

APLICACIÓN DE LOS DRONES EN DIVERSOS CONTEXTOS ARQUEOLÓGICOS Y EN CASOS DE RECONSTRUCCIÓN GEOARQUEOLÓGICA

APPLICATION OF DRONS IN VARIOUS ARCHAEOLOGICAL CONTEXTS AND IN CASES OF GEO-ARCHAEOLOGICAL RECONSTRUCTION

M. Marta Sampietro Vattuone¹ y J. Luis Peña Monné²

¹ Laboratorio de Geoarqueología, Facultad de Ciencias Naturales e IML, UNT - CONICET. España 2903, (4000) San Miguel de Tucumán, Argentina, sampietro@tucbbs.com.ar;

² Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna 12, (500001) Zaragoza, España, jlpenna@unizar.es

Presentado: 30/12/2017 - Aceptado: 02/05/2018

Resumen

La popularización del uso de los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT), o drones, está influyendo enormemente a la disciplina arqueológica. La incorporación de esta técnica con los procesamientos pertinentes permite una aproximación de gran detalle al conocimiento de los sitios arqueológicos. El objetivo de este trabajo es presentar seis casos distintos de aplicación en estudios realizados en Argentina y España que demuestran que esta técnica permite abordar problemas arqueológicos y geoarqueológicos complejos. El control de las escalas de trabajo, que pueden alcanzar gran detalle, facilita labores como el control patrimonial y el seguimiento multitemporal de los sitios arqueológicos, de gran importancia para conocer sus problemas de deterioro. Finalmente, se ofrece como una técnica valiosa para la sincronización de las plantas de excavación, aún en el caso de sitios con múltiples ocupaciones o intervenciones espaciadas temporalmente.

Palabras clave: *fotogrametría aplicada, arqueometría, SIG, patrimonio arqueológico*

Abstract

The popularization of Unmanned Aerial Vehicle (UAV), also known as drones, are deeply influencing the archaeological research. The incorporation of this technique, with the adequate processing, allows a high detail approach to the archaeological site knowledge. The aim of this paper is to present different study cases from Argentina and Spain that show how the technique allows focusing complex archaeological and geoarchaeological problems. The control of the scales, that could reach high detail, facilitates activities such as archaeological heritage control, and multitemporal analysis of the site evolution, both subjects of high importance to know archaeological decay. Finally,

it is a valuable technique for the synchronization of excavation layers in archaeological sites with multiple occupations, or interventions made in different field works.

Keywords: *applied photogrammetry, archaeometry, GIS, archaeological heritage*

Introducción

La utilización de sensores remotos aplicados a la investigación arqueológica es muy valiosa y proporciona múltiples posibilidades (Parcak 2009; Lillesand *et al.* 2014). Tanto en Argentina (González 1956) como en España (Peña Monné *et al.* 1986), países en los que se sitúan los casos de aplicación que expondremos, el uso de fotogramas aéreos en estudios arqueológicos se fue extendiendo desde la década de 1950. Dos décadas más tarde, ya eran de uso general y rutinario por muchos investigadores (Sampietro Vattuone 2009). Gradualmente se ha recurrido a otras fuentes de información tales como las imágenes satelitales y de radar (Bognani 2010; De Feo *et al.* 2013; Lamenza 2015; Peña-Monné y Sampietro-Vattuone 2016, entre otros). La popularización de esta técnica se debe fundamentalmente a que existe un mejoramiento sustancial en la resolución tanto espacial como espectral de las imágenes, que revelan cada vez mayor cantidad de información detallada. Por otra parte, la vista condensada que ofrecen estas imágenes permite comprender mejor la complejidad de las investigaciones arqueológicas a diversas escalas y los modelos digitales de elevación disponibles ayudan a mejorar las interpretaciones arqueológicas y el análisis de datos. La disponibilidad de largas series temporales de imágenes permite el monitoreo de los riesgos de degradación de los sitios arqueológicos y la prospección y análisis de datos intra e inter sitios. Finalmente, la accesibilidad a las imágenes es cada vez mayor (Lasaponara y Masini 2012), por lo que se han convertido en documento básico para la arqueología y las aplicaciones geoarqueológicas.

Sin embargo, tanto en el caso de fotografías aéreas como de imágenes satelitales, existen limitantes que están dados esencialmente por la resolución espacial que proveen. Este parámetro refiere a la menor medida de los objetos que se pueden reconocer con el sensor (cámara o scanner), es decir el área de terreno que representa un pixel. Por ejemplo, en el caso de Landsat TM la resolución máxima es de 30 m, o QuickBird provee una resolución espacial de 2,4 m (en ambos casos disponibles en la web) (Verhoeven 2009).

La popularización de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) (*Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*), conocidos como drones, ha contribuido a subsanar estos inconvenientes proveyendo una herramienta útil, accesible y versátil para la obtención de imágenes de gran calidad y alta definición a bajo costo (Campana 2017). En términos generales, estos equipos están compuestos de una plataforma (el dron), un sensor (el dispositivo de registro) y una

estación de base (el control remoto), donde el sensor juega un rol muy importante. Existe dos tipos de sensores, los pasivos (cámaras de fotos que pueden limitarse al espectro visible o tener incluso sensibilidad para el infrarrojo cercano, infrarrojo termal y ultravioleta cercano) y los activos entre los cuales se destacan los sensores LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) que permiten el registro tridimensional de la superficie terrestre penetrando el dosel arbóreo (Verhoeven 2009).

Si bien se trata de una técnica de reciente introducción en nuestra disciplina, su aplicación en España y Argentina es cada vez más usual. En el caso de sensores pasivos se han logrado excelentes resultados en la reconstrucción tridimensional de sitios arqueológicos, conservación patrimonial, prospección arqueológica, fotogrametría aérea de grandes estructuras y seguimiento de excavaciones arqueológicas, incluso en aplicaciones tales como la localización de emplazamientos de la Guerra Civil Española (1936-1939), entre otros temas (Fernández-Lozano *et al.* 2015; Ruiz Sabina *et al.* 2015; Díaz Moreno *et al.* 2015; Fernández-Lozano y Gutiérrez-Alonso 2016; Greco *et al.* 2018, entre otros). En el caso del LiDAR, España cuenta con la enorme ventaja de disponer gratuitamente de los archivos nacionales a través de la página web del Instituto Geográfico Nacional español (<http://www.ign.es/web/ign/portal>) en el marco del proyecto PNOA 2008-2015. En Argentina, la obtención de este tipo de información depende del esfuerzo particular de cada equipo de investigación. Algunos trabajos con aplicación de esta técnica a diversos aspectos arqueológicos son los de Fernández-Lozano y Gutierrez Alonso (2015), Berrocal-Rangel *et al.* (2017), Moralejo *et al.* (2017), Del Cogliano *et al.* (2017a, 2017b) y Moralejo *et al.* (2018), entre otros.

La efectividad del uso de drones radica en varios aspectos. De acuerdo a los objetivos de la investigación arqueológica, se pueden regular tanto la resolución del modelo final, ajustando la altura de vuelo, como la velocidad de desplazamiento de la plataforma. Por otra parte, los lugares de despegue y aterrizaje son pequeños, siendo sistemas portátiles de bajo costo con un número mínimo de operarios. Además, su autonomía de vuelo es adecuada y regulable y la puesta a punto operativa y su empleo en el campo son rápidos. Por último, los drones presentan bajo riesgo de aplicación y no generan impacto patrimonial (Walker y De Vore 1995; Schlitz 2004; Verhoeven 2009).

En este contexto, el objetivo de este trabajo es presentar aplicaciones de dron realizadas en Argentina y España orientadas a conservación patrimonial (cantera La Costa, Tucumán, Argentina), reconstrucción tridimensional de detalle de los sitios arqueológicos con rasgos microtopográficos (La Costa 2, Tucumán, Argentina), determinación de procesos erosivos activos y riesgo de erosión en sitios arqueológicos (El Pichao, Tucumán, Argentina), valoración de procesos de *piping* (procesos erosivos hipodérmicos producidos por

disolución de sales y dispersión de arcillas, Jones 1981) en modelos evolutivos geoarqueológicos (Los Pedregales, Huesca, España), riesgo de deslizamiento en asentamiento de época romana (Zuera, Zaragoza, España), seguimiento tridimensional de una excavación arqueológica (Collado de la Abeja, Zaragoza, España). Todos estos casos permiten valorar su aplicabilidad en contextos semiáridos con geomorfología evolutiva compleja y, a veces, con problemas importantes de interpretación.

