

- a) Integración de bases de datos accesibles a una plataforma web actualizable e intercambiable con diferentes escalas de acceso y edición, integrando de igual modo el conjunto de metadatos mediante ficheros XML que describen la información principal.
- b) Democratización de los resultados mediante el empleo de formatos compatibles a nivel de usuario para poder trabajar y gestionar la información con aplicaciones de libre acceso que resulten útiles y comprensibles por cualquier usuario.
- c) Registro del protocolo de actuación a través de normas que recojan las recomendaciones necesarias para la verificación de su geometría. El componente métrico en cada proyecto es fundamental para poder obtener medidas y localizar coordenadas absolutas o relativas como punto fundamental de partida para derivar el proyecto hacia alternativas infográficas, ello cumpliendo el binomio científico-divulgativo, siempre partiendo del mismo archivo geométrico a través de un orden lógico de desarrollo.

En este sentido, para la difusión de este proyecto mediante una plataforma web, en base a la experiencia adquirida, se han establecido criterios metodológicos con procesos relacionados con otras disciplinas exógenas como la ingeniería e industria, en concreto, utilizando el mismo sistema de servidor web local que integre cada escaneado realizado y que normalmente se emplea para fines industriales. En este caso se ha utilizado el *plug-in Leica Truview*, aunque existen otros programas similares como *Scene 5.0* de Faro con la función *Scene Web-Share server* que mejora el intercambio de la información. Todo esto supone un nuevo lenguaje que nos permite registrar y publicar el estado original.

El soporte que se ha utilizado para su difusión ha sido una página web. Sin embargo, existen actualmente condicionantes que de algún modo limitan su plena visualización e interacción. Estos condicionantes son: (1) la propia limitación física del tamaño de cada archivo en el alojamiento web, para ello ha sido necesario comprimir la información prescindiendo de resolución gráfica; (2) el tipo de conexión y velocidad para la carga de cada fichero; y (3), la adopción de formatos que sean fácilmente reconocibles y gestionables por cualquier usuario. Sin embargo, queda todavía un largo camino por explorar, y con ello tan sólo hemos comprobado con este proyecto una aproximación a un nuevo modo de gestionar la información registrada. En este sentido, entendemos que una de las claves para el futuro será intercambiar metodologías de trabajo en la frontera de varias disciplinas para la divulgación del patrimonio cultural, sobre todo a nivel de gestión de la información.



FIG. 135. Malla 3D transformada en formato PDF3D de la Presa romana de Muel (Zaragoza).

3.4.1.5. Conclusiones

El carácter singular de este proyecto ha establecido un nuevo modo de combinación de las nuevas tecnologías de registro patrimonial, con acceso libre a la información, ofreciendo herramientas, sobre todo accesibles, con las que cada usuario, a diferentes niveles, pueda interactuar con esa información. Para ello, ha de asegurarse una disposición de la información registrada, siguiendo un único proceso que integre y relacione de un modo recíproco un registro científico y divulgativo, según esta cadena de procesos:

- a) Documentación de cada yacimiento en su estado actual. Obtención de modelos métricos tridimensionales de diferentes tipologías hidráulicas romanas para su documentación, conservación y protección patrimonial, prescindiendo, si es el caso, de otros elementos externos o arquitecturas modernas, tal y como ha sucedido con la cloaca de Caesaraugusta, con el fin de entender la relación existente entre la arquitectura romana y el medio natural.
- b) Creación de un protocolo en el registro de la información. Control de calidad y comprobación a través de procedimientos, asegurando la interoperabilidad y comunicación de la información a través de la unificación, especificación y simplificación. Con ello, se facilita la comprensión de la cadena de procesos que corroboran el resultado final, pudiendo analizar de manera individual cada uno de ellos.
- c) Proceso de «democratización» de resultados 3D que proporcionen una difusión y divulgación, utilizando formatos compatibles con *software* libre y fácil de gestionar.
- d) Metodología interdisciplinar en el proceso de estudio coordinada por cada disciplina. La finalidad fundamental es facilitar la gestión a través de entornos web fácilmente configurables con diferentes grados de acceso, con el objetivo de alcanzar una mayor divulgación del yacimiento arqueológico de manera gráfica y, sobre todo, geométrica. Esto posibilita, de un modo rápido y preciso, la visualización de cualquier elemento o parte de su estructura. De este modo, se ha logrado un desarrollo combinado, válido para una mayor valoración y divulgación de la información obtenida. Además de contribuir a la propia investigación transdisciplinar, resolviendo los diferentes vacíos metodológicos y de conceptualización tridimensional y aportando una perspectiva integradora que evita la segmentación de la cadena informativa.
- e) Integración de aplicaciones gráficas y métricas de cada uno de los yacimientos en una plataforma web libre a través de un nexo didáctico en la siguiente página web: http://www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano

3.5. Arqueología del paisaje: documentar lo que no se ve

JORGE ANGÁS / PAULA URIBE

3.5.1. Introducción: la teledetección

El objetivo principal de este apartado es analizar la teledetección como una nueva técnica arqueológica que permita resolver diferentes problemáticas que se plantean actualmente en el estudio del patrimonio arqueológico. Concretamente, analizaremos diferentes yacimientos arqueológicos de época romana del valle medio del Ebro.

Si observamos, sobre todo, la proliferación de investigaciones desde el año 2012, nos percatamos cómo el avance tecnológico en la

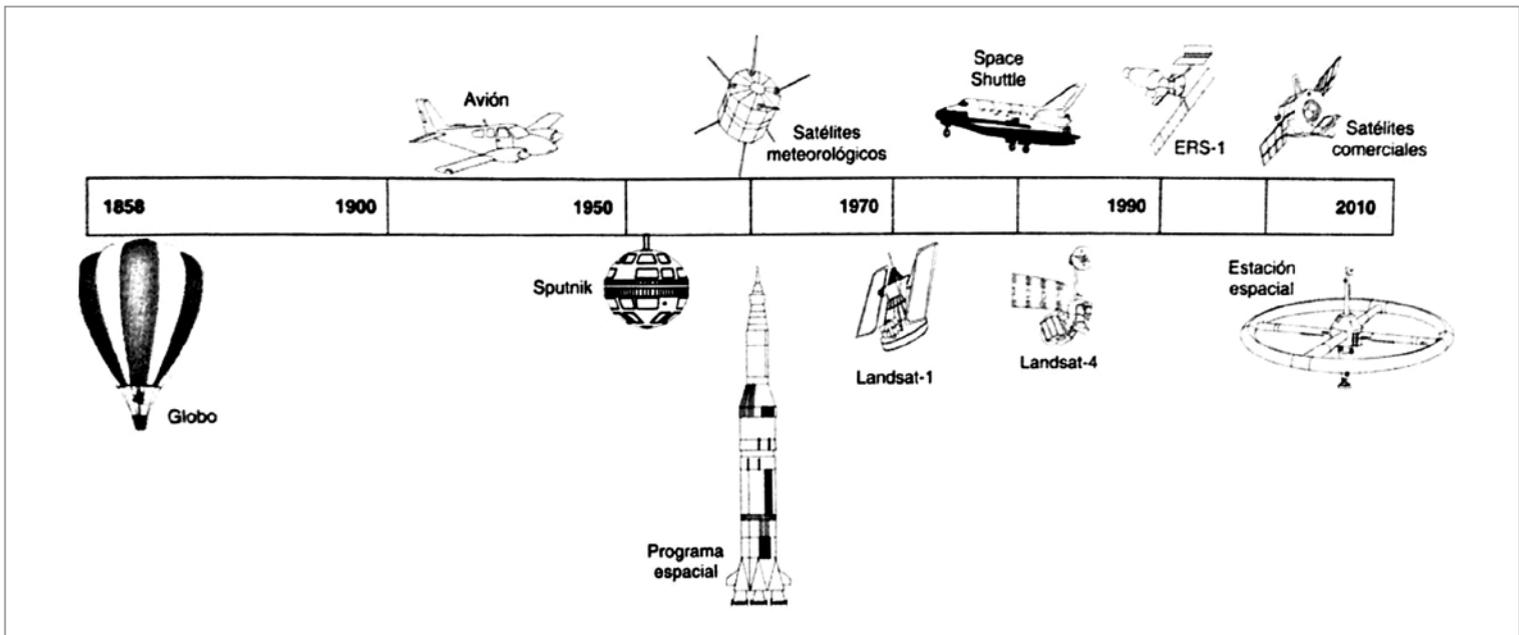


FIG. 136. Evolución histórica de los sistemas de teledetección (Chuvioco, 2010: 22).

sensorización de los drones ha contribuido a una monitorización periódica de zonas arqueológicas que facilitan, indudablemente, la documentación y conservación del patrimonio arqueológico. A este factor cabe añadir la accesibilidad en la consecución de información satelital y sobre todo de datos LiDAR. Sin duda, se trata de información con diferente grado de resolución y periodicidad, sin embargo, podemos obtener datos a diferente nivel de escala que nos permitan analizar un mapa previo antes de cualquier otro tipo de intervención más intensiva sobre el terreno, como las diferentes alternativas de la prospección geofísica. Este hecho, si lo comparamos con la denominada «agricultura de precisión», que prácticamente se nutre de las mismas técnicas de teledetección, resulta fundamental dotar de un registro o un histórico que nos permita conocer la evolución del campo para comprender la variabilidad de cada contexto.

En este momento, desconocemos gran parte del entramado urbano y la forma arquitectónica de muchos de los edificios que configuraron estos asentamientos prerromanos y romanos. Ante la incapacidad de llevar a cabo excavaciones arqueológicas, se plantea la aplicación de uso de imágenes multispectrales realizadas a baja altura mediante la utilización de RPAS o drones, con la finalidad de investigar y delimitar los restos que permanecen todavía soterrados. Nuestra aportación reside en la utilización de la misma herramienta de trabajo, esto es, la teledetección, pero precisamente usando estas tecnologías emergentes que adolecen de un procedimiento contrastado, tales como plataformas aéreas no tripuladas. Esta implementación tiene como resultado la obtención de diferentes imágenes con una resolución de 3-4 cm por píxel⁵⁴, resolución con la que seremos capaces de distinguir con mayor exactitud la tipología de las estructuras soterradas.

La aplicación de la teledetección es otra de las ciencias que ha tenido un gran protagonismo en el análisis científico de la arqueología del paisaje. Por ello, hemos dedicado un apartado de experimentación centrado en dos yacimientos arqueológicos con el fin de documentar «lo que no se ve». Si nos centramos en lo que entendemos por teledetección, es necesaria una definición del térmi-

no, significando que se trata de la ciencia que estudia el conjunto de técnicas de adquisición, elaboración e interpretación de objetos sin entrar en contacto directo con los mismos⁵⁵. Si atendemos a su propia idiosincrasia, esta ciencia siempre señala un ámbito multidisciplinar y en la frontera del conocimiento en el que confluyen campos de aplicación como las ciencias de la tierra, la agricultura, la ordenación del territorio, la biología, etc. (Campana, 2011: 12).

Aunque es una ciencia relativamente joven y muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente, aplicada al campo que nos ocupa, esto es, la arqueología⁵⁶, coincide con el desarrollo de la fotografía aérea (Aber *et al.*, 2010; Musson *et al.*, 2013) y posteriormente de las plataformas satelitales⁵⁷.

Actualmente, la relación de la teledetección con el uso de drones supone, en primer lugar, el abaratamiento de costes (Uribe *et al.*, 2018): comprar una imagen de satélite comercial o realizar un vuelo tripulado incrementa ampliamente el precio del trabajo de campo. En segundo lugar, se puede realizar una captura de datos personalizada en la que el investigador define la resolución del píxel que quiere para su proyecto, así como obtener diversos productos cartográficos: planos, modelos 3D, modelos digitales del terreno (MDT) y de superficie (MDS). De la misma forma, la incorporación de sensores multispectrales permite visualizar elementos que el ojo humano (longitud de onda del visible) no logra ver. Obviamente todo ello conlleva una nueva serie de problemas técnicos para la adaptación de estas herramientas a diferentes tipos de suelos, etapas fenológicas, periodos cronológicos y estructuras arqueológicas. La obtención o no de información en cada zona responde a un determinado flujo de trabajo que depende de cada uno de los factores anteriormente descritos. Es por ello, que en ocasiones re-

55 CCRS 1998: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/tutore.html> (último acceso: octubre de 2017).

56 Destacamos otro tipo de estudios precedentes que contribuyeron a la conexión y posibilidades de la teledetección con la arqueología como Palacios y Martín-Bueno, 2004 (331-361). Esta investigación analiza las posibilidades y aplicaciones de la teledetección mediante sensores activos como el Radar de Apertura Sintética (SAR) en la arqueología.

