ \mu\text{m}$. Registra imágenes con una dimensión de 640×480 pixel. Además, el sensor presenta su propio sistema de procesamiento de imagen el cual permite la implementación de una *non-uniformity correction* (NUC), así como un sistema automático de gestión del sesgo y la ganancia en la medida. Para un adecuado registro de la temperatura, el sensor es pre-calentado en tierra antes de ejecutar la misión de vuelo durante 20 minutos, proceso que permite la estabilización de la temperatura interna del sistema. El sensor no tiene capacidad de almacenamiento de la información, por ello éste se conecta a un stick PC Asus QM1 (Asustek Computer Inc., Taiwan, China) a través del puerto Ethernet. Considerando todos los componentes el peso total de la carga de pago es igual a 710 gramos, permitiendo realizar vuelos con una duración igual a 20 minutos.

Para cada uno de los sensores se programó un vuelo UAV considerando las características descritas anteriormente de cada uno ellos a una altura de 40 metros sobre el terreno y unos solapes de 75% y 60% de solape longitudinal y transversal respectivamente. Los tamaños de pixel de las imágenes obtenidas fueron de 8 cm y 1.25 cm para los vuelos termográfico y RGB respectivamente.



Figura 4-4. Detalles del material empleado: (a) estación de control y (b) sensor Gobi.

Los vuelos se realizaron el 20 de mayo de 2016, estando la zona limpia de vegetación, evitando por tanto cualquier posible interferencia en la termografía por parte de la vegetación por emisiones de temperatura, sombras y humedades procedente de los objetos mas superficiales. Antes de llevar a cabo los vuelos se materializaron en campo unos puntos de apoyo situados en cada una de las esquinas de la zona de vuelo de manera que se cubriera toda el área de trabajo. Para la obtención de las coordenadas de dichos puntos de control se emplearon dos receptores GNSS, el primero de ellos a modo de base fue una estación de referencia de la Red Andaluza de Posicionamiento del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía y como equipo rover un receptor Leica GS15 GNSS, recibiendo correcciones en tiempo real a través del protocolo NTRIP. La observación de estos puntos permitiría posteriormente calcular una aerotriangulación referida al sistema de referencia WGS-84, garantizando de este modo la interoperabilidad espacial entre las dos ortofotografías a generar, RGB y termográfica.

2.2 Proceso fotogramétrico

Como software de procesado de las imágenes obtenidas de cada vuelo se utilizó el software Pix4dmapper (Pix4D S.A., Lausanne, Suiza). Para ello, una vez enlazada la telemetría de cada vuelo con las imágenes registradas se crearía un proyecto fotogramétrico por vuelo, siendo procesado en diferentes fases: aerotriangulación, generación del Modelo Digital de Superficies (DSM) y finalmente una ortofotografía. Para no introducir errores en el procesado se eliminaron aquellas imágenes que no presentaban una adecuada calidad, siendo ésta valorada como nitidez. Dado que el área de estudio era de dimensiones reducidas, y por tanto el número de imágenes era bajo, este proceso se realizó manualmente.

2.3 Interpretación de resultados

A partir de la obtención de la ortofotografía RGB y del termograma de la zona de estudio se realizó una comparación de ambos productos visualmente con objeto de detectar la presencia de patrones de temperatura no asociados a los objetos sobre el terreno. Esta comparativa se realizó mediante el software QGIS. Dado que el rango dinámico de valores de temperaturas de interés es pequeño con respecto a los valores presentes

en la escena, se hicieron distintos test modificando el histograma de la imagen termográfica con objeto de poder resaltar la presencia de patrones de elementos a nivel de subsuelo.

