

La aplicación de la metodología no invasiva en Torregarcía: el levantamiento digital¹

Son muchas las distintas técnicas enmarcadas dentro de la metodología histórico-arqueológica no invasiva que se han aplicado al yacimiento de Torregarcía, como se ha introducido en el capítulo 5. En este, de entre todas esas técnicas, nos centraremos en el levantamiento digital en tres dimensiones. Así pues, para llevar a cabo el estudio de esta *officina purpuraria* y las estructuras de la Zona A.1 allí presentes, resultaba de vital importancia llevar a cabo una documentación digital del lugar.

A la hora de realizar una digitalización de un elemento determinado, mueble o inmueble, existen principalmente dos técnicas distintas. La primera de ellas sería el levantamiento digital mediante el uso de LiDAR. Esta primera técnica se basa en el uso de un escáner láser para la adquisición de los datos necesarios con los que posteriormente se obtendrá un modelo 3D. La segunda de estas técnicas, la fotogrametría, nos permite de igual manera obtener una nube de puntos o una malla en tres dimensiones texturizada, pero basándose en la adquisición de fotografías del elemento objeto de estudio, que serán sometidas a una serie de procesos para obtener dichos recursos 3D. Dentro de la fotogrametría podemos encontrar dos principales subdivisiones, terrestre o aérea, diferenciándose estas por el medio desde el que son tomadas las fotografías.

Ahora bien, para el caso de Torregarcía, no nos hemos decantado por el uso de una u otra técnica, sino que se ha llevado a cabo una combinación de todas las citadas anteriormente, tanto LiDAR como fotogrametría, aérea y terrestre, teniendo como objetivo principal, la generación de un modelo virtual de máxima calidad y precisión, a partir del que obtener información del yacimiento al ser sometido a posprocesos y análisis.

Cabe mencionar que la combinación de diversas técnicas de levantamiento digital no resulta ser algo nuevo, ya que podemos encontrar bastantes trabajos en los que se viene aplicando en elementos patrimoniales de diferente naturaleza (Calvillo Ardila *et al.* 2021).

7.1. Técnicas y equipamiento empleados

7.1.1. Escaneo Láser

Para el levantamiento digital de las estructuras de la Zona A.1 de Torregarcía mediante la tecnología LiDAR se ha empleado un escáner laser de la casa comercial Leica, ampliamente conocida dentro del mundo de la

topografía por la fabricación e integración de ópticas de altísima precisión en toda su gama de instrumentos. Concretamente, el escáner empleado en este caso ha sido el modelo BLK360. Si algo caracteriza a este escáner son sus reducidas dimensiones, permitiendo una alta operatividad a la hora de realizar un levantamiento digital, sin que su fácil manejo y rapidez en la toma de datos conlleve una pérdida de calidad o precisión en la nube de puntos resultante.

El BLK360 funciona mediante un telémetro láser de 360° de acción, con el que captura un total de hasta 360 000 puntos por segundo con presión milimétrica. Dicha tecnología LiDAR se apoya en la integración en el aparato de tres cámaras panorámicas y esféricas HDR (*High Dynamic Range*), con las que la nube de puntos generada en el proceso de escaneo es coloreada, obteniendo el color real de cada uno de esos puntos. Sin embargo, una de las grandes limitaciones que tiene el BLK360, y que condiciona por completo el proceso de la toma de datos tal y como veremos más adelante, es su reducido radio de acción. El escáner de Leica es capaz de tomar puntos hasta una distancia máxima de 60 metros, pero su radio de acción con máxima precisión se ve reducido hasta la mitad, pudiendo llegar a los 30 metros de distancia. Por ello, la manera en la que se plantea el levantamiento digital en campo se ve completamente condicionada por este factor, siendo de vital importancia y consideración para poder generar nubes de puntos de la máxima precisión.

En cuanto al *software* utilizado a lo largo de todo el proceso de obtención de la nube de puntos a partir del escaneo láser, nos encontramos con toda una serie de soluciones informáticas desarrolladas por la propia Leica. El primero de los programas es el Leica Cyclone FIELD 360, una aplicación desarrollada tanto para sistemas iOS como Android, desde la que se opera el BLK360 introduciendo los parámetros de cada uno de los escaneos que se realizarán en las labores de levantamiento digital. Seguidamente nos encontramos con el BLK Data Manager, cuya finalidad es simplemente la de exportar los datos crudos de cada uno de los escaneos efectuados.

Ya una vez obtenidos los datos brutos, comienza la fase de posproceso de la información, comenzando en primer lugar con la utilidad Cyclone REGISTER 360. Esta solución de Leica tiene los siguientes objetivos:

- transformar los datos brutos en nubes de puntos exportables a distintos formatos;
- alinear los distintos escaneos realizados para la documentación digital; y
- georreferenciar la nube de puntos.

¹ Este capítulo ha sido coordinado por Manuel Ruiz Barroso.

Por último, nos encontramos con el *software* Leica Cyclone 3DR. Con este programa llevamos a cabo la clasificación y limpieza de la nube de puntos resultante del escaneo, ofreciendo además una considerable cantidad de herramientas para el análisis del modelo digital. En este caso de estudio, Cyclone 3DR ha sido utilizado con una finalidad más, la de conjugar las nubes de puntos densas obtenidas mediante la tecnología LiDAR con la proveniente del proceso de fotogrametría aérea y terrestre.

7.1.2. Fotogrametría

En cuanto a la digitalización en tres dimensiones del yacimiento por medio de la fotogrametría, tal y como hemos mencionado anteriormente, se ha hecho uso tanto de la terrestre como la aérea, para así cubrir las estructuras por completo, desde todas las perspectivas posibles, y obtener un modelo sin huecos o con falta de información.

Para la fotogrametría aérea, el equipamiento empleado ha sido un UAV de la casa comercial DJI, el Phantom 4 Pro+. Este dron posee una batería de 6000 mAh, que se traduce en una duración máxima de vuelo, en condiciones óptimas, de 24 minutos. Ahora bien, lo más interesante de cara a la realización de los modelos fotogramétricos es la cámara integrada en este. La cámara de este UAV, el modelo FC6310, tiene un sensor de 1 pulgada CMOS, con 20 megapíxeles efectivos, con la que captura fotografías de 5472 píxeles de ancho por 3648 píxeles de alto.

Con respecto al equipamiento utilizado para la fotogrametría terrestre, en este caso se empleó una cámara fotográfica de la marca Canon, su modelo EOS 6D. Esta réflex DSLR (*Digital Single Lens Reflex*) posee un sensor CMOS de formato completo, o *full frame*, de 20,2 megapíxeles. La óptica montada en la cámara fue una Canon EF 24-70mm f/2.8L II USM, un objetivo de focal variable con una luminosidad considerable.