57 Las herramientas de teledetección geofísicas (georradar, electromagnéticas, etc.) no forman parte de nuestro análisis, sin embargo su uso se complementa perfectamente como técnica de contrastación intensiva de las marcas, previamente individualizadas, a través de los resultados de aplicación de los sensores multispectrales utilizados con los drones.

54 Recordemos que en el ámbito de la teledetección espacial la disponibilidad de imágenes de una resolución espacial inferior a medio metro es prácticamente inexistente y que los productos entre 0,5 y 1 m son considerados de muy alta resolución (VHR1), según la definición para GMES (2012) y actualizada por la ESA.

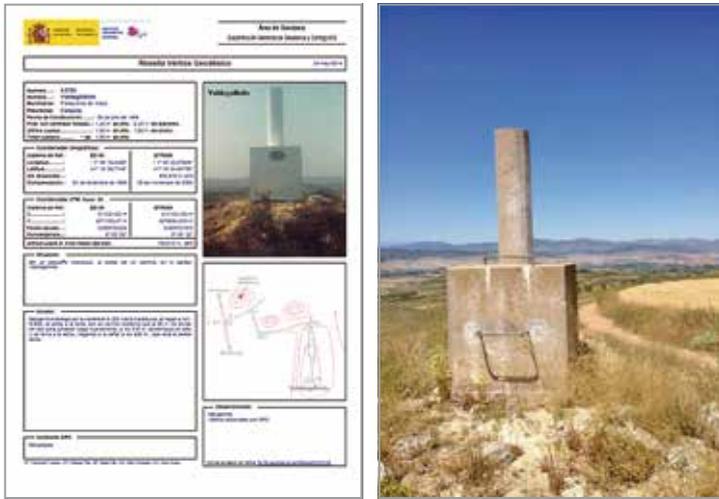


FIG. 138. Reseña del IGN del vértice núm. 43756 denominado Valdegalindo (izada.) y su estado actual (dcha.).

bagorzana situada en la confluencia de los ríos Cinca-Ésera. El topónimo de la ciudad, *Labitolosa*, fue deducido a partir del gentilicio *labitolosani* que apareció en una inscripción hallada en el siglo XVI con una dedicatoria realizada por los *cives Labitolosani et incolae* (CIL, II, 3008=5837). La consideración de *Labitolosa* como municipio latino fue confirmada por la aparición en el año 1994 de un epígrafe en el edificio del Genio del municipio, localizado en el foro, que aludía explícitamente al municipio de *Labitolosa*⁶².

De esta manera, la ciudad originada en el siglo I a.C. avanzado, pasaría de ser una comunidad estipendiaria a convertirse en municipio seguramente en época flavia. La transformación urbanística se produciría a mediados/segunda mitad del siglo I d.C., paralelamente a la promoción jurídica de la *civitas*. En este momento se reconstruyó el foro y se realizaron otras importantes reformas a partir de la iniciativa y el evergetismo de las élites locales, en especial de Marco Clodio Flacco.

El siglo II d.C. fue el momento de máximo esplendor y de mayor prosperidad económica de la ciudad, aunque ya a finales del mismo se evidencia su declive. Finalmente, será completamente abandonada en torno al año 200 d.C. por motivos que se desconocen.

A lo largo de más de una veintena de años de trabajos arqueológicos ininterrumpidos⁶³ en la ciudad de *Labitolosa* se han puesto al descubierto dos edificios termales completos, vestigios de varias viviendas y un importante sector del foro, del que destaca su curia por su conjunto epigráfico.

3.5.6. Adquisición de los datos de campo

3.5.6.1. Fase topográfica

Esta primera fase consiste en la adquisición de varios puntos de control en el terreno, denominados GCP (*Ground Control Points*). Para ello necesitamos una buena distribución geométrica en la zona delimitada del vuelo con el fin de escalar el modelo final a un sistema métrico e insertarlo dentro del sistema de coordenadas de referencia seleccionado.

En ambos trabajos el sistema geodésico de referencia utilizado fue el oficial en España UTM ETRS89 (Real Decreto 1071/2007 de 27

ministerio de Educación Cultura y Deporte y el Campus de Excelencia Internacional del Valle del Ebro (*Iberus*).

62 Navarro / Magallón (1999: 30-56).

63 Sobre la bibliografía proporcionada durante estos años de investigaciones nos referimos al volumen monográfico de la ciudad: Magallón / Sillières (2013).



FIG. 139. Distribución de la red de geodesia activa del Gobierno de Aragón, ARAGEA. FUENTE: <http://gnss.aragon.es/>.

de julio) dentro del huso 30. Los GCP fueron adquiridos mediante un sistema GNSS Leica GS14:

- En Valdeherrera el sistema GNSS se conectó mediante radio enlace (Satellite 3AS frecuencia 406.425 MHz) a otro equipo GNSS Leica GX1230 como referencia, estacionado en el vértice geodésico n° 43756 denominado Valdegalindo, situado en el término municipal de Paracuellos de Jiloca.
- Sin embargo, para Labitolosa, la conexión del equipo GNSS móvil se realizó mediante conexión GPRS a la red de geodesia activa del Gobierno de Aragón ARAGEA (<http://gnss.aragon.es/>). La aplicación de esta técnica permite obtener coordenadas absolutas en RTK con una precisión aproximada de dos centímetros sin necesidad de corregir la posición y la cota mediante un vértice geodésico o postproceso de archivos RINEX como en el caso de Valdeherrera.

La conexión del sistema GNSS fue mediante *Mountpoint Cercano*⁶⁴ a la antena situada en Graus. La elección de *Mountpoint Cercano* se escogió en detrimento del modo de estacionamiento virtual, dada la cercanía de la antena de Graus. Posteriormente se registraron entre 15/20 puntos repartidos en la zona delimitada. Las marcas sobre el terreno variaron entre puntos fácilmente identificados en el terreno, como caminos o piedras, junto con dianas y carcasas de hitos fenos en las zonas con vegetación.

De todo ello se obtuvo un fichero en formato «x, y, z, cod» para posteriormente realizar el apoyo fotogramétrico con estos puntos de control.

3.5.6.2. Fase de vuelo

Los vuelos en ambos casos, Valdeherrera y Labitolosa, fueron planificados mediante el programa *MKTools*. El objetivo de esta planificación fue definir una ruta que permitiese un solape entre las imágenes del 80 %. La velocidad media para ambos fue de 10 m/s a una altura aproximada de 100 m. Para la obtención de un GSD (*Ground Sample Distance*) o resolución espacial adecuada se configuran e introducen las siguientes variables en el *software*: distancia al suelo programada, megapíxeles de la cámara, tamaño del sensor de la cámara, longitud focal del objetivo, apertura del diafragma, velocidad de disparo y sensibilidad de la ISO.

64 Sistema de conexión del sensor móvil GNSS a la antena de referencia mediante telefonía móvil.

FIG. 140. Planificación del vuelo con *waypoints* en la zona arqueológica de Valdeherrera mediante la aplicación MKtools.

TABLA 9
Características de la adquisición de las imágenes

	VALDEHERRERA RGB	VALDEHERRERA NIR	LABITOLOSA RGB	LABITOLOSA NIR
Fecha captura	7 / 7 / 2013	7 / 7 / 2013	5 / 10 / 2014	5 / 10 / 2014
Cámara	EPM 2	EPM 1 NIR	EPM 2	EPM 1 NIR
Objetivo fijo	12 mm	12 mm	12 mm/ Tetracam Mini MCA 9.6 mm	12 mm/ Tetracam Mini MCA 9.6 mm
Altura de vuelo	100	100	90/100	90/100
GSD* / Resolución espacial	2.7 cm	3.1 cm	2.9 cm / 6.5 cm	6.5 cm
Hectáreas registradas	19.8 ha	27.4 ha	7.2 ha	72 ha
Velocidad de vuelo	10 m/s	10 m/s	10 m/s	10 m/s
ISO - Velocidad	200-1/400	200-1/400	200-1/400	
Diafragma	4.5	4.5	automático	automático
Imágenes captadas	685	1452	430	430
Sensor cámara (ancho x alto en mm)	17.3 x 13.0	17.3 x 13.0	17.3 x 13.0 6.66 x 5.32	6.66 x 5.32
Píxeles efectivos cámara	16 Mpx.	12 Mpx.	16 Mpx. 6 x 1.3 Mpx.	6 x 1.3 Mpx.

* Ground Sampling Distance

La cámara montada en el sistema fue una Olympus EPM1⁶⁵ (sistema micro cuatro tercios) con el mismo objetivo fijo de 12 mm Zuiko Digital ED. Las fotografías fueron registradas en formato RAW (Olympus*.ORF) con el mismo objetivo fijo, tanto en el sen-

sor RGB como NIR de 12 mm f. 2.0 con una ISO 200 y un enfoque manual a infinito.

Dadas las altas prestaciones, no fue necesario realizar una parada en cada una de los *waypoints* seleccionados ya que la captura se realizó en un movimiento continuo a una velocidad constante de 10 metros por segundo. El uso de esta cámara y objetivo con esta configuración permite evitar la trepidación en las imágenes y optimizar el tiempo de vuelo consiguiendo ampliar el área establecida.

65 Este tipo de cámara que elimina el espejo réflex de las cámaras SLR se denominan «micro cuatro tercios» por el tamaño del sensor 18 x 13,5 mm ofrecen una gran calidad y versatilidad en la toma de fotografías con una reducción considerable tanto en peso como en tamaño para su uso con drones.

TABLA 10

Resultado de la sincronización de una imagen con sus coordenadas y ángulos estimados para el yacimiento arqueológico de Valdeherrera

IMAGEN REFERENCIA	COORDENADA X / ESTE	COORDENADA Y / NORTE	COORDENADA Z / ALTITUD	YAW	PITCH	ROLL
Image112.jpg	611772.971835	4575713.692171	670.103316	134.294638	0.381355	1.831058