3. Resultados

Los vuelos UAV termográfico y visible se realizaron el 20 de mayo de 2016 adquiriendo un total de 157 y 138 imágenes respectivamente, cubriendo una superficie igual a 2.6 ha. Para la ortofotografía RGB (Figura 4-5.a) y su MDS (Figura 4-5.b) se generaron de forma automática una media de 35965 “tie points” por imagen, obteniendo así un tamaño de pixel (GSD, *Ground Sample Distance*) en el producto final igual a 1.90 cm. Igualmente, en el caso del termograma de la zona de estudio (Figura 4-5.c) y su MDS (Figura 4-5.d) el número medio de *tie points* por imagen resultó igual a 1678, siendo el GSD igual a 8.82 cm. La diferencia del número de *tie points* se debe principalmente a dos factores, en primer lugar a la relación lineal en las dimensiones de la imagen RGB es 8.8 veces mayor que la imagen termográfica, por otro lado la calidad¹ de las imágenes RGB permite a los algoritmos de *matching* la posibilidad de detectar mayor cantidad de detalles y diferencias radiométricas frente a las obtenidas por el sensor termográfico. El error medio cuadrático en el proceso de georreferenciación considerando los 5 puntos de apoyo fue igual a 1.80 cm y 7.01 cm para la ortofotografía RGB y térmica respectivamente. Esto aseguró la interoperabilidad espacial entre ambos productos. La ortofotografía térmica en valores digitales no fue convertida a valores de temperatura empleando el fichero de calibración del fabricante. Tal decisión se fundamentó en el hecho de que el posterior análisis se apoyó en la detección de elementos y anomalías a partir de diferencias de comportamiento entre áreas, es decir, diferencias relativas.

¹ La calidad de la imagen es entendida como nitidez en la imagen, mayor nivel de detalle de los elementos y objetos presentes en la imagen tanto por un menor tamaño de pixel como de diferencias radiométricas entre fenómenos.

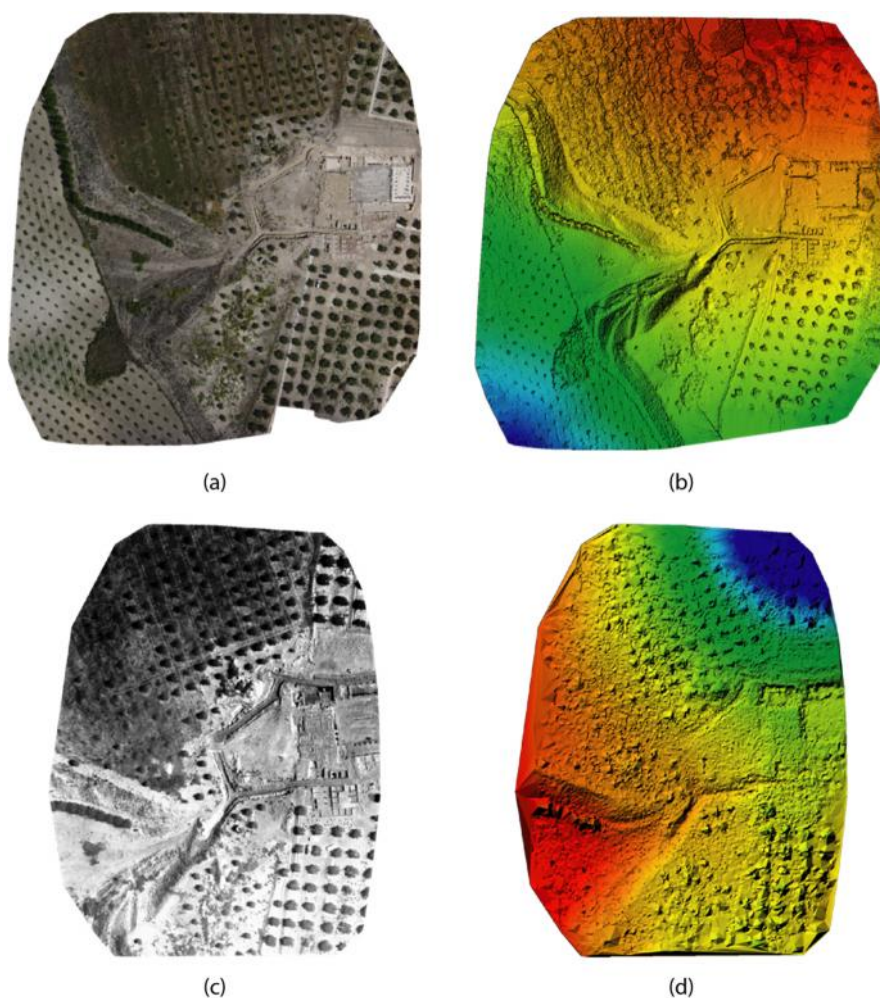


Figura 4-5. Vista general de la ortofotografía (a) RGB y su (b) MDS y (c) termograma y su (d) MDS asociado.

