



ANEJOS DE

na:ilos

Estudios
Interdisciplinarios
de Arqueología



A4

Octubre 2018
OVIEDO

Anejos de NAILOS
Número 4
Oviedo, 2018
ISSN 2341-3573

Asociación de
Profesionales
Independientes de la
Arqueología de
Asturias

Anejos de
Nailos
Estudios Interdisciplinarios
de Arqueología

**Jornadas
de Arqueología
Española
en el Exterior**

Juan R. Muñiz Álvarez (coordinador)

Oviedo, 2018

En recuerdo de Juan Antonio Fernández-
Tresguerres Velasco (1941-2011)



ANEJOS DE  **na:los**

Estudios
Interdisciplinares
de Arqueología



Consejo Asesor

José Bettencourt
Universidade Nova de Lisboa

Rebeca Blanco-Rotea
*Universidade de Minho /
Universidad de Santiago de
Compostela*

Miriam Cubas Morera
Universidad de York

Camila Gianotti
*Universidad de la República
(Udelar)*

Adolfo Fernández
Fernández
Universidad de Vigo

Manuel Fernández-Götz
University of Edinburgh

Juan José Ibáñez Estévez
*Institución Milá i Fontanals,
CSIC*

Juan José Larrea Conde
Universidad del País Vasco

José María Martín Civantos
Universidad de Granada

Aitor Ruiz Redondo
Université de Bordeaux

Ignacio Rodríguez Temiño
Junta de Andalucía

José Carlos Sánchez Pardo
*Universidad de Santiago de
Compostela*

David Santamaría Álvarez
Arqueólogo

Consejo Editorial

Alejandro García Álvarez-Busto
Universidad de Oviedo

César García de Castro Valdés
Museo Arqueológico de Asturias

David González Álvarez
*Instituto de Ciencias del Patrimonio,
CSIC / Durham University*

María González-Pumariega Solís
Gobierno del Principado de Asturias

Carlos Marín Suárez
Universidad de la República, Uruguay

Andrés Menéndez Blanco
Universidad de Oviedo

Sergio Ríos González
Arqueólogo

Patricia Suárez Manjón
Arqueóloga

José Antonio Fernández
de Córdoba Pérez
*Secretario
Arqueólogo*

Fructuoso Díaz García
*Director
Fundación Municipal de Cultura de Siero*

naïlos

**Estudios
Interdisciplinares
de Arqueología**

ISSN 2340-9126
e-ISSN 2341-1074
C/ Naranjo de Bulnes 2, 2º B
33012, Oviedo
secretario@naïlos.org
www.naïlos.org

Naïlos nº 4. Octubre de 2018
© Los autores

Edita:
Asociación de Profesionales
Independientes de la Arqueología
de Asturias (APIAA).
Hotel de Asociaciones Santullano.
Avenida Joaquín Costa nº 48.
33011. Oviedo.
apia.asturias@gmail.com
www.asociacionapiaa.com
Lugar de edición: Oviedo
Depósito legal: AS-01572-2013



CC BY-NC-ND 4.0 ES

Se permite la reproducción de los artículos, la cita y la utilización de sus contenidos siempre con la mención de la autoría y de la procedencia.

NAÏLOS: Estudios Interdisciplinares de Arqueología es una publicación científica de periodicidad anual, arbitrada por pares ciegos, promovida por la Asociación de Profesionales Independientes de la Arqueología de Asturias (APIAA)

Bases de datos que indizan la revista | Bielefeld Academic Search Engine (BASE); Biblioteca Nacional de España; CAPES; CARHUS Plus+ 2014; Catàleg Col·lectiu de les Universitats de Catalunya (CCUC); Catalogo Italiano dei Periodici (ACNP); CiteFactor; Copac; Dialnet; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Dulcinea; Elektronische Zeitschriftenbibliothek (EZB); ERIH PLUS; Geoscience e-Journals; Interclassica; ISOC; Latindex; MIAR; NewJour; REBIUN; Regesta Imperii (RI); Sherpa/Romeo; SUDOC; SUNCAT; Ulrich's-ProQuest; Worldcat; ZDB-network

Portada: Resto de la bóveda de la iglesia jesuita de Gorgora Nova junto a la orilla del lago Tana en Etiopía. Víctor M. Fernández Martínez. Diseño y Maquetación: Miguel Noval.

Promueve

apiaa

Asociación de Profesionales
Independientes de la Arqueología
de Asturias

Financia



OVIEDO
AYUNTAMIENTO



Colaboran

MUSEO ARQUEOLÓGICO DE ASTURIAS



EL COMERCIO

Sumario

Presentación Juan R. Muñiz Álvarez	13-19
Ángel Armendariz Gutiérrez, Juan José Ibáñez Estévez, Maya Haïdar-Boustani, Jesús Emilio González Urquijo, Amelia del Carmen Rodríguez Rodríguez y Luis Teira Mayolini <i>El Natufiense del levante mediterráneo y el nuevo sitio de Jeftelik</i> (Siria centro-occidental)	21-39
Pastor Fábrega-Álvarez, César Parceró-Oubiña, Patricia Mañana-Borrazás, Alejandro Güimil-Fariña, Mariela Pino, César Borie, Cristián González Rodríguez y Jorge Canosa-Betés <i>Empleo de UAV para la documentación efectiva y de bajo coste de espacios</i> <i>arqueológicos. Una experiencia en sistemas agrícolas prehispánicos</i> <i>en Atacama (N. Chile)</i>	41-69
Agustín Azkarate, Sergio Escribano-Ruiz, Iban Sánchez-Pinto y Verónica Benedet <i>Sancti Spiritus, 1527-1529. El primer intento colonizador del Cono Sur (Argentina)</i>	71-88
Víctor M. Fernández Martínez <i>Arqueología de las misiones jesuitas en Etiopía (1557-1632)</i>	91-108
Jorge De Juan Ares y Yasmina Cáceres Gutiérrez <i>Excavaciones arqueológicas en Cidade Velha (Cabo Verde).</i> <i>Balance de tres años de investigación</i>	111-141
Luis Blanco Vázquez <i>Tras los pasos del coronel Bens. Los restos de la presencia colonial española</i> <i>en la costa del Sáhara: Villa Cisneros, Cabo Juby y La Agüera</i>	143-163
Manuel J. Parodi Álvarez <i>El Museo Arqueológico de Tetuán (1923-1946) en el 150 aniversario</i> <i>del nacimiento de Pelayo Quintero</i>	165-182

Sumario

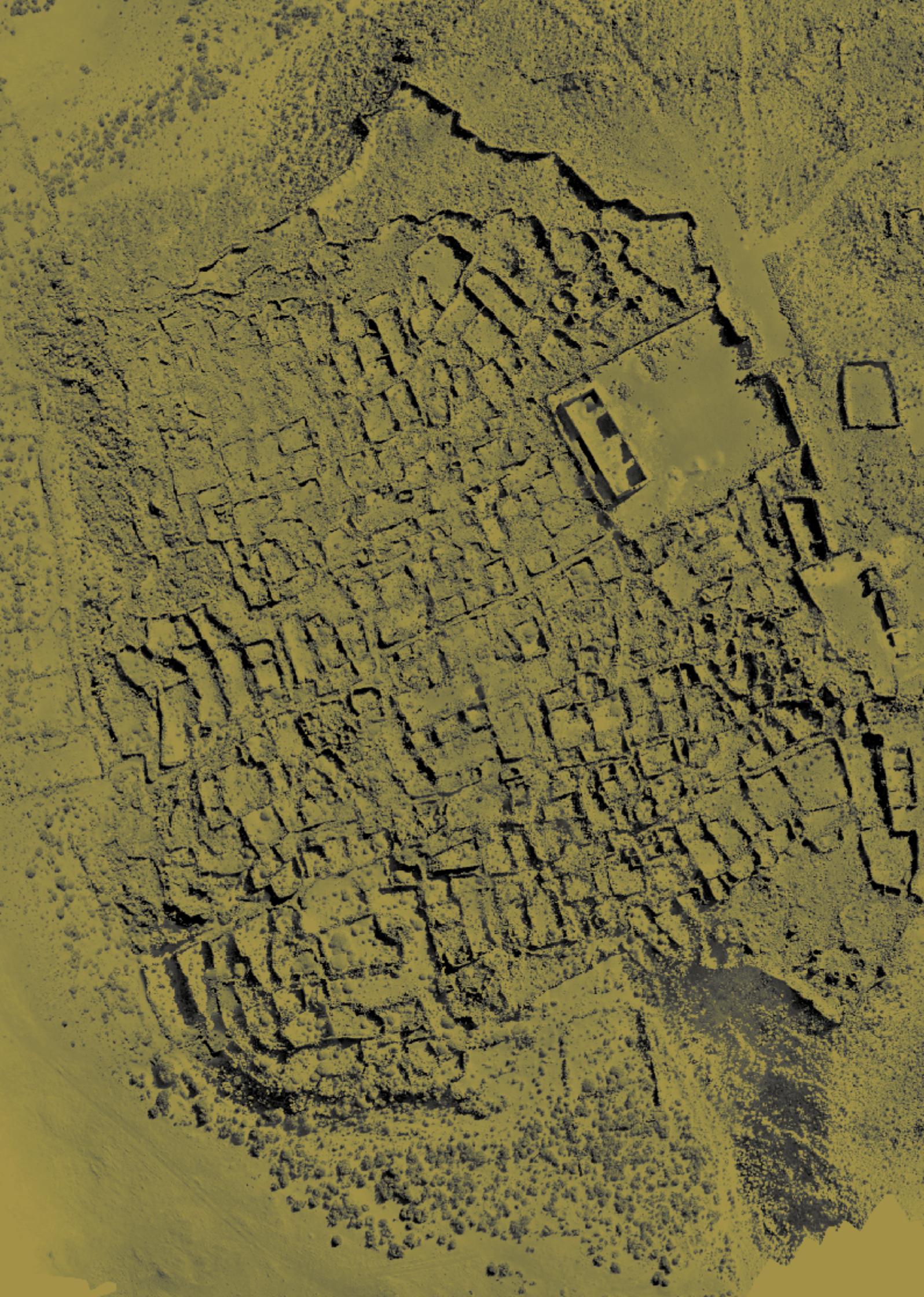


Summary

Presentación Juan R. Muñiz Álvarez	13-19
Ángel Armendariz Gutiérrez, Juan José Ibáñez Estévez, Maya Haïdar-Boustani, Jesús Emilio González Urquijo, Amelia del Carmen Rodríguez Rodríguez y Luis Teira Mayolini <i>The Natufian of the levant and the new site at jeftelik (central-western syria)</i>	21-39
Pastor Fábrega-Álvarez, César Parceró-Oubiña, Patricia Mañana-Borrazás, Alejandro Güimil-Fariña, Mariela Pino, César Borie, Cristián González Rodríguez y Jorge Canosa-Betés <i>Using UAVs to record archaeological sites in an effective and affordable way. The prehispanic fields in the Atacama Desert (N. Chile) case</i>	41-69
Agustín Azkarate, Sergio Escribano-Ruiz, Iban Sánchez-Pinto y Verónica Benedet <i>Sancti Spiritus, 1527-1529. The first colonizing attempt of the Cone South (Argentina)</i>	71-88
Víctor M. Fernández Martínez <i>The archaeology of the Jesuit missions in Ethiopia (1557-1632)</i>	91-108
Jorge De Juan Ares y Yasmina Cáceres Gutiérrez <i>Archaeological excavations in Cidade Velha (Cape Verde). Three years of research</i>	111-141
Luis Blanco Vázquez <i>In the footsteps of Colonel Bens. The remains of the Spanish colonial presence in the Sahara coast: Villa Cisneros, Cabo Juby and La Agüera</i>	143-163
Manuel J. Parodi Álvarez <i>The Archaeological Museum of Tetouan (1923-1946) in the 150th anniversary of the birth of Pelayo Quintero</i>	165-182