En lo que respecta al *software* empleado a lo largo de todo el proceso de levantamiento fotogramétrico del yacimiento de Torregarcía, contamos con dos programas distintos de la empresa Pix4D. El primero de ellos, Pix4Dcapture, es un *software* diseñado para la planificación y ejecución de misiones de vuelo automatizadas para el mapeo y modelado en tres dimensiones con aeronaves no tripuladas. El segundo de ellos es Pix4Dmapper, el *software* en el que han sido procesadas las fotografías obtenidas tanto con el Phantom 4 Pro+ por medio del Pix4Dcapture, como las fotografías terrestres, para conseguir obtener un modelo fotogramétrico final.

Sin embargo, si bien no es algo fundamental para el levantamiento digital en sí de Torregarcía, el equipamiento topográfico termina resultando esencial para poder georreferenciar el modelo en tres dimensiones. Dentro del equipamiento topográfico se ha combinado el uso de dos herramientas, nuevamente de la empresa alemana Leica: el equipo de GNSS (Sistema Global de Posicionamiento) CS14 y la Estación Total TS06 Plus.

7.2. Planteamiento del trabajo

Antes de comenzar con el levantamiento digital *in situ* de las estructuras, fue necesaria la planificación completa de las tareas a realizar en el sitio, atendiendo con especial atención a los siguientes factores:

- la morfología de las estructuras;
- las condiciones meteorológicas; y
- el contexto.

La morfología de las estructuras que se desean documentar digitalmente influye directamente en las técnicas que van a ser empleadas en el proceso. Dependiendo del tamaño de la estructura, de la extensión que ocupa, su complejidad morfológica y si resulta ser más o menos regular, puede ser más propicia la utilización de la tecnología LiDAR, la de la fotogrametría, o, como es el caso de Torregarcía, la combinación de ambas. Y es que no siempre ambas técnicas pueden ser aplicadas de igual manera.

Centrándonos en el aspecto puramente morfológico. Las estructuras presentes en Torregarcía poseen una morfología que podría ser considerada regular. Paramentos completamente rectos que se cortan perpendicularmente unos a otros, presentando una forma geométrica, por así decirlo, sencilla. Esto nos empujaría a decidimos por la aplicación única y exclusiva del escáner láser. Pues este tipo de tecnología, y el *software* que trae consigo para el posprocesado de los datos, se encuentra muy optimizada para estructuras que cumplen estos requisitos, ya que son productos diseñados para campos como el de la ingeniería civil o la arquitectura, donde este tipo de diseños y formas geométricas se reproducen de manera bastante generalizada. Sin embargo, tal y como vemos en la ortofoto del yacimiento (Fig. 7.5), se presenta una dificultad a la hora de emplear únicamente el BLK360, y es la gran compartimentación interna de las estructuras. En el caso de que nos decantásemos tan sólo por el empleo del escáner láser para la digitalización, el número de escaneos necesarios para obtener un modelo tridimensional completo de Torregarcía se vería necesariamente duplicado e, incluso, triplicado, ya que al menos se tendría que realizar un estacionamiento por cada una de las piletas que allí se encuentran, introduciendo el BLK360 en el interior de cada una de ellas. Pero, incluso, llevando a cabo este procedimiento, un estacionamiento por cada una de las piletas, no obtendríamos un modelo completo de estas, ya que el BLK360, del mismo modo que otros escáneres láser de la misma naturaleza, tiene una limitación, y es que en el lugar en el que se posiciona al realizar el escaneo, deja sin cubrir una circunferencia con un radio mínimo de 0,60 m de radio (dependiendo de la altura del escáner) sin escanear, por lo que el plano inferior de cada una de las piletas se quedaría sin cubrir, como consecuencia del punto ciego del aparato. Debido a esta limitación, resulta fundamental el empleo de la fotogrametría aérea para poder modelar el interior de las piletas.

Teniendo presente todo lo anteriormente expuesto, el escaneo láser fue utilizado para cubrir todas las caras

exteriores de las estructuras, ya que es este el que mejor puede cubrir, gracias a su rapidez y precisión en lo que respecta a la adquisición de datos.

En cuanto a la fotogrametría, tal y como hemos comentado, concretamente el aérea nos permite poder modelar sin ningún tipo de problemas la superficie de las estructuras y el interior de las piletas. Esta, combinada con la fotografía terrestre, nos permitirá obtener un mayor solapamiento del modelo tridimensional generado con la fotogrametría con aquel resultante del escáner láser. También cabe destacar un punto fuerte de la fotogrametría terrestre con respecto al BLK360, y es que la textura que puede generar la primera resulta ser superior a la de la segunda, por lo que supliría en este aspecto al escáner láser.

Otro factor que debemos tener en consideración de cara a la planificación de las labores en campo de levantamiento digital serían las condiciones meteorológicas, ya que, al desarrollarse estas al aire libre, serán determinantes en cuanto al desarrollo y el resultado de dichas labores.

Las condiciones meteorológicas durante la campaña de trabajo en Torregarcía fueron óptimas, debido a que tuvo lugar, de forma generalizada, durante días nublados (Fig. 7.1). En un yacimiento como este, que se encuentra al aire libre y no presenta ninguna estructura que lo proteja, la iluminación es completamente natural y, por lo tanto, complicada de controlar. Esto suma un plus de dificultad para la consecución de la fotogrametría, ya que tendrían que buscarse las mejores horas del día para llevar a cabo las sesiones de fotografiado de las estructuras allí presentes, para así tener siempre unas sombras homogéneas, que variasen lo mínimamente posible entre las distintas técnicas —el LiDAR, la fotogrametría aérea y la terrestre— obteniendo así una colorimetría lo más similar para las distintas nubes de puntos resultantes.

Sin embargo, los días nublados, al contrario que aquellos completamente despejados, ofrecen las condiciones óptimas para no tener el problema anteriormente expuesto. En primer lugar, porque la iluminación se mantiene de una manera mucho más constante durante una cantidad de horas mayor que a lo largo de un día despejado, en el que las sombras van cambiando de manera constante. Esto nos permite alargar más las sesiones de trabajo en el yacimiento. Y, en segundo lugar, las sombras son mucho más suaves en los días nublados, lo que supone que en este caso las estructuras tengan una iluminación uniforme, con ausencia de sombras duras que terminen por oscurecer ciertas partes del modelo en tres dimensiones de una manera muy marcada. Pues si bien en un sitio cerrado con una iluminación artificial y controlada, se pueden corregir estos aspectos, en un lugar al raso termina por resultar casi imposible, teniendo que optar por herramientas de posproceso para la corrección colorimétrica del modelo, como puede ser Agisoft Texture De-Lighter.

Por último, debemos tener también en cuenta el contexto en el que se ubican las estructuras a digitalizar. El yacimiento de Torregarcía se encuentra situado en pleno Parque Natural Marítimo-Terrestre de Cabo de Gata-Níjar, y, al estar dentro de este marco, se tiene que considerar la protección que existe sobre la flora de la zona. Por ello, no se ha llevado a cabo ningún tipo de limpieza de la vegetación presente en las estructuras de cara a su posterior digitalización.