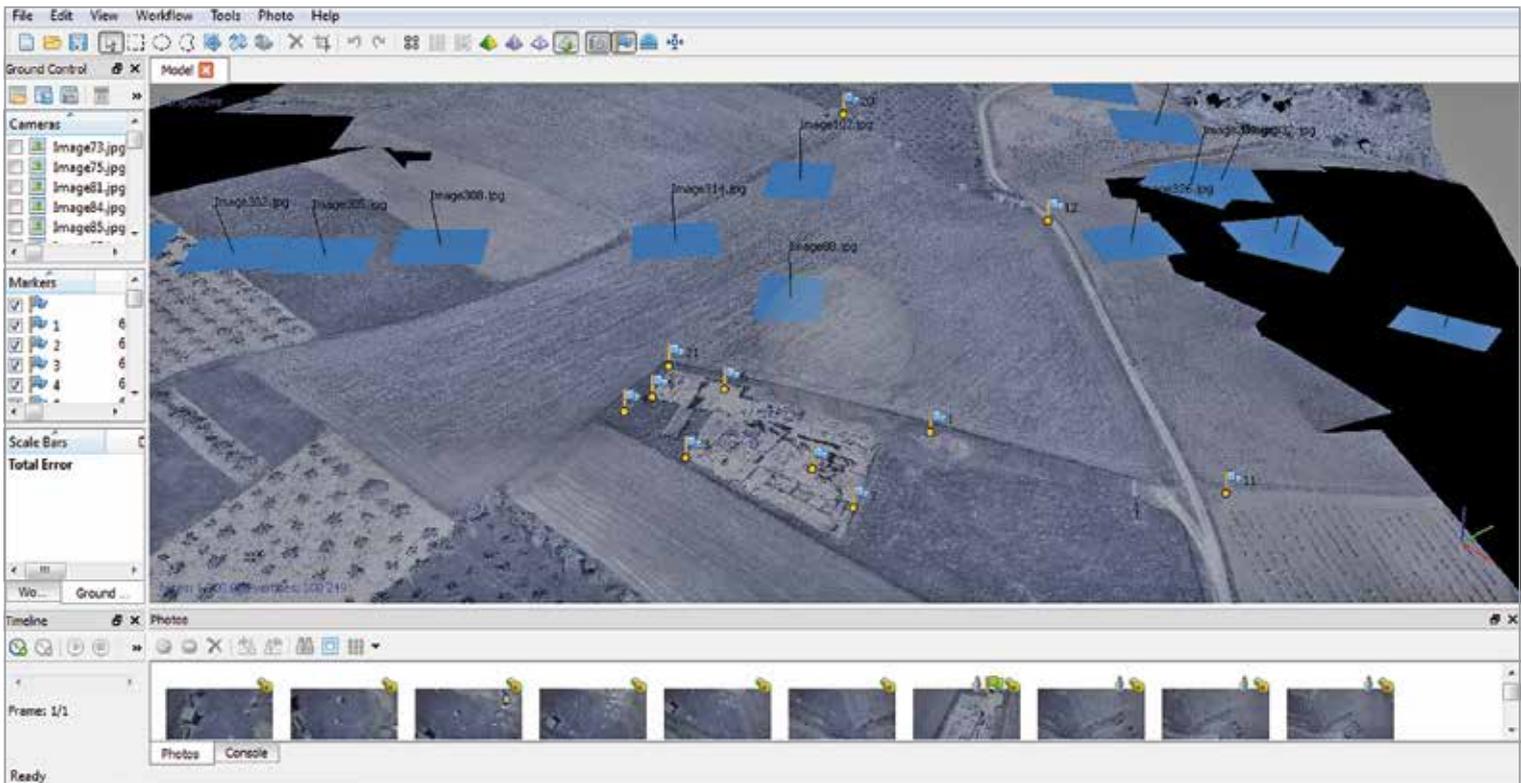
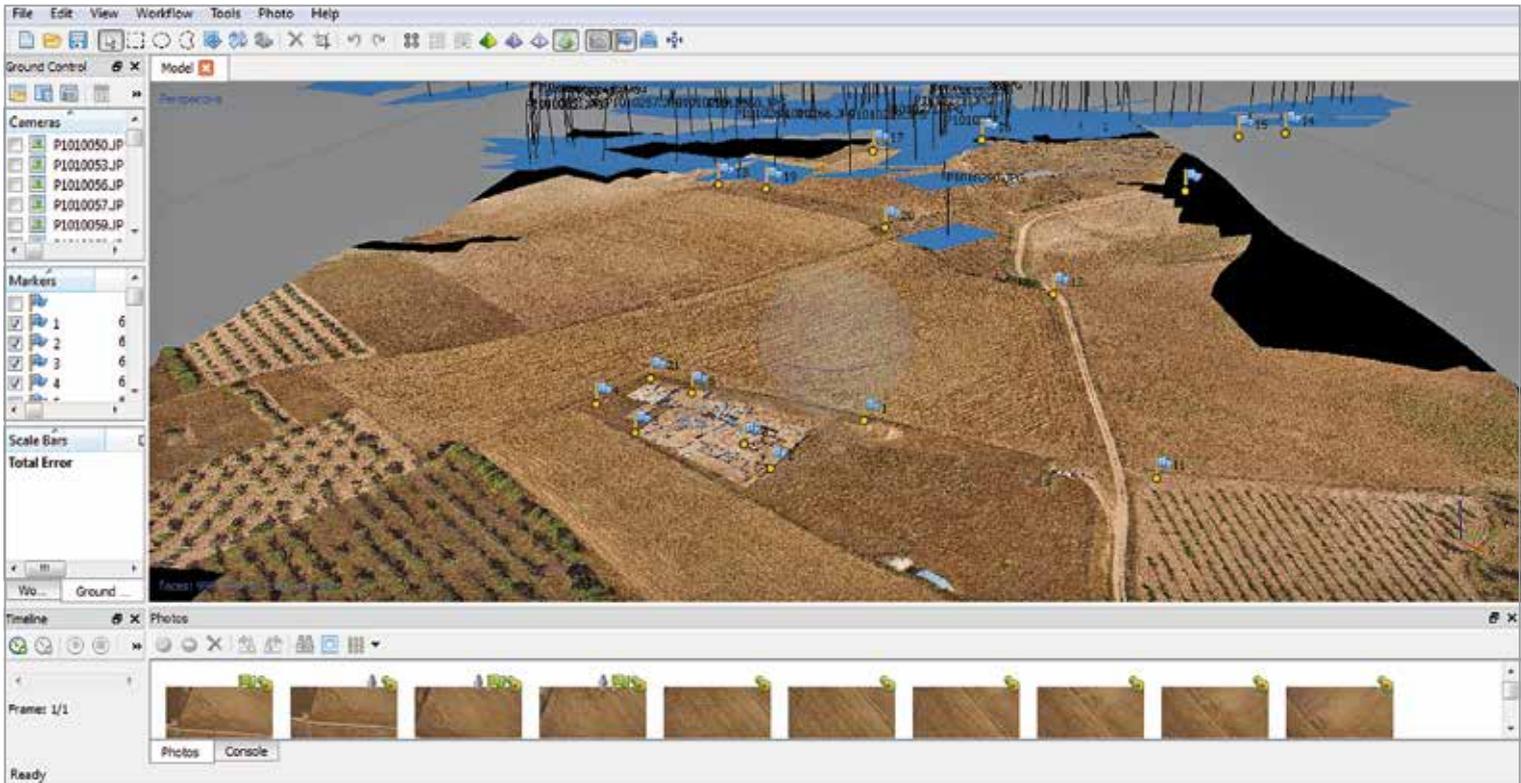


FIG. 141. Ejemplo del procesamiento de Valdeherrera RGB (imagen superior) y NIR (imagen inferior) resultante con los mismos GCP insertados en terreno y la orientación externa de cada una de las imágenes que integran el modelo mediante el programa Agisoft Photoscan.

- Número de imágenes utilizadas: 218
- Zona capturada: 19.8 ha
- Error del modelo: 0.7 píxel
- Altura de vuelo: 100.77 m
- Puntos vinculados: 624098
- Resolución: 2.7 cm / píxel
- Proyecciones: 2365481

Respecto a la cámara multispectral *Tetracam*, se utilizó en formato *.raw* de 10 bits con enfoque a infinito, objetivo de 9.6 mm y ajustes automáticos.

3.5.6.3. Postproceso de la información

El primer paso de la restitución fotogramétrica es sincronizar las imágenes captadas con las coordenadas del autopiloto del sistema y los tres ángulos o actitud del RPAS: *Pitch*, *Roll* y *Yaw*, traducidos como los ángulos de cabeceo, alabeo y guiñada (esto es, la actitud). Pese a ser un sistema GNSS diferencial con un error aproximado de dos metros, este primer paso –sincronización de la imagen junto con las coordenadas aproximadas del sistema y de los tres ángulos comentados– optimiza notablemente el procesamiento para el cálculo de la orientación externa de las imágenes.

Posteriormente resumimos el tratamiento de los datos en los siguientes pasos:

1. Importación de las imágenes seleccionadas.
2. Sincronización de imágenes, coordenadas y ángulos.
3. Alineación de las imágenes mediante ajuste *bundle* o puntos comunes.
4. Importación del fichero *.txt* con los GCP adquiridos.
5. Reconocimiento sobre las imágenes de los GCP y control de errores *x*, *y*, *z*.
6. Ajuste del modelo, selección del sistema de coordenadas utilizado y triangulación de la nube de puntos.
7. Aplicación de la textura de cada una de las imágenes que integran el modelo 3D mediante un ajuste radiométrico según el método del *software: Adaptive Orthophoto*⁶⁶.
8. Exportación de los errores del modelo, nube de puntos, MDT, ortofoto y mapa de elevación.
9. Comprobación de los errores obtenidos (informe) en la ortofoto (*x,y*) de cada uno de los puntos de control y en la nube de puntos densa (*x, y, z*).

Además del informe estadístico de los errores cometidos en cada uno de los puntos obtenidos en coordenadas *x, y, z* y píxel que nos proporciona el programa, podemos comprobar la robustez resultante del modelo tridimensional de un modo totalmente empírico ya que disponemos de los mismos GCP como fichero auxiliar que permite la comprobación de esos puntos en un programa que a su vez permita importar el MDT y/o ortofoto y posteriormente importar estos puntos para comparar los resultados.

3.5.7. Tratamientos aplicados a las imágenes

El paso previo al tratamiento digital fue realizar un *layer stack* de las imágenes en formato *.tiff* del VIS y del NIR de los dos ejemplos o yacimientos. De esta forma, la imagen resultante, utilizada para la aplicación de los tratamientos mencionados a continuación, tiene seis bandas, ordenadas para nuestra comodidad del siguiente modo:

A continuación se describe la metodología utilizada para la discriminación de los restos arqueológicos soterrados. La presentación de esta metodología se ha ordenado según los criterios de Chuvieco (2010).

⁶⁶ Para realizar la textura del modelo 3D el *software* realiza un ajuste radiométrico basado en la media de cada píxel en cada imagen tomada.

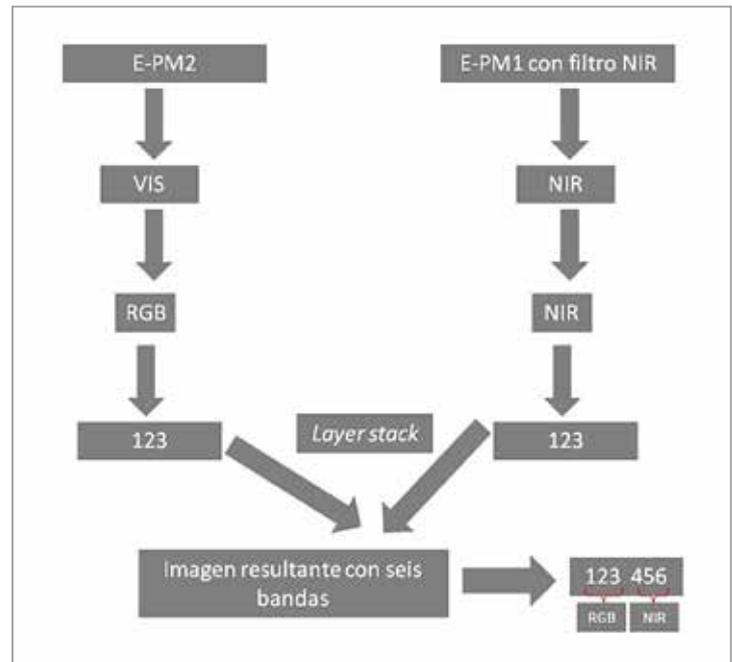


FIG. 142. Proceso de creación de la ortofoto con la longitud de onda del VIS-NIR con los sensores E-PM2 y E-PM1.

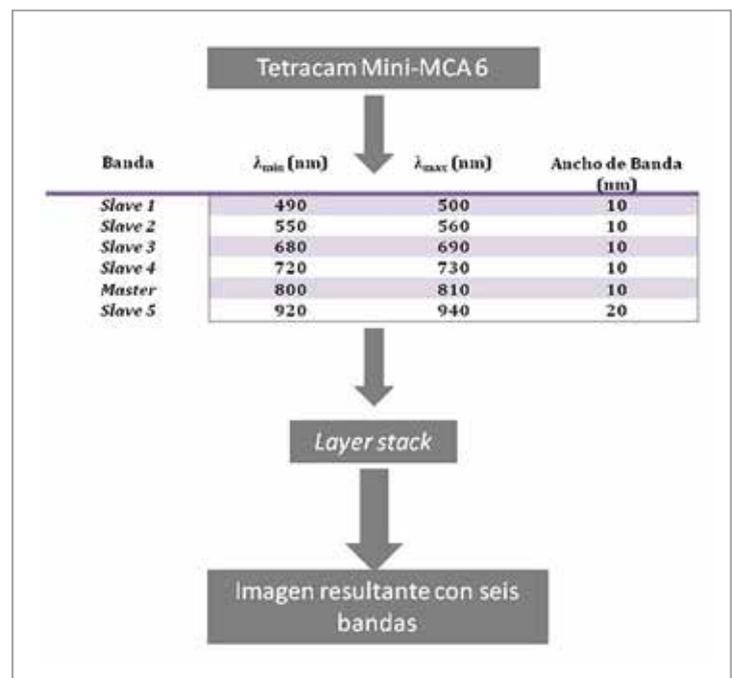


FIG. 143. Proceso de creación de la ortofoto con la longitud de onda del VIS-NIR del sensor *Tetracam Mini-MCA 6*.