Summary







02

Empleo de UAV para la documentación efectiva y de bajo coste de espacios arqueológicos. Una experiencia en sistemas agrícolas prehispánicos en Atacama (N. Chile)

Using UAVs to record archaeological sites in an effective and affordable way. The prehispanic fields in the Atacama Desert (N. Chile) case

Pastor Fábrega-Álvarez, César Parcero-Oubiña, Patricia Mañana-Borrazás, Alejandro Güimil-Fariña, Mariela Pino, César Borie, Cristián González Rodríguez y Jorge Canosa-Betés

Resumen

Este artículo detalla la contribución de los llamados UAV o drones para la documentación en arqueología, a partir del caso de un amplio conjunto de elementos agrícolas (campos de cultivo, canales de riego) y espacios de asentamiento prehispánicos en el área desértica de Atacama (norte de Chile). Aprovechando la excelente conservación y visibilidad en superficie de estos elementos arqueológicos, propiciada por las particulares condiciones ambientales de la zona, el trabajo de mapeo y documentación allí realizado se basó inicialmente en una combinación del empleo de imágenes de satélite de alta resolución espacial (GeoEye 1) y trabajo de prospección en campo.

Con ello se logró una detallada documentación de los espacios en estudio, aunque limitada por la falta de detalle suficiente de las imágenes de satélite en algunas

Pastor Fábrega-Álvarez: Instituto de Ciencias del Patrimonio (Incipit), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) | pastor.fabrega-alvarez@incipit.csic.es

César Parcero-Oubiña: Instituto de Ciencias del Patrimonio (Incipit), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) | cesar.parcero-oubina@incipit.csic.es

Patricia Mañana-Borrazás: Dimenso S.L.; Investigadora colaboradora del Instituto de Ciencias del Patrimonio (Incipit), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Alejandro Güimil-Fariña: Dimenso S.L.; Investigador colaborador del Instituto de Ciencias del Patrimonio (Incipit), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Mariela Pino: Departamento de Antropología, Universidad de Chile

César Borie: Programa de Doctorado en Arqueología, Universidad Católica del Norte – Universidad de Tarapacá

Cristián González Rodríguez: Arqueólogo independiente

Jorge Canosa-Betés: Instituto de Ciencias del Patrimonio (Incipit), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)



áreas concretas. Para complementar ese trabajo con una aproximación más detallada, se realizó una documentación basada en técnicas de *computer vision* (*Structure From Motion*) a partir de fotografías tomadas desde un UAV sencillo y de bajo coste. Con estas fotografías se produjeron modelos 3D y ortoimágenes de gran resolución de áreas de cultivo y asentamientos.

La principal contribución ha sido la producción de documentos planimétricos de gran detalle y precisión de un extenso conjunto de elementos arqueológicos, que han servido tanto para entender mejor estos espacios como para diseñar y planificar futuras campañas de trabajo de campo.

En este artículo describimos el proceso de trabajo y realizamos una valoración de la relación entre tiempo de trabajo – recursos técnicos empleados – condiciones del trabajo – resultados obtenidos. Además, comparamos el proceso de trabajo y los resultados obtenidos con dos equipos diferentes.

Palabras clave: drones; mapeo; prospección; fotogrametría; arqueología agraria; Atacama; período prehispánico.

Abstract

The paper summarizes the contribution of UAV to archaeological recording by means of the case of a vast group of late Prehispanic agrarian elements (fields, irrigation canals) in the dry Atacama area (northern Chile). Taking advantage of the extraordinary preservation and visibility of fields, canals and other constructions, the general mapping of the area was based on a combination of visual interpretation of high resolution satellite images (GeoEye 1) and fieldwork.

However, despite their high resolution, satellite images did not provide sufficient detail in some areas. A more detailed approach was needed to produce an adequate recording of fields, settlement areas and singular constructions. A Structure From Motion-based computer vision approach was carried out, based on the use of a low cost UAV (Dji Phantom) and a consumer-grade compact digital camera for taking low altitude aerial images that allowed the generation of 3D models and orthoimagery of great detail.

The main contribution has been the generation of a highly detailed and accurate map of a complex group of archaeological structures, used since then for the analysis and interpretation of the area, and also for the design of new fieldwork seasons.

In this paper we describe the workflow and assess the ratio between working time, tools and quality of the results. Besides, we compare the workflow and results of two different instruments.

Keywords: drones; mapping; survey; photogrammetry, agrarian archaeology; Atacama; Prehispanic period



1. Introducción: paisajes agrícolas prehispánicos en el norte de Chile

Las tierras altas del actual norte de Chile fueron, durante los llamados Períodos Intermedio Tardío (ca. 950-1450 d. C.) y Tardío o Inka (ca. 1450-1540 d. C.), un escenario con sociedades diversas y trayectorias históricas independientes, que sin embargo comparten una serie de rasgos esenciales. Entre ellos, la creciente dependencia de estas sociedades de una economía agrícola de amplia escala. En efecto, las aldeas aglutinadas que se desarrollan a partir del Período Intermedio Tardío se asocian con frecuencia a obras de ingeniería agrohidráulica que transformaron el paisaje por medio de complejos sistemas de terrazas, andenes, canales y acequias.

Siendo la producción agrícola o agropastoril la base de la economía de estas poblaciones a partir del segundo milenio de nuestra era, la dominación incaica no pudo sino generar transformaciones sobre este sistema, seguramente ampliando las superficies cultivables como forma de generar excedentes para financiar las obras y administración del estado en este territorio (Llagostera 1976, Santoro et al. 1987, entre otros).

No obstante, pese a la importancia de los sistemas de producción agrícola en el norte de Chile durante estos períodos Intermedio Tardío y Tardío, hasta la fecha este no ha sido un tema de investigación abordado con frecuencia en la zona a una escala detallada. La mayoría de los estudios previos constituyen aproximaciones preliminares y/o descripciones generales de los elementos materiales que conforman estos sistemas productivos (cf. Osorio y Santoro 1989, Alliende et al. 1993, Núñez 1993a, Núñez 1993b, Santoro et al. 1998, Malim 2009).

El proyecto del que este trabajo forma parte tiene como objetivo analizar en detalle un espacio productivo y social de este estilo, el que se desarrolló en el entorno del área conocida como Vegas de Turi, en el Alto Loa, región de Antofagasta (Figura 1). En esta área se localizan tres asentamientos con ocupaciones que abarcan, de manera variable, los dos períodos de interés (PIT y Tardío): los sitios de Turi, Topaín y Paniri. En el entorno de estos dos últimos se conservan los restos de sendos sistemas de campos de cultivo y obras de irrigación, que abarcan en total una superficie aproximada de unas 60 Has. (Parcero-Oubiña et al. 2015, Parcero-Oubiña et al. 2017, Parcero-Oubiña et al. 2016). En general su estado de conservación y visibilidad en superficie son excelentes (Figura 2), lo que nos permitió plantearnos la posibilidad de desarrollar un proyecto orientado a caracterizar las prácticas productivas prehispánicas en esta área a partir del análisis detallado de este conjunto de elementos materiales. El proyecto, que arrancó en 2010, es una iniciativa fuertemente interdisciplinar (involucrando el trabajo de especialistas en arqueología, paleoambiente, geomorfología, edafología, antropología, tecnologías geoespaciales,...) liderada de

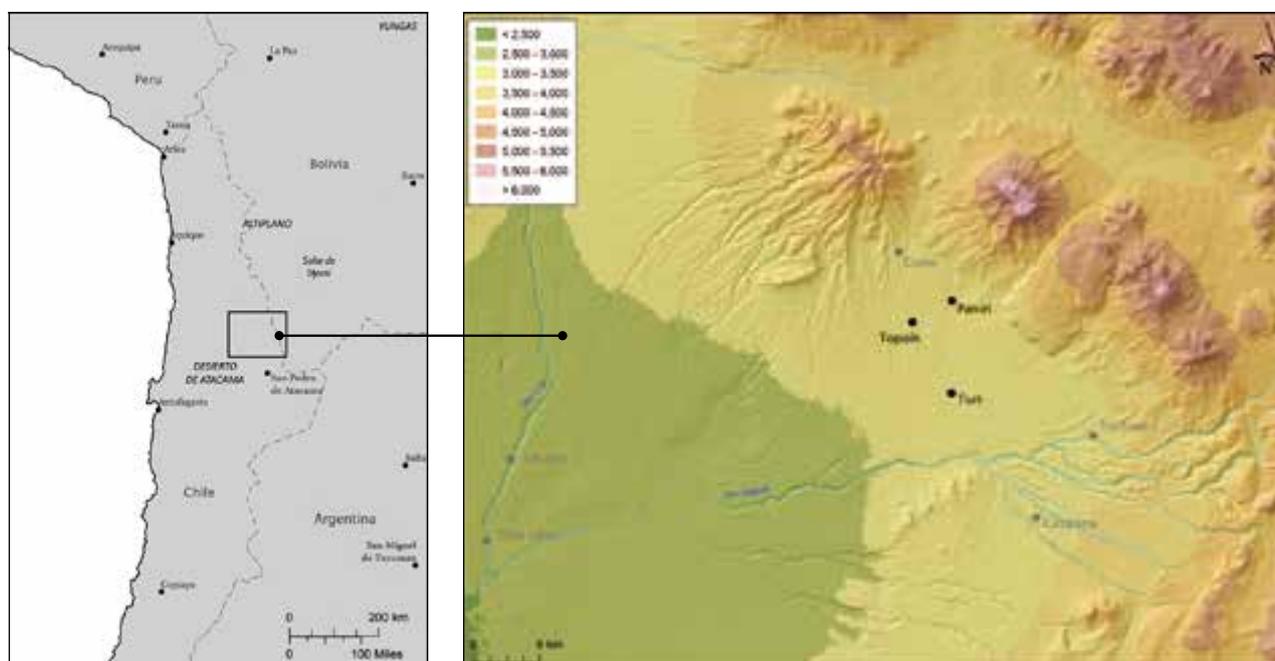


Figura 1. Localización de la zona de trabajo. A la derecha, sitios de trabajo del proyecto; en gris, otros sitios contemporáneos en las proximidades.

manera conjunta desde la Universidad de Chile, la University of New Mexico (USA) y el Instituto de Ciencias del Patrimonio (Incipit, España).