7.3. Desarrollo del levantamiento digital

7.3.1. LiDAR

El levantamiento digital de las estructuras mediante el uso del escáner láser BLK360 fue, con gran diferencia, el que mayor cantidad de tiempo ocupó dentro de la campaña



Figura 7.1. Panorámica en la que se aprecian las condiciones climatológicas generales.

de adquisición de datos. Además, de las tres técnicas aplicadas en Torregarcía, esta fue la primera de ellas.

Las labores comenzaron por la colocación de las dianas o puntos de control necesarios para el posterior proceso de georreferenciación del modelo en tres dimensiones. Se emplearon un total de cuatro dianas de tipo *Black and White*, especialmente diseñadas por Leica para la máxima compatibilidad de estas con el *software* de posproceso Cyclone Register360, ya que este programa se encuentra desarrollado para la identificación automática de estas dianas. Todas y cada una de estas dianas se colocaron en un plano horizontal, principalmente en la mitad oeste de la zona de trabajo.

Con el fin de poder cubrir todas las estructuras pertenecientes al yacimiento a lo largo de todo el perímetro exterior de estas, fue necesaria la realización de un total de 42 escaneos distintos. Si bien es cierto que, el número de escaneos realizados fue superior, un total de 49, 7 de estos tuvieron que ser descartados *in situ* por presentar errores de diversa índole, principalmente ocasionados por fallos en la comunicación entre el BLK360 y el *software* de adquisición, cuya versión por aquellos entonces nos resultó bastante inestable en este aspecto.

Dentro del *software* de adquisición de datos del escáner, se pueden programar distintos parámetros que definirán las características y resultado de la nube de puntos y la textura que se genere para esta. En el caso Torregarcía, los parámetros que definimos dentro del programa fueron exactamente iguales para todos y cada uno de los escaneos que realizamos, siendo los siguientes:

- Densidad del escaneo: aquí nos encontramos con tres opciones distintas, baja, media o alta. La densidad del escaneo influye en la cantidad de puntos que puede llegar a tener la nube resultante. En nuestro caso los escaneos han sido configurados en alto, buscando obtener una nube con la mayor densidad de puntos y, por consiguiente, un modelo de la mayor precisión posible. Y es que, si en algún momento nos encontramos con la necesidad de disminuir la cantidad de puntos o el peso del modelo, esto será algo que siempre se podrá realizar desde una nube de puntos de máxima densidad. Ahora bien, la configuración del parámetro con esta opción, inevitablemente, acabará afectando a la cantidad de tiempo que será necesario al escanear, ya que, a mayor densidad de puntos, mayor será la cantidad de tiempo empleado, existiendo una diferencia de aproximadamente tres minutos entre las opciones baja y alta.
- Fotografía: aquí tan sólo nos encontramos con dos opciones posibles a elegir, sin toma o con toma fotográfica. Si nos decantamos por la primera de las opciones, durante el proceso de escaneo no se llevará a cabo ningún tipo de toma fotográfica, lo que traerá como resultado una nube sin colorear. En este sentido, debemos tener en cuenta que la técnica LiDAR, en sí, tan sólo consiste en la emisión de pulsaciones láser que

nos permiten ubicar una serie de puntos en un espacio en tres dimensiones determinado, pero ese punto no puede ser coloreado de otra forma que no sea, en este caso, mediante la captura de una fotografía de la que se tomará el color correspondiente de cada uno de los puntos registrados. La diferencia de tiempo, en el caso de que nos decantemos por la toma de fotografías, es de aproximadamente dos minutos y medio más durante el proceso de adquisición de los datos. Esta segunda opción fue la elegida para la digitalización de Torregarcía.

- HDR: este otro parámetro se encuentra directamente relacionado con la toma fotográfica, y su activación permite aumentar el rango dinámico de las fotografías capturadas por la cámara del BLK360. En este caso, al encontrarnos tal y como hemos explicado con anterioridad en un lugar al raso, con unas condiciones de iluminación natural y no controladas, nos decantamos por activar el modo HDR de la cámara. De este modo, los niveles de luz de las fotografías tomadas se equilibrarán, obteniendo en estas una exposición lo más uniforme posible. Así conseguimos fotografías de una mayor calidad, que resultan óptimas para la obtención de los colores de cada uno de los puntos escaneados. Del mismo modo que sucede con los parámetros anteriores, la activación del HDR lleva consigo un incremento de aproximadamente minuto y medio en el tiempo de adquisición de los datos.

Teniendo en cuenta todos los ajustes con los que se configuraron los escaneos, el tiempo aproximadamente empleado por cada uno de los escaneos para la adquisición de los datos sería de seis minutos. Duración a la que hay que sumar la demora que trae consigo la transferencia de los datos brutos de cada uno de los escaneos desde el BLK360 hasta la tableta que utilizamos para la adquisición. Así pues, la transferencia de estos datos a la tableta nos permite poder ir alineando los distintos escaneos. Este es un paso que no es necesario llevar a cabo durante el trabajo en campo, y que, si bien lo realizaremos durante el posprocesado en laboratorio desde cero, si se realiza *in situ* cumple una función realmente útil durante las labores de levantamiento digital.

Cuando alineamos los distintos escaneos, podemos inspeccionar cómo se van complementando cada una de las nubes de puntos generadas por el BLK360, comprobando de esta forma si se está quedando algún espacio sin cubrir, por razones como pueden ser la presencia de un punto ciego entre un estacionamiento y otro del escáner. En el caso de que algo así se pueda producir, podríamos tomar la decisión de realizar un escaneo extra, cubriendo esa carencia entre un escaneo y otro. Esta situación se llegó a producir en el yacimiento de Torregarcía, pero al llevar a cabo este procedimiento de trabajo, pudo ser solventada sin problemas. Con esto también estamos realizando al mismo tiempo un croquis que resultará de gran utilidad para la alineación final de los estacionamientos durante el posproceso en Cyclone REGISTER 360 desde el laboratorio.

Hay que añadir que, la transferencia de los datos a la tableta no cumple tan sólo este objetivo, sino también el de realizar una copia de los escaneos, ya que, si bien los datos en bruto son almacenados en la memoria interna del BLK360, aumentamos el nivel de seguridad de los datos al tener una copia externa, disminuyendo así la probabilidad de una pérdida total de la información obtenida debido a cualquier percance que pudiera sufrir alguno de estos dos dispositivos.

7.3.2. Fotogrametría

Empezando por la fotogrametría aérea, esta pudo llevarse a cabo sin grandes complicaciones. En primer lugar, y atendiendo a las condiciones meteorológicas, pudimos contar con ausencia de precipitaciones que permitían efectuar el vuelo programado del UAV para la captura de las fotografías del yacimiento. Por otra parte, la velocidad del viento también resultó ser óptima, sin rachas fuertes que dificultasen la misión. Ahora bien, ¿cuál fue la configuración de la misión automatizada de vuelo fotogramétrico?

