

Cómo citar este artículo / How to cite this article: Esquivel, F. J., Alarcón Moreno, L., Esquivel, J. A. y Fernández-García M.ª I. (2019). Arqueología virtual en la *terra sigillata* y aplicaciones estadísticas. Láser escáner vs. Fotogrametría. *Lucentum*, XXXVIII, 243-254. <http://dx.doi.org/10.14198/LVCENTVM2019.38.11>

ARQUEOLOGÍA VIRTUAL EN LA *TERRA SIGILLATA* Y APLICACIONES ESTADÍSTICAS. LÁSER ESCÁNER VS. FOTOGAMETRÍA*

VIRTUAL ARCHAEOLOGY IN THE STUDY OF *TERRA SIGILLATA* AND STATISTICAL APLICATIONS. LASER SCANNING VS. PHOTOGRAMMETRY

FRANCISCO JAVIER ESQUIVEL

Universidad de Granada

jesquivel@ugr.es

<http://orcid.org/0000-0001-8296-1013>

LAURA ALARCÓN MORENO

Universidad de Granada

lauraperiana@correo.ugr.es

<https://orcid.org/0000-0003-2748-9718>

JOSÉ ANTONIO ESQUIVEL

Universidad de Granada

esquivel@ugr.es

<https://orcid.org/0000-0002-4525-7489>

MARÍA ISABEL FERNÁNDEZ-GARCÍA

Universidad de Granada

mifernan@ugr.es

<https://orcid.org/0000-0003-3030-346X>

Recepción: 23-06-2019

Aceptación: 02-10-2019

Resumen

El potencial de la denominada ‘Arqueología virtual’ es amplio y diverso. Una de las principales aplicaciones es que permite la construcción de registros 3D de piezas y es totalmente abierto, preciso, y muy fácil de compartir. Esto se traduce en un gran salto divulgativo, tanto de carácter educativo como científico, que permite realizar estudios analíticos muy fiables, imágenes de perfiles o secciones, reconstrucciones digitales, aplicaciones museológicas, etc.

Este trabajo surge como continuación de un estudio previo de caracterización estadística de *terra sigillata* isturgitana (Esquivel *et al.*, 2019) en el que se mostró el problema de realizar estudios cuantitativos dimensionales a piezas que son, fundamentalmente, fragmentos

Abstract

The potential of the so-called ‘Virtual Archaeology’ is wide-ranging and diverse. In brief, this term can be understood as a three-dimensional registration of fragments, which is totally open, precise, and very easy to share. This results in a great leap forward both in the educational and scientific field, which allows to carry out reliable analytic studies by registering dimensional measures otherwise difficult to obtain, images of sections, digital reconstructions, museological applications, etc.

This paper emerges as the continuation of a previous work on the statistical characterization of *terra sigillata* from *Isturgi* (Esquivel *et al.*, 2019), which clearly showed the problem of performing dimensional quantitative studies of fragments of original objects. This work has

* El presente trabajo ha contado con el soporte del proyecto de I+D «Producción y adquisición de cerámicas finas en el proceso de configuración de las comunidades cívicas de la Bética y la Hispania Meridional durante el Alto Imperio Romano (HAR2016-75843-P)». Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España. Investigadora Principal María Isabel Fernández-García, y con el soporte de instrumentación e investigadores del «Laboratorio arqueológico de modelización 3D» (Departamento de Prehistoria de la Universidad de Granada) y del «Laboratorio Arqueológico de Modelización 3D». Universidad de Granada.



del objeto original. En este artículo se fijan tres objetivos principales: la creación de una base de datos 3D de *terra sigillata* isturgitana y su divulgación, la realización de un estudio comparativo que muestre qué metodología de modelado 3D es más conveniente en el registro de *terra sigillata*, y la extracción de medidas dimensionales de forma autónoma y precisa para realizar estudios estadísticos cuantitativos. Para ello, en este trabajo se resumen los pasos de modelado utilizando las metodologías de láser escáner y fotogrametría realizando una discusión de las ventajas e inconvenientes de cada una, se crea un entorno web 3D que permite de manera rápida y ágil la visualización gráfica de las piezas, y se analiza el grado de perfeccionamiento alcanzado por el taller isturgitano mediante un estudio estadístico de datos dimensionales obtenidos a partir del modelo 3D de una de las piezas.

Palabras claves. *Baetica*; estadística; fotogrametría; *Isturgi*; láser escáner 3D; *terra sigillata* hispánica.

three main objectives: the development and disclosure of a three-dimensional database of Hispanic *terra sigillata*; the performance of a comparative study showing that the three-dimensional modeling methodology is more convenient for the registration of *terra sigillata*; and the extraction of dimensional measures in an autonomous and accurate way to carry out quantitative statistical studies. In order to do this, this paper summarizes the main steps of the modeling process using both the laser scanning method, and the photogrammetry method, analysing their advantages and disadvantages. A three-dimensional web environment is created, which allows for a quick graphic display of the fragments. Finally, it analyses the level of sophistication achieved by *Isturgi's* workshop by means of a statistical study of the dimensional data obtained from the three-dimensional model.

Key words. *Baetica*; Statistics; photogrammetry; *Isturgi*; 3D laser scanning; Hispanic *terra sigillata*.

1. INTRODUCCIÓN

La introducción de las técnicas digitales en el ámbito arqueológico es una realidad plenamente consolidada tal y como lo demuestra la aparición de la denominada «Arqueología Virtual», que puede definirse como «la disciplina científica que tiene por objeto la investigación y el desarrollo de formas de aplicación de la visualización asistida por ordenador a la gestión integral del patrimonio arqueológico» (López-Menchero y Grande, 2011: 72). Su formulación se remonta a inicios del siglo XX (Reilly, 1990; Duque y De Francisco, 2015: 11). Aunque, sin embargo, no fue hasta inicio del año 2000 cuando se estimuló la utilización de las nuevas tecnologías con el fin de aprovechar las oportunidades que ofrecen en todos los ámbitos (Duque y De Francisco, 2015: 11). En los últimos años la Arqueología Virtual ha experimentado un auge gracias a los avances tecnológicos y a la aparición de diversos programas de registro y documentación 3D cada vez más especializados (Martínez *et al.*, 2010: 133). Estas técnicas son principalmente aplicadas con el propósito de documentar, modelizar y representar estos elementos; además del potencial que poseen en cuanto a la divulgación docente e investigadora.

Por otra parte, es usual trabajar con gran número de objetos arqueológicos de los que se dispone de diversas variables, lo que hace necesario la aplicación de técnicas estadísticas para extraer la máxima información posible. Para ello los objetos deben permitir obtener mediciones comparables, lo que rara vez ocurre en Arqueología debido a que las piezas normalmente están deterioradas o incluso son fragmentos aleatorios del objeto original (Esquivel *et al.*, 2019). En este sentido, los modelos 3D de los objetos permiten obtener mediciones físicas que presentan diversos problemas,

como pueden ser la falta de precisión al tratarse de detalles pequeños, la destrucción de la pieza al realizar la medición, etc. Además se tiene el potencial de poder realizar reconstrucciones de gran precisión a partir de los modelos 3D y obtener las mediciones sobre estas reconstrucciones (Chiabrandó, 2018; Gil-Melitón, 2019; Torres *et al.*, 2010: 52).