3.5.7.1. Realces y mejoras visuales

A. Ajustes radiométricos del histograma

Para favorecer la visualización de los restos arqueológicos soterrados se han aplicado ajustes radiométricos del histograma. Estos ajustes se han empleado sobre las siguientes imágenes y neocanales: imágenes VIS, NIR, VIS-NIR, neocanal del NDVI, Green NDVI, SAVI y ACP. De la amplia batería de recursos disponibles en el *software* de tratamiento digital utilizado (*Erdas Imagine*) el realce lineal, utilizando puntos de corte o *breakpoints*, para definir interactivamente los límites de las funciones, fue el que mejores resultados proporcionó (*vid. infra*). Según Jensen (1996: 145), el ajuste lineal tiende a expandir los niveles digitales originales al mínimo y

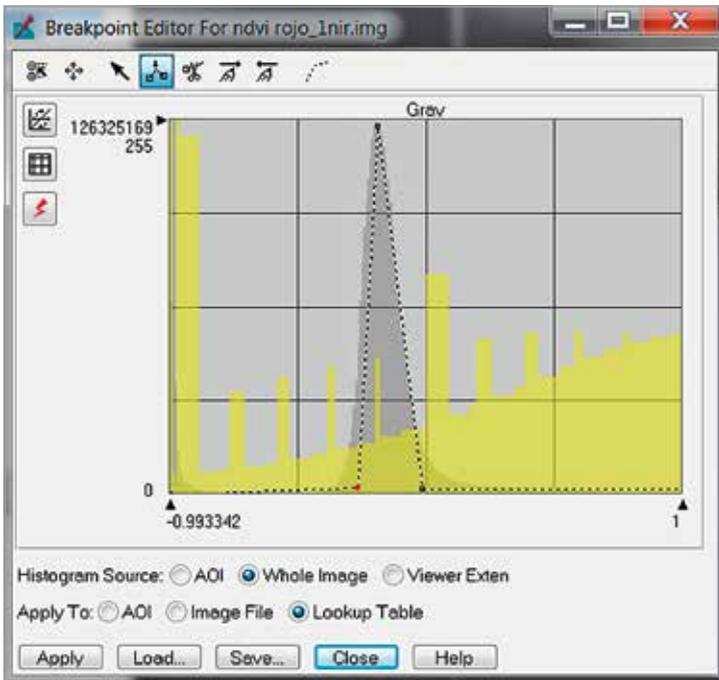


FIG. 144. Realce lineal del histograma con puntos de corte de la imagen NDVI_4.

al máximo (0-255) para aprovechar la sensibilidad del dispositivo. En nuestro caso, se utilizaron umbrales definidos estadísticamente (desviación estándar) e interactivamente (*breakpoints*), siendo este último particular en cada imagen.

B. Composiciones de color

Las composiciones de falso color son combinaciones lineales de tres bandas a cada una de las cuales se les asignan los colores aditivos primarios (*Red, Green and Blue* –RGB–). En nuestro caso, en lugar de las bandas originales se utilizaron los tres NDVI (aquellos realizados con las tres bandas del NIR, *vid. infra*) o las seis bandas del ACP.

En relación a la ordenación particular de las bandas de las imágenes VIS-NIR de Valdeherrea y Labitosa para los diferentes sensores utilizados, las composiciones de falso color comúnmente utilizadas en teledetección tendrán la siguiente notación:

Obviamente no hemos incluido en la tabla las composiciones de falso color que utilizan la longitud de onda del SWIR ya que los sensores utilizados en este trabajo no son capaces de captarla. Sin embargo, debemos recordar que, cuando en este trabajo se citan las bandas 5 y 6, no se hace referencia a esta longitud de onda (SWIR) si no a los valores más altos del NIR.

C. Ajustes espaciales o filtros

Comenzamos nuestra experimentación aplicando diferentes filtros porque, tal y como expone Chuvieco (2010: 254), sirven para aislar

componentes de interés. Como nuestro fin era identificar visualmente las estructuras soterradas pensamos que esta podría ser la mejor herramienta.

Los filtros o realces espaciales se basan en el concepto de la frecuencia espacial, esto es, el número de cambios en los valores de brillo por unidad de distancia (Jensen, 1996: 153). Estos buscan reforzar o suavizar los contrastes espaciales entre píxeles contiguos mediante la utilización de una matriz móvil de coeficientes de filtraje (CF) o *kernel*. Se pueden distinguir dos tipos de filtros en función de sus coeficientes de filtraje. En primer lugar, los de paso bajo (*Low pass filtering*) que tienden a destacar el componente de homogeneidad de la imagen, suavizándola de esta forma, por lo que pensamos que no son los más adecuados para destacar los restos soterrados ya que tienden a homogeneizar la imagen. En segundo lugar, los filtros de paso alto (*High pass filtering*), agudizan los contrastes entre los niveles digitales de los píxeles contiguos, por lo que consecuentemente pensamos que podían actuar como una buena herramienta para la detección de las estructuras. Así, se aplicaron a las imágenes VIS, NIR, VIS-NIR al igual que a las imágenes individuales sin ortorectificar ni mosaicar.

Lasaponara y Masini (2012: 51) describen este tipo de tratamiento de las imágenes para la teledetección arqueológica mediante imágenes de satélite; sin embargo, sus resultados son exiguos.

3.5.7.2. Extracción de información temática: creación de neocanales

La generación de neocanales nos permite extraer información continua y realzar aspectos significativos de las imágenes a partir de las bandas originales. La creación de estos canales artificiales se puede realizar con diferentes técnicas. Para este estudio, utilizamos la relación métrica entre bandas para la estimación de parámetros biofísicos como el vigor vegetal, en el caso de la obtención de los índices de vegetación, así como la relación estadística entre bandas para la creación del Análisis de Componentes Principales (ACP).

A. Índices de vegetación

Los índices de vegetación se utilizan para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Obviamente la vegetación, bajo la que subyacen los restos arqueológicos, presenta una variación de crecimiento dependiendo de si la vegetación está creciendo sobre estructuras enterradas o no (*crop marks* o *soil marks*). Es decir, una planta que crece en una parcela donde existen estructuras soterradas (por ejemplo, un muro) presentará un comportamiento diferente a una planta que crece en el mismo terreno en una zona sin restos arqueológicos.

Los índices de vegetación consisten en la creación de ratios o cocientes, píxel a píxel, entre los niveles digitales de dos o más bandas de la imagen (Chuvieco, 2010: 337). Para la realización de este trabajo utilizamos los siguientes índices que se exponen a continuación:

TABLA 11

Equivalencias de las composiciones de falso color

COMPOSICIONES FALSO COLOR COMÚNMENTE UTILIZADAS PARA LA TELEDETECCIÓN SATELITAL	EQUIVALENCIA CON LAS COMPOSICIONES DE FALSO COLOR DE LOS SENSORES DSLR E-PM2 Y E-PM1	EQUIVALENCIA CON LAS COMPOSICIONES DE FALSO COLOR DEL SENSOR TETRACAM MINI-MCA 6
4/3/2	4-5-6/1/2	4-5-6/3/2
3/2/1	1/2/3*	3/2/1

* Las imágenes en formato *tiff* y RGB se representan de este modo en *Erdas*, siendo la composición de 123 (RGB) la representación el *True Color Composite*.

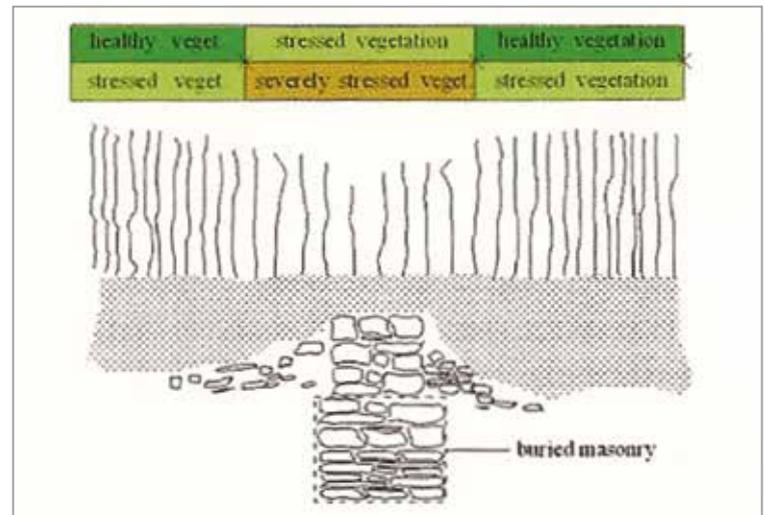
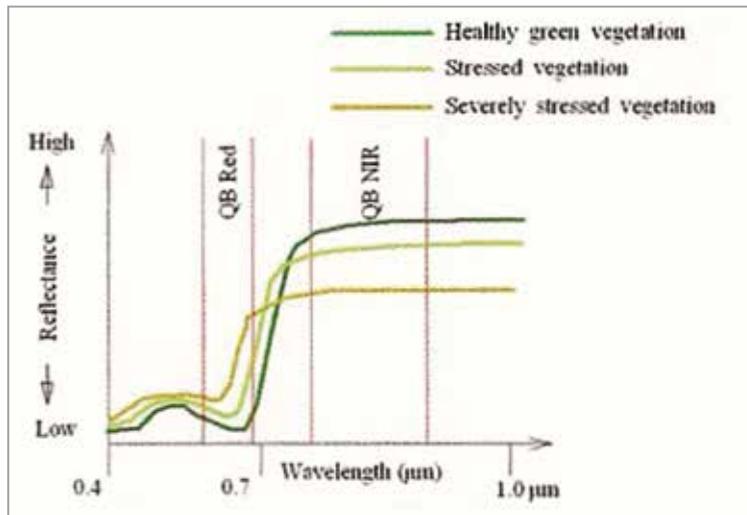


FIG. 145. Comportamiento del crecimiento de la vegetación sobre estructuras soterradas (Lasaponara / Masini, 2012: fig. 2.7).

a) NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI por sus siglas en inglés, se obtuvo operando con la banda del rojo, correspondiente a la banda 1 para los sensores DSLR y a la banda 3 para el sensor *Tetracam* Mini-MCA 6, con las tres bandas de la imagen del NIR (4, 5 y 6 para todos los sensores) mediante la siguiente expresión:

$$NDVI_i = (\rho_{i,NIR} - \rho_{i,R}) / (\rho_{i,NIR} + \rho_{i,R})$$

Donde: $\rho_{i,NIR}$ corresponde al valor de la reflectividad del píxel en las bandas 4 o 5 o 6 y $\rho_{i,R}$ el valor de reflectividad del píxel en la banda del rojo. Para facilitar la comprensión a partir de ahora se designarán como NDVI_4, NDVI_5 o NDVI_6 dependiendo de la banda del NIR utilizada para su creación.

b) Green NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada verde, Green NDVI por sus siglas en inglés, opera de igual que el NDVI pero con la banda del verde siendo más sensitivo a la concentración de la clorofila. Este índice se obtuvo operando con la banda del verde (correspondiente a la banda 2 para todos los sensores utilizados) con las tres bandas de la imagen del NIR (4, 5 y 6 para todos los sensores) mediante la siguiente expresión:

$$GreenNDVI_i = (\rho_{i,NIR} - \rho_{i,G}) / (\rho_{i,NIR} + \rho_{i,G})$$

Donde: $\rho_{i,NIR}$ corresponde al valor de la reflectividad del píxel en las bandas 4 o 5 o 6 y $\rho_{i,G}$ el valor de reflectividad del píxel en la banda del verde. Para facilitar la comprensión a partir de ahora se designará GreenNDVI_4, GreenNDVI_5 o GreenNDVI_6 dependiendo de la banda del NIR utilizada para su creación.

c) Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

Finalmente optamos por introducir la proporción de vegetación/suelo que capta el sensor y que modifica notablemente el comportamiento del NDVI. Para ello Huete (1998) propuso en la fórmula del NDVI introducir el parámetro L (en torno a un valor a 0,5) que ajustase el índice a una reflectividad promedio de fondo (Chuvieco 2010, 341). De esta forma, el índice de vegetación ajustado al suelo (*Soil Adjusted Vegetation Index*) se calcula:

$$SAVI = (\rho_{i,NIR} - \rho_{i,R} * (1+L)) / (\rho_{i,NIR} + \rho_{i,R} + L)$$

También en este caso la banda del rojo se corresponde con la 1 para los sensores DSLR y la banda 3 para el sensor *Tetracam* Mini-MCA

6. Para el NIR se han utilizado todas las bandas posibles (4, 5 y 6), siendo denominada como SAVI_4, SAVI_5 o SAVI_6, dependiendo de la banda del NIR utilizada para su creación.

B. Análisis de componentes principales (ACP)

Esencialmente el ACP es un procedimiento estadístico que reduce la información redundante transformando un número de variables cuantitativas (dimensiones subyacentes comunes) en un número de nuevas variables no correlacionadas. Esta reducción se realiza mediante una matriz de varianza-covarianza sin perder una parte significativa de la información original. Esta capacidad de síntesis es interesante en teledetección porque la adquisición de imágenes en bandas adyacentes del espectro, implica con frecuencia detectar información redundante, puesto que las cubiertas suelen presentar un comportamiento similar en longitudes de onda próximas. Por ello, las medidas realizadas en una banda pueden presentar una importante correlación con las realizadas en otra banda.