2. Objetivos, metodología y herramientas

2. 1. Objetivos

El objetivo genérico del proyecto es el análisis y comprensión de las formas de producción y organización de la misma en esta área en época prehispánica, entre el PIT y el período Tardío, prestando especial atención a las eventuales transformaciones ocurridas entre ambos momentos. De manera más concreta, el proyecto pretende:

- Reconstruir el funcionamiento de los sistemas productivos y sus transformaciones históricas.
- Comprender el rol de la producción agrícola en las dinámicas sociales de la época y la reproducción de las comunidades atacameñas prehispánicas.



Figura 2. En estos sitios es notable la visibilidad en superficie y el estado de conservación de las estructuras agrarias y de riego: campos a la izquierda, y canal de riego a la derecha.

- Caracterizar la evolución de la secuencia paleoambiental a escala local y correlacionarla con las modificaciones en las formas productivas documentadas.

De entre las diferentes acciones realizadas para contribuir a esos objetivos, el presente texto se centra en un aspecto específico de aquellas orientadas a la documentación y mapeo del amplio conjunto de evidencias existentes: redes de canales, terrazas, campos de cultivo y espacios de asentamiento. En concreto, presentaremos aquí detalles acerca de la contribución que a esa documentación ha supuesto el empleo de imágenes aéreas tomadas con un UAV (Unmanned Aerial Vehicle o dron) sencillo y económico.

Como en cualquier otro trabajo arqueológico, la construcción de un registro de la evidencia disponible representa una fase esencial. En este caso esto se hace particularmente complejo por las razones opuestas a lo que es habitual cuando trabajamos en regiones templadas: si en muchos casos las dificultades para construir un registro están sobre todo en la escasez de información arqueológica accesible desde la superficie del terreno, en este caso las complicaciones vienen dadas por la excelente visibilidad superficial del registro, lo que motiva que la cantidad de elementos a documentar sea muy grande.

2. 2. Metodología para la documentación y mapeo

Considerando lo anterior, se diseñó un proceso de trabajo que recurrió en gran medida a la utilización de recursos y tecnologías geoespaciales para planificar y apoyar todos los procesos de documentación en campo. El diseño general de esta secuencia de trabajo, y las herramientas y equipos empleadas para la documentación a escala amplia de los sitios, han sido descritas en detalle en

algunas publicaciones recientes, por lo que únicamente las resumiremos aquí de manera muy breve (ver Parcero-Oubiña *et al.* 2017, Parcero-Oubiña *et al.* 2016).

Un factor clave en el diseño de esa estrategia son las condiciones del paisaje que, como ya fue dicho, han contribuido a una excelente conservación y visibilidad de las estructuras arqueológicas. Esto es cierto tanto en superficie como en una visión desde el aire, ya que la mayor parte de estas estructuras son nítidamente visibles en imágenes de satélite con una suficiente resolución espacial. Así, la secuencia de trabajo partió de una fotointerpretación de imágenes satelitales del sensor GeoEye 1 (50 cm. de resolución pancromática), para generar un plano orientativo de la extensión y variedad de elementos existentes. Sobre ella, se realizaron varias campañas de relevamiento en campo. Este trabajo, como se describe en más detalle en otros lugares (Parcero-Oubiña *et al.* 2015, Parcero-Oubiña *et al.* 2017, Parcero-Oubiña *et al.* 2016), nos permitió construir un amplio y detallado registro en un entorno GIS de la mayor parte de los elementos existentes en toda la extensión de la zona de trabajo y hasta un cierto grado de detalle.

Ese detalle ha resultado de gran utilidad para entender una buena parte de los elementos existentes, pero sin embargo es aún insuficiente en algunos casos concretos. Así, en algunas zonas la densidad, tamaño y apariencia de las estructuras hacen que estas no sean claramente identificables en la imagen de satélite, o que lo sean con una resolución deficiente. Un claro ejemplo son los espacios de los poblados, que no es posible mapear de manera adecuada por medio de la imagen GeoEye ya que las construcciones aparecen confusas y poco definidas (Figura 3, compárese con la Figura 18). Estas limitaciones en el detalle proporcionado por la imagen de satélite son extensibles a cualquiera de los demás espacios (campos, terrazas, canales) cuando lo que queremos es no solo mapear y describirlos de manera genérica (cuánta superficie ocupan, cuál es su localización relativa), sino que pretendemos documentarlos de manera detallada (cómo se estructura internamente un espacio de campos, cómo se organiza el flujo del agua adentro de los campos, cómo se conectan entre sí los diferentes elementos que componen cada espacio). Este tipo de documentación se haría habitualmente a través del dibujo manual o del levantamiento planimétrico de detalle con herramientas topográficas. En nuestro caso, dada la gran extensión de los espacios con que trabajamos y la enorme densidad de estructuras existentes en ellos, este tipo de aproximación tradicional tendría un coste demasiado alto en tiempo y esfuerzo invertido en el campo. Alternativamente, la propuesta fue realizar una documentación de estos espacios mediante una serie de vuelos fotográficos realizados con un UAV. A partir de las imágenes tomadas, y empleando software basado en la tecnología Structure From Motion (De Reu *et al.* 2014, De Reu *et al.* 2012, Doneus *et al.* 2011, Verhoeven *et al.* 2012), se podría generar una documentación 3D de gran detalle y calidad en poco tiempo y con un coste muy asumible.



Figura 3. La resolución de la imagen GeoEye resulta insuficiente para distinguir con claridad la estructura interna de espacios densamente construidos, como el área del poblado de Topain.

2. 3. El recurso a UAV: herramientas y equipos empleados

El equipamiento empleado consistió en una corta serie de elementos de bajo coste y manejo sencillo. Los UAV que empleamos en las diferentes campañas de trabajo pertenecen a la familia Phantom de DJI, una gama de vehículos de manejo realmente sencillo y coste reducido, pensados para usuarios domésticos y para un uso amateur. Dada la rapidez con la que esta novedosa tecnología ha ido evolucionando, pudimos tener ocasión de usar dos versiones diferentes de este aparato.

2. 3. 1. DJI Phantom 1

En las dos primeras campañas en que hicimos este tipo de documentación (2013 y 2014) disponíamos de un Phantom 1, la primera versión de este aparato. Sus principales puntos fuertes son la facilidad de pilotaje, pequeño tamaño y peso, y precio asequible (en aquél momento, unos 500 euros, Figura 4). El Phantom 1 permite diferentes modos de vuelo y control, alguno de ellos realmente sencillo de implementar y muy intuitivo, lo que hace que la curva de



Figura 4. DJI Phantom 1 usado en los dos primeros años del proyecto.



Figura 5. Detalle del sistema que construimos para poder adaptar una cámara de fotos estándar al Phantom.

aprendizaje para su manejo sea realmente rápida. En nuestro caso, y sin experiencia previa alguna con este tipo de equipos, fuimos capaces de adquirir una solvencia suficiente en su manejo en apenas un par de días. Además, es un equipo ligero y compacto de transportar, sencillo de desmontar y montar, lo que facilitó mucho su traslado tanto desde España a Chile como el traslado diario entre el campo y el lugar donde teníamos establecida la base del proyecto.

Sin embargo, es un equipo con algunos puntos débiles notables. El más evidente es que no permite realizar vuelos programados y planificados mediante un sistema GPS, ni disponer de control directo sobre la cámara instalada en él. Por ello, todo el manejo en campo se realiza manualmente, lo que, como veremos, implica diseñar un sistema de trabajo que permita asegurarse de que se está cubriendo de manera adecuada la zona de interés. La segunda limitación más destacable de este equipo es la reducida autonomía de vuelo. El Phantom 1 funciona con baterías LiPo (polímero de litio), que en condiciones normales nos permitieron unos tiempos de vuelo (sin peso adicional en el equipo) de unos 15 minutos por batería. Al añadir el peso de la cámara de fotos, este tiempo se reducía a entre 5-8 minutos, dependiendo de las condiciones de viento. Para maximizar la cantidad de trabajo realizada cada día, adquirimos varias baterías adicionales (hasta un total de 12, con un coste de unos 25 Us\$ por unidad), lo que nos permitió trabajar con el equipo durante unas 2.5 horas por día (incluyendo los tiempos de las operaciones de cambio de baterías).

El Phantom 1 está diseñado específicamente para trabajar con la cámara GoPro Hero, muy ligera y de manejo sencillo. De hecho, incluye de serie un soporte específico para esta cámara que, sin embargo, no sirve para cualquier otra. En nuestro caso no consideramos que el empleo de la GoPro fuese la mejor opción posible, ya que el objetivo que monta por defecto es un súper gran angular

(170° de visión, equivalente aproximadamente a una distancia focal de 12 mm en formato de 35 mm), con lo que genera imágenes con notable distorsión en los bordes, lo cual no es la opción óptima para su uso con fines fotogramétricos. Nuestra opción fue montar en el Phantom 1 una cámara compacta convencional, con un objetivo menos extremo, que tenía que cumplir dos condiciones:

- Ser ligera, para maximizar el tiempo de vuelo que las baterías del Phantom permiten.
- Disponer de una opción de disparo automático a intervalos, para que la cámara tomase fotos de manera automática. La opción alternativa a ésta, equiparla con un control remoto, la descartamos porque suponía por un lado un coste adicional, y por otro añadir más peso al equipo, afectando de nuevo al tiempo de vuelo disponible.

Inicialmente empleamos una Ricoh Gr2, que cumple ambas condiciones: es una cámara ligera (< 200 gr.), con un sensor de 10 Mpix y objetivo de 28 mm equivalente en formato de 35 mm, que incorpora la opción de disparo automático con un intervalo mínimo de 5 segundos. En un momento de la campaña realizada en julio de 2014 un accidente con el equipo provocó la avería de la cámara, y nos vimos obligados a comprar una de reemplazo. Las opciones disponibles en la zona eran pocas, y ninguna de ellas disponía por defecto de la opción de disparo automático. Finalmente adquirimos una Canon Ixus 140 (ELPH 130 en América), que solo pesa 133 gr., siendo por lo demás bastante equivalente a la Ricoh (28 mm., 16 Mpix), a la que pudimos forzar a trabajar en modo de toma automática instalando en ella el firmware modificado por el Canon Hack Development Kit¹. Entre otros cambios, esto nos permitió realizar fotos a intervalos más cortos, de 3 segundos, con lo que podíamos aprovechar mejor el corto tiempo de vuelo de cada batería.

El montaje de cualquiera de estas dos cámaras en el Phantom 1 requirió también de un trabajo adicional, ya que, como mencionamos, el soporte que este trae únicamente sirve para la GoPro. En nuestro caso, elaboramos un soporte combinando por un lado un adaptador antivibración de aluminio y apoyos de goma, y por otro lado un cabezal de tornillo estándar procedente de un minitrípode (Figura 5). De este modo, además, logramos mejorar la calidad de las imágenes, ya que el adaptador antivibración contribuye efectivamente a minimizar la transferencia de la vibración de dron a la cámara. El coste total de esto fue de unos 15 €.