Metodología

Los casos de estudio presentados en este trabajo son el resultado de los vuelos efectuados con los cuadricópteros DJI Phantom 4, DJI Phantom 4 Pro y Mavic Pro. Los tres equipos son sencillos de utilizar y poseen sensores de buena calidad (Tabla 1). En todos los casos el Control Remoto fue conectado a una tableta Samsung SM-T813 con sistema Android. Los vuelos fotogramétricos fueron realizados con Pix4DCapture. Esta aplicación, instalada en la tableta, permite configurar las especificaciones del vuelo con antelación a su ejecución estableciendo la zona de mapeo, altura de vuelo, velocidad del dron, ángulo de la toma y porcentaje de superposición entre fotografías. Para decidir los parámetros específicos en cada caso se tuvo en cuenta: a) el objetivo del vuelo, b) el objeto de estudio, c) los resultados esperados, d) la optimización del tiempo de vuelo disponible (balance entre baterías disponibles, superficie a fotografiar y resolución deseada) y e) la extensión de la superficie de interés. Los vuelos fueron realizados durante la mañana con sol oblicuo para lograr el máximo contraste. El uso de vuelos planificados asegura la colecta estandarizada de información y el uso eficiente de las baterías.

| Aeronave | Sensor | Píxeles efectivos | Lente | Diafragma | Sensibilidad (ISO) (Automático) |
|---------------|-------------|-------------------|--|--------------|---------------------------------|
| Phantom 4 | 1/2,3" CMOS | 12,4 Mp | FOV 94° 20 mm (equivalente a 35 mm) | f/2.8 | 100-1600 |
| Mavic Pro | 1/2,3" CMOS | 12,35 Mp | FOV 78,8° 28 mm (equivalente a 35 mm) | F/2.2 | 100-1600 |
| Phantom 4 Pro | 1" CMOS | 20 Mp | FOV 84° 8,8 mm/24 mm (equivalente a 35 mm) | f/2.8 - f/11 | 100-3200 |

Tabla 1. Principales características de los sensores de DJI Phantom 4, Mavic Pro y Phantom 4 Pro.

Para la valoración de la superficie afectada mecánicamente sobre zonas de interés arqueológico en La Costa (Tucumán, Argentina) se realizó en vuelo a 120 m de altura en una grilla sencilla con 70 % de superposición entre fotografías. El sitio arqueológico La Costa 2 (Tucumán, Argentina) fue volado a 100 m de altura, con superposición del 80 %, fraccionando la superficie en tres grillas simples teniendo en cuenta el desnivel del terreno y trasladando el punto de despegue para lograr la mejor cobertura, optimizando el

desplazamiento desde el punto de partida. El modelo digital de elevación y ortomosaico de El Pichao (valle de Santa María, Tucumán, Argentina) fue planificado en cinco grillas a 100 m de altura para lograr la máxima cobertura, con superposición fotográfica del 70 %. La reconstrucción tridimensional para valorar la erosión producida por *piping* en el sitio arqueológico visigótico de Los Pedregales se realizó con una grilla simple volando a 30 m de altura con superposición del 70 %. El ortomosaico realizado para valorar los procesos de deslizamiento y *piping* del meandro de Zuera (Zaragoza, España) en la zona de asentamiento de la villa romana fue realizado con un vuelo a 50 m de altura con una grilla simple y superposición del 80 %. El sitio arqueológico Collado de la Abeja, en proceso de excavación, fue volado en una grilla simple a 20 m de altura y 80 % de superposición, el vuelo fue complementado con fotos de detalle de la zona excavada; el ortomosaico fue realizado a máxima resolución en el sector de interés de la excavación.

Una vez obtenidas las fotos, fueron tratadas con Adobe Photoshop Lightroom CC con un procedimiento estándar de reconocimiento y calibración para homogeneizar eventuales diferencia de exposición y tonalidad entre las tomas.

Tras este paso se procedió a cargar las fotos de cada proyecto independiente en Agisoft Photoscan v1.3. En el caso de proyectos con numerosos fotogramas, éstos fueron separados por lotes para facilitar y agilizar el procesamiento. La cadena de trabajo consistió en alinear las fotos con alta precisión, optimizar el alineamiento, construir una nube de puntos densa con alta precisión, construir la malla de la superficie a partir de la nube de puntos densa con detalle alto. Finalmente, en el caso de procesamientos por lotes estos fueron alineados y fusionados utilizando pares de cámaras. Finalmente se asignaron los sistemas de coordenadas métricas correspondientes en el sistema UTM WGS84.

Tras esta primera etapa de generación de los modelos se aplicaron las herramientas correspondientes a cada objetivo calculando las superficies afectadas, el volumen de material movido, las curvas de nivel para obtención de microtopografías, los ortomosaicos, los modelos digitales de elevación y los reportes de procesamiento para tener la información relativa a la precisión en cada caso. Para el cálculo de redes de drenaje, el ortomosaico y el modelo de elevación fueron incorporados a QGIS v2.18 y se realizaron los procedimientos de GRASS para la determinación de cálculos de pendientes y cuencas de drenaje. En el caso de seguimientos multitemporales las fotos aéreas, escala 1:10000 (vuelo II Brigada Aérea de Paraná 1987) en el caso de La Costa y 1:50000 (vuelo SPARTAM 1970) para El Pichao fueron incorporadas al SIG y georeferenciadas en el sistema correspondiente.

Resultados y discusión

Extracción de áridos en La Costa 1 (valle de Tafí, Tucumán, Argentina)

El sitio arqueológico La Costa (26°51'S; 65°40'W) se encuentra ubicado en el valle de Tafí (Tucumán, Argentina) sobre un gran abanico aluvial holoceno, del nivel H2 entre los definidos por Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (2016). El sector fue intensamente ocupado por poblaciones prehispánicas de los períodos Formativo (*ca.* 500 AC-1000 AD) y posteriormente durante los Desarrollos Regionales (*ca.* 1000-1500 AD) (Sampietro Vattuone *et al.* 2018). En la actualidad, la zona está sometida a un intenso proceso de degradación por presión antrópica, tanto por asentamiento y construcción de viviendas como por los trabajos de excavación de una empresa de extracción de áridos. En este último caso no existe ningún control del impacto sobre el patrimonio arqueológico. En la práctica, el sistema de explotación simplemente consiste en ir ampliando las excavaciones desde el cauce original hacia los márgenes, buscando los afloramientos granulométricamente más adecuados para la venta sin que existan actividades de gestión patrimonial ni restitución ambiental. Mediante un procedimiento incontrolado, el suelo existente en el abanico aluvial se ve afectado por escarificación superficial. La excavación se amplía y profundiza de forma irregular para seleccionar el material de explotación y se generan acumulaciones de descarte tanto como material suelto dentro de las propias canteras que se abandonan como en sus márgenes. Las distintas fases de avance de la explotación pueden ser observadas en el ortomosaico de la figura 1. La red de caminería asociada se establece de acuerdo a las necesidades del momento lo que constituye otro motivo de serio impacto en toda la zona, no solo en los sectores de explotación. Además de los problemas de afectación a la zona arqueológica, estos trabajos tienen consecuencias importantes en el funcionamiento hidrológico de los cauces, al generarse cambios bruscos de pendiente y un exceso de carga disponible, que puede ser movilizadada de forma rápida en cualquier crecida.

Con el objeto de valorar esta situación, sobre un área muestra se realizó el vuelo de acuerdo a los parámetros citados en la metodología. El área seleccionada incluye 201 fotogramas que representan una superficie de 0,42 km². En el ortomosaico (Figura 1), cuya resolución es de 5,26 cm/pix, pueden observarse las áreas afectadas por excavaciones, las zonas de descarte de áridos y la red viaria para el desplazamiento de camiones y maquinaria. En los márgenes de las canteras, las estructuras arqueológicas aparecen claramente truncadas por efecto de la actividad (Figura 1). Dentro del área muestra, la zona afectada representa 0,20 km², donde es imposible determinar con las imágenes actuales qué sectores tenían restos de ocupaciones del pasado. Para subsanar este inconveniente se ingresaron en el SIG fotos aéreas de años anteriores (1987, escala 1:10000) georreferenciadas. Si bien no tienen la misma resolución que el ortomosaico actual, permiten observar que las

áreas afectadas por la excavación efectivamente contenían estructuras arqueológicas. La aplicación sistemática de esta técnica permitirá realizar no solo una apreciación multitemporal como la aquí propuesta, sino el seguimiento a largo plazo de este tipo de actividades que producen pérdidas patrimoniales que de otra forma serían difíciles de cuantificar sin la documentación gráfica correspondiente.