En el campo de la arqueología, el ACP ha sido utilizado, sobre todo, cuando se trabaja con sensores multispectrales (Traviglia, 2006). En nuestro caso, lo aplicamos sobre la imagen VIS-NIR (es decir, aquella que contiene las seis bandas) de todos los sensores utilizados para la creación de neocanales.

3.5.7.3. Extracción de información temática: clasificación digital de la imagen

Otra de las técnicas que se han aplicado para la detección de los restos arqueológicos soterrados ha sido la clasificación digital de las imágenes, es decir, la asignación de categorías informacionales a los ND mediante técnicas de tratamiento digital y proceso automáticos o semiautomáticos. En concreto, la clasificación digital de la imagen se realizó con la finalidad de diferenciar las zonas donde podrían existir estructuras soterradas de las que no lo están (que pasamos a denominar como yermas). En este sentido, el propósito del trabajo no era realizar una clasificación precisa, sino poder valorar si esta técnica nos permitía distinguir los restos soterrados.

Una de las etapas clave en el proceso de la clasificación digital es el entrenamiento, consistente en la identificación de las claves multispectrales de las categorías informacionales (en este caso, zonas yermas o no). En términos generales existen dos tipos: Supervisado y No Supervisado. En el primero, se determinan muestras de cubiertas objetivo a partir de las cuales el sistema extrae los parámetros de la clase que ocupa dicha área; en el segundo, se proporcionan

unas instrucciones mínimas para buscar mediante técnicas estadísticas y algoritmos específicos agrupaciones de NDs. En las siguientes líneas se recogen con mayor detalle las instrucciones seguidas en cada uno de estos dos procedimientos de clasificación.

En concreto, únicamente hemos realizado la clasificación con los datos obtenidos por los sensores DSLR para el yacimiento de Valdeherrera.

A. Clasificación no supervisada: ISODATA (*Iterative Self-organizing Data Analysis Technique*)

En primer lugar, para la clasificación se realizó un *layer stack* con las bandas del visible (RGB), las bandas del NIR (en este caso otras tres) y por último, la séptima banda, con el resultado de los NDVI. Posteriormente, decidimos hacer una primera aproximación utilizando el procedimiento no supervisado. Para ello, manejamos el algoritmo ISODATA con 36 clases que realiza una clasificación automática basada en la función de la mínima distancia espectral.

B. Clasificación supervisada

Primeramente, definimos una leyenda que pensamos reunía los requisitos básicos.

Clases:

- Bloques de cemento de la excavación
- Información solo del NIR
- Suelo desnudo
- Restos arqueológicos
- Lona azul excavación
- Lona negra excavación
- Tejado paridera
- Tejado uralita
- Parideras sin tejado
- Marcas de arado
- Sombra
- Almendros
- Cultivos sin restos_divergentes
- Cultivos sin restos

Esta leyenda resulta jerárquica y estructurada porque ordena y diferencia las diferentes cubiertas. Asimismo, es flexible porque se podrían añadir nuevas clases si quisiésemos. Con las clases establecidas pensamos que además se podrían realizar comparaciones temporales de cómo cambia la cobertura vegetal o avanza la excavación. Finalmente, pensamos que también es exhaustiva porque para la finalidad de la investigación podíamos reducirla simplemente a tres clases. Sin embargo, una vez terminada la clasificación pensamos que sería necesario añadir otras coberturas (*vid. infra*). De ella, creemos que cabe explicar la diferencia que realizamos entre los cultivos sin restos (cultivo sin restos divergente y cultivo sin restos). Esta diferenciación se debe a su diferente signatura espectral, por ello hemos creído conveniente no juntarlas para observar los resultados obtenidos.

La clasificación supervisada se realizó mediante una selección de *training fields* con un método de localización interactiva, es decir, diferentes AOIs. Además, utilizamos la banda del NDVI para determinar mejor las estructuras soterradas. Esta información se combinó con los datos obtenidos durante el trabajo de campo –prospecciones arqueológicas– que determinan la concentración de materiales muebles e inmuebles en superficie. Para una correcta definición de las clases pensamos que era necesario obtener entre 8 y 800 píxeles debido a que la imagen tiene 7 bandas.

3.5.8. Resultados obtenidos

Como el objetivo principal de este trabajo era comprobar si éramos capaces de obtener resultados con la aplicación de esta nueva metodología, dentro del campo de la arqueología, hemos decidido estructurar el apartado de los resultados en dos apartados. El primero, para la valoración de los resultados obtenidos mediante la metodología aplicada y, el segundo, para los resultados arqueológicos conseguidos y su validación en campo.

La complejidad del uso de la cámara Tetracam Mini-MCA 6, su adaptación a nuestro RPAS, las dificultades para ortorectificar las imágenes y mosaicarlas así como los problemas de viñeteado o su resolución espacial menor provocan que la operatividad de este sensor se dilate en el tiempo. En consecuencia, se muestran a continuación los resultados obtenidos con los sensores DSLR para los



FIG. 146. Detalle del resultado del realce lineal del histograma con puntos de corte de las imágenes del NDVI_5 y NDVI_6 de Valdeherrera.

dos yacimientos: Valdeherrera y Labitlosa y algunos resultados de Labitlosa con el sensor *Tetracam* Mini-MCA 6.

3.5.8.1. Resultados de la metodología aplicada

El realce lineal utilizando puntos de corte o *breakpoints*, para definir interactivamente los límites de las funciones, ha sido el que mejores resultados ha proporcionado a esta investigación, en cuanto a los tratamientos aplicados a las imágenes de los índices de ve-

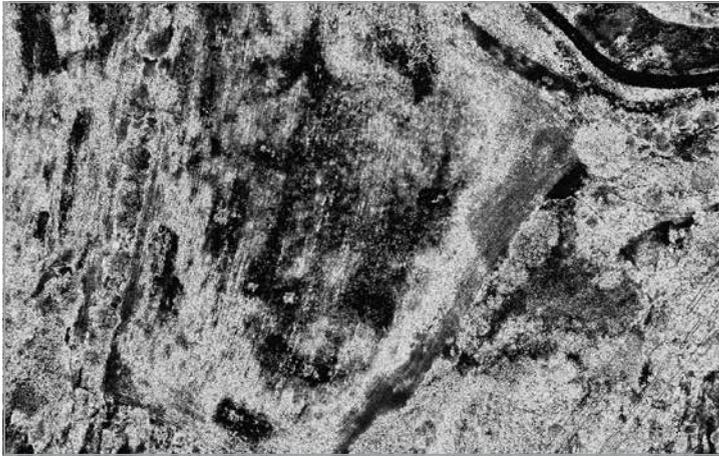


FIG. 147. Detalle del resultado del realce lineal del histograma con puntos de corte de la imagen del NDVI_6 de Labitlosa.

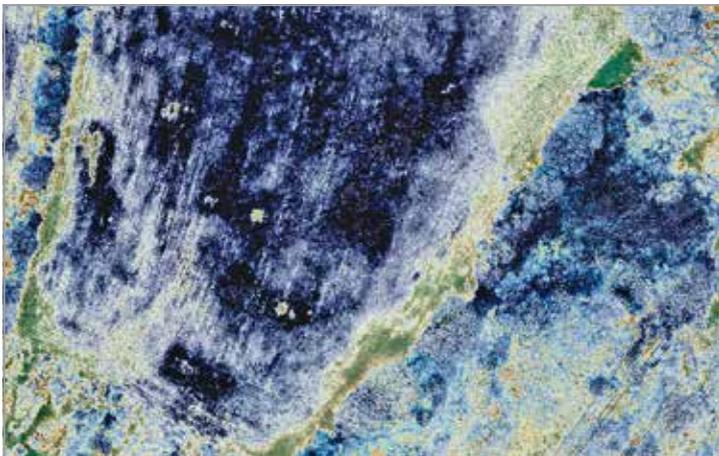


FIG. 148. Detalle de la composición de falso color con los tres NDVIs (R: NDVI_6; G: NDVI_5; B: NDVI_4) y realce lineal del histograma con puntos de corte de Labitlosa.

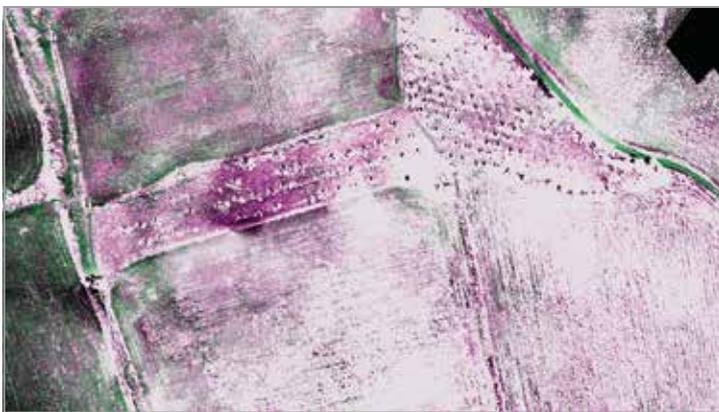


FIG. 149. Detalle de la composición de falso color con los tres NDVIs (R: NDVI_6; G: NDVI_5; B: NDVI_6) y realce lineal del histograma con puntos de corte de Valdeherrera.

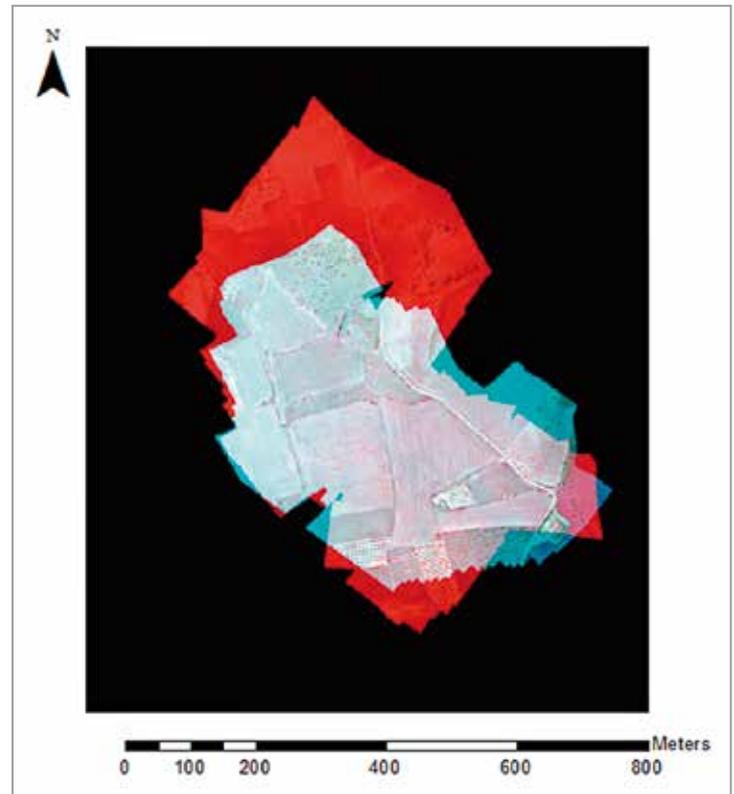


FIG. 150. Aplicación del filtro *Edge Enhance* 5x5, composición de falso color 432 de la imagen VIS-NIR de Valdeherrera con ajuste lineal de desviación estándar (2,5) donde se observa una zona con restos soterrados.

getación. Este ajuste lineal nos ha permitido destacar visualmente las estructuras soterradas frente a otros ajustes no lineales, como la equalización. Este último considera la frecuencia procediendo a equidistribuir los píxeles reduciendo el contraste en las zonas extremas del histograma (Jensen, 1996:150). Tal y como podemos observar en los resultados obtenidos por realce lineal, los restos se muestran dentro de las zonas extremas del histograma siendo muy oscuros o muy claros. En consecuencia, ajustes no lineales o tendientes a homogeneizar el histograma no nos son útiles para esta aplicación.

Las figuras bajo estas líneas representan la distribución de los niveles visuales tras el ajuste y los resultados de la aplicación de este realce sobre los NDVIs de dos imágenes (NDVI_5 y NDVI_6) del yacimiento de Valdeherrera.

Para las composiciones en falso color también han demostrado óptimos resultados la utilización de los tres NDVIs en vez de las bandas originales. A continuación, se muestran detalles de los resultados obtenidos:

Como comentamos en el apartado de la metodología, pensamos en un primer momento que los filtros de paso alto (*High pass filtering*) podían actuar como una buena herramienta para la detección de las estructuras. Sin embargo, tal y como se muestra a continuación, los resultados no han sido óptimos para la finalidad de este trabajo.