¹ <http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK>



Figura 6. DJI Phantom 3 Standard.

2. 3. 2. DJI Phantom 3

En las campañas de 2015 y 2016 dispusimos ya de un equipo más actualizado, el Phantom 3 Standard, una versión más reciente del mismo UAV, que incorpora algunas novedades ciertamente muy apreciables. Entre ellas destacan tres:

- En primer lugar, esta versión incorpora unas baterías con mucha más capacidad, que permiten ampliar el tiempo de vuelo hasta 15-20 minutos, dependiendo de las condiciones (intensidad del viento sobre todo). Esto supone una considerable mejora, ya que con únicamente 2 baterías es posible superar la ½ hora de trabajo efectivo en campo.
- En segundo lugar, este equipo incorpora una cámara propia, muy ligera y de alta resolución (12 MP), con una lente equivalente a 20 mm en distancia focal 35mm². La cámara viene ya montada en una plataforma específicamente diseñada para ella y además puede ser girada remotamente desde el control del dron. De nuevo, esto facilita mucho el manejo del equipo, y además contribuye a mejorar el tiempo de vuelo ya que la cámara es extremadamente ligera.
- Finalmente, este equipo incluye también mejoras en el software, entre las que destaca la incorporación de un sistema de monitoreo y control remoto que, instalado en una tablet o un smartphone, permite manejar desde esa pantalla la cámara del dron. Así, es posible visualizar en tiempo real en la pantalla de la tablet lo que la cámara del dron está viendo en cada momento, y también manejarla desde ahí (por ejemplo, disparando fotos por medio de un botón en la pantalla de la tablet, o iniciando y deteniendo la grabación de video). Además, este software permite controlar también en la tablet otros parámetros

2 <https://www.dji.com/es/phantom-3-standard/info>

del vuelo, como la carga restante en las baterías, la cantidad de satélites activos en el receptor GPS del dron, etc.

Todo ello supuso una muy notable mejora en el proceso de trabajo de campo, resultando en una mayor eficiencia en la toma de fotografías (y, por tanto, el descarte de muchas menos imágenes). Además, facilitó el propio trabajo de campo al no hacer necesaria ya la ayuda de asistentes para garantizar la cobertura adecuada de la zona de interés (ver apartado siguiente).

2. 4. Proceso de trabajo de campo

Dadas las diferentes prestaciones de los dos equipos usados, el proceso en campo resultó diferente en cada caso. Con el Phantom 1 hubimos de encontrar la manera de salvar algunas dificultades prácticas, que con el Phantom 3 resultaron mucho más sencillas de abordar. Describimos a continuación el proceso de trabajo con ambos equipos.

2. 4. 1. DJI Phantom 1

Como venimos diciendo, con este primer equipo el proceso de trabajo seguido implicó un par de aspectos prácticos más o menos delicados, que conviene comentar aquí.

El primero, y más notable, es el procedimiento seguido para garantizar una adecuada cobertura de la zona de interés en cada caso. Como comentamos más arriba, el Phantom 1 carece de la posibilidad de planificar previamente un vuelo definiendo unas coordenadas de referencia, por lo que todo el proceso ha de hacerse manualmente. Cuando nos situamos sobre el terreno, y a poco que elevemos el aparato y lo alejemos de nosotros, resulta bastante complicado determinar la vertical sobre la que está volando en cada momento, por lo que puede ocurrir fácilmente que pensemos que estamos fotografiando una zona que está todavía lejos de la posición del equipo. Como forma de resolver este problema, recurrimos a un sistema «manual» que describimos siguiendo el esquema ideal mostrado en la Figura 7. Se basa en disponer un recuadro imaginario sobre la zona a fotografiar, en tres de cuyos vértices se situaba una persona: el piloto del Phantom en una esquina, y dos asistentes en ángulo recto respecto al piloto (en la figura, al norte y oeste del piloto). El vuelo comienza (1) dirigiendo en línea recta el aparato hacia el primero de esos dos asistentes, situado en el extremo norte del recuadro: este indica, alzando un brazo, el momento en el que el Phantom alcanza la vertical de su posición, lo que permite al piloto detener el avance en esa dirección e iniciar (2) una primera pasada en horizontal (en la figura, hacia el oeste). Una vez alcanzada la vertical del segundo asistente, este

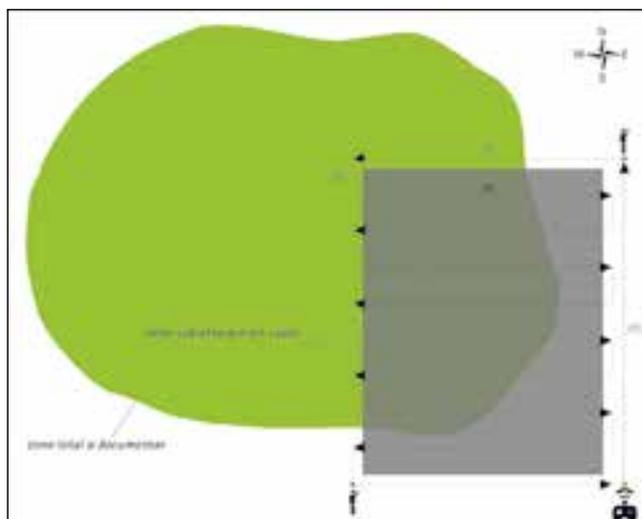


Figura 7. Esquema del sistema empleado para orientar cada vuelo y garantizar que se cubre adecuadamente la zona de interés.

alza su mano de manera que el piloto detiene el movimiento en esa dirección, lo mueve hacia el sur (3) e inicia una nueva pasada en horizontal hacia el este (4), y así sucesivamente.

A estos dos asistentes se sumaba un tercero, que colaboraba en el proceso de despegue y aterrizaje del aparato. Dada la extrema irregularidad de la superficie del terreno, con abundantes piedras y arena, y lo muy expuesta que estaba la cámara bajo el Phantom, para evitar roces, impactos o el efecto de la arena en la cámara, en lugar de despegar y aterrizar el Phantom sobre el suelo lo hacíamos desde y hacia las manos de este tercer asistente (Figura 8).

La cámara se programaba para tomar fotografías a intervalos de cinco segundos, intervalo mínimo que permitía la cámara Ricoh GR2 (reducido a tres segundos a partir de que empezamos a usar la Canon Ixus 140). Combinando este dato con el de la duración de cada batería, en cada uno de los vuelos realizados se tomaban entre 100-150 fotografías, de las que de promedio se descartaba en torno al 20 % (fotos tomadas durante el ascenso o descenso del Phantom, fotos movidas o borrosas, ver más adelante Tabla 1). Así, en una jornada ideal usando diez baterías se podrían llegar a tomar unas 800-1200 fotografías válidas para su procesamiento fotogramétrico.

El área cubierta por estas fotografías depende en gran medida de la altura del vuelo. En nuestro caso, habitualmente realizamos primero una serie de vuelos a más altura (unos sesenta a ochenta metros), para cubrir zonas extensas y tener una documentación más genérica, que luego se completó con vuelos más bajos (veinte a cuarenta metros) para capturar el terreno y las estructuras arqueoló-

gicas con gran detalle (Figura 9). En la última sección de este trabajo detallaremos la relación entre vuelos-fotografías-área documentada.

Este sistema es bastante sencillo de implementar en el terreno, siempre que la topografía sea lo suficientemente suave como para permitir la intervisibilidad entre el piloto y los dos asistentes. Dada la reducida extensión que se documenta en cada vuelo, esto se cumple en la mayor parte de los casos. En aquellos donde no es así, como en el caso de la documentación del poblado de Topaín, que se ubica en un cerro de fuertes pendientes, fue necesario proceder por zonas más pequeñas, o emplear asistentes adicionales intermedios entre el piloto y los situados en los extremos del rectángulo a fotografiar.

2. 4. 2. DJI Phantom 3

Gracias a las mejoras de este equipo respecto al 1, en los años 2015 y 2016 ya no hubo necesidad de implementar el sistema de trabajo con asistentes, sino que bastaba con dos personas para realizar toda la tarea: la persona que manejaba el dron, y la que manejaba la tablet donde estaba instalado el software de control. En este caso, desde la tablet ya era posible ver en directo lo que la cámara del dron enfocaba, y tomar las fotos en los lugares necesarios para asegurar una cobertura completa de la zona de interés, y con un solape suficiente entre las fotos para permitir la reconstrucción 3D de la zona. Si bien este modelo, al igual que el Phantom 1, carece de un software para el prediseño de las trayectorias de vuelo, la posibilidad de monitorear de manera remota desde una tablet los desplazamientos del aparato facilitó la cobertura sistemática del área específica en estudio.

Esto supuso una notable simplificación del proceso de trabajo en campo. Además, dada la mayor duración de las baterías, también resultaba más efectivo este tiempo en campo. Sin embargo, como luego veremos, no hubo un efecto directo de todo



Figura 8. Proceso de despegue y recepción del Phantom por un asistente.

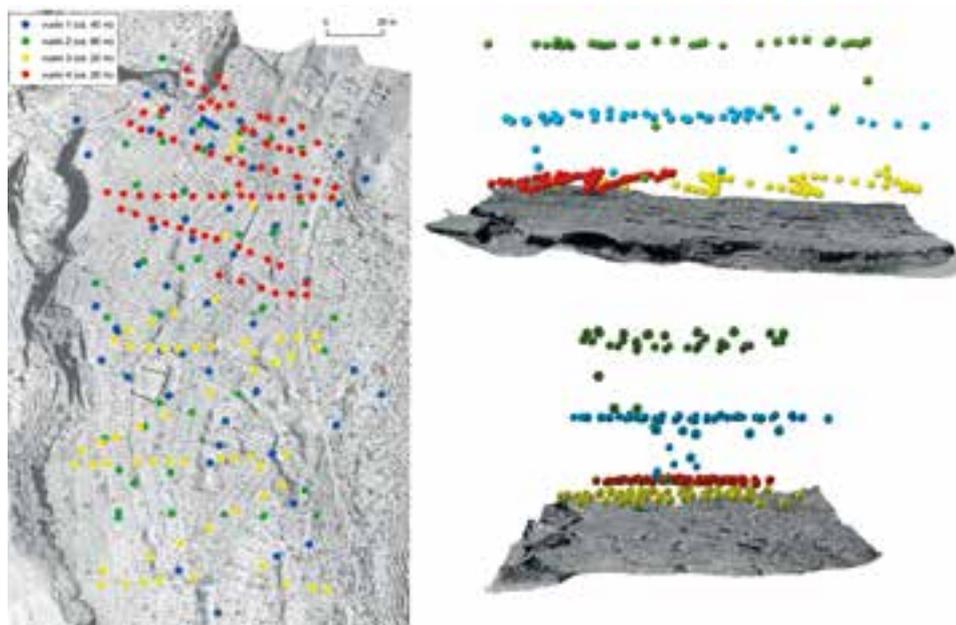


Figura 9. Ejemplo de la secuencia de vuelos realizados para documentar un sector de campos de cultivo, que ilustra la relación entre vuelos y superficie documentada.

ello en la eficiencia concreta del trabajo (cantidad de fotos útiles conseguidas por minuto en campo), aunque sí en otros aspectos relacionados con la calidad final de los resultados y, sobre todo, con la completitud de las coberturas.