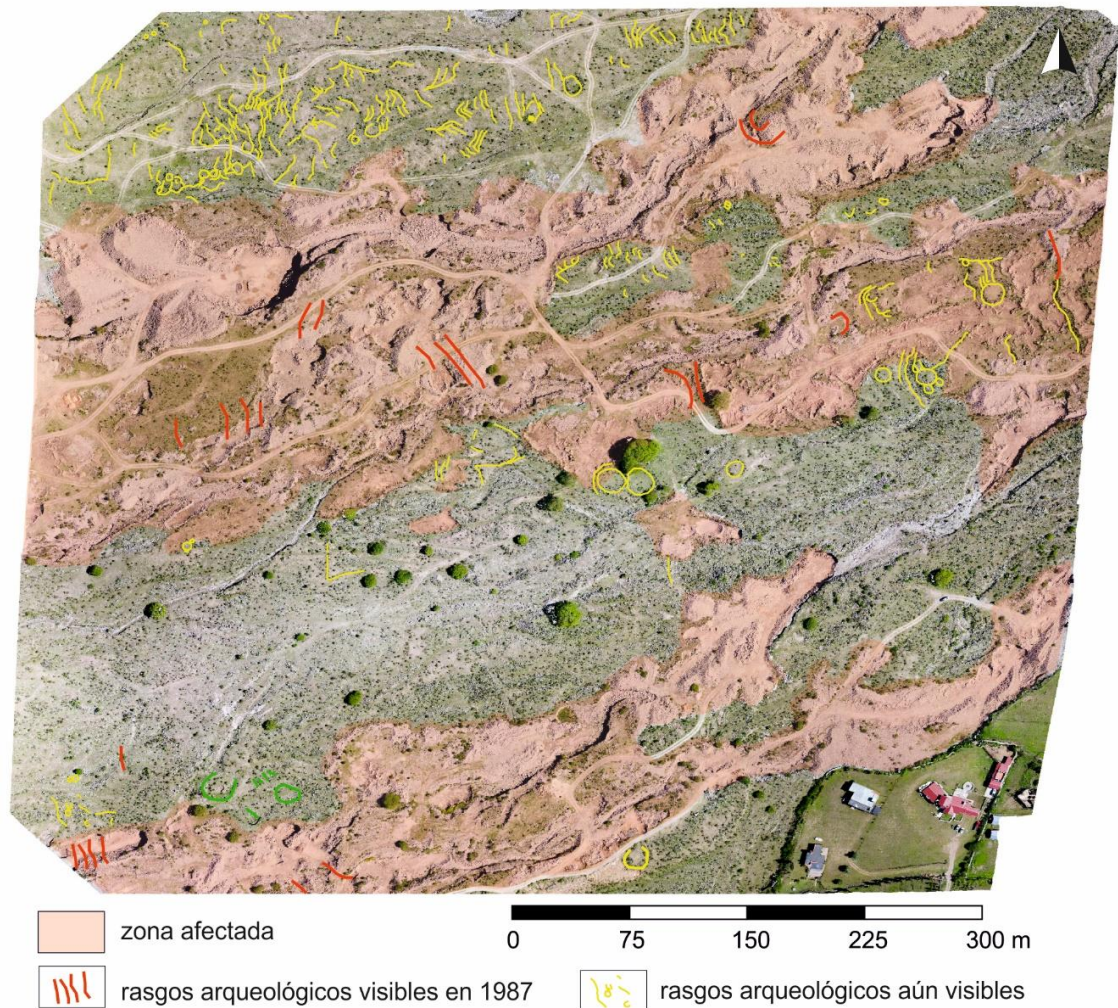


Figura 1. Sector analizado en las canteras de La Costa 1, valle de Tafí.

Microtopografía y drenaje en La Costa 2 (valle de Tafí, Tucumán, Argentina)

El sitio arqueológico La Costa 2 (26°52'S; 65°40'W) se ubica hacia el sureste del anteriormente descrito y comparte las características arqueológicas del anterior. Geomorfológicamente se trata de un abanico aluvial de edad Holoceno superior de nivel H2

según las investigaciones de Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (2016), contemporáneo de la mayor parte de los abanicos aluviales que conforman la superficie del valle de Tafí. La zona presenta gran cantidad de terrazas agrícolas construidas durante tiempos formativos. De acuerdo a los análisis fisicoquímicos llevados a cabo, los suelos fueron explotados introduciendo modificaciones manifiestas en el incremento de la compactación, aumento de la concentración de carbonato de calcio y fosfatos orgánicos y favoreciendo la edafización en las zonas agrarias (Roldán *et al.* 2016). Sin embargo, se desconoce el manejo del agua en las zonas agrícolas, existiendo evidencias superficiales que dan indicios de la construcción y manejo de sistemas de irrigación. Por este motivo y con el objetivo de localizar la probable red de acequias se ha realizado un registro del sector mediante el cálculo de un ortomosaico compuesto por 745 fotos cubriendo una superficie de 0,87 km² con definición de 2,9 cm/pix (Figura 2a) y su correspondiente modelo digital de elevación de 5,8 cm/pix de resolución (Figura 2b). El cálculo de las curvas de nivel con equidistancia de 2 m muestra claramente que la topografía está condicionada por la existencia de las estructuras residenciales y agrícolas prehispánicas del sector (Figura 2a) a lo que se suman las intervenciones recientes sobre el abanico aluvial tales como sectores de limpieza de campos, construcción de residencias y apertura de caminos.

Una gran extensión de lo que fuera el sitio arqueológico se encuentra actualmente ocupado por residencias de veraneo y permanentes por lo que el deterioro general es notorio. Para este ejemplo se tomó una parcela experimental de 2,8 ha donde las estructuras arqueológicas estaban en mejor estado (Figura 3). El modelo digital introducido en QGIS y procesado de acuerdo a los algoritmos correspondientes para cálculo de cuencas hidrográficas muestra que existen zonas de concentración del drenaje que están relacionadas directamente con las características propias de los procesos geomorfológicos vinculados a la formación de la geoforma, mostrando una red dendrítica típica de abanicos aluviales. No obstante es posible identificar dos concentradores del flujo superficial evidenciados por las vías de comunicación actuales y dos concentradores del drenaje condicionados por la existencia de estructuras arqueológicas (Figura 3). Futuras prospecciones orientadas a este tema específicamente contribuirán a consolidar estos datos. Esta metodología de trabajo abre nuevas puertas para la planificación de detalle de las zonas de sondeo con objetivos específicos, especialmente cuando los rasgos que se trata de identificar son inapreciables con técnicas tradicionales o han sido enmascarados por actividades de diversa índole.

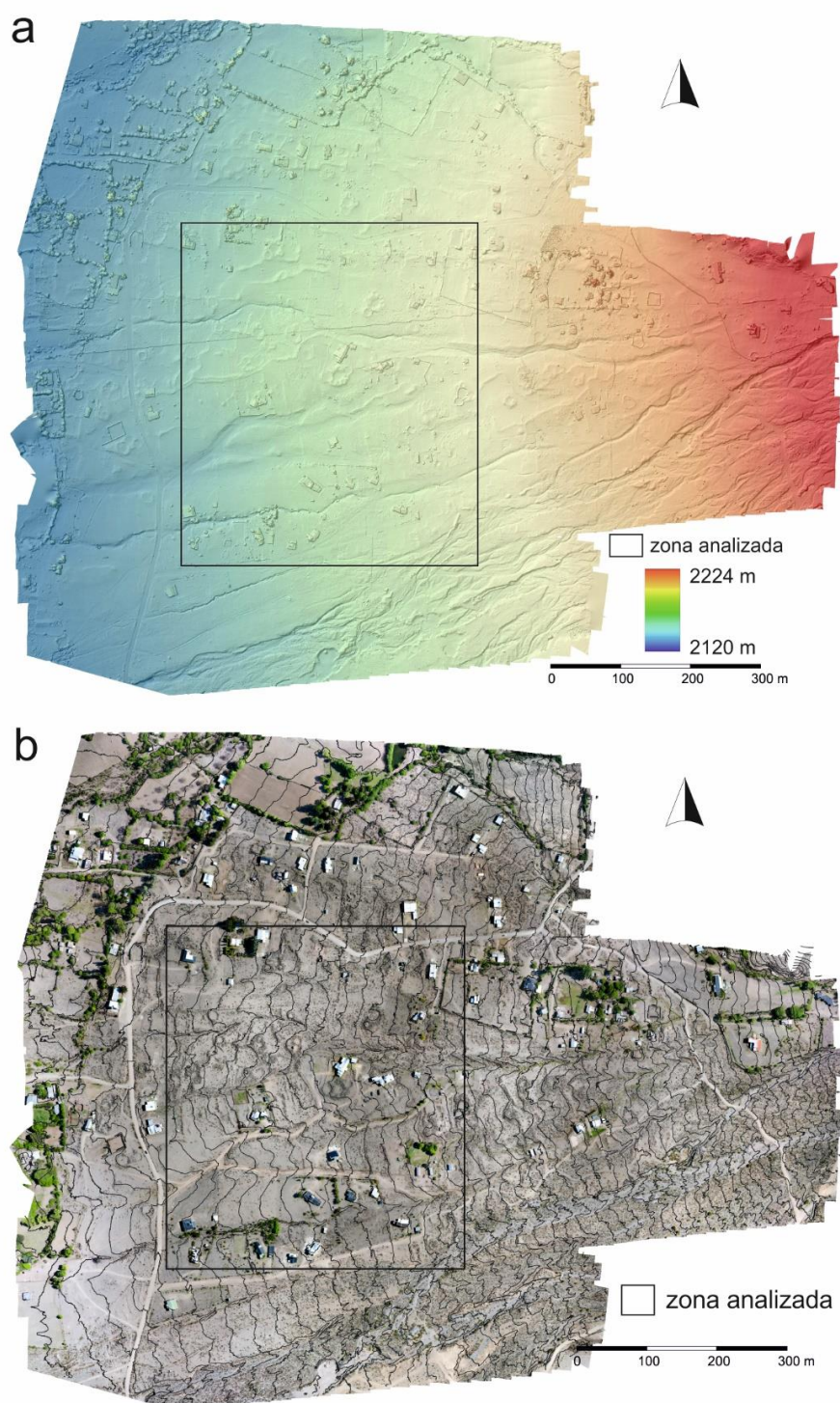


Figura 2. La Costa 2 (valle deTafí, Argentina): (a) modelo digital de elevación; (b) ortomosaico con curvas de nivel (equidistancia 2m).