Como se puede observar en la imagen anterior, los resultados obtenidos mediante esta herramienta no son los deseados. Aparentemente el proceso de mosaicado (*seam lines* o líneas de costura) con *Photoscan* queda reflejado en la imagen tras aplicarle un filtro *High pass* de 5x5. Hemos podido comprobar que si reducimos la *kernel* a 3 (*kernel* de 3x3) esto no sucede. De esta forma, este tratamiento digital, filtro *High pass* de 5x5, se ha utilizado como herramienta para discriminar los restos soterrados de los solapes de las imágenes

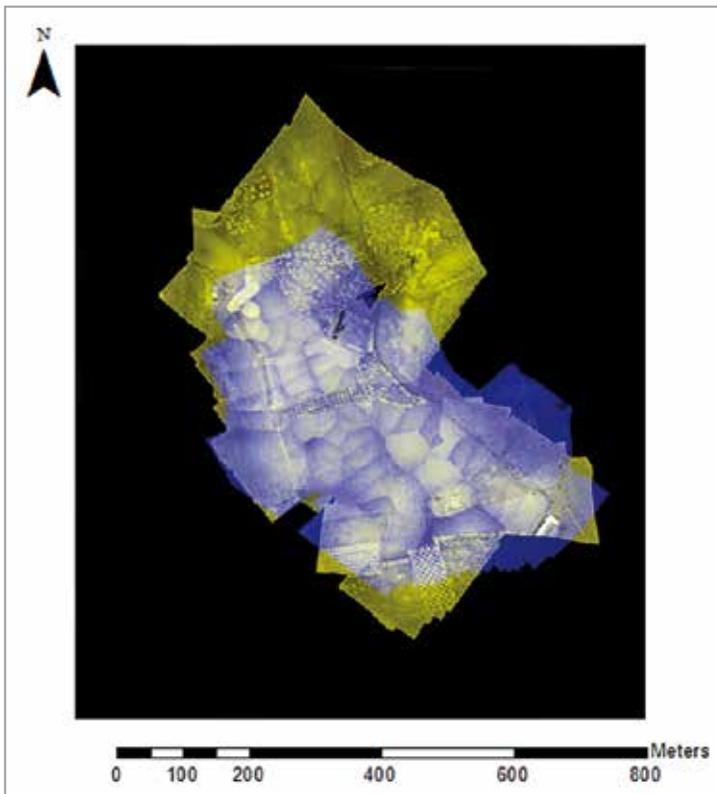


FIG. 151. Resultado del tratamiento digital de la imagen de Valdeherra VIS-NIR con un filtro *High pass* con una kernel de 5x5 (composición 643) con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

de *Photoscan*, estableciéndose como una herramienta necesaria para el procesado de los datos que provengan del mosaicado de este *software*. En el caso de la imagen que se muestra a continuación de Labitlosa este hecho no es tan visualmente nítido como en el caso



FIG. 152. Resultado del tratamiento digital de la imagen de Labitlosa VIS-NIR con un filtro *High pass* con una kernel de 5x5 (composición 431) con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).



FIG. 153. Una sola imagen del NIR a la que se le ha aplicado un filtro *Adaptive Filter* sin resultados significativos. Zona de la excavación de Valdeherra.

de Valdeherra debido a que se han realizado otros parámetros de ajuste en el programa de mosaicado.

Asimismo, también probamos a realizar ajustes espaciales a una sola imagen (sin georreferenciar y sin realizar el mosaico) obteniendo también exiguos resultados, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

De todos los tratamientos digitales de las imágenes que se han realizado durante la elaboración de este trabajo, la utilización de los índices vegetales para visualizar estructuras soterradas se muestra como una herramienta adecuada de gran potencial⁶⁷. Su elaboración y posterior utilización para la creación de neocanales así como su posterior ajuste lineal, utilizando puntos de corte, del histograma nos ofrecen, de momento, el recurso más óptimo para el desarrollo de esta nueva metodología.

En las FIGS. 154, 155, 156 y 157 mostramos los resultados obtenidos por la creación de los índices vegetales comentados en la metodología (*vid. supra*).

El proceso de cálculo de los componentes principales no se ha mostrado muy revelador, identificándose prácticamente los mismos restos arqueológicos que en la elaboración de los índices, tal y como se muestra en el detalle de las imágenes de las FIGS. 158 y 159.

TABLA 12
Matriz de autovectores

	B1	B2	B3	B4	B5	B6
CP1	0.529	0.395	0.676	0.308	0.098	-0.030
CP2	0.406	0.398	-0.178	-0.671	-0.437	0.043
CP3	0.285	0.420	-0.684	0.347	0.390	-0.016
CP4	0.369	-0.368	-0.155	0.382	-0.459	0.587
CP5	0.379	-0.392	-0.128	0.130	-0.229	-0.784
CP6	0.439	-0.467	0.035	-0.411	0.617	0.191

67 Sobre la aplicación de NDVI para la detección de restos arqueológicos, *vid. Lasaponara / Masini, 2006; Lasaponara / Masini, 2012; Bennett et al., 2012.*

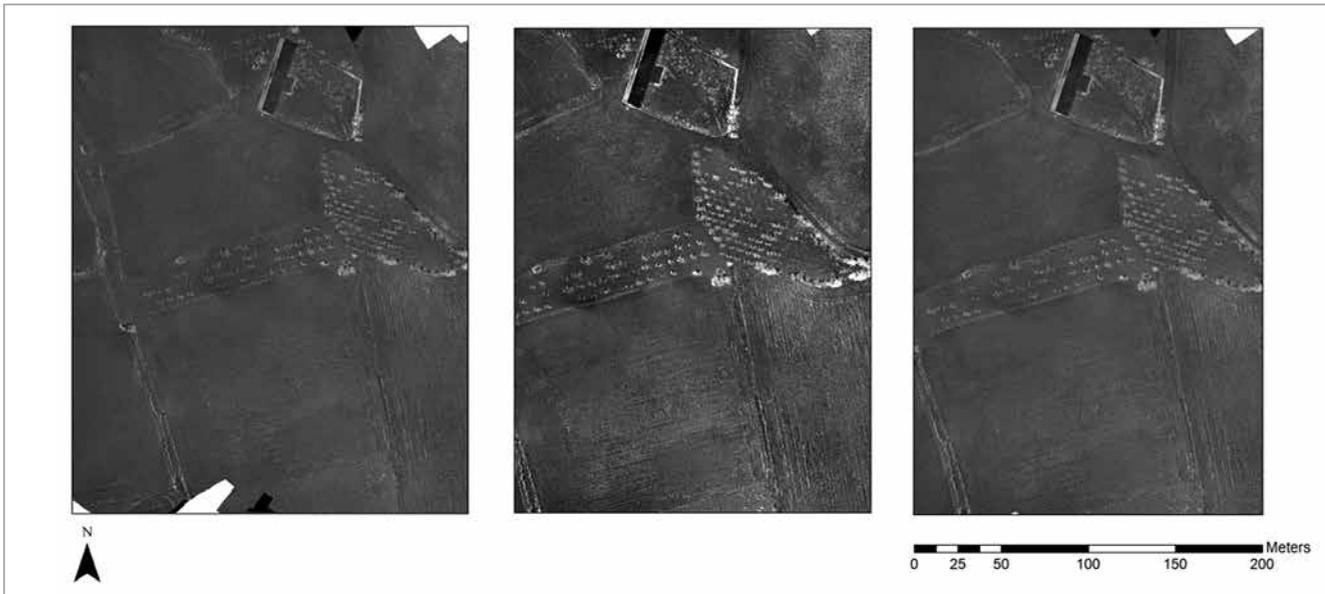


FIG. 154. Detalle de los NDVIs de Valdeherrera (NDVI_4; NDVI_5; NDVI_6) con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

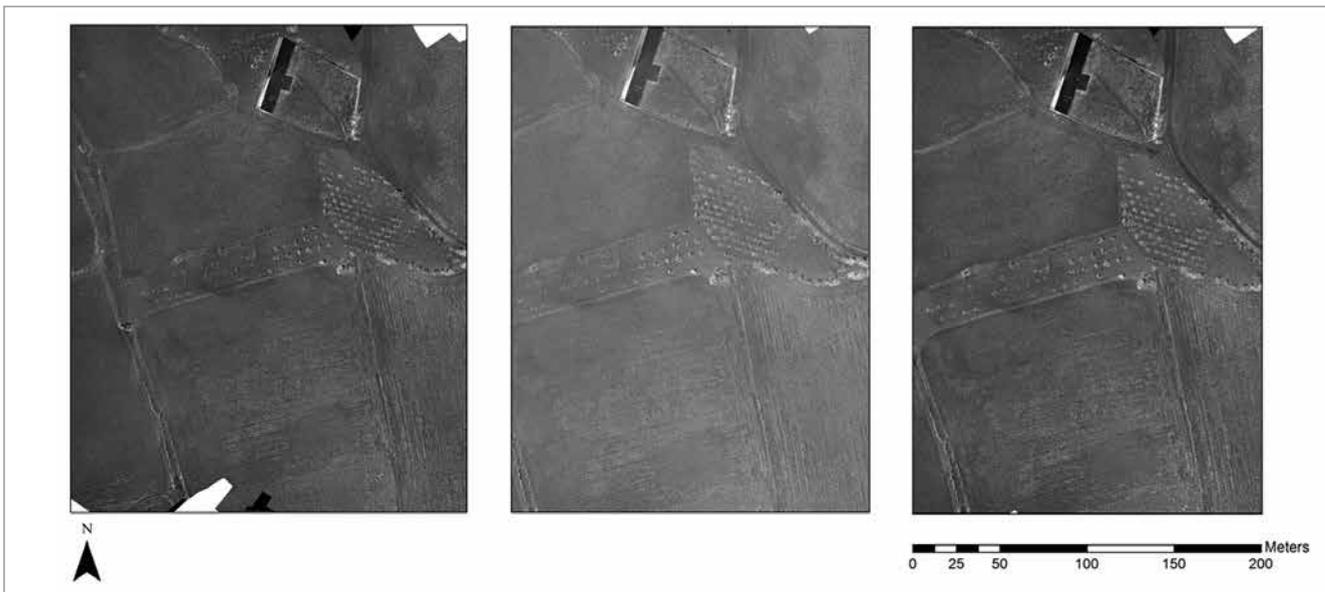


FIG. 155. Detalle de los GreenNDVIs de Valdeherrera (GreenNDVI_4; GreenNDVI_5; GreenNDVI_6) con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

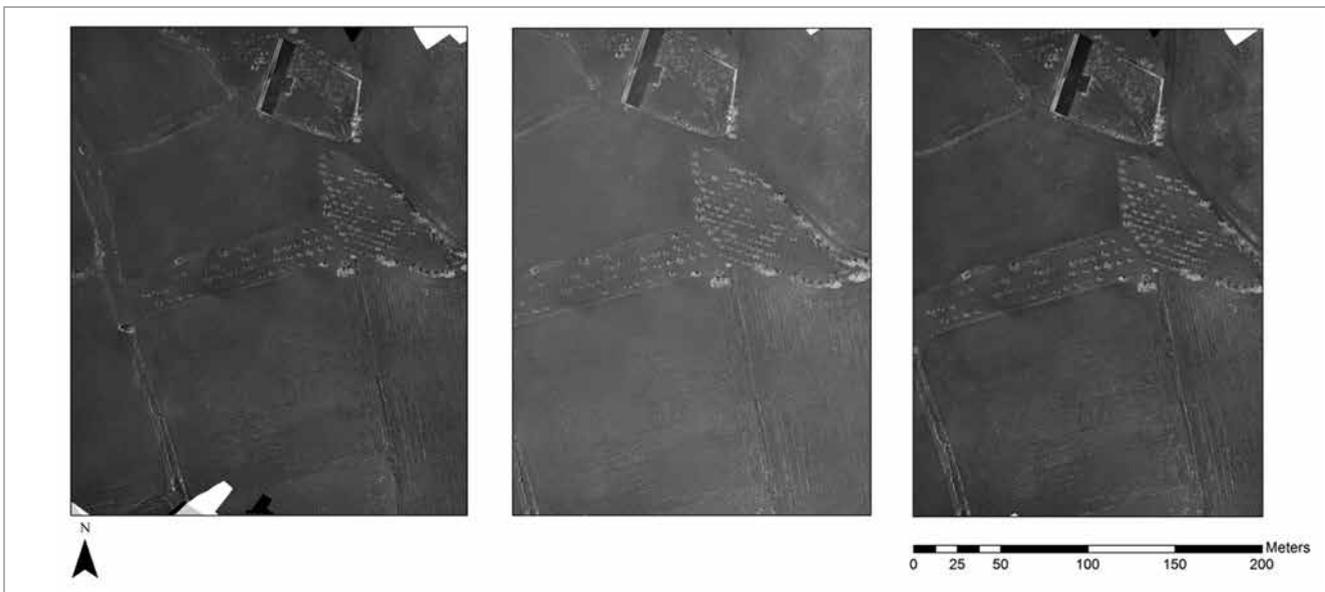


FIG. 156. Detalle de los índices SAVI de Valdeherrera (SAVI_4; SAVI_5; SAVI_6) con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