2.5. Procesado de imágenes y creación de productos finales

Finalmente, el tercer componente del equipamiento empleado fue el software para el procesado de las imágenes y la construcción de los modelos tridimensionales y las ortoimágenes. El software empleado fue el bien conocido AgiSoft Photoscan³, cuyo uso en arqueología está ya ampliamente difundido (e.g. De Reu et al. 2014, De Reu et al. 2012, Doneus et al. 2011, Verhoeven 2011, Verhoeven et al. 2012). Este software, basado en los principios de la llamada «visión artificial» (*computer vision*), recompone la estructura tridimensional de una escena (objeto, paisaje, construcción,...) a partir de la combinación de fotografías con un mínimo grado de solape. La manera concreta en la que este software funciona ha sido ya ampliamente descrita en la literatura, y en particular

³ <http://www.agisoft.com/>

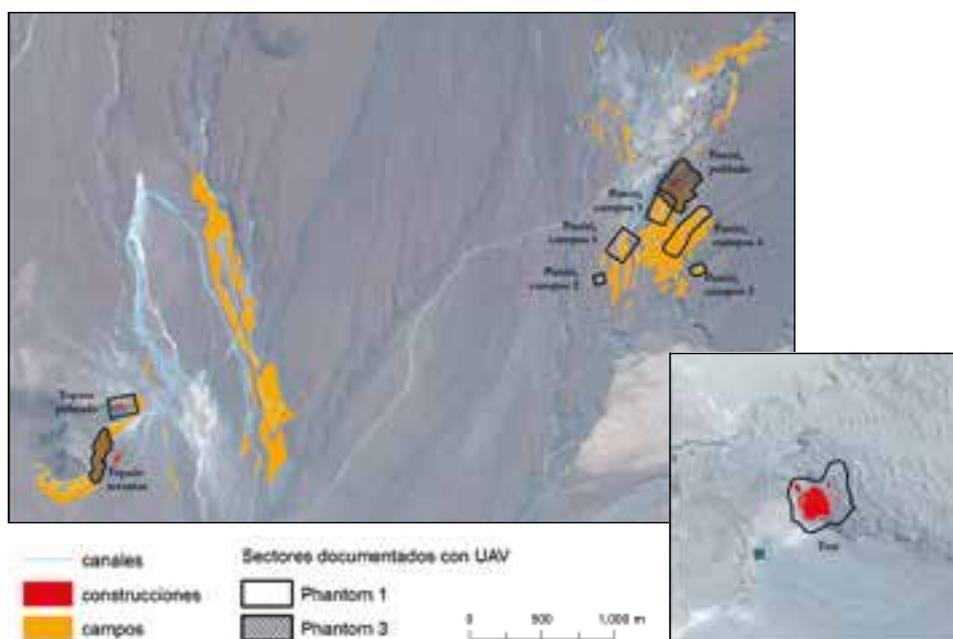


Figura 10. Zonas documentadas con el dron en las diferentes campañas de trabajo.

en trabajos que detallan su uso en arqueología, por lo que no insistiremos aquí en ello (ver referencias citadas más arriba).

Con esta herramienta es posible crear diferentes productos finales: inicialmente el software crea una malla de puntos tridimensional que representa la geometría básica de la escena, y a partir de ella es posible derivar otros productos como modelos de caras 3D, modelos *raster* de elevaciones u ortoimágenes.

3. Resultados

3. 1. Relación esfuerzo/tiempo/resultados: comparación entre los dos equipos usados

Los recursos y los dos sistemas de trabajo descritos en el anterior apartado se pusieron en práctica en cuatro campañas sucesivas de trabajo: dos con el Phantom 1 (diciembre de 2013 y julio de 2014) y dos con el Phantom 3 (noviembre de 2015 y de 2016). Con el Phantom 1 se documentaron dos de los tres poblados (Topaín y Turi), además de varios sectores (5) representativos de los campos de



DÍA	TIEMPO DE TRABAJO (MIN.)	FOTOS TOTALES	FOTOS ÚTILES	% FOTOS DESCARTADAS	FOTOS ÚTILES / MIN.
7-nov-2013	45	276	177	35,9	3,9
8-nov-2013	27	168	141	16,1	5,2
11-nov-2013	56	324	165	49,1	2,9
12-nov-2013	22	372	225	39,5	10,2
13-nov-2013	26	192	133	30,7	5,1
13-nov-2013	24	180	127	29,4	5,3
13-nov-2013	6	84	72	14,3	12,0
14-nov-2013	80	408	338	17,2	4,2
16-jul-2014	36	240	212	11,7	5,9
18-jul-2014	123	756	696	7,9	5,7
19-jul-2014	7	84	72	14,3	10,3
21-jul-2014	124	770	560	27,3	4,5
22-jul-2014	78	690	484	29,9	6,2
23-jul-2014	77	190	160	15,8	2,1
24-jul-2014	42	450	317	29,6	7,5
25-jul-2014	79	560	487	13,0	6,2
TOTAL	852 (14 h. 12 min.)	5.744	4.366	Promedio: 23,8	Promedio: 6,1

Tabla 1. Relación entre tiempo de trabajo y cantidad de imágenes utilizables obtenidas con el Phantom 1

cultivo (Figura 10). En total se realizaron vuelos en 14 días de trabajo (6 en 2013 y 8 en 2014). Con el Phantom 3 documentamos en 2015 dos nuevos sectores: el área de asentamiento de Paniri junto con algunas de las terrazas circundantes, y una amplia porción de los aterrazamientos del cerro Topaín⁴.

Las siguientes tablas proporcionan algunos datos cuantitativos básicos para entender la relación entre trabajo invertido y resultados obtenidos. Las dos primeras, Tabla 1 y Tabla 2, resumen, para cada uno de los dos equipos usados, la relación entre el tiempo de trabajo, el total de imágenes tomadas y la cantidad de ellas que fueron finalmente válidas. Como se puede observar, el tiempo total de trabajo invertido en campo es de menos de diecinueve horas. En este tiempo se tomaron un total de casi 7000 fotografías, de las que finalmente pudimos usar algo más de 5500 para documentar los nueve sectores antes enumerados.

⁴ En 2016 el trabajo realizado con el dron se centró en un cuarto sitio, Cupo, cercano a los tres aquí descritos, del que no hablaremos en este trabajo.

DÍA	TIEMPO DE TRABAJO (MIN.)	FOTOS TOTALES	FOTOS ÚTILES	% FOTOS DESCARTADAS	FOTOS ÚTILES / MIN.
25-nov-15	9	81	80	1.2	9,1
26-nov-15	24	183	183	0.0	7,7
30-nov-15	12	33	33	0.0	2,8
01-dic-15	7	11	11	0.0	1,6
02-dic-15	28	152	152	0.0	5,5
03-dic-15	33	180	178	1.1	5,5
04-dic-15	54	160	160	0.0	3,2
05-dic-15	34	123	123	0.0	3,7
06-dic-15	50	218	217	0.5	4,4
07-dic-15	16	89	88	1.1	5,7
TOTAL	267 (4 h. 25 min.)	1.230	1.225	Promedio: 0,4	Promedio: 4,9

Tabla 2. Relación entre tiempo de trabajo y cantidad de imágenes utilizables obtenidas con el Phantom 3

Como era esperable, el uso del Phantom 3, con el control directo remoto del disparo de la cámara desde la tablet, permitió reducir notablemente la cantidad de imágenes descartadas para su uso final: en promedio, casi una de cada cuatro fotografías de las tomadas con el Phantom 1 hubieron de ser descartadas por estar movidas, borrosas o directamente fuera de la escena de interés (más de 1.000 descartadas en total). Sin embargo, únicamente descartamos cinco de las 1230 tomadas con el Phantom 3. El aumento de la eficiencia fue, pues, considerable.

Sin embargo, paradójicamente la cantidad de imágenes utilizables por tiempo de trabajo fue mayor con el Phantom 1 que con el Phantom 3: un promedio de seis imágenes útiles por minuto de trabajo con el primero, por cinco con el segundo. La explicación de esto es sencilla: al emplear un intervalo de fotografía automático con el equipo más antiguo (una foto cada tres o cinco segundos), el barrido es mucho más indiscriminado y, si solo descartamos finalmente las imágenes movidas o borrosas, sigue resultando una gran cantidad de fotos utilizables. El solape y la reiteración entre estas imágenes será probablemente mayor que el que tengamos con las fotos hechas con el Phantom 3, donde podemos controlar explícitamente la separación que queremos tener entre las fotos.

La Tabla 3, por su parte, se refiere ya a la relación entre el trabajo en campo y los resultados finales obtenidos: resume la extensión de cada una de las áreas documentadas, la cantidad de imágenes empleadas en cada caso y la resolución de las ortofotos y los DSM (Modelos Digitales de Superficie) obtenidos. Un primer resumen de estas cifras muestra que con una dedicación en campo de



EQUIPO	CÁMARA	SECTOR	SUPERFICIE (HA)	TOTAL FOTOS	FOTOS POR HA	ALTURA MEDIA FOTOS	RESOLUCIÓN ORTO (CM)	RESOLUCIÓN DSM (CM)
Phantom 1	Ricoh Gr2	Paniri, campos 1	3	177	59.0	35,1	1	5
		Paniri, campos 2	0,5	133	266.0	19,8	0,6	2,5
		Paniri, campos 3	0,65	127	195.4	20,1	0,7	2,8
		Paniri, campos 4	4,06	543	112.2	20,7	0,6	2,5
		Paniri, campos 5	3,22	127	39.4	32,8	1	2,3
	Topain poblado	4	213	53.3	33,5	1,2	2,5	
	Canon Ixus 140	Turi poblado	11,8	2.988	253.2	24,7	1	4,5
Phantom 3	Cámara del Phantom	Paniri poblado	6,54	911	139.3	25,1	1	3,5
		Topain terrazas	3,1	676	218.1	17,0	0,7	3,5

Tabla 3. Imágenes y resultados obtenidos en la documentación de los diferentes espacios trabajados

menos de diecinueve horas hemos podido documentar con extremo detalle nueve sectores diferentes de la amplia zona de estudio, que abarcan en total algo más de treinta y cinco hectáreas.

Como puede observarse, la resolución de los productos finales obtenidos es en general muy elevada: las ortoimágenes varían entre 6 mm y 1,2 cm., mientras que los Modelos Digitales de Superficie están entre 2,3 y 5 cm. Con estas ortoimágenes es posible visualizar de manera extremadamente detallada la superficie del terreno. Considerando la escasa cobertura vegetal en esta zona, estas ortoimágenes nos permiten extraer de manera directa un plano de detalle de los diferentes sectores documentados, a una escala equivalente aproximada de entre 1:10-1:20. En el siguiente apartado mostraremos algunos ejemplos de este grado de detalle alcanzado (ver Figura 15, Figura 16).