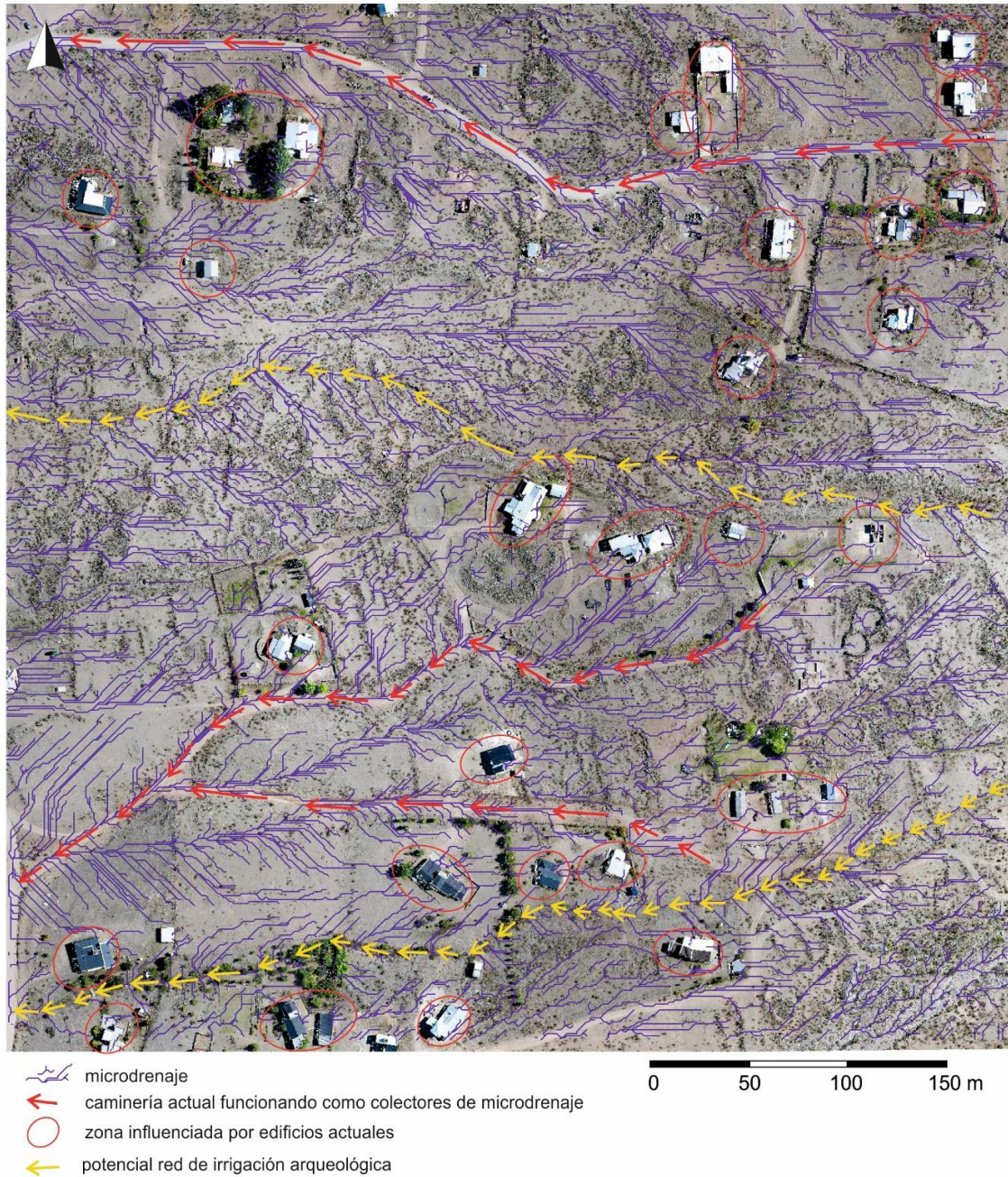


Figura 3. Sector analizado en La Costa 2 mostrando microdrainaje, zonas con impacto humano actual y zonas potencialmente utilizadas para la red de irrigación prehispánica.

Riesgo de inundación e impacto erosivo en el sitio arqueológico El Pichao (Tucumán, Argentina)

El sitio arqueológico El Pichao (26°22'S; 66°01'W) se encuentra en el departamento de Tafí del Valle (Tucumán, Argentina), asentado sobre superficies agradativas H2 del Holoceno superior (Peña-Monné y Sampietro-Vattuone 2016). Las ocupaciones prehispánicas datan desde el Formativo (*ca.* 500 AC-1000 AD) (Núñez Regueiro y Tartusi 1993) hasta el Hispano-indígena (1535-1700 AD) (Cornell y Johansson 1993). En el sector central del sitio (denominado STucTav 5) las construcciones se caracterizan por la presencia de unidades residenciales típicas del período de Desarrollos Regionales (*ca.* 1000-1490 AD) acompañadas por terrazas de cultivo. La margen norte del sector STucTav5 del sitio arqueológico está limitada por el río Pichao, que si bien tiene una cuenca relativamente pequeña posee un alto dinamismo dado por eventos de baja frecuencia y alta intensidad que producen crecidas con alta carga sedimentaria (Peña Monné *et al.* 2016a; Peña Monné *et al.* 2016b). Los trabajos previos tratan sobre el contexto geomorfológico y los problemas de conservación que presenta el sitio. Entre los procesos vinculados a la dinámica del río Pichao destaca su tendencia a la incisión del cauce en algunos sectores y la formación de barras en otros, la erosión lateral del cauce que avanza sobre el sitio y, por último, las coladas de barro y flujos de detritos que llegan a alcanzar la unidad H2 y el sitio arqueológico.

En esta oportunidad, con el objeto de profundizar en el conocimiento de los procesos erosivos que afectan la zona, se realizó el vuelo fotogramétrico compuesto de 1132 fotogramas. La definición del ortomosaico es de 5,31 cm/pix y el modelo digital de elevación de 10,6 cm/pix. Con el objeto de analizar en detalle el sector afectado por un flujo de barro ocurrido el año 2015 se realizó un recorte de la zona, compuesto de 197 fotogramas, con la resolución ya indicada. El área total ocupada por el flujo comprende 3,17 ha repartidas entre ambos márgenes del río. Los límites del mismo son difusos por lo que la zona afectada por el desborde probablemente fue mayor que la cartografiada, complementada por láminas de agua residuales que escurrieron sobre el sitio una vez que la fricción y el cambio de pendiente hizo que el flujo perdiera su capacidad de transporte. La construcción del SIG de la zona permitió identificar los cambios en el curso del río ocurridos en el intervalo comprendido entre 1970 y 2016 (Figuras 4a y 4b, respectivamente). Finalmente, la superposición de la información obtenida muestra que las estructuras que componen el sitio efectivamente fueron afectadas por la colada de barro. En el modelo digital de elevación (Figura 4c) se muestra la síntesis de la información obtenida, observándose incluso el sombreado correspondiente a las estructuras arqueológicas presentes en la actualidad. La implementación sistemática de este tipo de aproximaciones permitirá prever impactos y plantear posibles medidas de mitigación de los efectos que los cambios en el curso del río

pueden generar sobre la zona arqueológica mediante la confección de mapas de riesgo de detalle.