Uno de los materiales arqueológicos que más se ha beneficiado de las grandes posibilidades que ofrecen los modelados tridimensionales es la cerámica, posibilitando «un desarrollo importante a la hora de avanzar en la metodología del dibujo y visualización de los recipientes cerámicos documentados en intervenciones arqueológicas (sic)» (Martínez *et al.*, 2010: 133). Por este motivo, los modelos 3D deben ser considerados como «herramientas estándar de análisis cerámico, puesto que permiten almacenar las formas cerámicas en formato digital agilizando enormemente el proceso de dibujo de las formas y permitiendo la elaboración de láminas de dibujos de alta calidad, por otro lado permiten avanzar en estudios referentes a los modos de producción a partir de la uniformidad o variabilidad de formas cerámicas (sic)» (Martínez *et al.*, 2010: 133). A partir de los modelos 3D de cerámica arqueológica se pueden establecer delineaciones de los perfiles, alzados y, sobre todo, realizar cálculos volumétricos, secciones, distancias geodésicas, etc. De esta forma se pueden inferir resultados importantes acerca de su manufactura, forma, cuantificación, similitud, tecnología, tipología, etc. lo que convierte a estas técnicas en herramientas de gran importancia en la investigación.

Este estudio surge como línea abierta del trabajo Esquivel *et al.* (2019), en el que se realiza una caracterización de la *terra sigillata* hispánica. Para ello se seleccionó una muestra representativa de piezas, que

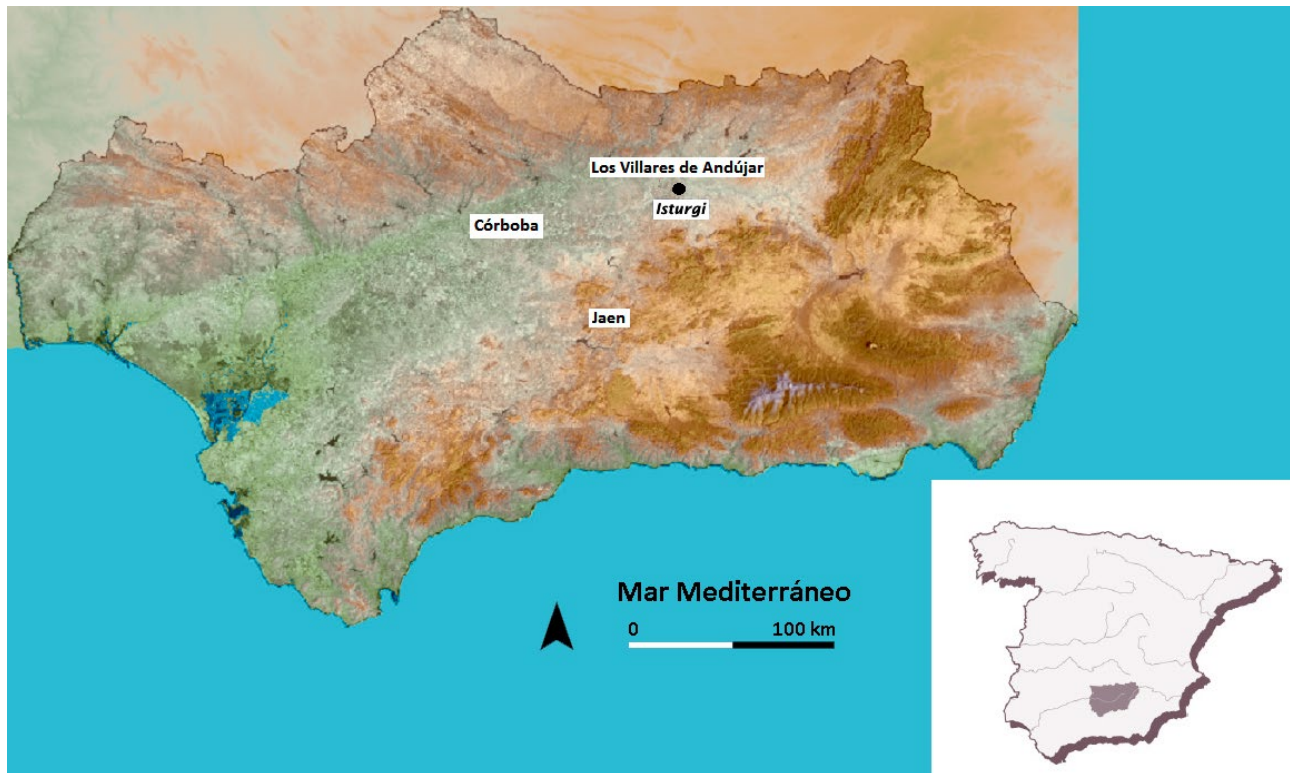


Figura 1: Mapa que muestra la localización del yacimiento de *Isturgi*

fueron documentadas, mediante un sistema de fichas, y analizadas estadísticamente, mediante estudios de clasificación y diversidad. A pesar de que solo se pudo trabajar con una variable cuantitativa, dado que las piezas son fragmentos del objeto original, las técnicas estadísticas utilizadas mostraron claras asociaciones entre las dimensiones físicas con las versiones lisas y decoradas, así como con la funcionalidad de estas. Aquí se señaló como principal línea abierta la realización de modelos 3D de las piezas para tratar de solventar en gran medida esta escasez de variables analizables (nuevas medidas y variables estimadas a partir de los modelos 3D como, por ejemplo, la cantidad de arcilla), proponer una reconstrucción virtual del material y facilitar su divulgación educativa y científica.

En este trabajo se aborda esta tarea mediante la realización de un completo registro 3D de fragmentos de *terra sigillata* hispánica pertenecientes al yacimiento de *Isturgi* (Fig. 1) mediante las dos metodologías, escáner láser y fotogrametría. Los objetivos son la documentación y divulgación de las piezas, la descripción de los principales aspectos comparativos entre las dos metodologías en cuanto a los resultados obtenidos (nube de puntos, geometría, textura, etc.), el coste temporal y económico, y la medición de características dimensionales de las piezas que permitan análisis estadísticos más completos a partir de más variables numéricas. En la siguiente sección se introduce la metodología 3D, las técnicas de escáner láser y fotogrametría. En la sección 3 se presenta un rápido resumen del estado actual del

yacimiento de *Isturgi*, se señala los principales aspectos experimentales del proceso de modelado mediante cada una de las técnicas, se introduce el entorno online donde se ha creado un repositorio de los modelos obtenidos, y se muestra el potencial de los modelos 3D en cuanto al análisis de las piezas incluyendo un estudio estadístico ilustrativo para determinar el nivel de perfeccionamiento alcanzado en el taller isturgitano. Finalmente, se introduce un breve resumen del trabajo, una discusión de los principales resultados, y se establecen líneas abiertas de investigación.

2. METODOLOGÍA DE MODELADO 3D

Actualmente existen dos técnicas básicas que permiten generar modelos 3D de alta resolución y precisión: la fotogrametría digital y el escaneado láser (Lerma *et al.*, 2013: 86). A continuación se introducen las diferentes etapas de trabajo de cada método en cuanto al registro de datos, el procesado de los mismos y la obtención de los resultados.