A priori, es esperable que las diferencias en la resolución final obtenida en cada caso se relacionen con tres factores: la resolución de la cámara empleada, la densidad de imágenes por superficie de terreno y la altura de los vuelos.

El factor que parece mostrar una relación más directa y lineal con el grado de detalle final obtenido es la altura de los vuelos (Figura 11, arriba): a menor altura, mayor resolución final, y esta correlación es casi perfectamente lineal.

La influencia de los otros factores es, sin embargo, un tanto más variable y parece estar combinada. Si examinamos solo la relación entre la densidad de imágenes por superficie de terreno y la resolución final obtenida (Figura 11, abajo) vemos como, pese a haber una cierta correlación entre ellas, ésta no es tan acusada como cuando consideramos la altura. Una razón para esta mayor dispa-

alidad hay que encontrarla en un factor antes apuntado: donde usamos el Phantom 1, la cantidad de imágenes finales resultó en cierto modo aleatoria, producto no tanto de cuántas fotos queríamos haber tomado como de cuántas fotos útiles resultaban del disparo automático de la cámara cada 5 ó 3 segundos (Figura 12). Esto hace que en ocasiones haya una excesiva densidad de fotografías que, a partir de cierto punto, no aportan un mayor grado de detalle al resultado final. Esto ocurrió particularmente en la documentación de asentamiento de Turi, donde estábamos especialmente interesados en obtener un producto de gran resolución. Como vemos, menos fotografías habrían probablemente permitido obtener el mismo resultado.

Pero aquí habría que tener en cuenta también las diferentes cámaras usadas en cada caso. Como hemos dicho, usamos 3 cámaras consecutivamente: Ricoh Gr2 (10 Mpix, 28 mm), Canon Ixus 140 (16 Mpix, 28 mm) y la cámara nativa del Phantom 3 (12 Mpix, 20 mm). La Canon solo se usó en Turi, donde el factor más determinante que condiciona los resultados habría sido esa excesiva densidad (redundancia) en las imágenes. Si comparamos los resultados de las otras dos, vemos como aparentemente las fotografías tomadas con la Ricoh fueron capaces de generar una mayor resolución en los productos finales respecto a la cámara nativa del Phantom 3 (Tabla 3). Tomemos, por ejemplo, los sectores Paniri campos 5 y Paniri poblado, donde se alcanzó la misma resolución final en las ortoi-

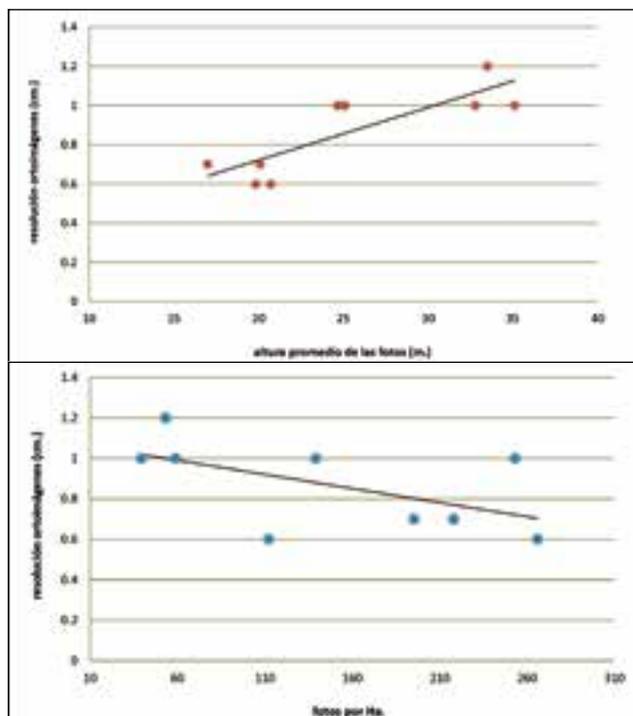


Figura 11. Existe una correlación lineal clara de la resolución que es posible obtener en las ortoimágenes finales con la altura de los vuelos (arriba) y, en menor medida, con la densidad de fotos por ha (abajo).

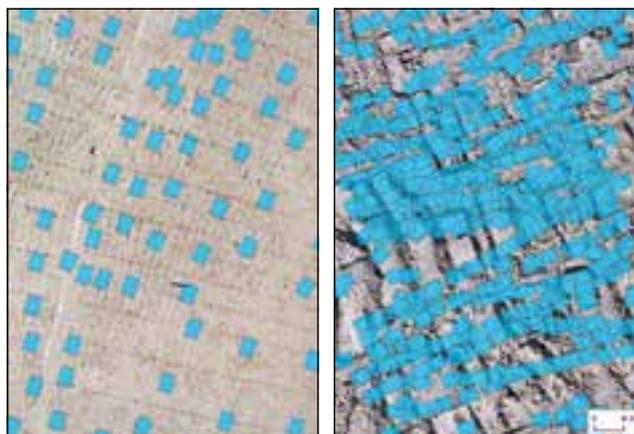


Figura 12. Mientras que con el Phantom 3 es sencillo obtener una cobertura más regular y homogénea de la zona de interés (izquierda), con el Phantom 1 y el modo de disparo automático se obtiene una mayor densidad de imágenes, que acaban por ser redundantes (derecha).

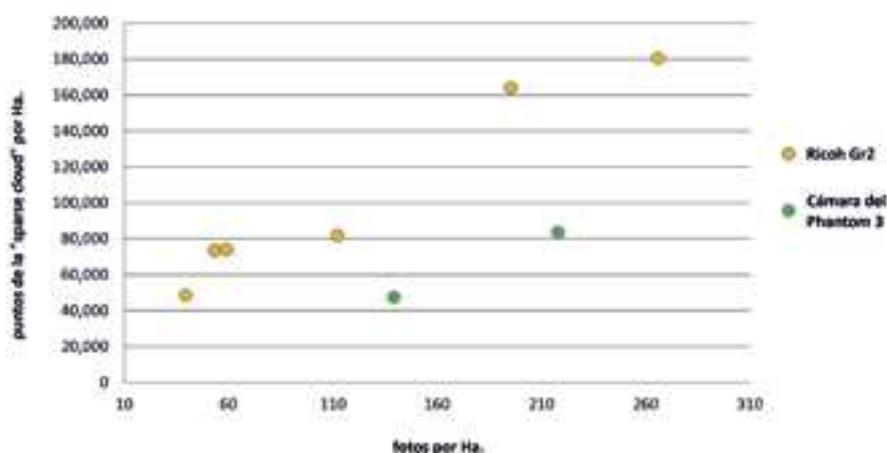


Figura 13. La correlación entre densidad de fotos y densidad de la *sparse cloud* es consistente, pero depende en gran medida de las características de la cámara usada.

mágenes. Para ese resultado, se necesitó una menor densidad de imágenes por hectárea con la Ricoh (apenas treinta nueve frente a ciento treinta y nueve), pese a que la altura promedio es más elevada (32,8 frente a 25 m). Además, y esto es un punto importante, la resolución final del DSM es más detallada en el sector documentado con la Ricoh (2,3 frente a 3,5 m). Parece, pues, que las características de la cámara sí han tenido también un efecto claro en los resultados. Dado que la resolución de la cámara del Phantom 3 es nominalmente mayor que la de la Ricoh (12 Mpix frente a 10), es posible sugerir que hayan sido las diferencias en la óptica y el sensor de cada cámara las que expliquen esto: menor distorsión en la Ricoh, 28 mm frente a 20 mm, y seguramente también una mejor calidad de la óptica. Estas diferencias se resumen en la noción de Ground Sampling Distance, superficie real de terreno que representa cada pixel de una foto aérea vertical tomada a una cierta altura, que depende sobre todo de la óptica y del tamaño del sensor. Efectivamente, la GSD de la cámara del Phantom 3 es casi un 30% más grande que la de la Ricoh GR2.

¿Es posible tener alguna otra constatación de esto? Quizá sí, si atendemos a un factor muy importante dentro de la metodología que hemos seguido. La llamada «visión artificial» (computer vision) en que se basa el Agisoft Photoscan lo que hace es recomponer la estructura tridimensional de una escena a partir de la combinación de fotografías con solape, mediante la extracción de puntos tridimensionales a partir de ese solape. El primer paso del proceso es, pues, la detección de esos puntos y el cálculo de sus coordenadas 3D. Ese conjunto de puntos es lo que se llama *sparse cloud*; la cantidad de puntos que el software es capaz de identificar depende en gran medida de la calidad de las fotos. Y, efectivamente, las fotos tomadas con la cámara Ricoh permitieron al software identificar más puntos que a partir de las fotos tomadas con la cámara del Phantom 3

(Tabla 4, Figura 13): de nuevo hay aquí una relación lineal, pero las magnitudes son diferentes para ambas cámaras. Podemos aquí comparar, por ejemplo, los sectores Paniri campos 3 y Topaín terrazas: con una densidad similar de fotos por Ha. (de hecho un poco mayor en Topaín terrazas, 195 frente a 218), la densidad de la *sparse cloud* resultante es casi el doble en Paniri campos 3 (más de 16,4 frente a 8,3 puntos por m²); pese a que la resolución de la ortoimagen final es la misma, la resolución del DSM es más detallada en el sector de Paniri.

De hecho, la densidad de la *sparse cloud* es siempre más alta en todos los casos en los que se usó la cámara Ricoh, incluso con densidades de fotos mucho menores. La única excepción es Paniri campos 5, donde precisamente la densidad de fotos es excepcionalmente baja (solo 39,4 fotos por ha)

Finalmente, es necesario destacar una nueva diferencia entre los resultados obtenidos con los dos equipos, en este caso en términos de completitud: mientras que con el Phantom 3 se consigue en general cubrir completamente las zonas de interés, con el Phantom 1 las dificultades para controlar el sobrevuelo ocasionó faltas de solape en algunos lugares, o dejar sin documentar algunas porciones del terreno (Figura 14).