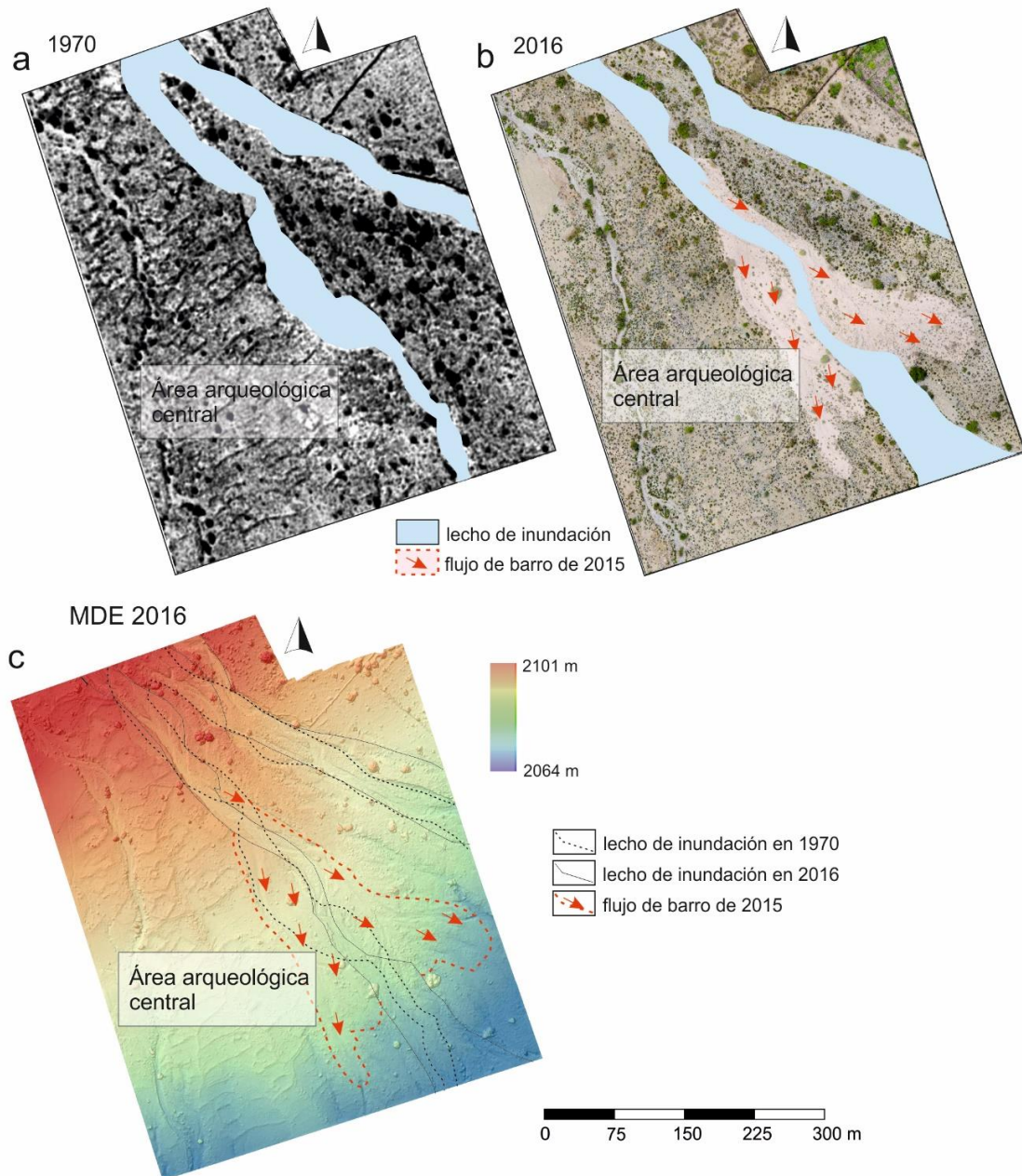


Figura 4. Sector del sitio arqueológico de El Pichao mostrando el curso del río Pichao en 1970 (a), 2016 y zonas afectadas por flujos de barro producidos en el año anterior (b). Finalmente (c), el modelo digital de elevación (2016) con la evolución de las variables citadas.

Estos cambios, que están vinculados a la dinámica ambiental de la zona, es además representativa de lo que sucede e otros abanicos de la zona y de la mayoría de los valles semiáridos del NOA.

La evolución del meandro del río Gállego y su afección a la villa romana del sector de Zuera (Zaragoza, España)

Este sitio arqueológico (41°54'N; 00°47'W) se encuentra en la margen derecha del curso bajo del río Gállego, al N de la localidad de Zuera. La zona corresponde al límite norte de los afloramientos de yesos miocenos del sector central de la depresión del Ebro (Quirantes 1978). Estos materiales terciarios quedaron cubiertos por acumulaciones miocenas posteriores, principalmente formadas por niveles arcillosos y calizas y reaparecieron tras un largo proceso erosivo desde finales del Terciario, una vez abierta la cuenca del río Ebro hacia el mar Mediterráneo. Las variaciones en el nivel de base marino y los cambios climáticos cuaternarios generaron etapas de agradación e incisión fluvial alternantes que favorecieron la formación de terrazas fluviales, que en caso del río Gállego se componen de 11 niveles (Benito *et al.* 2010).

En el sitio arqueológico romano de Zuera aflora una de las terrazas pleistocenas más recientes, que ha sido incidida por el río Gállego alcanzando hasta el sustrato de yesos miocenos. El corte producido por la erosión lateral del río muestra la perfecta estratificación horizontal de los yesos de tonos blancos, que contrastan con las capas de gravas grisáceas de la acumulación pleistocena que se superpone a los mismos (Figura 5). Y, por encima, aún hay una tercera unidad compuesta por sedimentos limo-arenosos con gravas de yeso intercaladas, pertenecientes a la zona distal de un cono aluvial, procedente de las sierras yesíferas cercanas. Este nivel superior de conos se formó en Época Romana ya que contiene cerámicas de ese período y sus sedimentos enterraron finalmente el yacimiento de esa época, por lo que podemos situar cronológicamente este cono como posterior al siglo IV AD. Pertencería a la unidad holocena H1C definida por Peña Monné *et al.* (2018) para el sector central de la cuenca del Ebro. La composición salina del conjunto hace que la zona sea susceptible al desarrollo de *piping* ya que son materiales proclives a la dispersión de las partículas que los componen. Este aspecto se ve además complementado con el avance del meandro que el río Gállego produce al pie del escarpe sobre el que se asienta el sitio. Para tener una visión global del problema y hacer un seguimiento de los procesos de deterioro se realizó un vuelo sobre el sector más vulnerable. El ortomosaico (Figura 5a) está compuesto por 260 fotogramas cubriendo una superficie de 5,5 ha con resolución de 2,33 cm/pix. Además se realizaron proyecciones oblicuas (Figura 5b) del mismo para observar en detalle la evolución lateral del meandro, la estratigrafía del escarpe y la evolución vertical de los procesos de *piping*.

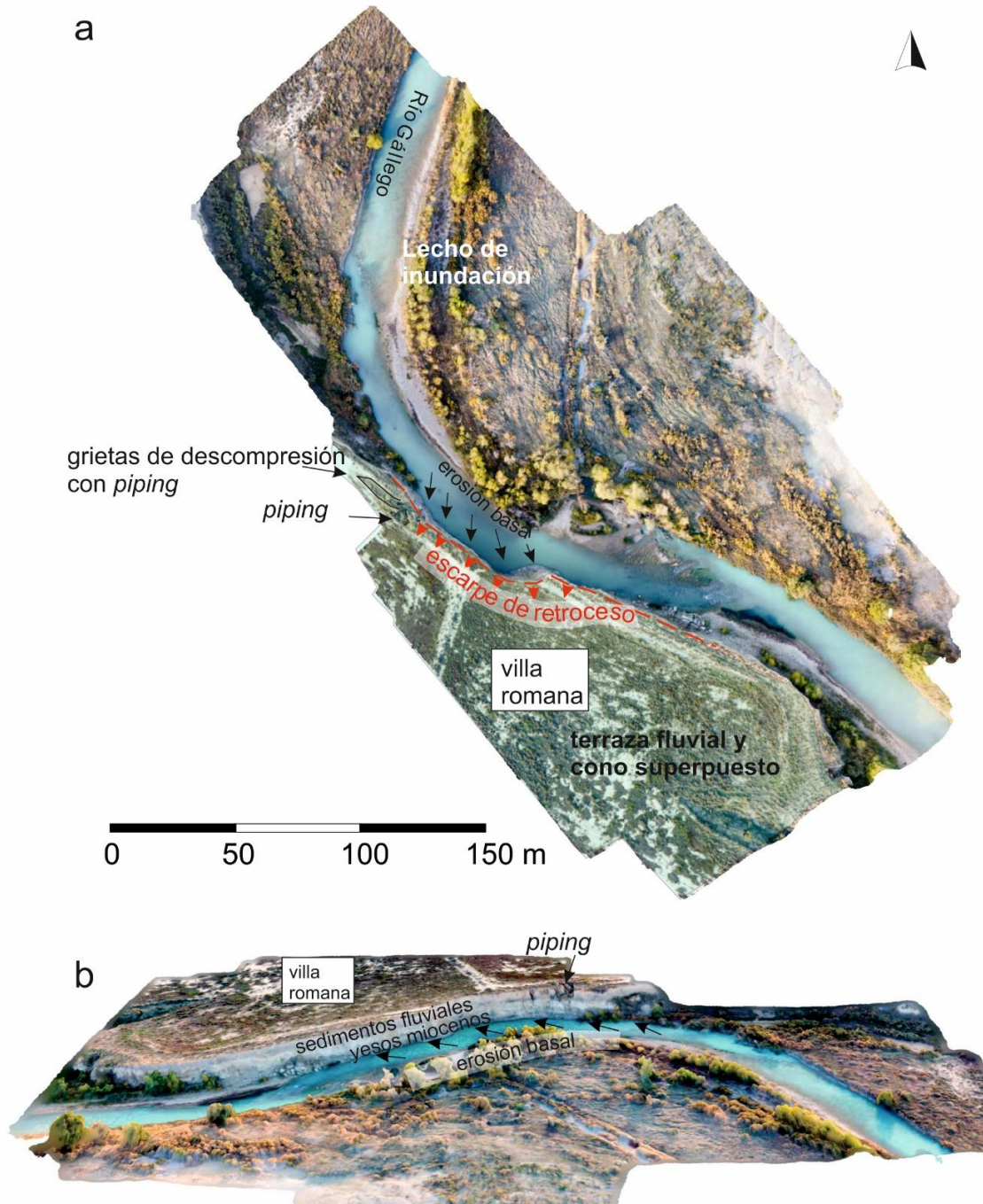


Figura 5. (a) Vista vertical de la zona de meandro del río Gállego avanzando su parte cóncava sobre el sitio arqueológico romano. Obsérvense las grietas de descompresión y los procesos de *piping*; (b) vista lateral del escarpe con erosión basal y procesos de *piping* que alcanzan hasta los yesos miocenos.