2.1. ESCÁNER LÁSER DE LUZ ESTRUCTURADA

El escáner láser realiza un barrido de una superficie captando miles de puntos por segundo con un haz de láser en abanico. Como resultado final se obtiene una nube de puntos 3D compuesta por cientos de miles de mediciones individuales en un sistema de coordenadas

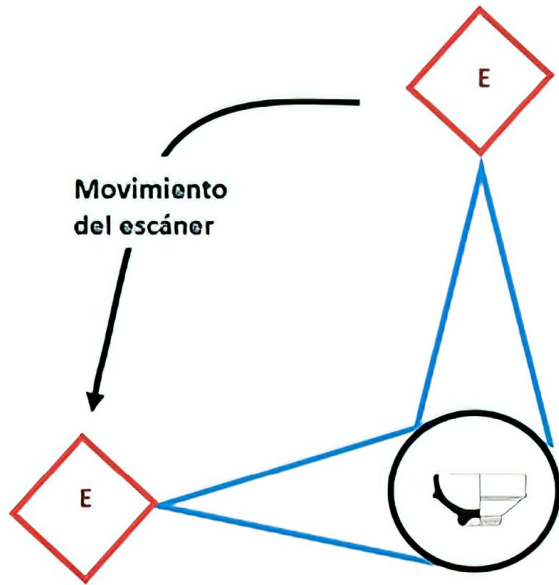


Figura 2: Protocolo de captura de datos

(x , y , z) que en sí mismas componen un modelo tridimensional de los objetos registrados. Dos sensores, ubicados a ambos extremos del escáner y convenientemente calibrados, se encargan de recoger este patrón proyectado (y ya deformado) sobre el objeto. Posteriormente se aplican diversos algoritmos matemáticos para obtener un objeto compacto que incluye la nube de puntos, la construcción de una malla digital y la textura mediante imágenes.

La captura de datos a través del escáner láser tiene cierta problemática y hay condiciones que empeoran la calidad del registro (Boehler *et al.*, 2003: 1; Historic England, 2017; Martínez Rubio *et al.*, 2018) además de incrementar el ruido o residuos de la nube de puntos. Los casos en los que este ruido aumenta aparecen al registrar una superficie reflectante, una superficie que tenga zonas en negro o cuando el objeto se encuentra en una posición oblicua respecto a la situación del escáner. También es habitual el residuo que resulta de la interferencia de elementos entre el escáner y el objeto. (Boehler *et al.*, 2003: 2). En el proceso de trabajo con el láser escáner se distinguen distintas fases:

1º Fase: Captura de datos. El proceso de trabajo comienza con la captura de datos. Esta primera fase conlleva una planificación previa del trabajo en la que hay que tener en cuenta la finalidad del escaneo ya que se debe valorar qué número de escaneos son imprescindibles en función de las necesidades de nuestro trabajo. Esto supone una labor de organización previa, buscando las posiciones en las que los campos de visión-captura se complementen mejor, siendo una de las estrategias más utilizadas la realización del barrido de la pieza mediante movimientos circulares, lo que permite obtener un registro de todas las superficies del objeto (Fig. 2).

2º Fase: Procesamiento de los datos. Esta consta a su vez de distintas fases:

- 2.1 Limpieza del ruido. A partir de cada escaneo se obtiene una nube de puntos que presenta una cantidad importante de ruido, esto es todo aquello que aparece en la imagen sin pertenecer al objeto. En esta fase se procede a la eliminación de los escaneos mediante un proceso de depuración manual y controlado.
- 2.2 Registro de la nube de puntos. El registro de las nubes de puntos consiste en el alineamiento de los escaneos que se han realizado al objeto mediante un proceso manual o automático dependiendo del tipo de software que se utilice.
- 2.3 Obtención del modelo tridimensional. Esta etapa consiste en la fusión de los distintos escaneos formando el modelo tridimensional del objeto. Este proceso también es conocido como TIN (Triangular Irregular Network), el cual consiste en una aproximación de la superficie que se pretende representar a una superficie poliédrica formada por triángulos cuyos vértices son los puntos de la nube obtenida (Barrera, 2006: 251), formando una única malla (*mesh*) tridimensional del objeto.
- 2.4 Texturización. Existen diversos métodos para dotar al modelo 3D de textura. Casi todos los escáneres son capaces de capturar el color del punto medido, consiguiendo nubes de puntos mucho más representativas del objeto digitalizado. Posteriormente se crea un modelo tridimensional en el que cada triángulo muestra el color de su baricentro. La obtención de la textura se consigue mediante una cámara digital (interna o externa) que permite obtener las imágenes georeferenciadas respecto a la nube de puntos para poder ser incorporadas sobre el modelo 3D. La resolución geométrica y radiométrica depende de la cámara (Biosca *et al.*, 2009: 310).

2.2. FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría es traducida etimológicamente como «la medida de lo escrito con luz» y se basa en la obtención de varias tomas fotográficas a corta distancia de forma que cubran toda la superficie del objeto con un solapamiento de al menos un 65% entre imágenes contiguas, con gran resolución y con una determinada geometría sobre el objeto. Tras el proceso de orientación de las tomas fotográficas se podrá llevar a cabo la modelización digital 3D del objeto. Dentro del proceso de elaboración de un modelo tridimensional a partir de la técnica de fotogrametría se distinguen distintas fases:

1º Fase: Captura de datos. Esta parte del trabajo es fundamental, ya que dependerá de ello el éxito del trabajo. Para conseguirlo es necesario hacer una planificación personalizada para cada objeto, mediante la realización de un croquis en el que se situarán los

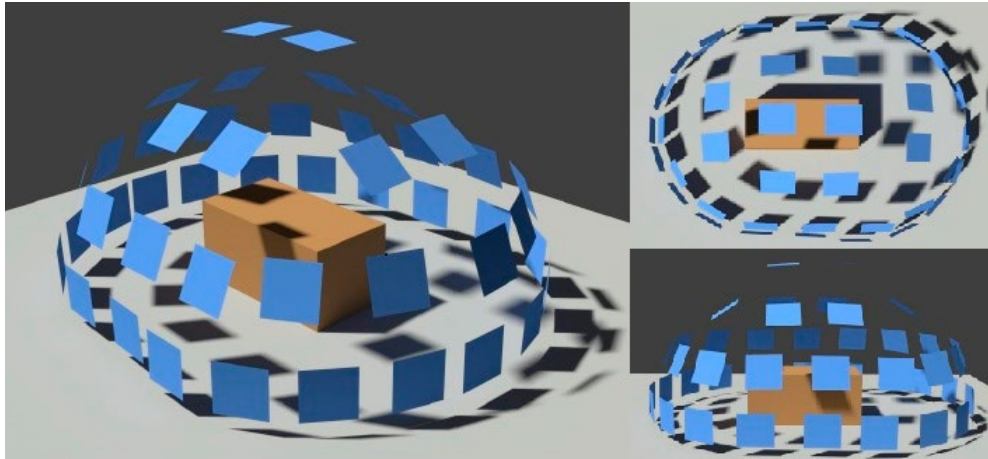


Figura 3: Estrategias en la captura de datos (Curso online de Introducción a la fotogrametría digital y su uso en patrimonio. http://www3.ubu.es/ccu/?page_id=4772)

distintos puntos de toma de imagen y se enlazarán las imágenes en una malla.