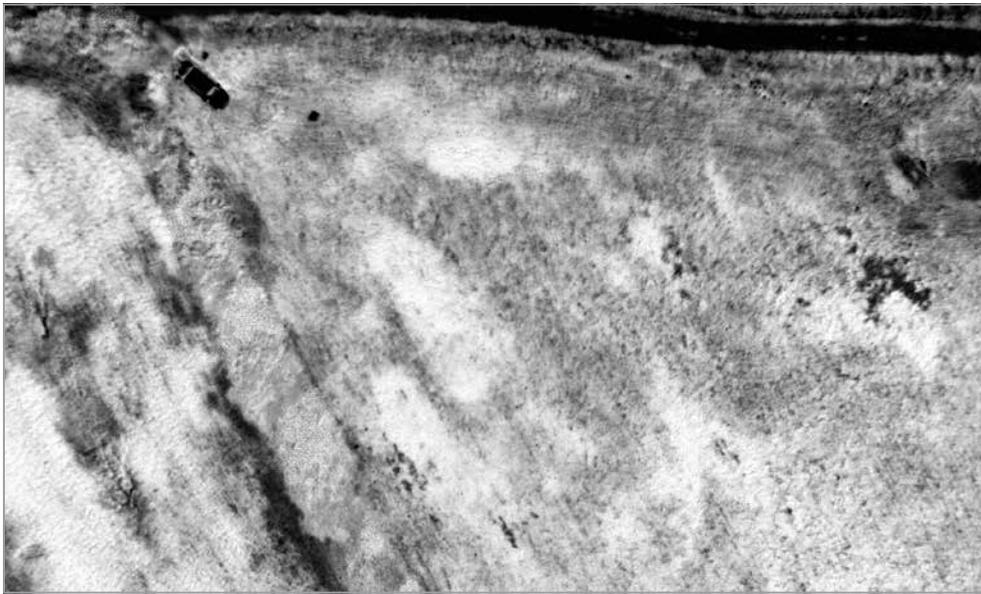


FIG. 157. Detalle del NDVI realizado a una sola imagen del sensor *Tetracam Mini-MCA 6* utilizando la longitud de onda del 920-940 nm.



FIG. 158. Detalle del ACP de Valdeherrera bandas 1, 2 y 3 con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).



FIG. 159. Detalle del ACP de Valdeherrera bandas 4, 5 y 6 con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

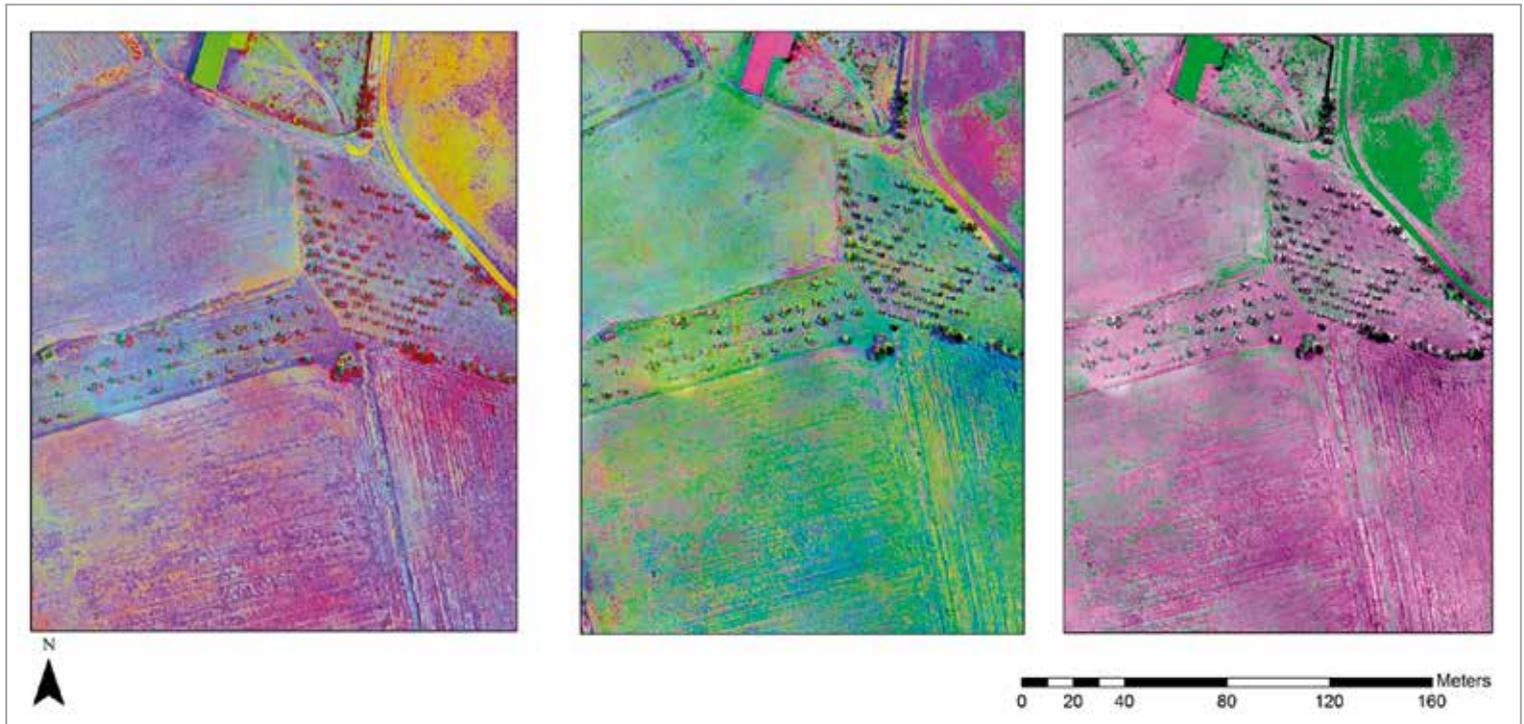


FIG. 160. Generación de neocanales con los resultados obtenidos del ACP. La primera imagen combina los ACP 123; la segunda 234 y la tercera 323. A todas ellas se les ha aplicado un ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

La matriz de autovectores muestra el sentido espectral de los componentes, es decir, evidencia la asociación entre cada componente y las bandas originales (recordemos que en este caso la banda 1 representa el rojo). En esta tabla puede verse que el primer componente recoge una valoración de las características espectrales comunes a todas las bandas, que puede asimilarse con el brillo de la imagen. El segundo componente muestra el contraste espectral entre el NIR y el resto de las bandas, representándose de este modo el vigor vegetal que permite una visualización óptima de los restos arqueológicos. Este último, junto con el ACP 3 el cual parece indicar el contenido de agua de la vegetación, son los ACP que resultan más óptimos para identificar los restos. Por contra, se puede observar como el ACP6 contiene sólo ruido.

Sin embargo, verdaderamente mejora la identificación de los restos arqueológicos cuando utilizamos los ACP para la creación de neo-

canales, mostrándose como una herramienta muy útil para conseguir nuestros objetivos.

Finalmente querríamos comentar los resultados obtenidos mediante la clasificación digital de la imagen. Según la leyenda que hemos expuesto en la metodología, hemos obtenido la siguiente tabla de divergencia transformada (FIG. 161).

En ella se puede observar cómo hemos tenido graves problemas de asignación entre los cultivos yermos, las marcas dejadas por el tractor (arado) y los cultivos con restos. Pensamos que al tratarse de campos de cultivo poseen una signature espectral muy similar, siendo muy complejo diferenciarlos con esta herramienta. Los resultados obtenidos se muestran en la FIG. 162.

En este sentido, podemos observar cómo esta herramienta no es útil para nuestro objetivo porque no discrimina automáticamente

Separability CellArray														
Distance Measure: Transformed Divergence														
Using Layers: 1 2 3 4 5 6 7														
Taken 7 at a time														
Best Average Separability: 1962.51														
Combination: 1 2 3 4 5 6 7														
Signature Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
restos	1	0	1869.09	1999.95	2000	2000	2000	1987.09	1940.71	2000	2000	1974.79	1894.84	893.863
Suelo_denudo	2	1869.09	0	2000	2000	2000	2000	1998.49	1946.12	2000	2000	2000	1804.66	1865.74
bloques_cemento_excav	3	1999.95	2000	0	2000	1999.7	2000	1915.1	1971.05	2000	2000	1999.1	2000	2000
Info_solo_NIR	4	2000	2000	2000	0	2000	1999.84	1999.98	2000	1999.93	2000	1999.1	2000	2000
Lona_azul_excav	5	2000	2000	1999.7	2000	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Lona_negra_excav	6	2000	2000	2000	1999.84	2000	0	2000	2000	1522.16	2000	2000	2000	2000
Parideras_sintejado	7	1987.09	1998.49	1915.1	1999.98	2000	2000	0	1923.31	2000	1999.95	1998.87	2000	1999.99
Tejado_paridera	8	1940.71	1946.12	1971.05	2000	2000	2000	1923.31	0	2000	2000	1999.47	1999.91	1995.83
Sombra	9	2000	2000	2000	1999.93	2000	1522.16	2000	2000	0	2000	2000	2000	2000
Tejado_uralita	10	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1999.95	2000	2000	0	2000	2000	2000
Almendros	11	1974.79	2000	1999.1	1999.1	2000	2000	1998.87	1999.47	2000	2000	0	2000	2000
Arado	12	1894.84	1804.66	2000	2000	2000	2000	2000	1999.91	2000	2000	2000	0	1577.29
Cultivo_sinrestos	13	893.863	1865.74	2000	2000	2000	2000	1999.99	1995.83	2000	2000	2000	1577.29	0

FIG. 161. Resultado del *Transformed divergence*.

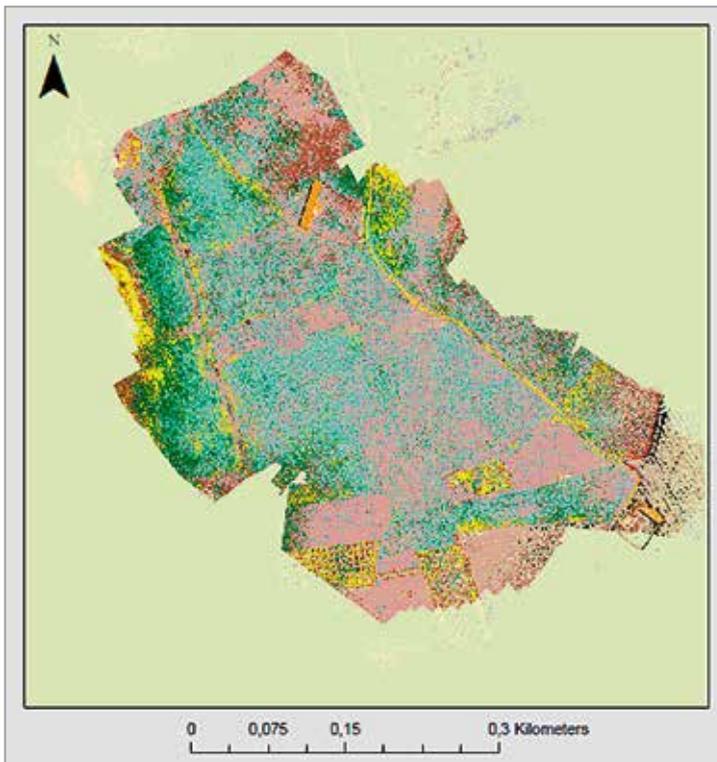


FIG. 162. Resultado de la clasificación digital de la imagen de Valdeherrera.

te entre los restos arqueológicos y el suelo yermo, por lo que pensamos que para el desarrollo de esta nueva metodología aplicada al campo de la arqueología no sería apropiado utilizar esta herramienta.