El flujo del río erosiona la base del escarpe generando desplomes que durante un tiempo protegen el escarpe hasta que el río completa otro ciclo de erosión. Los desplomes favorecen la formación de grietas de descompresión y los procesos de *piping*, que normalmente son más activos en los estratos superiores (Fig. 5b). El resultado del proceso de retroceso del escarpe en conjunto es la pérdida gradual de la superficie del cono sobre la cual se encuentra la villa romana.

Geoarqueología del campo de silos altomedieval de Los Pedregales (Huesca, España)

El sitio arqueológico Los Pedregales (42°09'N; 00°35'W) se encuentra cerca de la localidad de Lupiñén (Huesca, España), en el sector N de la Depresión del Ebro. La zona presenta una compleja evolución geomorfológica, que involucra un momento de ocupación consistente en la excavación de silos en el sustrato limo-arenoso pleistoceno. Se iniciaron durante el período altomedieval, hacia el siglo VI, y terminando hacia el siglo IX (Picazo *et al.* 2016), en que fueron abandonados. Más tarde se formó una superficie agradativa que recubrió los silos entre los siglos XI y XVII, que fue erosionada esencialmente por procesos de arroyada concentrada y de *piping* durante la Pequeña Edad del Hielo, sacando de nuevo a la luz estas construcciones antiguas, en varias etapas que han sido reconstruidas mediante estudios geoarqueológicos (Peña Monné *et al.* 2017). Con el objeto de valorar la velocidad e intensidad del proceso erosivo se realizó un modelo fotogramétrico del sector que consta de 104 fotos. La resolución en terreno del ortomosaico obtenido es de 2,2 cm/pix y el modelo digital de elevación posee una resolución en terreno de 4,4 cm/pix, cubriendo un área total de 9,64 ha (Figura 6a). De acuerdo a los resultados obtenidos, considerando el modelo digital de elevación y la zona afectada por *piping* y tomando como plano de referencia la superficie agradativa formada entre los S XI y XVII, el volumen total de material desplazado es de 39751 m³, lo que implica una tasa erosiva media aproximada de 99,4 m³/siglo. La información cartográfica obtenida servirá, además, como referencia para comprobar en vuelos de fechas posteriores, la evolución de estas tasas erosivas, que tienen un efecto muy negativo en la conservación de los restos arqueológicos altomedievales.

Seguimiento multitemporal de excavaciones arqueológicas: el Collado de la Abeja de Muel (Zaragoza, España)

El Collado de la Abeja se encuentra en las proximidades de Muel (Zaragoza, España) (41°29'N; 1°10'29"W), en el sector sur de la Depresión del Ebro. Se trata de una suave ladera, al pie de un cerro aislado, orientada al SE que fue ocupada por un asentamiento agrario formado por cabañas dispersas con un campo de silos asociado datado en el Bronce Medio (*ca.* 1600 a.C.). Hay indicios de al menos cinco cabañas muy deterioradas por la acción del arado. Estaban ligeramente excavadas en los limos y arcillas terciarias de la base,

aparentemente tuvieron formas rectangulares y dimensiones indeterminadas. Se reconocen suelos de arcilla compactada sobre los que se encuentran diversos artefactos, agujeros de poste, muretes de separación, caídas de manteados de barro, enlucidos de arcilla, etc. Alrededor de las cabañas se han documentado 13 silos excavados en el suelo, si bien podrían existir bastantes más, según se deduce por la prospección geofísica realizada. Se distribuyen de forma aleatoria, presentan secciones cilíndricas o acampanadas y dimensiones en torno a 1 m de diámetro en la base por una profundidad entre 60 y 90 cm (Pérez-Lambán *et al.* 2015). Hasta la fecha se han realizado cuatro campañas de excavación (2009-2011 y 2017) y una prospección geofísica de tipo magnético. Considerando las características del sitio (uso actual, asentamiento de cabañas bajo nivel, silos en las inmediaciones) que hace imposible lograr una visión de conjunto dado que la zona se sigue arando año a año, se ha decidido hacer el seguimiento multitemporal de las excavaciones con el objeto de lograr una reconstrucción final del sitio con toda la información expuesta de manera sincrónica. En esta oportunidad contamos con la primera etapa de registro (Figuras 7a y 7b) con la reconstrucción global del área y el sector de detalle de la zona excavada (Figuras 7c y 7d). Este tipo de aplicación ha dado excelentes resultados permitiendo la apreciación de superficies ocupacionales completas a pesar de haber sido excavadas en etapas, así como en la integración de las catas y zonas excavadas alejadas dentro de un mismo sitio arqueológico (Campana 2017).

Conclusiones

Los casos de análisis propuestos en este trabajo muestran múltiples aplicaciones potenciales de la técnica a casos concretos de situaciones complejas arqueológicas y geoarqueológicas. El manejo correcto de los vuelos automáticos permite tener un excelente control de la calidad del producto final: ortomosaicos, vistas oblicuas y modelos digitales de elevación sumado a la enorme resolución potencial. A esto se suma la posibilidad de incorporar marcadores utilizando GPS de alta precisión.

Las ventajas de estas aplicaciones vinculadas al seguimiento del deterioro patrimonial son indiscutibles, tanto en caso de afecciones por razones naturales como antrópicas, especialmente por las posibilidades de generar documentación multitemporal y sumar los datos espaciales previos mediante la implementación de SIG.

Por otra parte, es una técnica que facilita la cartografía georreferenciada de detalle, indispensable en arqueología, acortando los tiempos de campo comparando, por ejemplo, con el uso de estaciones totales para levantamiento de detalle. Por otra parte, agiliza el cálculo de índices relacionados con topografía, hidrología, integración de información geológica, geomorfológica, etc., potenciando la obtención rápida de resultados. Se

constituye además como una herramienta valiosa para planificar prospecciones hacia intereses específicos y la manipulación masiva de datos espaciales. A esto hay que sumar la posibilidad de realizar registros de procesos ambientales en el momento en que estos se están produciendo, como el registro de crecidas de ríos, inundación de sitios arqueológicos, etc. Finalmente, se ofrece como una técnica invaluable para la sincronización de las plantas de excavación, aún en el caso de sitios con múltiples ocupaciones o intervenciones espaciadas temporalmente.