A partir de un vuelo fotogramétrico se pueden sacar varios productos distintos, encontrándonos principalmente con cartografías en dos dimensiones y modelos en tres dimensiones por otro. La configuración de la misión de vuelo hará que las fotografías resultantes de este sean mejores para un tipo u otro de producto. En nuestro caso, como queríamos llevar a cabo el levantamiento digital del yacimiento, los parámetros tendrán que ser los óptimos para modelos en tres dimensiones. Para ello, programamos una misión de tipo doble malla o *grid*, en la que el UAV irá tomando fotografías a lo largo de varias calles paralelas y perpendiculares entre sí, tal y como podemos observar en la figura 7.2. De este modo se obtienen fotografías desde muchos ángulos distintos, permitiendo al *software* de posprocesado poder generar una nube de puntos mucho más completa.

El vuelo tuvo una duración total de 17 minutos, y fue programado para alcanzar una altura máxima con respecto al punto de despegue de 15 m. Esta altitud resultó óptima para poder cubrir todas las estructuras presentes en Torregarcía en un solo vuelo, sin tener que renunciar por ello a unas fotografías de gran calidad y detalle, obteniendo así un GSD (distancia de muestreo del suelo) teórico de 0,44 cm/px. El Phantom 4 Pro+ realizó fotografías a lo largo de 7 calles en dirección noreste-suroeste, y 14 calles en dirección noroeste-sureste.

Otro aspecto muy importante es el ángulo de ataque de la cámara del UAV con respecto a la superficie sobrevolada. Por lo general, para realizar una cartografía, la mejor opción sería un ángulo de 90°, completamente cenital. Sin embargo, para el modelado en tres dimensiones es preferible utilizar un ángulo de 70°, que nos dé un plano más picado de las estructuras, para así poder obtener más información de aquellas superficies de las estructuras que se encuentren en un plano vertical.

El último parámetro configurable que reseñar es el solape entre las fotografías que toma el UAV. Cuanto mayor sea el solape entre las fotografías, mayor será la precisión y fiabilidad del modelo tridimensional que obtendremos mediante la fotogrametría. En el caso concreto de Torregarcía, el solape entre fotografías ha sido del 80 %.

El número total de fotografías obtenidas a raíz del vuelo fotogramétrico con UAV fue de 320. Se trata de una cifra elevada teniendo en cuenta las dimensiones del yacimiento y comparándolo con la cantidad de fotos que pueden llegar a obtenerse para una configuración destinada a la obtención única y exclusiva de cartografía 2D. En cuanto a la georreferenciación, se emplearon un total de cuatro dianas, ubicadas en cada una de las cuatro esquinas que forman el rectángulo de la malla del vuelo UAV.



Figura 7.2. Programación del vuelo fotogramétrico desde Pix4Dcapture.

Con respecto a la fotogrametría terrestre, el recorrido realizado para la consecución de esta resultó ser el mismo que se llevó a cabo durante las labores de levantamiento digital mediante el empleo del BLK360, realizando un barrido a lo largo de todo el perímetro exterior de las estructuras. Todas las fotografías realizadas, un total de 590, se tomaron con el objetivo a una distancia focal de 50 mm, debido a que, en una cámara de este formato, con un sensor *Full Frame*, la distancia focal de 50 mm resulta ser la óptima de cara a la realización de levantamientos fotogramétricos.

Para la georreferenciación del modelo se utilizaron un total de 18 dianas. A diferencia de las empleadas en la fotogrametría aérea y con el escáner láser, en esta ocasión, todas y cada una de las dianas fueron posicionadas en las propias estructuras, tanto en los planos verticales como en los horizontales de estas. Las dianas eran de tipo *Black and White*, de un formato muy reducido con respecto a las utilizadas anteriormente, y fueron ubicadas en las estructuras de manera que estas no sufrieran ningún tipo de daño.

7.4. Posprocesado de los datos obtenidos en campo

Aquí nos encontramos con el posprocesado de dos tipos de datos distintos para la posterior combinación de ambos: los obtenidos mediante el LiDAR terrestre, y los resultantes de la fotogrametría aérea y terrestre. Comenzamos explicando el posprocesado de los datos procedentes de los escaneos.

Una vez finalizadas las labores de adquisición de datos en campo con el BLK360, el posproceso de estos comenzó con la exportación de los escaneos en bruto.

Estos datos tienen que ser procesados en primera instancia con el *software* Cyclone REGISTER 360 para poder obtener una nube de puntos (Fig. 7.3). Además, es durante el proceso de trabajo con este mismo programa cuando realizamos también las siguientes tareas:

- La correcta alineación entre sí de los 42 escaneos realizados en Torregarcía. El *software* intentará además optimizar dicho alineamiento, buscando el máximo solape entre escaneos y el mínimo error, por lo que no nos encontramos con una conexión realizada de manera manual al cien por cien.
- La georreferenciación del modelo, introduciendo las coordenadas de cada una de las dianas *Black and White* empleadas durante el levantamiento digital, y realizando la identificación de cada una de estas dentro del *software*.

Una vez hecho esto, hemos podido obtener una primera nube de puntos, con una precisión de 0,013 m, un solapamiento del 52 % y una fuerza del 66 %, todos ellos parámetros que resultan ser buenos para la solución de Leica. Esta nube consta, además, de un total de 900 281 512 puntos, una densidad realmente grande, y se han llegado a crear un total de 113 enlaces entre los distintos escaneos, ya que estos no solamente se crean durante el alineamiento entre los estacionamientos consecutivos por orden de escaneo en campo, sino entre todos los escaneos existentes dentro del proyecto, produciéndose así este número de enlaces que supera el centenar, consecuencia de la combinatoria entre todos los escaneos

Ahora bien, esta no deja de ser una primera nube de puntos que es necesario someter a toda una serie de posprocesos