En primer lugar se analizó la coherencia espacial entre ambos productos UAV. Para ello, se identificaron un total de 40 puntos distribuidos de forma homogénea por la zona de estudio en la ortofotografía RGB, para posteriormente identificarlos en la ortofotografía termográfica, siendo la discrepancia entre ambos productos igual a 7.12 cm, inferior al GSD del termograma generado, garantizando así la comparativa por superposición de ambos productos. La Figura 4-6 presenta con mayor detalle la zona de

interés dentro del yacimiento obtenido por los dos sensores y la Figura 4-7 la superposición de ambos productos.



(a)



(b)

Figura 4-6. Detalle ortomosaicos generados mediante vuelo UAV: (a) sensor RGB y (b) sensor termográfico.

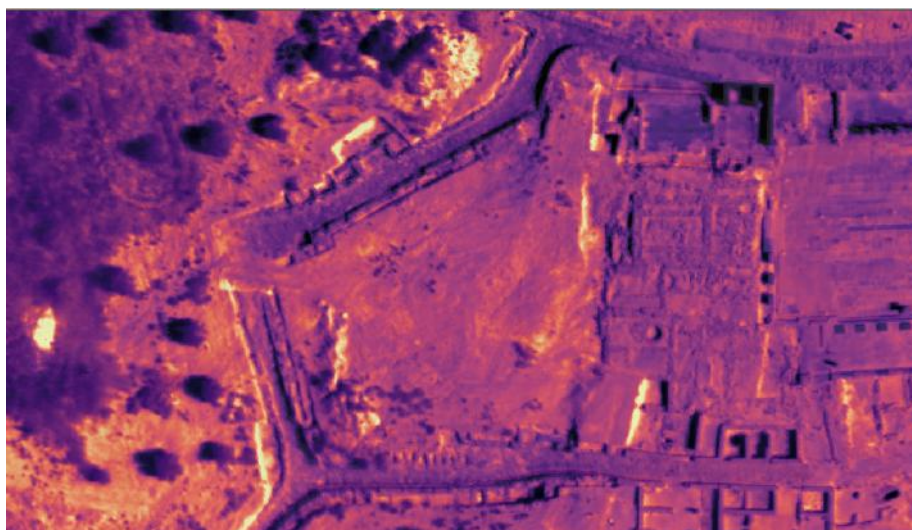


Figura 4-7. Detalle de superposición ortofotografía RGB y termografía de la zona de estudio.

A continuación, se superpuso el termograma de la zona sobre la ortofotografía RGB para localizar posibles elementos presentes en el termograma no detectables en la región del visible. Se usaron para ello diferentes paletas de color, así como diferentes configuraciones del histograma del termograma. La Figura 4-8 presenta diferentes configuraciones de visualización. La Figura 4-8.a presenta un detalle de la zona explorada sobre la ortofotografía RGB mientras que las Figura 4-8.b a Figura 4-8.e muestra distintas representaciones del termograma. Concretamente la Figura 4-8.b presenta la termografía considerando el valor máximo y mínimo presentes en el termograma, a continuación, en las siguientes figuras se muestran distintas representaciones de la misma imagen reduciendo los valores mínimo y máximo del histograma a considerar para la representación en pantalla de la imagen de temperatura. Como se puede ver, en la zona remarcada aparece una estructura formada por alineaciones que si bien aparece marcada en la imagen de temperaturas no se encuentra en la ortofotografía RGB de la misma fecha. Estos resultados han sido analizados junto con profesores del Departamento de Historia del Arte, Arqueología y Música de la Universidad de Córdoba, determinando éstos que las alineaciones pueden deberse a restos de muros de viviendas. Actualmente se ha solicitado financiación para realizar los trabajos de

prospección arqueológica en la zona a fin de contrastar los resultados presentados con la realidad.