Puesto que el objeto de estudio es tridimensional son necesarias varias líneas fotográficas a distintas alturas. Para ello se pueden utilizar diferentes estrategias (Fig. 3).

Otro factor importante a la hora de planificar un proyecto de trabajo es el solapamiento que debe de existir entre fotografías consecutivas. En fotogrametría se recomienda un solapamiento horizontal del 60% y vertical del 20% (Matthews, 2007. En Ruiz *et al.*, 2016: 108).

2º Fase: Procesamiento de los datos. Esta etapa consta a su vez de distintas fases:

- 2.1. Creación de la nube de puntos. Esta fase incluye la búsqueda de puntos comunes entre imágenes solapadas. El resultado de esta primera fase es la obtención de la nube de puntos sobre la que se creará la geometría.
- 2.2. Geometría. En esta fase se realiza la generación de la malla a partir de una serie de vértices y de polígonos que serán los que darán verdadero volumen a la nube de puntos.
- 2.3. Texturización. Tanto en la nube de puntos como en la geometría sin texturizar se puede observar en ocasiones los colores originales de nuestro objeto, estos tonos son aproximados a partir de los puntos de correlación individualizados.

3. UN ESTUDIO DE *TERRA SIGILLATA* A TRAVÉS DE MODELO 3D

En esta sección se resume brevemente el estado actual del yacimiento de *Isturgi*, se señalan los principales aspectos experimentales del proceso de modelado mediante cada una de las técnicas, se presenta la web 3D creada para difundir la *terra sigillata* isturgitana a través de la base digital 3D de las piezas, y se muestra el potencial de los modelos 3D en cuanto al análisis estadístico de las piezas incluyendo un estudio estadístico

ilustrativo para determinar el nivel de perfeccionamiento alcanzado en el taller isturgitano.

3.1. *ISTURGI*

El complejo alfarero vinculado al núcleo de *Isturgi* (Los Villares de Andújar, Jaén) se constata como uno de los centros productores más importantes de la península ibérica, produciendo una amplia variación de manufacturas a lo largo de su vida productiva, entre las que destacan las producciones de cerámica tipo Peñafior, cerámica pintada de tradición ibérica, cerámica de paredes finas, cerámica común, cerámica de imitación de barniz interno rojo pompeyano, lucernas, pesas de telar y productos en *terra sigillata* hispánica (actualizados en Fernández-García, 2013c: 155-318). Estos últimos, cuando aparecen desbancan a las restantes clases cerámicas en cuanto a volumen de producción y comercialización se refiere. En la actualidad, el complejo alfarero isturgitano se ha convertido en un claro referente en relación con las manufacturas en *terra sigillata* hispánica, no solo por el establecimiento de una importante cronotipología de producción que permite su aplicación en los centros receptores consumidores de sus manufacturas, sino también, porque ha permitido profundizar en sus estructuras de producción y comercialización con lo que ello implica a nivel de reconstrucción de la historia social y económica de esta parte de la *Baetica* (Fernández-García, 2013a; 2013b; 2015). Ello ha sido posible por el estudio continuado de este centro alfarero ya que, a lo largo de la historia de investigación del yacimiento, se han desarrollado tres grandes proyectos de investigación: «Romanización del Alto Guadalquivir» (directores M. Sotomayor Muro 1971-1979 y M. Roca Roumens 1979-1989), «*Isturgi* romana y su territorio: la producción de *terra sigillata* y su difusión» (directora M^a I. Fernández García 1995-2011) y «Proyecto *Isturgi*: Otro indigenismo y otra romanización: la configuración del artesanado romano y de los fenómenos productivos en las áreas periféricas

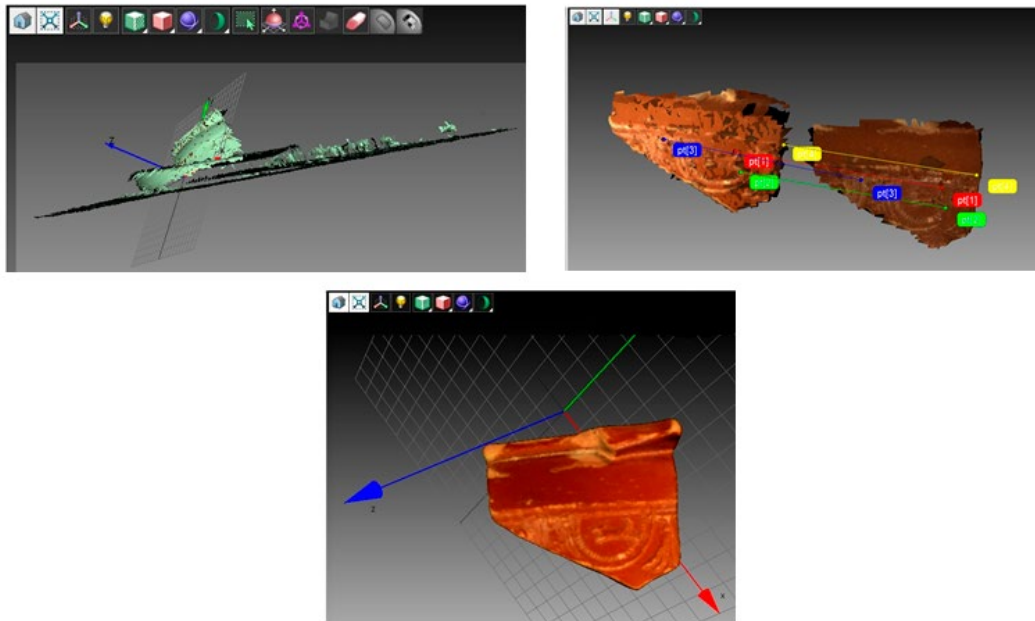


Figura 4: Limpieza del ruido y alineamiento (parte superior) y modelo texturizado (parte inferior)

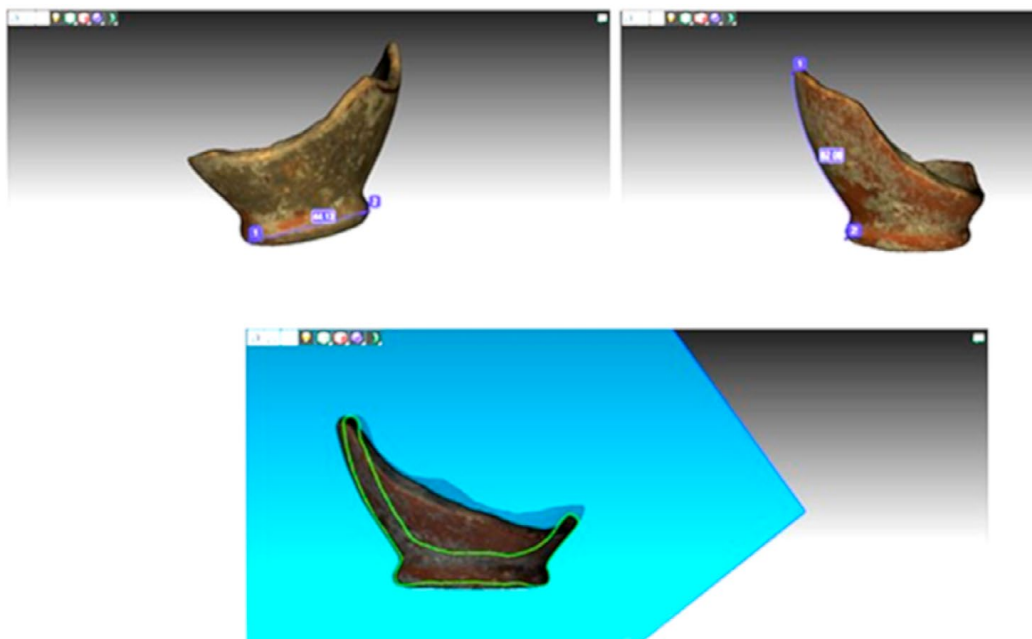


Figura 5: Medidas lineales y geodésicas (parte superior), y secciones (parte inferior)

del Alto Guadalquivir» (directora M^a I. Fernández García 2012-activo).