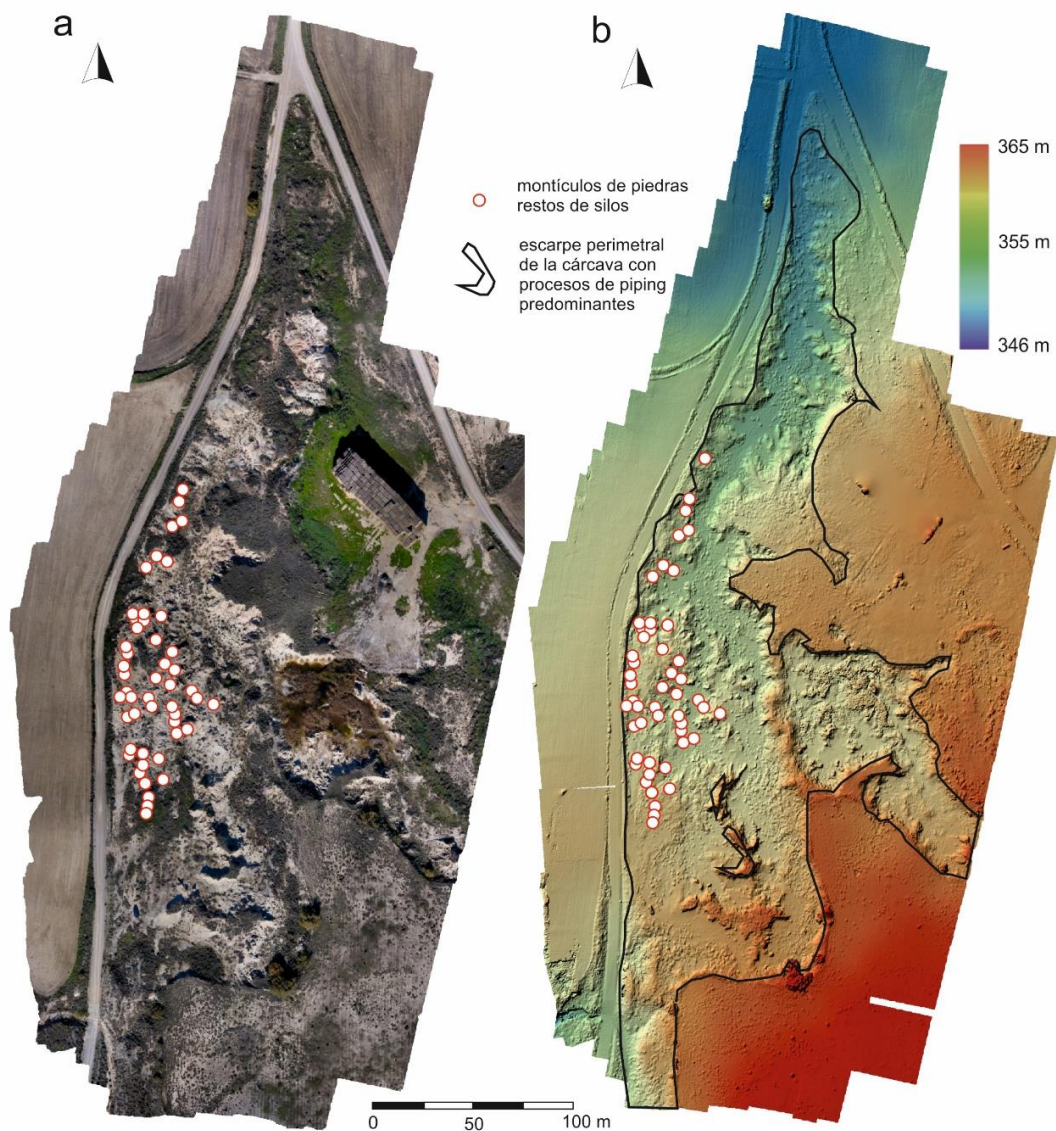


Figura 6. Ortomosaico (a) y modelo digital de elevación (b) del sitio arqueológico Los Pedregales, afectado por el desarrollo de una zona de badlands con procesos muy activos de *piping*.

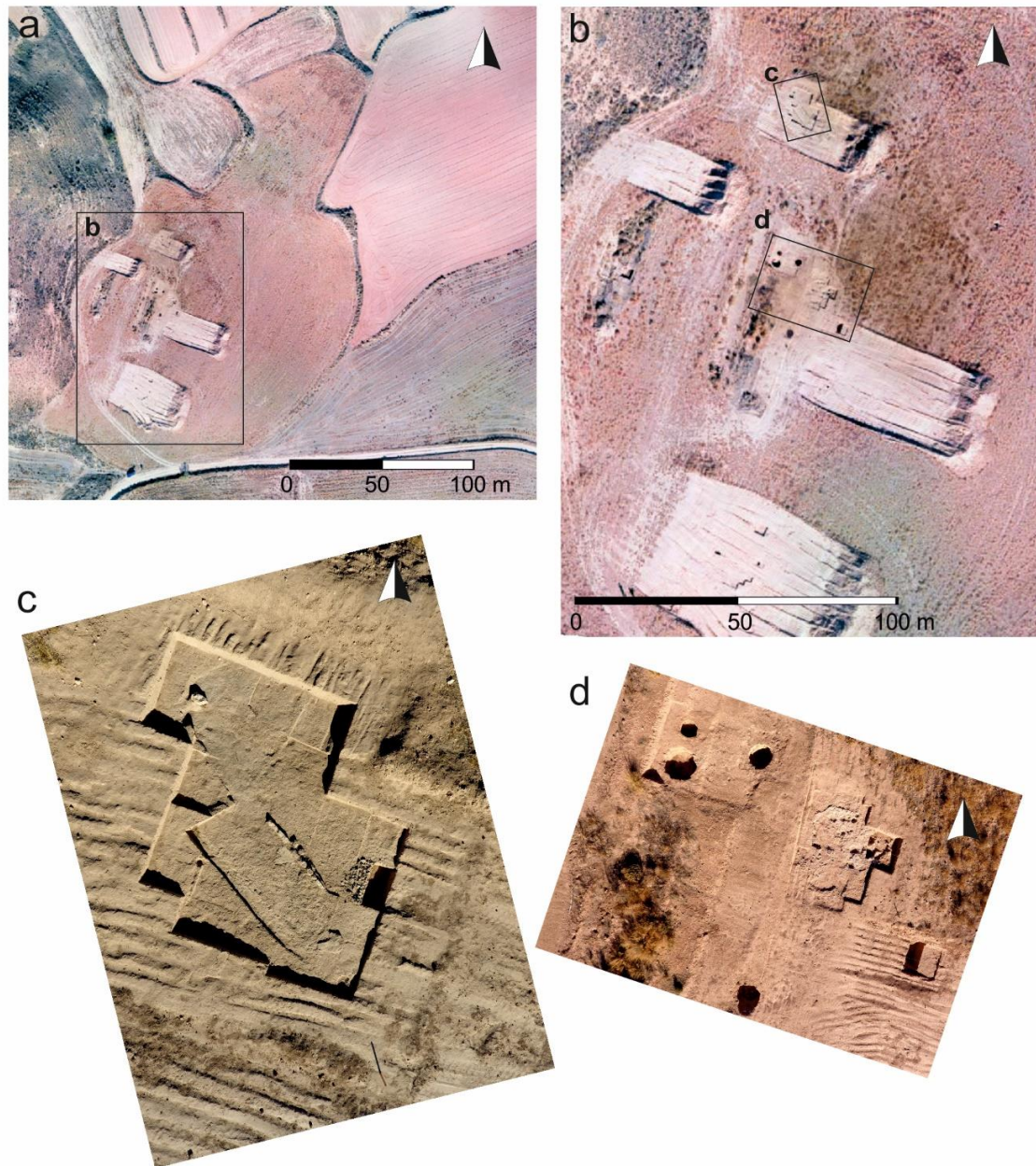


Figura 7. (a) Vista general del sitio arqueológico Collado de la Abeja; (b) zonas excavadas mecánicamente para exponer las zonas de interés arqueológico; y detalle de las cabañas 37 (c) y 10 (d) con sus silos.

En síntesis, la implementación sistemática del uso de drones para articularlo con las técnicas arqueológicas y geoarqueológicas usuales se presenta como un complemento muy promisorio de investigación, tanto por la calidad de los resultados como la inversión de tiempo y recursos necesaria.

Agradecimientos: agradecemos especialmente al Dr. Jesús Picazo Millán de la Universidad de Zaragoza por los datos aportados en relación a algunos de los yacimientos de este trabajo. Esta investigación se enmarca entre las actividades desarrolladas con la ayuda económica de CONICET para visitantes extranjeros, PIUNT G629 de SCAIT-UNT y del grupo de Investigación Paleoambientes del Cuaternario (PALEOQ) del Gobierno de Aragón (España) - Fondo Social Europeo.

Bibliografía citada

Benito, G.; Sancho, C.; Peña-Monné, J.; Machado, M. y E. Rhodes
2010 Large-scale karst subsidence and accelerated fluvial aggradation during MIS6 in NE Spain: climate and paleohydrological implications. *Quaternary Science Reviews* 29: 2694-2704.

Berrocal-Rangel, L.; Paniego Díaz, P.; Ruano, L. y G. Manglano Valcárcel
2017 Aplicaciones LiDAR a la topografía arqueológica: el Castro de Iruña (Fuenteguinaldo, Salamanca). *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología* 43: 195-215.

Bognani, F.
2010 La teledetección aplicada al estudio del pasado a una escala inter-regional. *Revista Española de Antropología Americana* 40(2): 77-93.

Campana, S.
2017 Drones in archaeology. State-of-the-art and future perspectives. *Archaeological Prospection* 24: 275-296.

Cornell, P. y N. Johansson
1993 Desarrollo del asentamiento del Sitio STucTav 5 (El Pichao). Provincia de Tucumán, comentarios sobre dataciones de 14C y luminiscencia. *Publicaciones Instituto de Arqueología 2 Investigaciones* 1: 31-43.

De Feo, M.; Gobbo, J. y R. Moralejo
2013 Hacer arqueología desde las alturas. *Museo* 26: 23-30.

Del Cogliano, D.; Moralejo, R.; Rodríguez Zar, M.; Pinto, L.; Simontacchi, L.; Mezio, V.; Munz, D.; Gómez, M.; Falip, S. y D. Gobbo
2017a LIDAR para la preservación del sitio arqueológico El Shincal de Quimivil. En 28 Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, pp. 258-259. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata. La Plata.