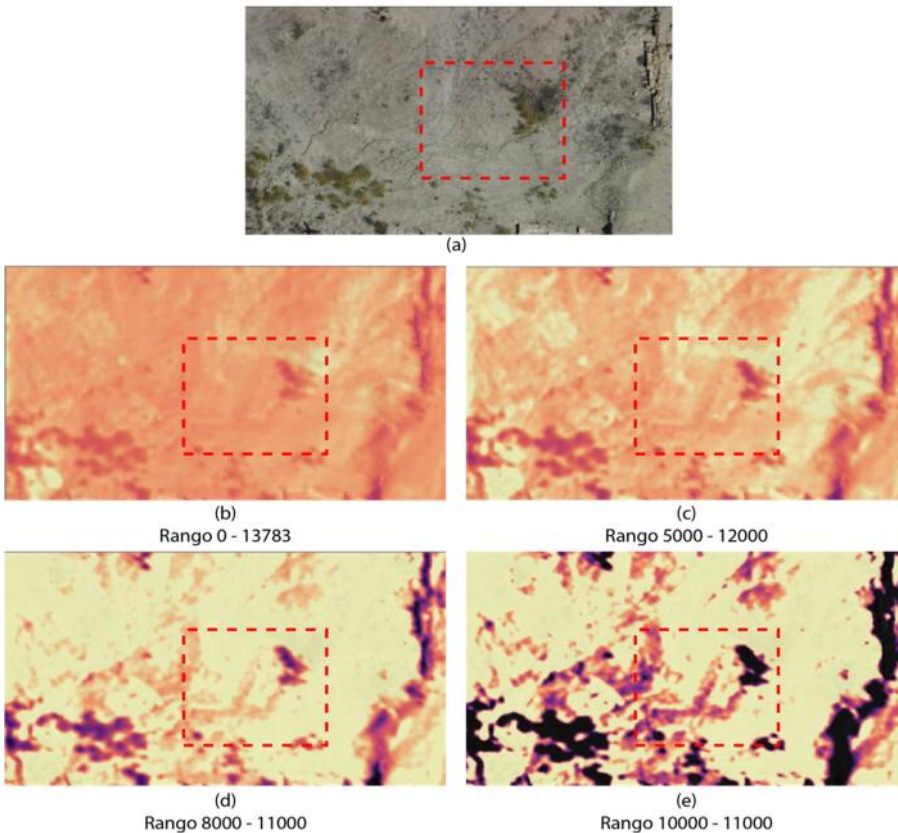


Figura 4-8. Detalle comparativa RGB y termograma: (a) ortofotografía RGB, (b a d) termograma con expansión del contraste considerando diferentes valores máximos y mínimos de nivel digital.

4. Conclusiones

La fotografía aérea no es nada nuevo, pero la capacidad de usar imágenes derivadas de distintos sensores a bordo de diferentes plataformas y la captura de estas rápidamente y con alta resolución espacial crea herramientas analíticas que eran virtualmente inaccesibles para los arqueólogos hace una década. El avance en desarrollo e investigación en este campo permite nuevas técnicas de diagnóstico para documentación de las excavaciones con el mayor detalle posible.

La termografía infrarroja, como un sistema de imágenes remotas, puede utilizarse para evaluación de superficies, siendo además una técnica sin contacto que permite el estudio de obras de arte como mosaicos, frescos y pinturas. Hay una evolución de la técnica termográfica, los progresos son continuos tanto en los equipos como en los medios de tratamiento de imágenes. Los progresos no consisten solo en mejoras de las características sino también en acciones innovadoras como la mezcla de imágenes infrarrojas y visibles.

El presente trabajo supone una confirmación de la viabilidad de trabajar con termografía infrarroja para la detección de elementos enterrados. Con las cámaras térmicas que puede ser portadas en un UAV, los arqueólogos tienen una nueva manera de descubrir qué se esconde bajo tierra, buscando desde el cielo. La prospección guiada por termografía puede ayudar a localizar edificaciones bajo tierra, gracias a que las paredes de piedra y ladrillo emiten calor de una forma diferente al suelo circundante.

Con una metodología adecuada de trabajo y análisis de características de vuelo, sensores y software óptimos, que dan como resultado un trabajo eficiente, se convierte en una herramienta útil para los estudios arqueológicos, aunque el uso de esta herramienta debe convertirse en un procedimiento estandarizado común antes de comenzar una excavación.