En este trabajo se realiza el registro 3D de 34 piezas cerámicas lisas del yacimiento de *Isturji* y 10 decoradas procedentes de los vertederos explorados en el alfar.

3.2. REGISTRO 3D

3.2.1. Láser escáner

Para el modelado de las piezas mediante láser escáner se ha utilizado el escáner de triangulación basado en luz

estructurada Artec 2000, ya que se adecua a las características de nuestro trabajo al ser un escáner que se sostiene con las manos y es portátil. El procesamiento de los datos se ha realizado con el software Artec Studio (escáner Artec 2000). La limpieza del ruido de las nubes de puntos obtenidas y el alineamiento se ha realizado de forma manual (Fig. 4, imágenes superiores). Una vez alineados, los distintos escaneos se fusionan formando un modelo de triángulos de manera automática. A la malla obtenida es necesario aplicarle diferentes filtros para hacerla uniforme. Por último se realiza la texturización con la que se cuenta con la información recogida por la cámara CCD del escáner (Fig. 4, imagen inferior).

En cuanto al tiempo dedicado, el tiempo invertido para realizar un modelo tridimensional oscila entre 25-30 minutos. En cuanto al resultado final, la textura que ofrece se caracteriza por su nitidez aunque en algunos ejemplares podemos ver un estiramiento de píxeles. Además tenemos que tener en cuenta el elevado coste económico de las herramientas, ya que tenemos que disponer de un escáner, así como un software que en la mayoría de los casos son software comerciales para el proceso de post-procesado.

Una de las posibilidades que nos ofrece este tipo de modelos tridimensionales son la de realizar mediciones. Las medidas realizadas sobre el modelo virtual garantizan gran precisión y permiten obtener dimensiones cuya medida sobre la pieza real resultaría imposible de realizar. El software que hemos utilizado (Artec Studio 11) escala el ejemplar de manera automática, lo que aumenta la perfección de las medidas realizadas. Este software nos permite realizar medidas lineales, medidas geodésicas, secciones, áreas, volúmenes, etc. de los ejemplares cerámicos de manera automática (Fig. 5).

3.2.2. Fotogrametría

La captura de datos se ha realizado sobre un trípode y con una caja de luz con focos lumínicos integrados, para controlar la iluminación (nuestro caso es especialmente importante por trabajar con piezas que contienen partes reflectantes) realizando tres líneas fotográficas a alturas diferentes con un desplazamiento circular

con bandas convergentes hacia el cenit de una semiesfera teórica con solape del 65% entre fotografías para cubrir los objetos lo mejor posible. Para la creación del modelo tridimensional se ha utilizado el software Photo Scan Pro en la construcción, organización, recorte y limpieza del ruido de las nubes de puntos (Fig. 6, imagen superior izquierda). Posteriormente se realiza el alineamiento de las distintas fotografías de manera automática, generando una nube de puntos dispersa, densa (Fig. 6, imagen superior derecha) y un modelo poligonal. Por último, el software realiza de forma automática la texturización del modelo a partir de las fotografías (Fig. 6, imagen inferior).

Un aspecto de especial importancia al igual que en el escáner láser es la planificación de la toma fotográfica que nos permite valorar la cantidad de fotografías y la posición de la cámara, así como la posibilidad de utilizar herramientas para evitar las sombras y brillos en las fotografías. El resultado final ha exigido aproximadamente 110 minutos en promedio por modelo (15-18 minutos para el registro fotográfico, 35-40 minutos para el postprocesado y limpieza, y 45-50 minutos para la densificación de la nube de puntos). Este importante coste de tiempo exige utilizar un ordenador muy potente y calcular bien el número de escaneos para optimizar el trabajo y evitar repeticiones. En cuanto al resultado final, la textura que ofrece se caracteriza por su gran nitidez y en este caso no se producen estiramientos de píxeles. Al contrario de lo que ocurría con el escáner láser el software fotogramétrico usado no permite realizar mediciones, es por ello que debemos en primer

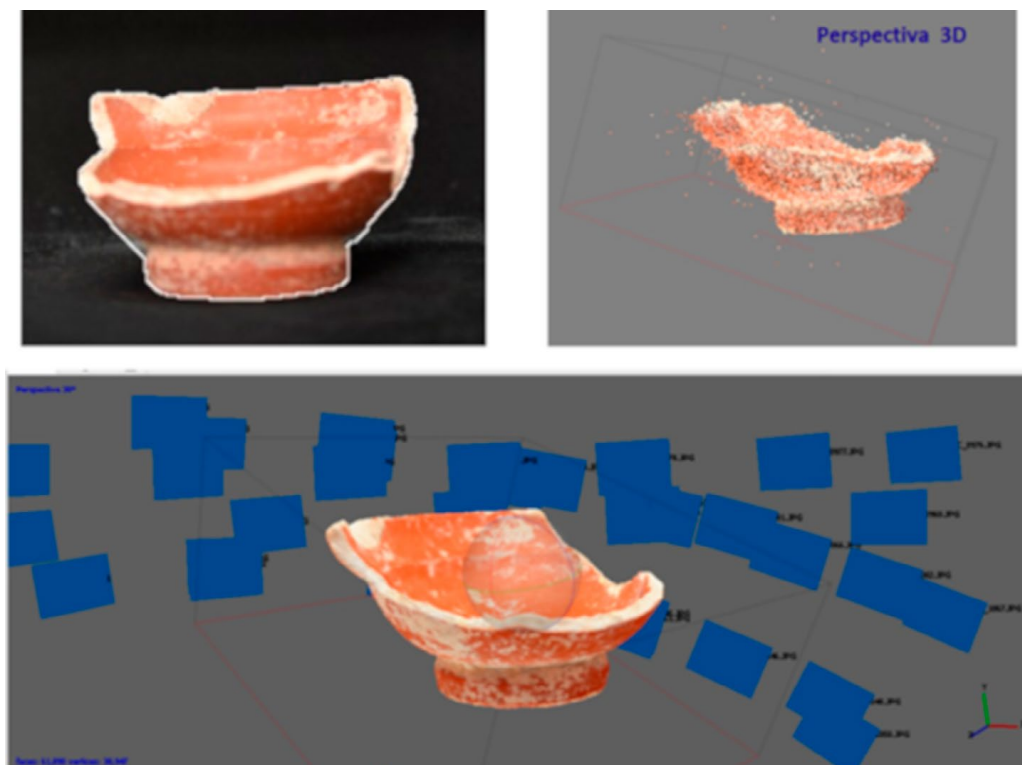


Figura 6: Limpieza de imágenes, alineamiento (parte superior) y modelo texturizado (parte inferior)

lugar escalar el modelo de manera manual y una vez que el modelo está escalado lo debemos de exportar a otro software como Blender, Mesh Lab, Adobe Acrobat o SketchUp Viewer. En este caso hemos usado el Adobe Acrobat que aunque es comercial su uso es generalizado, lo que hace que aumente la difusión y divulgación del modelo.