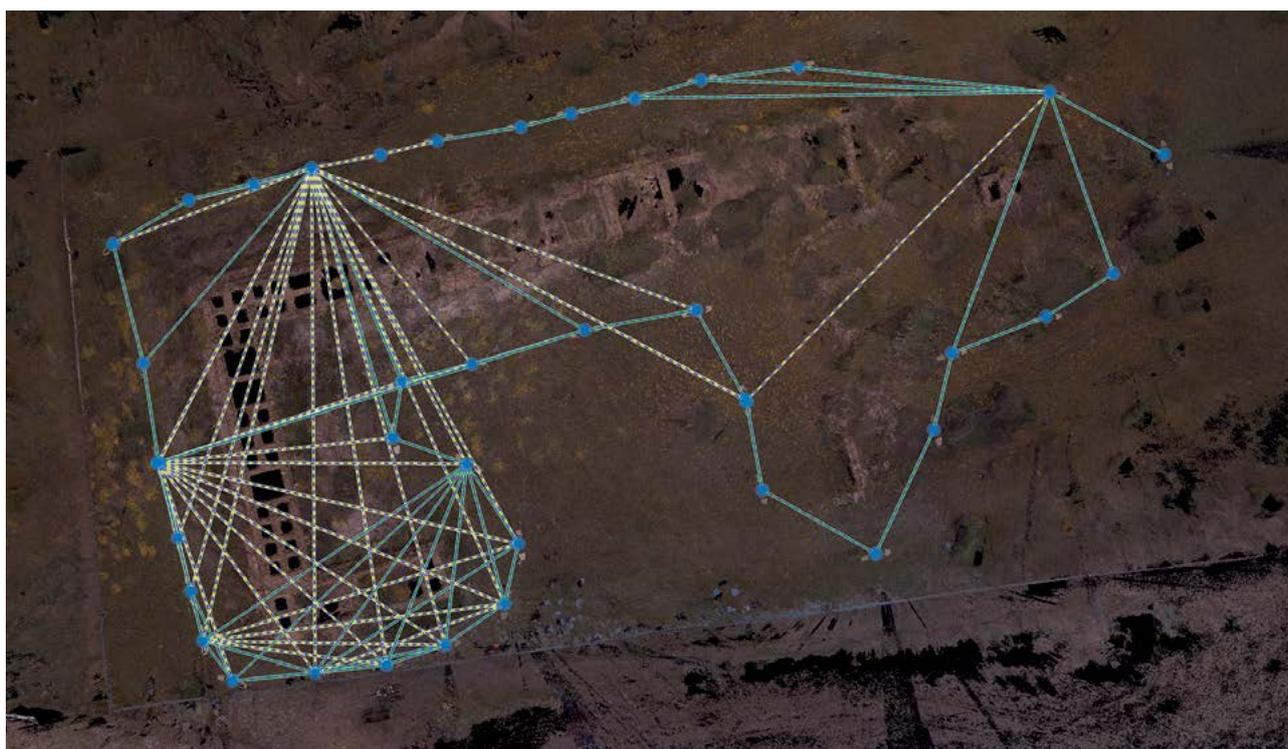


Figura 7.3. Resultado de la alineación de los escaneos de Torregarcía en Cyclone REGISTER 360.

para poder limpiarla. Todos estos son ya realizados en la última de las soluciones informáticas de Leica, Cyclone 3DR, en nuestro caso la versión 2022. Este *software* nos ofrece una gran cantidad de herramientas con las que llevar a cabo distintos filtrados y procesos de limpieza. Una de las más importantes nos permite la detección de objetos en movimiento entre los distintos escaneos de los que se compone la nube de puntos, como pueden ser los operarios del BLK360 o incluso aquella vegetación que ha sido mecida por el viento. Gracias a la aplicación de filtros como este, podemos llegar a obtener una nube altamente depurada, tal y como podemos ver en la figura 7.4.

En cuanto al posproceso de los datos procedentes de la fotogrametría terrestre, y la obtención del modelo, este puede resultar mucho más sencillo, debido a que el flujo de trabajo se encuentra mucho más cerrado y automatizado en el *software*. Una vez que introducimos todo el material fotográfico generado en campo, lo primero que tendremos que hacer será la identificación de las distintas dianas y la

inserción de las coordenadas de cada una de estas, para que de este modo todos los productos que se acaben generando se encuentren georreferenciados correctamente. Una vez hecho esto, el *software* comenzará con el alineamiento de las imágenes y con la búsqueda de todos aquellos puntos espaciales coincidentes por el solapamiento entre fotografías. Gracias a estos procedimientos, el *software* puede llevar a cabo la generación de una nube de grandes puntos, y es a su vez, a partir de esta nube, desde la que el programa va a poder llevar a cabo la creación de una malla, para terminar con la generación de un modelo final sólido texturizado (Fig. 7.5).

La nube obtenida gracias a la fotogrametría consta de un total de 640 797 741 puntos. Una nube que, si bien se queda por debajo de los novecientos millones de puntos de la obtenida por medio del LiDAR terrestre, no puede dejar de ser considerada de una gran densidad. Hay que tener en cuenta también que, la diferencia entre las cantidades de puntos entre una y otra, pueden deberse principalmente a