5. Bibliografía

- Agam, N.; Kustas, W.P.; Anderson, M.C.; Li, F.; Neale, C.M.U., (2007). Avegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sensing of Environment* 107, pages 545–558.
- Avdelidis, N.p.; Moropoulou, A., (2004). Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage* 5, pages 119–127.
- Berlin, G.I.; Ambler, J.R; Hevly, R.H.; Schaber, G.G., (1977). Identification of a Sinagua Agricultural Field by Aerial Thermography, Soil Chemistry, Pollen/Plant Analysis, and Archaeology. *American Antiquity*, Volume 42, Issue 4, pp. 588-600.
- De Reu, J.; Plets, G.; Verhoeven, G.; De Smedt, P.; Bats, M.; Cherretté, B.; De Maeyer, W.; Deconynck, J.; Herremans, D.; Laloo, P.; Van Meirvenne, M.; De Clercq, W.,(2013). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological Heritage. *Journal of Archaeological Science* 40, pages 1108e1121.
- Di Carlo, A., (2004). Telethermography with thermostimulus in the study of temporal arteritis. *Infrared Physics & Technology*, Volume 46, Issues 1–2, Pages 57-61.
- Eppelbaum, L., (2009). Near-surface temperature survey: An independent tool for delineation of buried archaeological targets. *Journal of Cultural Heritage*, Volume 10, Supplement 1, Pages e93-e103.
- Fourteau, A.M.; Tabbagh, A., (1979). Parcelleire fossile et prospection thermique Résultats des recherches à Lion-en-Beauce (Loiret). *Revue d'Archéométrie*, n°3, pp. 115-123.
- Hill, A.C.; Kersel, M.M.; Rowan, Y.M., (2014). Mapping with Aerial Photographs: Recording the Past, the Present, and the Invisible at Marj Rabba, Israel. *Near Eastern Archaeology* 77(3), pages 182-186

- Lunden, B., (1985). Aerial Thermography: A Remote Sensing Technique Applied to Detection of Buried Archaeological Remains at a Site in Dalecarlia, Sweden. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography* Vol. 67, No. 1/2, pp. 161-166.

- Marchetti, M.; Ludwig, S.; Dumoulin, J.; Ibos, L.; Mazioud, A., (2008). Active Infrared Thermography for Non-Destructive Control for Detection of Defects in Asphalt Pavements. 9th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, July 2-5. Krakov-Poland.

- Meola, C.; Di Maio, R.; Roberti, N.; Carlomagno.G.M., (2005). Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. *Engineering Failure Analysis* 12, pages 875–892.

- Sepulcre-Cantó, G.; Zarco-Tejada, P.J.; Jiménez-Muñoz, J.C.; Sobrino, J.A.; de Miguel, E.; Villalobos, F.J., (2006). Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology* 136, pages 31–44.

- Torgersen, C.E.; Faux, R.N.; McIntosh, B.A.; Poage, N.J.; Norton, D.J, (2001). Airborne thermal remote sensing for water temperatura assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment*, Volume 76, Issue 3, Pages 386-398.

- Verhoeven, G.; Sevara, C.; Karel, W.; Ressler, C.; Doneus, M.; Briese, C., (2013). Undistorting the Past: New Techniques for Orthorectification of Archaeological Aerial Frame Imagery. *Good Practice in Archaeological Diagnostics*, pp 31-67.

- Watson, I.M.; Realmuto, V.J.; Rose, W.I.; Prata, A.J.; Bluth, G.J.S.; Gu, Y.; Bader, C.E., Yu, T., (2004). Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 135, pages 75– 89.

- Weng, Q., (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, pages 335_344.

Capítulo 5

Futuras líneas de investigación, limitaciones y conclusiones finales.

1. Futuras líneas de investigación y limitaciones actuales

A futuro se plantean diferentes retos que necesitan de análisis, investigación y desarrollo. El empleo de nuevos materiales, más ligeros y resistentes, permitirá el aumento de los tiempos de vuelo, aspecto a considerar en toda planificación de vuelo UAV. Además, uno de los aspectos más críticos en el uso de UAS es tanto las operaciones de lanzamiento como recuperación de la plataforma, siendo muy significativo en las plataformas de tipo ala fija frente a las de ala giratoria, presentando estas últimas una tasa de incidentes menor, así como mayor facilidad de manejo.

Otro aspecto en el que se está trabajando hoy día reside en dotar al sistema de la capacidad de ver y evitar, con objeto de hacer la navegación más segura. La mejora de las prestaciones y fiabilidad de estos sistemas permitirá a futuro el transporte de maquinaria, robots o incluso personas, facilitando de esta forma la seguridad en vuelos fuera de línea de vista. De este modo, además del desarrollo tecnológico se hace necesario la definición de un marco regulatorio donde se asegure en todos los aspectos la coexistencia con plataformas tripuladas.

Si bien la naturaleza y desarrollo de los UAS ha sido militar, es innegable que se ha despertado el interés del gran público. El crecimiento de usos civiles y comerciales está creciendo cada año al tiempo que se mantienen las aplicaciones militares. Tal y como refleja el estudio realizado por UVS (UVS-International 2014) entre el periodo 2005-2013 se han triplicado las referencias UAS y duplicado los productores y desarrolladores de sistemas. A la vista de estos datos es posible afirmar como el interés del gran público por estas tecnologías va aumentando y que todo lo iniciado y desarrollado por motivos militares se está incorporando a la sociedad civil al igual que otras tecnologías lo hicieron anteriormente como el sistema GPS. Por lo tanto, es posible afirmar que a corto plazo la progresión y evolución de estas tecnologías se incrementará. Desarrollando plataformas más estables y seguras, equipadas con sensores de mayores prestaciones, navegando en el espacio compartido con plataformas tripuladas.