3.2.3. Discusión

En la figura 7 aparecen las principales características observadas durante el modelado con cada metodología. En el caso de la *terra sigillata* los modelos obtenidos mediante fotogrametría presentan mejores resultados dado que la precisión es alta y se obtienen texturas de alta calidad, ya que es capaz de captar diferentes tipos de superficies, incluso cuando existen problemas de reflectividad como es el caso de la *terra sigillata*, la cual está revestida por una capa de barniz. Los modelos generados mediante escáner láser poseen una precisión muy alta pero presentan problemas para capturar texturas reflectantes ya que este método registra los escaneos con un haz de luz que puede crear destellos. El coste económico y temporal es notablemente más alto en el caso del escáner láser. En cuanto al tratamiento de los modelos obtenidos, para obtener perfiles, secciones, medidas, volúmenes, etc. existen diferencias significativas entre los diferentes software utilizados. Cualquier modelo, creado con fotogrametría o láser escáner, puede ser tratado mediante software libre que permite un gran abanico de funciones pero necesitan de una importante habilidad en su uso, en el caso del escáner láser en algunas ocasiones al exportar el modelo a otros formatos y procesarlos con otros softwares puede perder calidad la textura. El software de cada escáner se caracteriza por ser cerrado, da poca libertad de funciones, pero es muy intuitivo y no requiere de una gran habilidad; además, suele ser software propietario. Mención aparte merece el uso del Adobe Acrobat, el cual fue recomendado desde el proyecto CARARE, red

europea financiada entre 2012-2013 por la Comisión Europea, vinculada con Europeana Collections, que es el punto de acceso para millones de contenidos digitales de todo Europa y que tiene colgados en su repositorio miles de elementos 3D.

3.3. DIFUSIÓN DE LOS MODELOS TRIDIMENSIONALES

La irrupción de los modelos tridimensionales no solo ha supuesto una revolución en el registro, documentación y análisis geométrico de los restos arqueológicos sino que también ha supuesto un gran avance en la difusión de los hallazgos abriendo un campo de conocimiento ilimitado antes reservado a los investigadores mediante la creación de un registro tridimensional virtual en entornos web 3D. Atendiendo a la gestión de la web 3D, existen dos tipos: plataforma de usuario y plataforma personal.

Plataforma de usuario: los modelos 3D se suben a una web colectiva. Existen diferentes plataformas online que permiten almacenar, descargar o editar los modelos. Entre ellas, citamos los casos de p3d.in (plataforma que permite el almacenamiento de modelos 3D en varios tipos y formatos aunque no se puede alterar la geometría), Verold (permite editar los modelos y vincularlos a textos, videos o animaciones) o Sketchfab (permite editar el modelo y compartir los modelos en otras web). Estas plataformas suelen presentar inconvenientes tales como que al subir un modelo al repositorio se pierde la propiedad del mismo, que es común que existan límites de espacio o de número descargas de modelos 3D o que para acceder a las herramientas sin restricciones es necesario realizar pagos. Paralelamente, existe otra plataforma denominada Europeana Collections de acceso libre y sin coste económico que permite subir y descargar en formato pdf documentos 2D y 3D. Este entorno web es financiado por la Comisión europea entre 2012-2013 dentro del proyecto CARARE.

FOTOGRAMETRÍA	ESCÁNER 3D
Técnica invasiva: No	Técnica invasiva: No
Precisión: Alta	Precisión: Muy alta
Tiempo de adquisición de datos: Alto	Tiempo de adquisición de datos: Bajo
Calidad de textura: Alta	Calidad de textura: Media
Requerimiento de Hardware-Pc: Alto	Requerimiento de Hardware-Pc: Medio
Coste de equipamiento: Bajo	Coste de equipamiento: Alto
Dependencia de la luz/condiciones atmosféricas: Alta	Dependencia de la luz/condiciones atmosféricas: Baja

Figura 7: Comparativa entre fotogrametría y escáner 3D



Figura 8: Entorno web creado «ceramica3d.home.blog» (web privada)

Plataforma personal: los modelos 3D se suben a una web personal creada por el usuario en función de sus necesidades a través de un sistema de gestión de contenidos como Wordpress. En este sentido, el usuario tiene su modelo 3D en su propio servidor y bajo su propio dominio, por lo que puede crear accesos restringidos de descarga o de edición en función de los intereses del usuario. Ante esta situación muchos proyectos desarrollan sus propias plataformas y servidores en los que poder adjuntar estos elementos, un ejemplo es el proyecto «Paleocatálogo 3D» (Maqueda y Luque, 2015: 35-40).

En la actualidad estamos trabajando en la creación de un entorno web 3D con el objetivo de fomentar la difusión de la terra sigillata (Fig. 8) que permita de manera rápida y ágil su visualización gráfica. De esta forma se conseguiría un doble desarrollo que sirva tanto para una mayor divulgación de la información obtenida, como para un estudio científico de toda la información.

3.4. ESTUDIO ESTADÍSTICO

En el mundo científico cuando se tiene una presunción o teoría es fundamental que esta quede demostrada de forma matemática. La estadística, comúnmente utilizada para describir cuantitativamente un conjunto de datos, es considerada actualmente como el método cuantitativo aplicable a las diversas áreas del conocimiento para aceptar o rechazar presunciones científicas. Al recopilar **datos** para su posterior análisis estadístico se ha de tener especial cuidado para garantizar que la información sea representativa, completa, correcta y fiable (Moscati, 1990; Orton, 1982; Shennan, 1992; Orton y Hughes, 2013).

En Arqueología es usual no disponer del objeto original completo sino de fragmentos por lo que las características físicas de los materiales no son comparables o existen una gran cantidad de datos faltantes. Por otro lado, las mediciones del material arqueológico

pueden presentar problemas para la toma de datos (diámetros, distancias geodésicas, volúmenes, etc.), propiciando que existan gran cantidad de objetos de los que no se pueda obtener de mucha información para obtener estudios estadísticos. Este problema fue señalado en un trabajo anterior en el que se realizó una caracterización estadística de la terra sigillata isturgitana (Esquivel *et al.*, 2019), en el cual solamente se disponía de una característica dimensional comparable con una cantidad suficiente de datos (diámetro del borde). En este trabajo se señaló como principal línea abierta la realización de modelos 3D para tratar de solventar en gran medida esta escasez de variables analizables que, además de completar el registro, permitirá hacerlo consultable digitalmente y ayudar a su divulgación (Esquivel *et al.*, 2007).