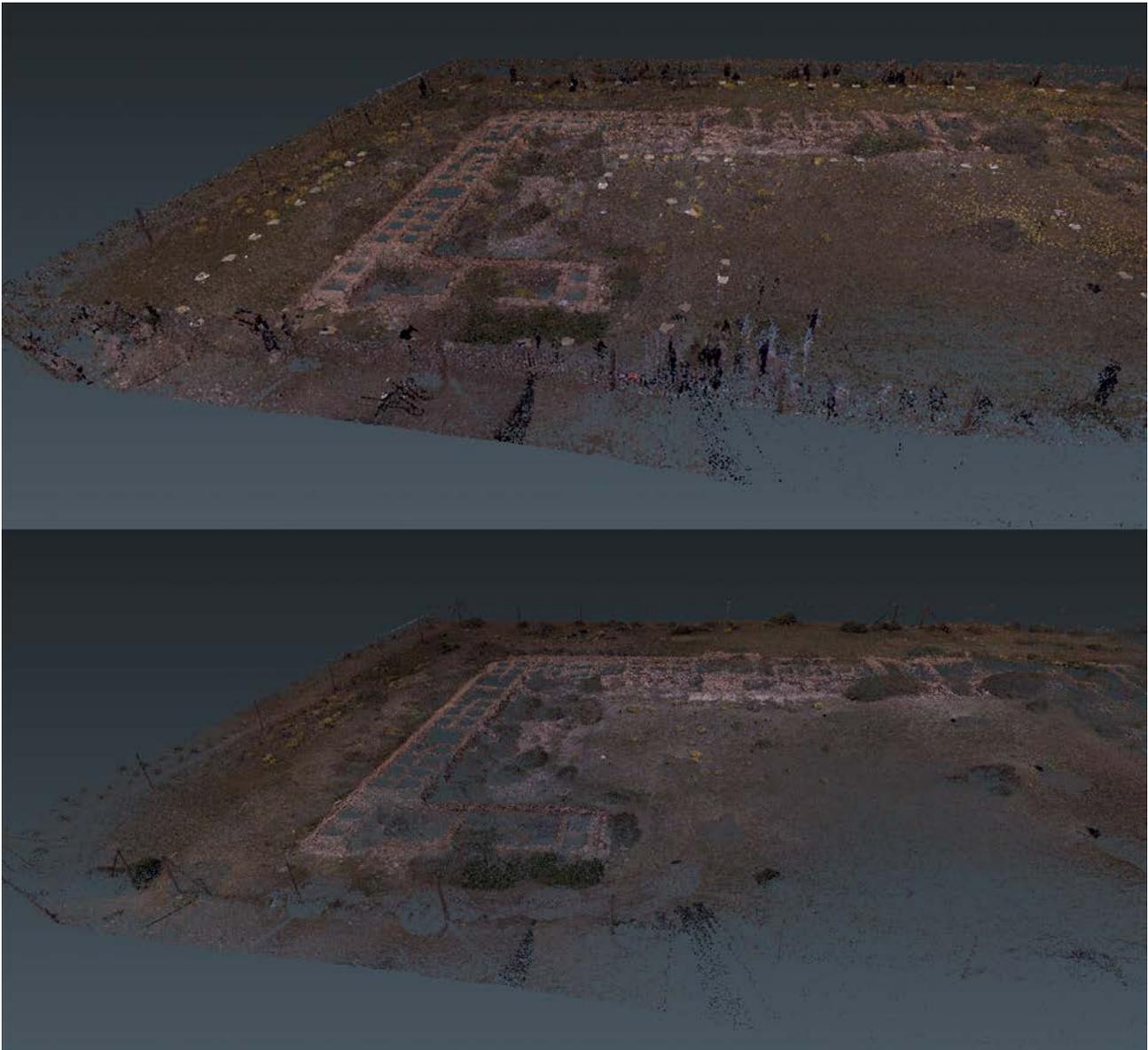


Figura 7.4. Nube sin limpiar (superior) y nube tras el proceso de limpieza (inferior).



Figura 7.5. Modelo fotogramétrico sólido texturizado.

dos factores. El primero de ellos es la zona de acción de cada una, ya que, en el caso de la fotogrametría, el área de trabajo está mucho más delimitada que en el caso del LiDAR, que toma datos hasta donde alcanzan sus pulsos láser. El segundo de esos factores es la redundancia en cuanto a los puntos obtenidos mediante el escáner láser, puesto que hay una gran cantidad de puntos que pueden llegar a estar casi duplicados, encontrándose al mismo tiempo en varios escaneos distintos. Todo esto se ha tenido en cuenta a lo largo del posproceso.

7.5. Resultados obtenidos

La aplicación de distintas técnicas de levantamiento digital en tres dimensiones en el yacimiento de Torregarcía nos ha permitido la obtención de un modelo completo de las estructuras de la Zona A.1 del yacimiento. Así pues, las carencias de la nube de puntos obtenida mediante LiDAR terrestre han podido ser cubiertas gracias a la nube fotogramétrica, y viceversa (Fig. 7.6). De este modo hemos podido constatar tanto las limitaciones como los puntos fuertes de cada una de estas técnicas al ser aplicadas en un yacimiento de estas características.

Este modelo digital de Torregarcía nos proporciona además una base sólida para poder llevar a cabo una restitución o una reconstrucción de las estructuras. Aunque ya en el punto actual, podemos extraer una importante cantidad de información acerca de estas.

La nube de puntos resultante de ambas técnicas de digitalización puede ser sometida a una considerable cantidad de procesos. Un ejemplo de ello es la posibilidad de extraer cualquier tipo de plano ortogonal (Fig. 7.7), con la que se pueden examinar sus paramentos. Además, al encontrarnos con una nube totalmente georreferenciada y dimensionada con una gran precisión, se puede llevar a cabo todo tipo de mediciones, cálculos, que nos arrojen una mayor cantidad de información acerca de la capacidad productiva que pudo llegar a tener en su momento.

Ejemplo de ello son los cálculos de volúmenes que se han podido realizar de todas aquellas piletas que no presentaban colmatación (Fig. 7.8). La extracción de dichos volúmenes ha sido posible en un total de 34 piletas, y a partir de este hemos podido conocer que, la capacidad total que poseen estas es de 29,38 m³.

Pero no tan sólo podemos acercarnos al estudio de su funcionalidad. Otro aspecto de gran interés sería el estudio de la evolución que han venido sufriendo las estructuras a lo largo del tiempo. En este sentido, tal y como ya hemos podido observar durante las labores de adquisición de datos en campo y sometiendo posteriormente a un primer examen al modelo de Torregarcía, encontramos indicios de cómo algunas de las piletas o balsas que conforman el grueso de las estructuras presentes en el yacimiento han visto cambiada su morfología original. Es por ello por lo que el modelo digital juega un papel clave en el estudio de las distintas fases presentes en el yacimiento y los posibles cambios de funcionalidad a los que han podido ser sometidos parte de sus estructuras.

En definitiva, podemos constatar cómo actualmente, y de manera cada vez más generalizada en trabajos similares, la digitalización utilizada como una herramienta de documentación del patrimonio histórico-arqueológico va cobrando cada vez una mayor importancia. Y no es tan sólo ya por el hecho de ser un soporte más en el que preservar dicho patrimonio, que ya de por sí es un gran valor, o como base fundamental para su divulgación, sino por la fuente de información fiable que representa, ya que, obtenida con el máximo detalle y precisión posibles, puede ser perfectamente sometida a estudio.