En cuanto a las limitaciones relacionadas con las plataformas de vuelo esta el hecho de emplear motores eléctricos, ofreciendo vuelos de duración corta, problemas de estabilidad y de maniobrabilidad en algunos de los casos. Otro aspecto limitante se debe a las restricciones en cuanto a la carga de peso. La limitación relacionada con el peso de los sensores se encuentra entre el 20 y el 30% del peso total de la plataforma de vuelo.

Considerando el marco legislativo, en el caso por ejemplo de la agricultura extensiva, la legislación actual obliga a volar siempre dentro del alcance visual del piloto, teniendo como consecuencia la necesidad de realizar diferentes vuelos para poder cubrir una explotación determinada. Finalmente, resaltar que, si bien en los últimos años han aparecido numerosos estudios e investigaciones donde se han empleado UAS para la adquisición de imágenes, no se ha realizado un análisis detallado de costes / beneficio que este tipo de tecnologías puede aportar en algunos tipos de trabajos.

Por lo tanto, los sistemas UAS aplicados a nivel civil se encuentran actualmente en una situación inicial donde aún queda espacio para el desarrollo de plataformas de vuelo, sensores, software y desarrollo de aplicaciones que aporten mejoras y valor añadido. El éxito de la aplicación de estos sistemas es dependiente de que en los próximos años se desarrollen utilidades que realmente demuestren el beneficio, bien sea en ahorro de costes, reducción temporal de procesos o la mejora de la producción en este sector.

2. Conclusiones finales

En esta Tesis Doctoral se ha estudiado el potencial de las imágenes obtenidas por sensores a bordo de UAV, evaluando la calidad de los productos generados, así como las características y condiciones óptimas para distintos tipos de aplicaciones. A modo de resumen, las conclusiones y consideraciones finales que pueden establecerse de la presente Tesis Doctoral son:

-) Los vehículos aéreos no tripulados se han desarrollado en los últimos años como una plataforma tremendamente versátil para la adquisición de imágenes remotas, con multitud de aplicaciones en

cartografía, termografía, agricultura de precisión, etc., aportando información con la calidad necesaria para las aplicaciones donde serán implementadas, suponiendo una revolución en el campo de la Geomática.

-) Las prestaciones ofrecidas por los sensores embarcados en plataformas UAV son muy variadas, dependiendo del tipo de sensor empleado. Los sensores tipo RGB son los que ofrecen un mayor tamaño de sensor, cubriendo una mayor superficie por fotograma y por tanto teniendo un impacto directo en el tiempo de duración del vuelo. Los sensores multiespectrales y termográficos presentan sensores de menor tamaño. De este modo, si bien ofrecen la posibilidad de registrar información en distintas regiones del espectro electromagnético, lo hacen con una resolución espacial mas grosera. Además, el tamaño de la imagen es inferior al ofrecido por los de tipo RGB, aumentando por lo tanto la duración de vuelo. Por lo tanto, además de la mejora en la estabilidad de la respuesta ofrecida, los sensores de tipo multiespectral y termográfico presentan aun un amplio rango de mejora.
-) La posibilidad de embarcar sensores de bajo peso multiespectrales y termográficos sobre UAV ha acercado la teledetección al usuario, que hasta ahora no tenía control ni de los sensores ni de las plataformas de vuelo. Este control unido a las nuevas resoluciones espaciales y temporales han posibilitado una apertura de las aplicaciones posibles en distintos sectores como el sector agrícola o el de patrimonio.
-) Los parámetros de vuelo óptimos dependen tanto del sensor y plataforma de vuelo como de las características técnicas de los productos a obtener como resultado. De este modo, se propone evaluar la calidad de los productos cartográficos según aplicación y tipo de sensor empleado. Esta evaluación de la calidad ha de ser realizada en todas sus componentes, no solo la espacial.
-) Queda reflejado el potencial que presentan los productos resultantes a partir de imágenes obtenidas de sensores a bordo de UAV, tanto en trabajos para agricultura como en patrimonio.