A continuación se muestra un estudio de estandarización de una de las piezas modeladas con el fin de mostrar el potencial de tener un registro 3D de piezas arqueológicas. Para obtener las mediciones se ha utilizado el Adobe Acrobat por dos razones: (1) porque puede utilizarse a cualquier modelo independientemente del método de modelado o del modelo de escáner y (2) por su alta capacidad de divulgación. Concretamente, este software permite tomar medidas en diferentes modos: punto a punto, perpendicular, radial y ángulo; y, ajustando estas a puntos finales de borde, aristas lineales, aristas radiales, siluetas y caras planas. Además, permite realizar secciones de la pieza. Tiene el inconveniente que las mediciones hay que realizarlas de forma manual y requiere, por tanto, una destreza en su uso. A modo de ilustración, nos centramos en una de las piezas modeladas que ha sido elegida por su alto grado de conservación (Fig. 9, imagen izquierda).

Así, si estamos interesados en estudiar el grado de perfeccionamiento alcanzado en el alfar isturgitano mediante una pieza representativa de este, entre otros análisis, es revelador contrastar el grado de homogeneidad de los diámetros de la boca de la pieza. Para ello, aplicando el software Adobe Acrobat se realizaron 40 secciones verticales de la pieza y se midieron en cada

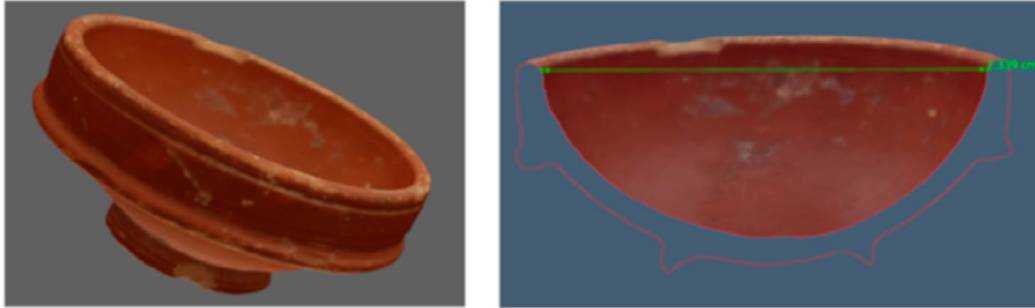


Figura 9: Modelo tridimensional terra sigillata hispánica lisa forma 24/25 (parte izquierda) y una de las secciones realizadas (parte derecha)

una de ellas el diámetro de la boca utilizando la herramienta de medición «punto final del borde, landmark» (Fig. 9, imagen derecha). Cabe señalar que 40 medidas de diámetros pueden obtenerse también de forma tradicional, calibre o dibujo, pero mediante el modelo 3D se realiza de forma más precisa y autónoma sin necesidad de tener la pieza físicamente.

El siguiente paso es aplicar técnicas estadísticas, concretamente se realizará un estudio de estandarización mediante el coeficiente de variación (C.V.) y vamos a estimar un intervalo de confianza para la media del diámetro de la pieza. En cuanto al C.V es importante asegurarse antes de su utilización que la variable (en este caso el diámetro) toma únicamente valores positivos. Para obtener un intervalo de confianza del C.V. antes debemos comprobar la normalidad de los datos. Para ello es usual complementar gráficas donde se muestre de forma visual el posible ajuste de los datos a una normal con un contraste de normalidad. Entre las más usuales destacan el histograma de frecuencias con la curva normal superpuesta y el gráfico de probabilidad normal que enfrenta los valores empíricos observados con sus probabilidades y superpone una línea formada por los valores probabilidades teóricos obtenidos de una normal. En la figura 10 podemos ver ambas gráficas obtenidas para los datos empíricos compuestos por los 40 diámetros obtenidos. Para comprobar la normalidad de los datos tenemos que fijarnos si el histograma se

ajusta a la curva normal, gráfica izquierda, o si las localizaciones de los puntos se sitúan próximas a la línea normal, gráfico de la derecha. En ambos casos es difícil concluir de forma rotunda si los datos son normales.

Para ayudar a concluir de forma clara proponemos comprobar la normalidad de forma gráfica mediante la generación de 100 muestras simuladas de tamaño 40 a partir de una normal con parámetros poblacionales, las estimaciones muestrales dadas por la media y la cuasidesviación típica de los datos empíricos. A estas muestras se les obtienen los percentiles y se muestran en la misma gráfica en color gris formando una región de este color de forma que al superponer los percentiles de los diámetros obtenidos a partir del modelo 3D si estos quedan dentro de esta región gris se puede interpretar de forma visual que los datos se ajustan a una distribución normal. Esta gráfica se obtiene mediante las siguientes líneas de código en Matlab.

```
mu=mean(D);
```

```
sigma=sqrt((40/39)*var(D));
```

```
for I=1:100
```

```
    x(I,:)=normrnd(mu,sigma,[1,40]);
```

```
end
```

```
num=linspace(1,99,99)/100;
```

```
cuantiles_D=quantile(D,num);
```

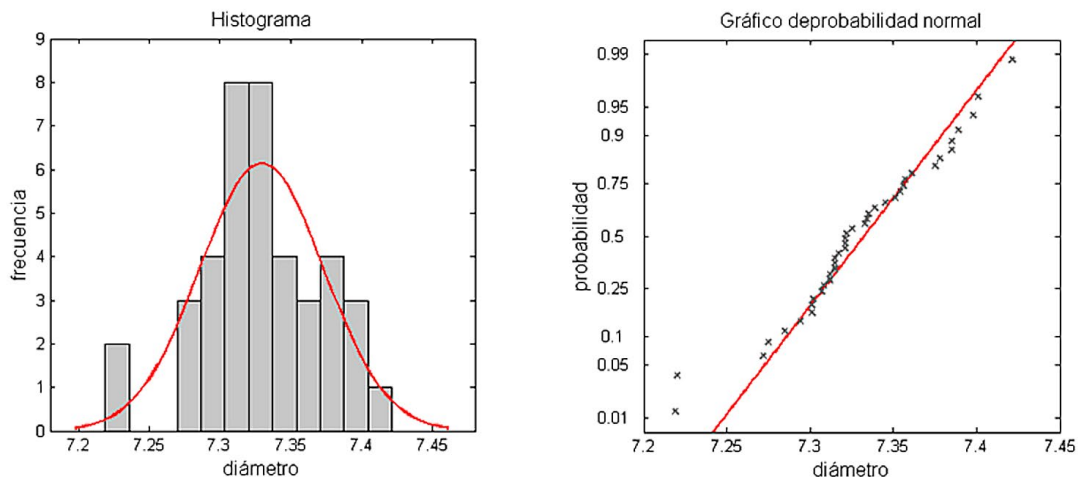


Figura 10: Histograma y gráficos de probabilidad de los datos empíricos con las líneas normales superpuestas (de izquierda a derecha)

```

set(0, 'DefaultLineWidth', 2)
for I=1:40
    y=x(I,:);
    cuantiles=quantile(y,num);
    hold on
    plot(cuantiles, 'Color', [0.811 0.811 0.811])
if I==40
    plot(cuantiles_D)
    xlabel('percentil')
    ylabel('diámetro')
end
hold off
end

```

En la figura 11 podemos ver cómo la curva de percentiles empírica queda dentro de la región gris con lo cual se puede concluir que los datos se distribuyen normalmente. Esta conclusión queda confirmada por el contraste de hipótesis de normalidad de Shapiro-Wilk para el cual se obtiene un valor P de 0,7486 que nos lleva a no rechazar la hipótesis de normalidad y, por tanto, a aceptar la normalidad de los datos.