Del Cogliano, D.; Moralejo, R.; Rodríguez Zar, M.; Simontacchi, L.; Mezio, V.; Munz, D.; Gómez, M.; Gobbo, D. y S. Falip

2017b Detección de nuevas estructuras arqueológicas a partir de LIDAR aéreo en El Shincal de Quimivil. En *Primer Simposio Internacional de Geomática Aplicada y Soluciones Geoespaciales*, pp. 40. Geodata, Buenos Aires.

Díaz Moreno, M.; Crespo Fraguas, A.; Farjas Abadía, M.; Ruíz Serrano, C.; Martínez Pardo-Gil, G.; Alfonso Carbajosa, E.; Pereira Sieso, J.; Ludueña, S. e I. del Castillo Bargueño

2015 Aplicación de nuevas tecnologías en la Arqueología de la Guerra Civil Española: Los Yesares, Pinto (Madrid). *Virtual Archaeology Review* 6(12): 122-136.

Fernández-Lozano, J. y G. Gutiérrez-Alonso

2015 Uso de lidar y aeronaves no tripuladas para la cartografía y registro de zonas de interés geomínero. Un ejemplo de la minería aurífera romana en el valle del Eria (León, España). En *Investigaciones Arqueológicas en el Valle del Duero: Del Paleolítico a la Edad Media*, A. Álvarez Rodríguez, C. Tejedor Rodríguez e I. García Vázquez (eds.), pp. 520-536. Universidad de Valladolid, Valladolid.

2016 Improving archaeological prospection using localized UAVs assisted photogrammetry: an example from the Roman Gold District of the Eria River Valley (NW Spain). *Journal of Archaeological Science, Reports* 5: 509-520.

Fernández-Lozano, J.; Gutiérrez-Alonso, G.; Salman Monte, K.; Sánchez-Fabián, J. y F. García

2015 Tecnología VANT de bajo coste para reproducción 3D y preservación del registro arqueológico del proyecto de Geoparque las Loras (Palencia-Burgos). *Mapping* 24: 4-11.

González, A.

1956 La fotografía y el reconocimiento aéreo en las investigaciones arqueológicas del N.O.A. *Anales de Arqueología y Etnología* 12: 41-62.

Greco, C.; Raffaele, L. y A. Álvarez Larrain

2018 Fotogrametría aplicada al estudio de sitios arqueológicos de Yocavil, Catamarca. Trabajo presentado en el VII Congreso Nacional de Arqueometría. San Miguel de Tucumán.

Jones, J.

1981 *The Nature of Soil Pipping: A Review of Research*. Geobooks, Norwich.

Lamenza, G.

2015 GIS and remote sensing in the archaeological research of the Argentine Chaco. *Arqueología Iberoamericana* 27: 40-54.

Lasaponara, R. y N. Masini

2012 Remote sensing in archaeology: from visual data interpretation to digital data manipulation. En *Satellite Remote Sensing a New Tool for Archaeology*, R. Lasaponara y N. Masini (eds.), pp. 3-16. Springer, Amsterdam.

Lillesand, T.; Kiefer, R. y J. Chipman

2014 *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York.

Moralejo, R.; Del Cogliano, D.; Pinto, L.; Gobbo, D.; Muntz, D.; Simontacchi, L.; Mezio, V.; Couso, M.; Gómez, M. y S. Falip

2017 Incorporación de tecnología LIDAR en el estudio de sitios Incaicos del Noroeste Argentino: el caso de El Shincal de Quimivil (Londres, Catamarca). Poster presentado en el Taller Internacional en torno al Sistema Vial incaico: "Qhapaq Ñan II". Salta.

Moralejo, R.; Gobbo, D.; Del Cogliano, D.; Pinto, L.; Couso, M.; Simontacchi, L.; Muntz, D.; Mezio, V.; Gómez, M. y S. Falip

2018 El LiDAR como técnica de prospección en arqueología: El Shincal de Quimivil como caso de estudio. Trabajo presentado en el VII Congreso Nacional de Arqueometría. San Miguel de Tucumán.

Núñez Regueiro, V. y M. Tartusi

1993 Orígenes de la ocupación prehispánica del sitio STucTav 5 (El Pichao), Provincia de Tucumán. *Publicaciones del Instituto de Arqueología* 2: 19-30.

Parcak, S.

2009 *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. Routledge, London.

Peña-Monné, J. y M. Sampietro Vattuone

2016 Geomorphology of the alluvial fans in Colalao del Valle-Quilmes area (Santa María Valley, Tucumán Province, Argentina). *Journal of Maps* 12: 460-465.

Peña Monné, J.; Rodanés, J.; Mazo, C. y L. Montes

1986 La fotografía aérea vertical en blanco y negro y su aplicación a la prospección arqueológica y geoarqueológica. *I Jornadas sobre Metodología de la Investigación Científica sobre Fuentes Aragonesas*, pp. 219 -222. Monzón.

Peña Monné, J.; Sampietro Vattuone, M.; Longares Aladrén, L.; Pérez Lambán, F.; Picazo, J.; Sánchez Fabre, M.; Alcolea Gracia, M.; Vallés, L.; Echeverría, M. y C. Baraza

2018 Holocene alluvial sequence of Valderazagoza (Los Monegros) in the paleoenvironmental context of the Ebro Basin (Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica* 44(1): 321-348.

Peña Monné, J.; Sampietro Vattuone, M.; Maldonado, M. y S. Cano

2016a Patrimonio y conservación en el sitio arqueológico El Pichao (Noroeste Argentino). XIX Congreso Nacional de Arqueología Argentina. *Serie Monográfica y Didáctica, Facultad de Ciencias Naturales e IML, Universidad Nacional de Tucumán* 54: 1207-1213.

Peña Monné, J.; Sampietro Vattuone, M.; Maldonado, M.; Cano, S. y M. Aguirre

2016b Contexto geomorfológico y problemas de conservación en el sitio arqueológico El Pichao (valle de Santa María, Noroeste Argentino). En *Geoarqueología de los Valles Calchaquíes*, M. Sampietro Vattuone y J. Peña Monné (eds.), pp. 165-184. Laboratorio de Geoarqueología, Universidad Nacional de Tucumán.

Peña-Monné, J.; Sampietro Vattuone, M.; Picazo, J.; Longares, L.; Pérez-Lambán, F. y D. Badía

2017 Application of geoarchaeological evolutionary models for the interpretation of complex archaeological structures in the central Ebro Basin (Spain). *Quaternary International* 483: 70-82.

Pérez-Lambán, F.; Picazo Millán, J. y J. Fanlo Loras

2015 La Edad del Bronce en el valle del río Huerva. Los yacimientos de Los Collados (Jaulín) y Collado de la Abeja (Muel). Poster presentado en el I Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés. Zaragoza.

Picazo Millán, J.; Pérez Lambán, F.; Peña Monné, J.; Sampietro, M.; Longares Aladrén, L.; Justes Floriá, J. y J. Ortega Ortega

2016 Los Pedregales (Lupiñén-Ortilla, Huesca): contribución al conocimiento del poblamiento altomedieval en la Hoya de Huesca. *Archivo Español de Arqueología* 89: 225-248.

Quirantes, J.

1978 *Estudio Sedimentológico del Terciario Continental de Los Monegros*. Instituto Fernando el Católico, Zaragoza.

- Roldán, J.; Maldonado, M.; Urquiza, S.; Vattuone, M. y M. Sampietro Vattuone
2016 Suelos antrópicos vs. naturales: La Costa 2 (Valle de Tafí, Tucumán). *Arqueología* 22(1): 127-148.
- Ruiz Sabina, J.; Gallego Valle, D.; Peña Ruiz, C.; Molero García, J. y A. Gómez Laguna
2015 Fotogrametría aérea por dron en yacimientos con grandes estructuras. Propuesta metodológica y aplicación práctica en los castillos medievales del Campo de Montiel. *Virtual Archaeology Review* 13(6): 5-19.
- Sampietro Vattuone, M.
2009 La fotografía aérea en la arqueología argentina. *Revista Arakuku* 1: 16-23.
- Sampietro-Vattuone, M. y J. Peña-Monné
2016 Geomorphological dynamic changes during the Holocene through ephemeral stream analyses from Northwest Argentina. 0 147: 663-677.
- Sampietro-Vattuone, M.; Peña-Monné, J.; Roldán, J.; Maldonado, M.; Lefebvre, M. y M. Vattuone
2018 Human-driven geomorphological processes and soil degradation in Northwest Argentina: a geoarchaeological view. *Land Degradation and Development* 29(11): 3852-3865.
- Schlitz, M.
2004 A review of low-level aerial archaeology and its application in Australia. *Australian Archaeology* 59: 51-58.
- Verhoeven, G.
2009 Providing an archaeological bird's-eye view -an overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in archaeology. *Archaeological Prospection* 16: 233-249.
- Walker, J. y S. De Vore
1995 *Low Altitude Large Scale Reconnaissance: A Method of Obtaining High Resolution Vertical Photographs for Small Areas*. Rocky Mountain Regional Office, National Park Service, Denver.