3. 2. Productos finales obtenidos

Evidentemente la enorme extensión que ocupan los campos de cultivo en nuestra zona de estudio (más de 60 Has.) hace que resulte inviable el documentarlas todas con gran detalle. No obstante, el empleo del UAV nos ha permitido documentar con detalle algunos sectores, que sirven para ejemplificar las di-

CÁMARA	SECTOR	FOTOS POR HA	PUNTOS DE LA SPARSE CLOUD POR M ²	RESOLUCIÓN ORTO (CM)	RESOLUCIÓN DSM (CM)
RicoH Gr2	Paniri, campos 1	59,0	7,40	1	5
	Paniri, campos 2	266,0	18,05	0,6	2,5
	Paniri, campos 3	195,4	16,40	0,7	2,8
	Paniri, campos 4	112,2	8,19	0,6	2,5
	Paniri, campos 5	39,4	4,87	1	2,3
	Topain poblado	53,3	7,35	1,2	2,5
Cámara del Phantom	Paniri poblado	139,3	4,90	1	3,5
	Topaín terrazas	218,1	4,75	0,7	3,5

Tabla 4. Comparación entre resultados de la cámara RicoH Gr2 y de la cámara del Phantom 3



Figura 14. El sector Paniri campos 4 es un ejemplo extremo de cómo la dificultad de controlar el sobrevuelo con el Phantom 1 ocasionó la documentación incompleta de alguno de los sectores (aunque esto ocurrió sólo de manera ocasional).

ferentes maneras en las que se articulan los elementos que conforman estos espacios (muros, canales, acequias, estructuras de cierre, *rumimoqos*). Como se aprecia en los detalles mostrados aquí (Figura 15, Figura 16), las ortoimágenes obtenidas muestran un apreciable grado de detalle, equivalente al que se podría obtener con medios de documentación convencionales (dibujo arqueológico a escala de al menos 1:20, y hasta alrededor de 1:10 en algún caso).

Las áreas de asentamiento conforman un conjunto menos extenso, cuya documentación detallada resulta aún más interesante ya que es una herramienta esencial para cualquier aproximación al estudio de la conformación y transformaciones de estos espacios domésticos. En nuestro proyecto, este tipo de aproximaciones constituyen una parte esencial, y trabajos basados en estos modelos que hemos producido ya han sido emprendidos (p.e. Ayán Vila y García Rodríguez 2015, González Rodríguez et al. 2016, Murphy y González Rodríguez 2017). En el caso de los poblados sí se contaba con documentación previa, de desigual precisión. Para Topaín y Paniri existen sendos croquis esquemáticos (Urbina 2007, Urbina 2010) que muestran la morfología aproximada de los sitios (Figura 17). Aunque útiles para los fines con que fueron creados, no son demasiado exactos geoméricamente, además de carecer de información acerca de la topografía local. La documentación ahora hecha de ambos poblados permite una mejora considerable. En el caso de Topaín, por ejemplo, nos ha permitido producir un nuevo plano del sitio, directamente a partir de la ortoimagen gene-



Figura 15. Vista a escala intermedia de la ortofoto del sector de campos Paniri 5.

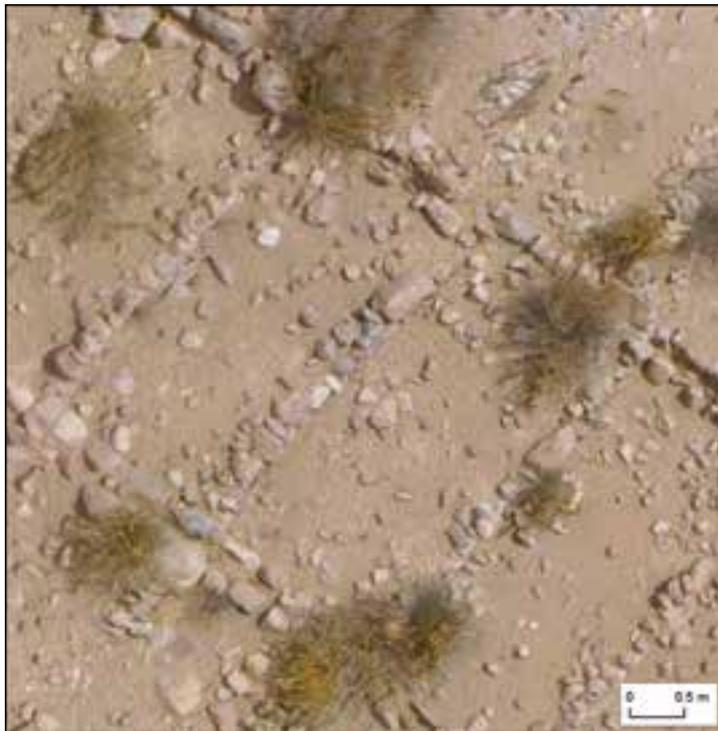


Figura 16. Ejemplo del grado de detalle alcanzado (sector Paniri campos 4).

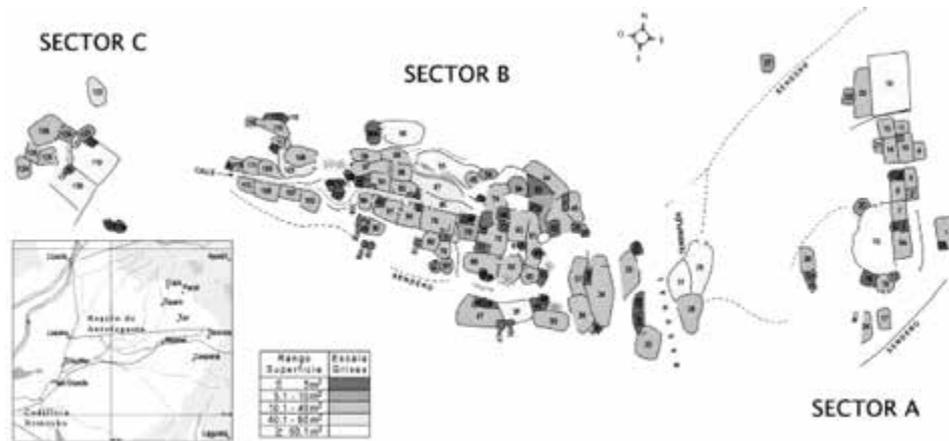


Figura 17. Croquis de Topaín (según Urbina 2007).

rada a partir de las fotografías del dron (Figura 18). El detalle de la ortoimagen es tal que se ha podido dibujar este plano piedra a piedra en el laboratorio. Como se puede apreciar, la planta real del sitio difiere ligeramente del meritorio croquis existente, además de proporcionar información acerca de las condiciones topográficas del lugar.

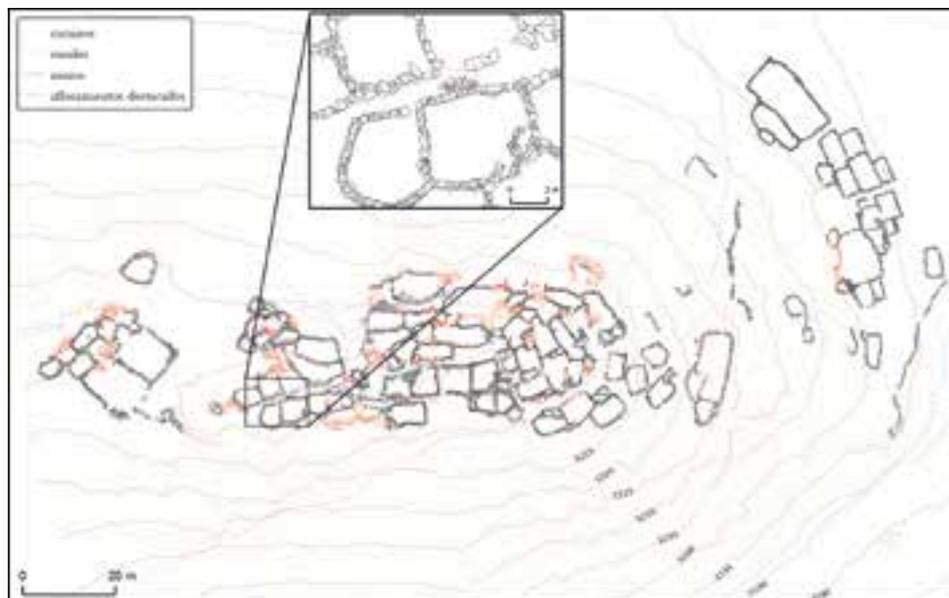


Figura 18. Planta del poblado de Topaín, producido a partir de la ortoimagen generada con las fotografías del dron.

El caso de Turi es diferente, pues aquí sí se disponía de un plano cuya creación constituye un notable antecedente del tipo de metodologías hoy vigentes. Este plano (Figura 19) fue realizado a finales de los años 80 por F. Maldonado a partir también de fotografías aéreas tomadas con una cámara analógica montada en un globo cautivo de helio (Castro et al. 1993, ver también Castro y Cornejo 1990, Cornejo 1990, Cornejo 1999). Pese a que entonces las herramientas disponibles para este tipo de trabajos eran mucho menos sofisticadas que las actuales, el resultado obtenido proporcionó una muy notable aportación al conocimiento de la estructura del sitio. Nuestro trabajo está permitiendo afinar esa planta existente, incluyendo mayor detalle en la definición de las estructuras y corrigiendo algunas distorsiones geométricas (Figura 20, Figura 21).

Valoración final

Como balance general, la aproximación aquí mostrada nos ha permitido generar una documentación extremadamente valiosa para los objetivos del proyecto, empleando unos recursos bastante accesibles y con una inversión de tiempo (sobre todo de tiempo en terreno) muy asumible. En comparación con lo que habría supuesto el documentar estos espacios de manera «manual» (dibujo arqueológico a escala de al menos 1:20 y levantamiento topográfico de los sitios), hemos sido capaces de documentar en detalle 6 sectores de los

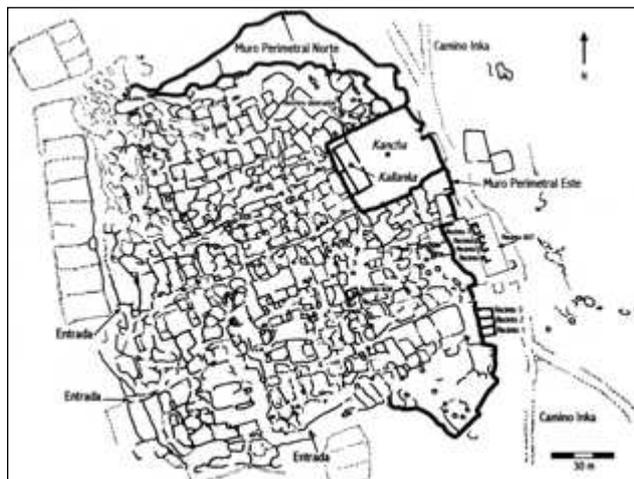


Figura 19. Planta existente del poblado de Turi (tomada de Cornejo 1999:167).



Figura 20. Vista conjunta de la ortoimagen de Turi creada en este proyecto.