3.5.8.2. Resultados arqueológicos

En definitiva, mediante este proceso hemos podido identificar diferentes estructuras soterradas. Consecuentemente, tal y como muestran las FIGS. 163 y 164, pensamos que hemos podido alcanzar el objetivo inicial de este trabajo: comprobar si esta nueva metodología aportaba resultados óptimos al campo de la arqueología.

Si bien la adquisición de los datos no fue la óptima, debido al momento fenológico de la vegetación (recordemos que en este yacimiento las imágenes fueron tomadas en julio), hemos podido identificar una serie de estructuras en la ciudad romano republicana

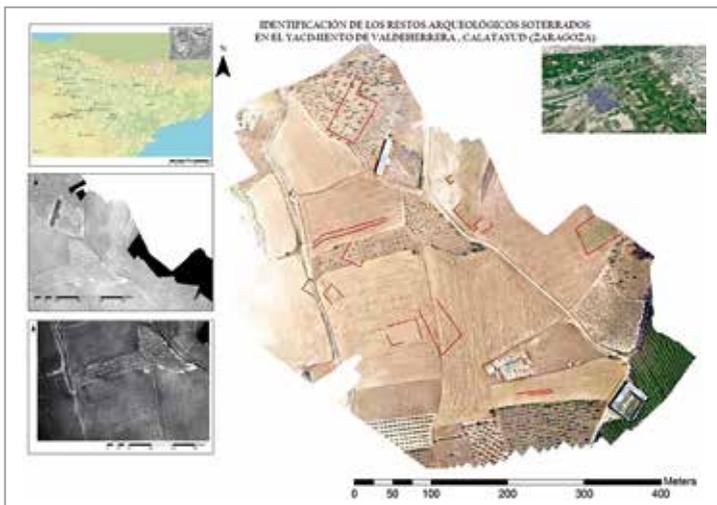


FIG. 163. Cartografía con los resultados obtenidos en el yacimiento de Valdeherrera (imagen VIS).

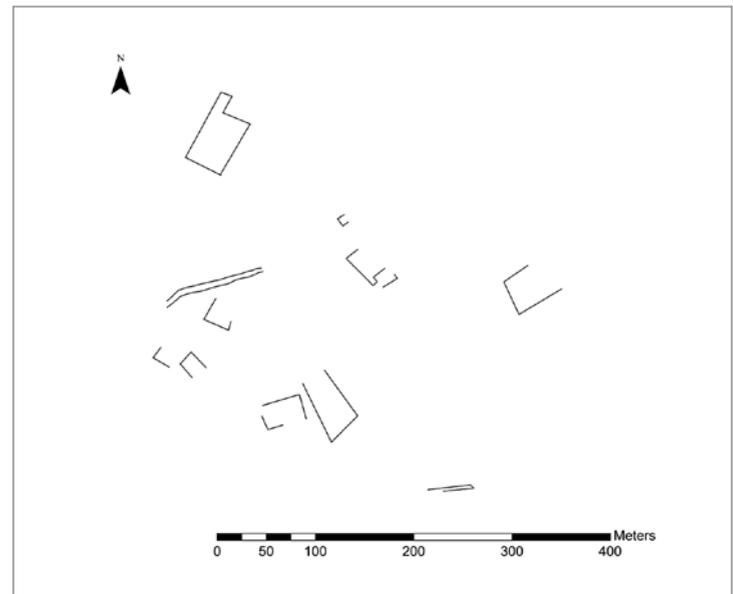


FIG. 164. Dibujo planimétrico de los restos arqueológicos documentados con las técnicas descritas en el yacimiento de Valdeherrera.



FIG. 165. Resultado del tratamiento digital de las imágenes (creación de neo-canales R: NDVI_6; G: NDVI_5; B: NDVI_4 y realce lineal del histograma con puntos de corte) para la identificación de los restos arqueológicos. Se puede observar claramente la diferencia entre la imagen del visible y la identificación de los restos arqueológicos gracias a la metodología utilizada.

na de Valdeherrera⁶⁸. De todas ellas, destacamos la estructura denominada como A (FIG. 165).

Pensamos que se trataría de un edificio importante de la ciudad debido a su posición elevada, tal y como muestra el MDE⁶⁹, sus dimensiones (25 x 26,67 m) y el hallazgo de grandes sillares rectangulares sobre el terreno (FIGS. 166 y 167).

Un hecho similar ocurre con la estructura identificada como B. Se trataría de una gran estructura ubicada justo en la vaguada del río (ver MDE). Por su forma y sus dimensiones (40 x 20 m) podemos pensar que estaríamos ante uno de los accesos a la ciudad (FIGS. 1688 y 169).

3.5.9. Conclusiones

En definitiva, tal y como muestran los resultados, hemos podido comprobar que la aplicación de estas técnicas de teledetección resultan muy propicias para la identificación de los restos soterrados arqueológicos. Sin embargo, para su adaptación a cada tipo de contexto arqueológico es necesario contemplar los factores que citábamos en la introducción de este apartado.

⁶⁸ Hemos decidido no incluir los resultados arqueológicos obtenidos en el yacimiento de Labitola (Huesca) por estar, todavía, en fase de procesamiento. Sin embargo, debemos destacar que, aplicando la misma metodología utilizada en el caso de Valdeherrera, se han obtenido los primeros resultados.

⁶⁹ Esta imagen del MDE ha sido extraída del software *Photoscan*.

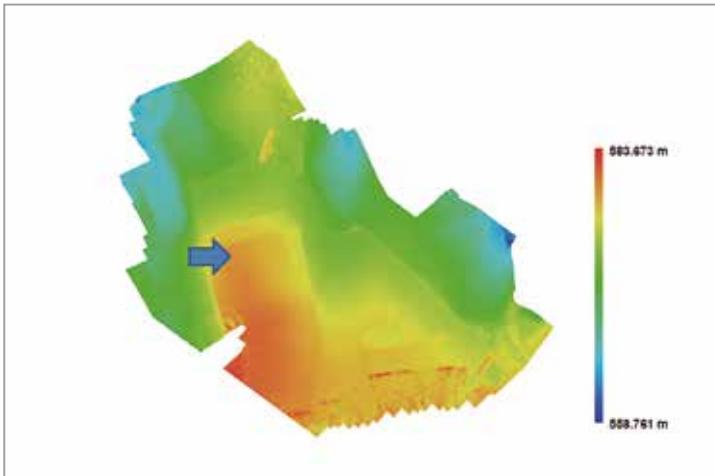


FIG. 166. MDE con la ubicación de la estructura A.

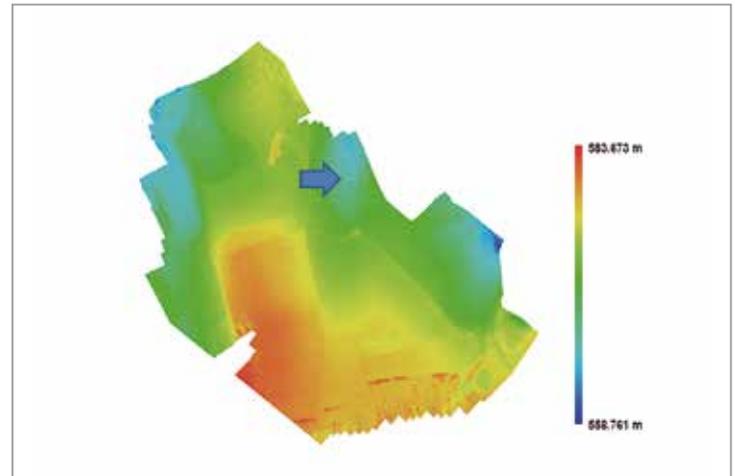


FIG. 168. MDE con la ubicación de la estructura B.

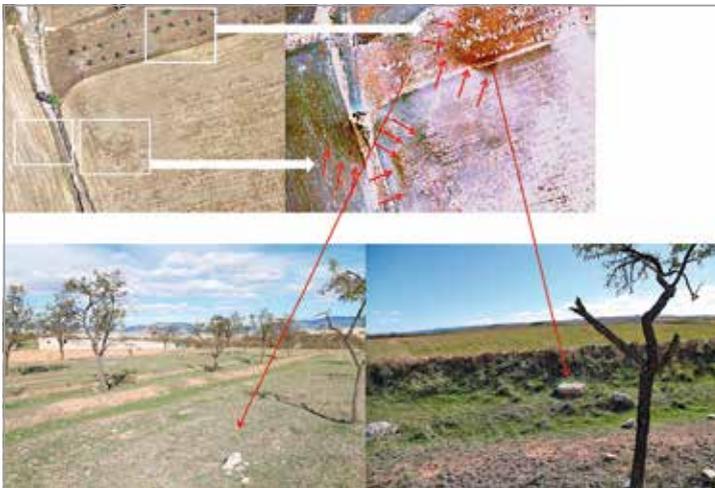


FIG. 167. Documentación de sillares de alabastro escuadrados sobre el terreno que confirman la existencia de una estructura.

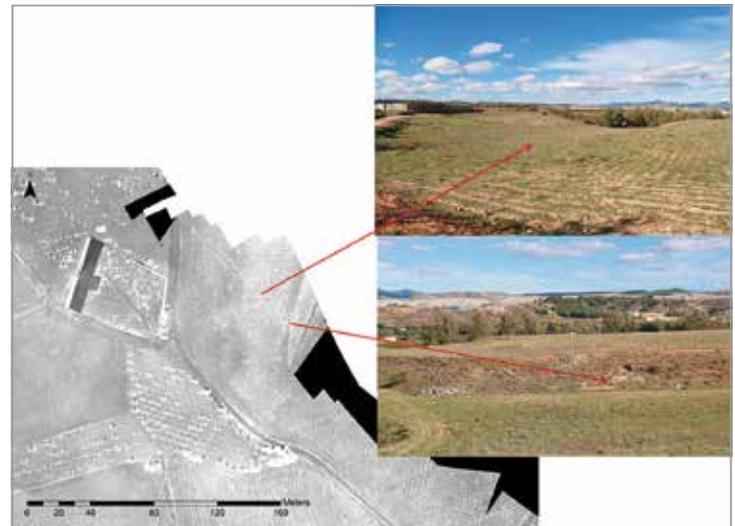


FIG. 169. Restos arqueológicos sobre el terreno que confirman la existencia de una estructura B.

A continuación pasaremos a describir una serie de cuestiones que se nos han planteado durante la elaboración del trabajo:

A. Reflexiones sobre la plataforma

Sin lugar a dudas, hemos podido demostrar que los drones se presentan hoy en día cómo una herramienta muy útil para estudios de teledetección que necesiten una resolución espacial máxima. Sin embargo, todavía quedan por mejorar algunos aspectos como la capacidad del tiempo de vuelo, su compatibilidad con los diferentes sensores o su telemetría. En este sentido, pensamos que este sector, en actual desarrollo, ofrecerá en los próximos años soluciones integrales e innovadoras como la posibilidad de utilizar escáneres láseres 3D sobre este tipo de plataformas aéreas con una mayor autonomía de vuelo.

B. Los sensores

La integración final del sensor Tetracam Mini-MCA6 conlleva múltiples problemas y actualmente se siguen procesando los datos de este sensor comparándolos con otros yacimientos en el valle medio del Ebro y con otros resultados de otras cámara multiespectrales (multiSpec de senseFly, *vid.* TABLA 3). Este hecho ha producido que no hayamos podido incluir los datos preliminares en este estudio. Asimismo, su manejo no ha sido fácil ya que, además de la integración, ofrece muchos problemas de ortorectificación y mosaicado. En consecuencia, pensamos que, aunque desconocemos

exactamente los rangos de longitudes de onda, la utilización de las DSLR *Olympus* E-PM2 y E-PM1 se muestran, por el momento, como el método más efectivo y económico para nuestros objetivos arqueológicos.

C. El tratamiento digital de las imágenes

Asimismo, hemos podido comprobar que los índices normalizados de vegetación y su tratamiento posterior se presentan como el tratamiento más efectivo para nuestros objetivos. La utilización de los filtros nos ha servido para discriminar los efectos del mosaicado del *software* *Photoscan*. Sin embargo, otras técnicas como el ACP o la clasificación digital de la imagen no han producido resultados relevantes.

También la realización de estos procesos nos ha permitido conocer las necesidades para trabajos futuros. De esta forma, quedan varias líneas de investigación abiertas como profundizar en la discriminación de las «soil marks» o en la zonificación de los píxeles de los índices de vegetación.

D. Resultados

En definitiva, los resultados han sido satisfactorios. Sin embargo, desde el punto de vista de la arqueología y a pesar de las posteriores comprobaciones en campo, solo una excavación arqueológica de las estructuras documentadas podrá validar nuestro método e hipótesis.