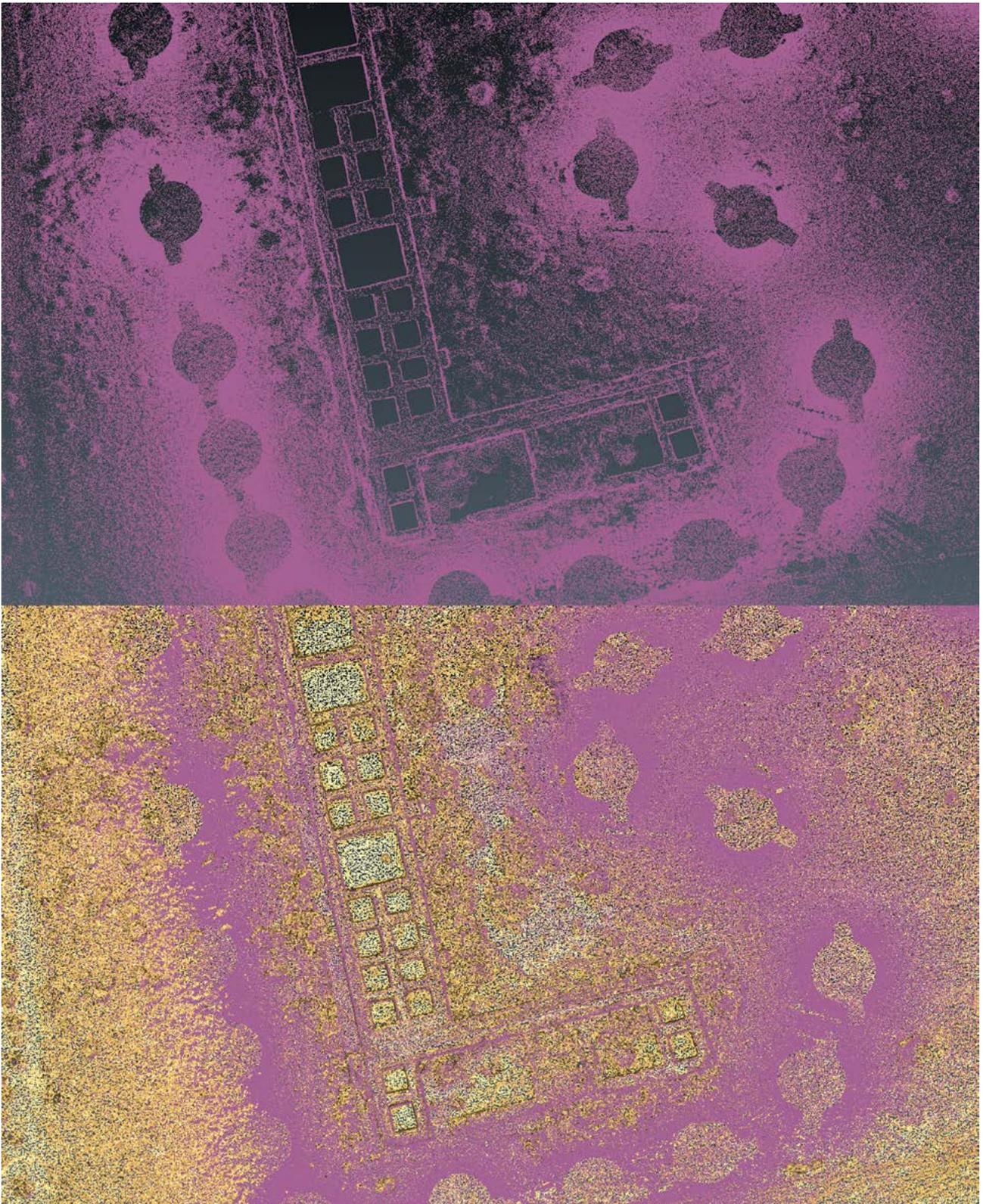


Figura 7.6. Nube de puntos LiDAR (superior) y combinación de esta con la nube de puntos de la fotogrametría (inferior).

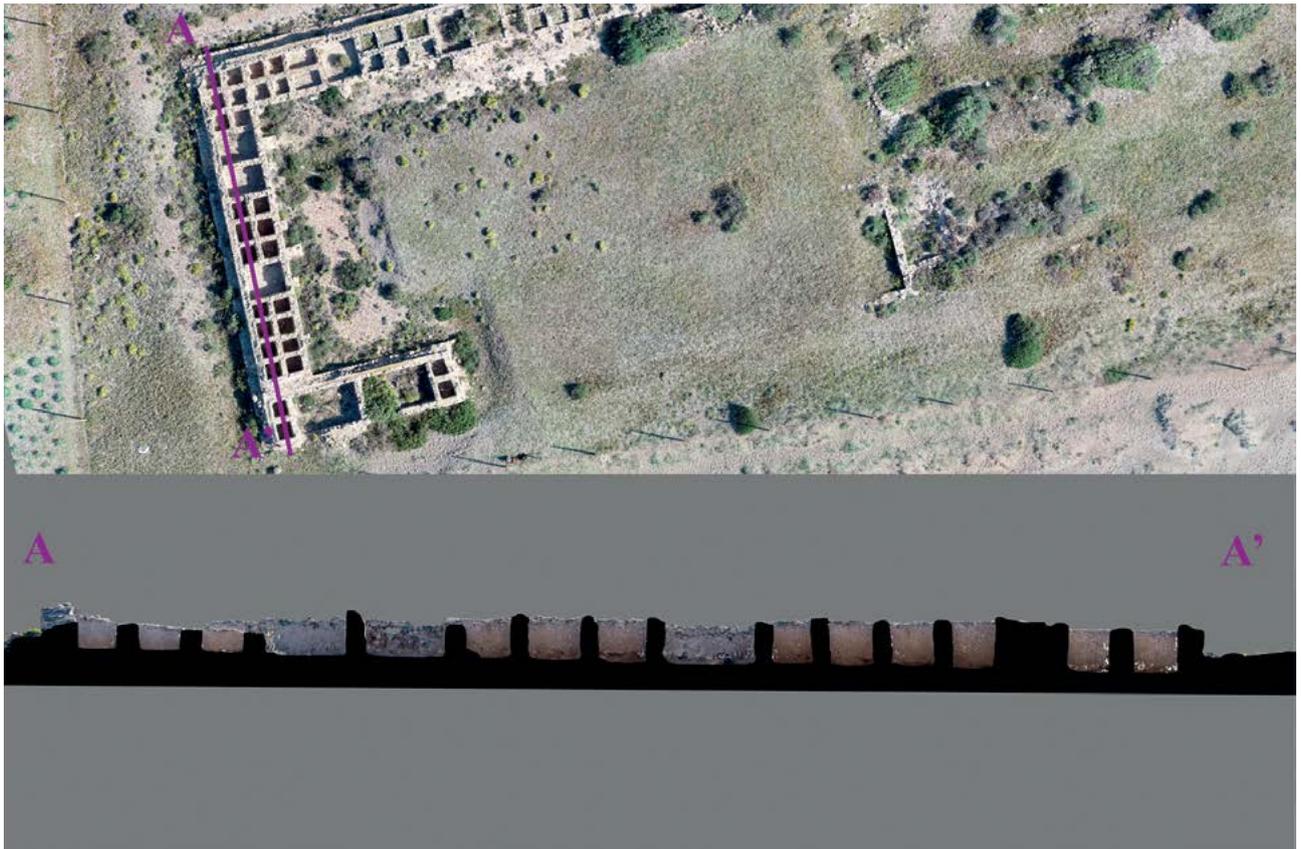


Figura 7.7. Sección del ala oeste de las estructuras.