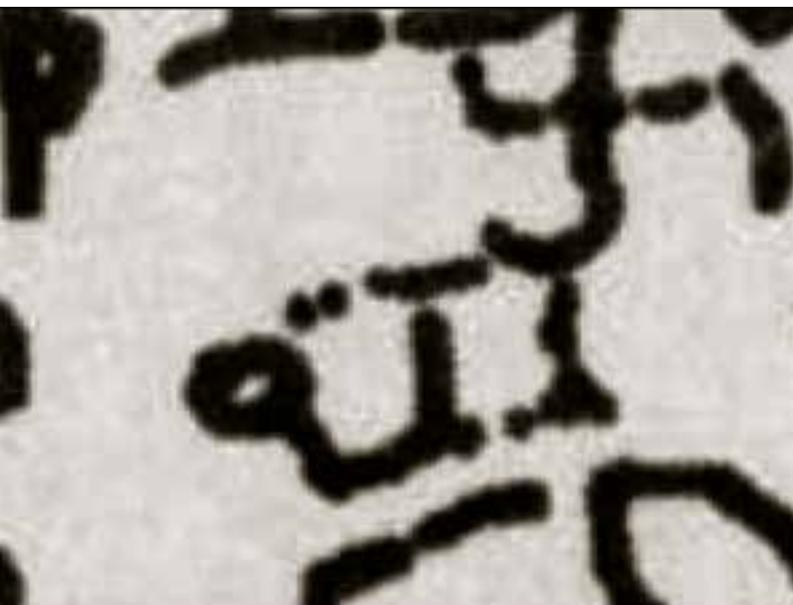


Figura 21. Detalle de la ortoimagen de un sector de Turi, comparada con la apariencia de ese mismo sector en el plano de Cornejo 1999.

campos de cultivo (unas 15 ha) y los tres poblados (más de 22 ha) con una inversión de unas diecinueve horas de trabajo en campo por un equipo máximo de cuatro personas. El coste cada uno de los dos equipos empleados (UAV, accesorios, cámara, y licencia de software) ronda los 1200 €.

Evidentemente hay también unas condiciones e implicaciones que todo ello tiene, y que también es necesario tomar en cuenta para poder valorar adecuadamente la pertinencia de una aproximación como esta:

- Ante todo, las condiciones del lugar (visibilidad de los elementos arqueológicos y, sobre todo, ausencia casi total de cubierta vegetal) resultan esenciales para poder obtener con esta aproximación unos resultados con la utilidad de los aquí descritos.
- La documentación proporcionada por el UAV es, en el caso de un trabajo con la escala del nuestro, únicamente un complemento de las otras fases de trabajo realizadas y descritas (empleo de imagen satelital, relevamiento en campo).
- El esfuerzo mostrado para la obtención de los datos en campo requiere ser complementado con un trabajo posterior en laboratorio, que puede ser más o menos liviano según el tipo de resultados y productos que se persigan. Así, obtener un modelo 3D u ortofotos es un procedimiento relativamente poco exigente en tiempo de dedicación

(el ordenador hace la mayor parte del trabajo), mientras que producir una planta de detalle a partir de las ortofotos (como la mostrada en la Figura 18) sí requiere una importante dedicación.

- El punto anterior requiere también disponer de ordenadores con capacidad de procesamiento suficiente para manejar el software de fotogrametría y la cantidad de imágenes capturadas. Los requisitos mínimos del software Photoscan no son demasiado altos, pero el equipo recomendado para que el trabajo sea más o menos rápido sí puede ser más exigente. En nuestro caso, los resultados aquí presentados se procesaron en un Dell Precision con procesador Intel Xeon x5650, 12 Gb de RAM y tarjeta gráfica Nvidia GeForce GTX 770 con 4Gb de memoria.
- Entre las consecuencias que se pueden extraer del trabajo realizado, destacan también los aspectos que tienen que ver con la relación entre las condiciones del trabajo y el grado de detalle de los resultados obtenidos. Respecto a esto, hay una cantidad grande de variables que pueden condicionar el detalle final que es posible obtener: características de la cámara empleada, altura de los vuelos, densidad de fotografías por unidad de terreno, grado de solape entre las fotografías. Nuestra experiencia demuestra que parece haber factores que tienen una mayor incidencia que otros: así, hemos podido ver cómo una mayor densidad de imágenes no es siempre garantía de un mayor detalle en los resultados, ya que llega un punto en el que las fotografías coincidentes se convierten en redundantes. Sin embargo, la altura de los vuelos sí tiene una evidente incidencia directa en la resolución final de las fotos, y por tanto en el grado de detalle que es posible obtener en los productos finales.

Finalmente, las condiciones de la cámara empleada parecen haber tenido también un efecto importante en los resultados finales: el uso de una cámara con un sensor más grande y una óptica de menos distorsión, como la de la Ricoh Gr2, permite que, a igualdad o semejanza de cantidad de fotos y altura de los vuelos, la densidad de la malla tridimensional producida por el Photoscan sea considerablemente superior a la que se obtiene con una cámara de óptica más pobre y sensor más pequeño, como la de la cámara nativa del Phantom 3. Este factor puramente técnico, que podría parecer trivial de entrada, ha resultado ser uno de los más influyentes en los resultados finales obtenidos. Resultados que, en todo caso, cumplieron sobradamente las expectativas previas. Esto, junto con los detalles aquí expuestos, puede representar un aliciente para aplicar metodologías similares en otros proyectos, y para considerar de manera informada qué variables han de tenerse en cuenta para obtener los resultados necesarios en cada caso.



Agradecimientos

Queremos expresar nuestro especial agradecimiento a las comunidades indígenas atacameñas de Ayquina-Turi y de Cupo, por permitirnos trabajar en sus sitios ancestrales. Vicky Castro y Fernando Maldonado nos dieron abundante información acerca de su trabajo en Turi en los años 80-90, y nos permitieron ver las fotos aéreas originales del sitio. El trabajo aquí presentado forma parte de un proyecto financiado por las siguientes entidades: Ministerio de Cultura de España (Proyectos Arqueológicos en el Exterior), Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (proyecto CONICYT-USA 2013-0012), Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research (International Collaborative Research Grant), National Geographic Society (grant #9296-13) y National Science Foundation (Catalyzing International Collaborations Grant, award OISE-1265816). El trabajo realizado con UAV ha sido también apoyado por el proyecto Archaeolandscapes Europe (European Commission, Culture Programme). 🌱

Bibliografía

- ALLIENDE, P.; CASTRO, V. y GAJARDO, R. (1993). «Paniri: un ejemplo de tecnología agrohidráulica». *Actas del XII Congreso Nacional de Arqueología*, 2: 123-128.
- AYÁN VILA, Xurxo M. y GARCÍA RODRÍGUEZ, Sonia (2015). «El poblado en altura de Topaín (segunda región, Chile): una residencia en la Tierra». *Arqueología de la Arquitectura*, 12: e035.
- CASTRO, Victoria y CORNEJO, Luis Eduardo (1990). «Estudios en el Pukara de Turi, Norte de Chile». *Gaceta arqueológica andina*, 5 (17): 57-66.
- CASTRO, Victoria; MALDONADO, Fernando y VÁSQUEZ, Mario (1993). *Arquitectura del Pukara de Turi*. (ed.) XII Congreso Nacional de Arqueología Chilena, 1993, 79-106.
- CORNEJO, L. E. (1999). «Los incas y la construcción del espacio en Turi». *Estudios atacameños*, 18: 165-176.
- CORNEJO, Luis E. (1990). «La molienda en el pukara de Turi». *Chungara*, 24-25: 125-143.
- DE REU, J., et al. (2012). «Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage». *Journal of Archaeological Science*, 40(2): 1108-1121.
- DE REU, Jeroen, et al. (2014). «On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice». *Journal of Archaeological Science*, 41(0): 251-262.
- DONEUS, Michael, et al. (2011). «From deposit to point cloud - A study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations». *Geoinformatics (XXIIIrd International CIPA Symposium)*, 6: 81-88.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, Cristián; MURPHY, Beau y AYÁN-VILA, Xurxo M. Nuevos acercamientos a la arquitectura y espacialidad del Pucará de Turi (Región de Antofagasta, Norte de Chile. (ed.) XIX Congreso Nacional de Arqueología Argentina, 2016 Tucumán, Argentina, 2572-2576.

- LLAGOSTERA, A. (1976). Hipótesis sobre la expansión incaica en la vertiente occidental de los Andes meridionales. En: NIEMEYER, H. (ed. *Homenaje al Dr. Gustavo Le Paige*). Antofagasta: Universidad del Norte.
- MALIM, T. (2009). Tears of the sun: condensation and irrigation in the Andes. En: NASH, G. y GHEORGHIU, D. eds), *The archaeology of people and territoriality*. Budapest: Archaeolingua, 116-136.
- MURPHY, Beau y GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, Cristián A GIS Analysis of Production Areas, Ritual Spaces, and Socioeconomics at the Mixed Inka-Local Administrative Center of Turi, Northern Chile. (ed.) *82nd Annual Meeting of the Society for American Archaeology*, 2017 Vancouver, Canada.
- NÚÑEZ, P. (1993a). Posibilidades agrícolas y población del incario en el área atacameña, norte de Chile. *Actas del XII Congreso Nacional de Arqueología Chilena*. Temuco: Museo Regional de Araucanía, 259-267.
- NÚÑEZ, P. (1993b). Un canal de regadio incaico: Socaire-Salar de Atacama. *Actas del XII Congreso Nacional de Arqueología Chilena*. Temuco: Museo Regional de Araucanía, 259-267.
- OSORIO, A. y SANTORO, C. (1989). «Trasvase prehispánico Vilasamanani-Socoroma, Norte de Chile». *IDESIA*, 11: 37-43.
- PARCERO-OUBIÑA, César, et al. (2015). «Sistemas Agrohidráulicos de los Períodos Intermedio Tardío y Tardío en el Loa Superior: el caso de Topaín». *Boletín de la Sociedad Chilena de Arqueología*.
- PARCERO-OUBIÑA, César, et al. (2017). «Ground to air and back again: Archaeological prospection to characterize prehispanic agricultural practices in the high-altitude Atacama (Chile)». *Quaternary International*, 435, Part B: 95-110.
- PARCERO-OUBIÑA, César, et al. (2016). Introduciendo orden en el registro mediante tecnologías no destructivas: experiencias en el estudio de paisajes agrarios prehispánicos en la región de Atacama (Norte de Chile). En: MAYORAL HERRERA, Victorino (ed. *La revalorización de zonas arqueológicas mediante el empleo de técnicas no destructivas*. Madrid: CSIC, 223-243.
- SANTORO, C.; HIDALGO, J. y OSORIO, A. (1987). «El estado Inka y los grupos étnicos en el sistema de riego de Socoroma». *Chungara*, 19: 71-92.
- SANTORO, C. M., et al. (1998). «Proyectos de irrigación y la fertilización del desierto». *Estudios atacameños*, 16: 321-336.
- URBINA, Simón (2007). «Estudio arquitectónico del pucara de Topaín». *Boletín de la Sociedad Chilena de Arqueología*, 40: 29-46.
- URBINA, Simón (2010). «Asentamiento y arquitectura: historia Prehispánica Tardía de las Quebradas Altas del Río Loa». *Actas del XVII Congreso Nacional de Arqueología Chilena*: 119-131.
- VERHOEVEN, G., et al. (2012). «Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs». *Journal of Archaeological Science*, 39(7): 2060-2070.
- VERHOEVEN, Geert (2011). «Taking ComputerVision Aloft - Archaeological Three-dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with PhotoScan». *Archaeological Prospection*, 18: 67-73.