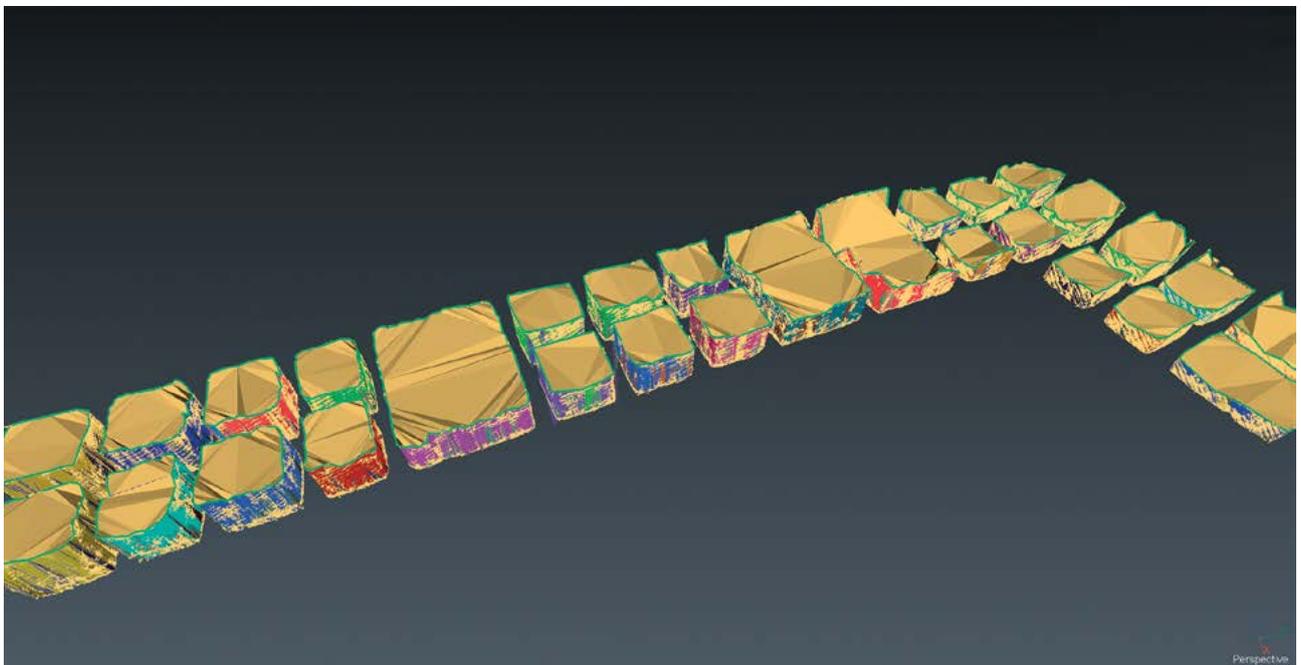


Figura 7.8. Extracción de volúmenes de piletas a partir del modelo digital de Torregarcía.

La aplicación de la magnetometría sobre el yacimiento y el procesamiento de sus datos¹

Otro de los métodos aplicados a la Zona A de Torregarcía ha sido la magnetometría. Este es uno de los métodos geofísicos más indicados para la investigación histórico-arqueológica no invasiva, por su rapidez, economía y transporte. Se trata de un método pasivo (Piro 2009; Boschi 2009, 299) que se puede usar tanto en tierra como en el mar, cuya limitación más importante es la menor capacidad de resolución en profundidad. Dependiendo de la potencia de la fuente de interferencia magnética, pueden detectarse elementos hasta una profundidad de 2,5 a 3 m. m. Aunque el magnetismo puede medirse en 3D lo normal es hacerlo en 2D (Sala *et al.* 2016).

La magnetometría consiste en la detección de anomalías derivadas de las propiedades magnéticas de los suelos y los elementos. La amplitud de esas alteraciones depende del contraste o diferencia de susceptibilidad magnética del suelo con los elementos, del volumen de estos y de la distancia con los sensores. A diferencia del georradar, esta técnica no muestra información tomográfica en profundidad, de manera que la imagen o imágenes obtenidas constituyen una planta resumen de los datos del subsuelo hasta -1,5 m, aproximadamente, denominada magnetograma.

Cuando una estructura arqueológica enterrada se caracteriza por el contraste de la susceptibilidad magnética respecto a sus alrededores, mostrará magnetización inducida en la dirección del Campo Magnético Terrestre (Aspinall *et al.* 2009, 22; Piro 2009, 31, Fig. 1; Fassbinder 2015, 85).

La superficie suele ser más magnética que la roca, así las estructuras excavadas producirán una señal magnética positiva y el material de relleno se puede detectar por una señal negativa (Fedi *et al.* 2017, 204). A veces, las estructuras arqueológicas muestran un contraste magnético ‘dipolar’, esto es, que la misma estructura proporciona dipolos magnéticos, positivo y negativo (Aspinall *et al.* 2009, 69).

El contraste se acentúa con la concentración de minerales ferrosos o de material termo-remanente (Boschi 2009, 305). Los cambios muy leves en la química del suelo también pueden influenciar los resultados magnéticos, como cuando se crea el humus. Siempre que el humus ha sido perturbado o removido, se hace evidente en los datos magnéticos, como se ejemplifica en los surcos de labranza o en los senderos modernos (Welch 2001, 18). Estas variaciones de la magnitud física medida son las

anomalías (Boschi 2009, 298).

De los diversos tipos existentes de magnetómetros, empleamos en esta exploración el de paso de flujo, o *fluxgate*, que mide los componentes del CMT. Actualmente contamos con *arrays* de sensores arrastrados por vehículos que pueden cubrir varias hectáreas al día (Sala *et al.* 2016). El espaciado de los sensores dependerá del tamaño y de la profundidad en la que se encuentren las estructuras. En el trabajo de campo se evitará el ruido, esto es, cualquier perturbación que oscurezca o reduzca la densidad o cualidad de una señal (Aspinall *et al.* 2009, 77).

8.1. Aspectos técnicos del equipo de magnetometría utilizado

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del equipo geofísico utilizado durante la toma de datos en la campaña de Torregarcía realizada en la Zona A en el año 2021. El magnetómetro se utilizó junto con un sistema de posicionamiento global (GPS), que sirvió para el correcto georreferenciado de los productos finales. Estos productos se elaboraron a partir de la utilización de una serie de *software* bajo licencia.

Empleamos un equipo MX V3, un magnetómetro multicanal modulable de la casa Sensys (*fluxgate gradiometer* FGM650/3). Su diseño modular permite hacer mediciones con diversas configuraciones, siendo muy adaptable a las características del área a prospectar. El número mínimo de canales con los que trabaja el equipo es de 3 y el máximo de 16 gradiómetros. En su configuración completa el ancho de barrido en la exploración es de 3,75 m. El sistema está previsto para ser empleado manualmente por uno o varios operarios, o remolcado mediante vehículo motorizado (Fig. 8.1).

La frecuencia de muestreo (*sample rate*) es también modulable, permitiendo elegir entre distintos módulos de frecuencia, entre estos: 20, 100 y 200 Hz. A su vez, depende de la velocidad de recolección de los datos. Este ajuste influye directamente en el número de valores de medición o puntos tomados por metro. Normalmente, cuando el equipo va empujado por un operador se elige la configuración de 20 Hz y cuando es remolcado con un vehículo que puede alcanzar hasta los 100 km/h la configuración de 100 Hz.

La distancia aplicada en este caso entre los sensores o gradiómetros es de 25 cm. Los gradiómetros se conectan a una unidad central, MX Compact V3, donde se registran todos los datos de la exploración. El sistema es controlado por el operador a través de una tableta con el *software* de

¹ Este capítulo ha sido coordinado por José Antonio Ruiz Gil, Francisco Javier Catalán González y Lázaro G. Lagóstena Barrios.