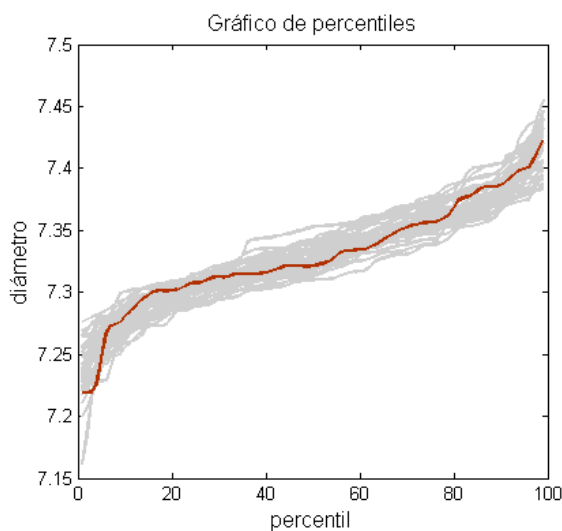


Figura 11: Curva de percentiles empírica superpuesta sobre las curvas de percentiles de 100 muestras simuladas normales

Una vez que se ha comprobado la hipótesis de normalidad podemos calcular un intervalo de confianza para el coeficiente de variación a través de la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$CV \in \left[\widehat{CV} \pm \frac{\widehat{CV} * \sqrt{0.5 + \widehat{CV}^2} * Z_{1-\alpha/2}}{\sqrt{n-1}} \right]$$

donde $Z_{1-\alpha/2}$ es el valor teórico de una normal tipificada para una confianza $1 - \alpha$ y n es el tamaño muestral. Para la muestra compuesta por los 40 diámetros se ha obtenido con una confianza del 95% que el verdadero valor

del CV se encuentra entre los valores 0,0052 y 0,0065. El hecho de que el valor del coeficiente de variación sea un valor tan próximo a 0 indica un alto grado de estandarización que señala un alto grado de perfeccionamiento en el alfar de *Isturgi*.

4. CONCLUSIÓN

Este trabajo surge como una línea abierta de un estudio previo (Esquivel *et al.*, 2019) en el que se realizó una caracterización estadística de piezas cerámicas de *terra sigillata* isturgitana, que reflejó la dificultad de poder tener características dimensionales comparables en diferentes piezas por tratarse de fragmentos del original. Para facilitar la medición de características dimensionales que son difíciles de obtener, tales como secciones de pared, superficies, volúmenes, etc. la arqueología virtual abre un abanico de posibilidades. Además, una base de datos 3D de las piezas aumenta la divulgación de la *terra sigillata* tanto en el dominio divulgativo como el científico. De esta forma se ha creado un registro digital 3D de *terra sigillata* hispánica mediante las dos técnicas tridimensionales existentes, fotogrametría y escáner láser, que permite su divulgación con fines educativos y científicos en una web «ceramica3d.home.blog» (web privada). A través del proceso de digitalización 3D de las piezas de *terra sigillata* mediante ambos métodos se determina que el más apropiado es la fotogrametría, dado que captura su textura reflectante mientras que el método de escáner laser presenta serios problemas. Por último, se ha mostrado el alto grado de perfeccionamiento del taller isturgitano mediante un estudio estadístico de datos dimensionales obtenidos a partir del modelo 3D de una de las piezas usando Adobe Acrobat. Para comprobar la hipótesis de normalidad de los datos se ha implementado en Matlab una gráfica que muestra los percentiles de 100 simulaciones normales junto con los percentiles empíricos. Como principales líneas de investigación abiertas destacan:

- La ampliación del número de piezas cerámicas modeladas tanto del alfar romano de *Isturgi* como de otros alfares de *terra sigillata* hispánica que permitan por una parte crear un repositorio digital que fomente la divulgación científica y educativa, además de caracterizar lo más completamente posible la *terra sigillata* hispánica.
- Realizar estudios estadísticos más completos a partir de nuevas variables dimensionales obtenidas de los modelos 3D y sus respectivos funcionales, tales como indicadores volumétricos.
- Establecer estudios paralelos con otras piezas de *terra sigillata* pertenecientes a otros alfares.
- Utilizar los modelos 3D obtenidos de objetos incompletos, para realizar reconstrucciones 3D basadas en los métodos informáticos CAD y 3D.

REFERENCIAS

- Barrera, J. A. (2006). *Aplicación de tecnologías innovadoras en la documentación geométrica del Patrimonio Arquitectónico y Arqueológico*. (Tesis doctoral). Universidad de Sevilla. Sevilla. Recuperado de: <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/15843>
- Biosca, J. M., Navarro, S. y Lerma, J. L. (2009). Estudios previos de fotogrametría en las bóvedas barroca y gótica del presbiterio de la Catedral de Valencia. En C. Pérez García (Coord.). *Los ángeles músicos de la Catedral de Valencia: estudios previos* (pp. 305-312). Valencia: Generalitat Valenciana. Recuperado de: <http://jllerma.webs.upv.es/pap021.pdf>
- Boehler, W., Bordas Vicent, M. y Marbs, A. (2013). Investigating Laser Scanner Accuracy. En *XLX CIPA Symposium at Antalya (Turkey, 30 Sept-4 Oct, 2003)*. Recuperado de: http://i3mainz.de/sites/default/files/public/data/laserscanner_accuracy.pdf
- Chiabrando, F., D'Andria, F., Sammartano, G. y Spanò, A. (2018). UAV photogrammetry for archaeological site survey. 3D models at the Hierapolis in Phrygia (Turkey). *Virtual Archaeology Review*, 9(18), 28. DOI: <https://doi.org/10.4995/var.2018.5958>
- Duque, J. y De Francisco, S. (2015). Arqueología tridimensional: las técnicas 3D aplicadas al registro paleolítico. *Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología, Arqueología*, 81, 9-53. Recuperado de: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/25145>
- Esquivel, J. A., Alemá, I. y Esquivel, F. J. (2007). Geometrical 3D laser scanner model of a Chalcolithic vessel (Gor, Granada, Spain). *Archeologia e calcolatori*, 18, 229-241. Recuperado de: <http://eprints.bice.rm.cnr.it/1075/>
- Esquivel, F. J., Alarcón, L., Esquivel, J. A. y Fernández-García, M.^a I. (2019). Caracterización estadística y registro de la *terra sigillata* hispanica a partir de restos de un vertedero del alfar romano de *Isturgi* (Los Villares de Andújar, Jaén). *SPAL*, 18(1), 1-20. DOI: <http://dx.doi.org/10.12795/spal.2019.i28.08>
- Fernández-García, M.^a I. (2013a). Historia de la investigación de Los Villares de Andújar. En M.^a I. Fernández-García (Coord.). *Una aproximación a Isturgi romana: El complejo alfarero de Los Villares de Andújar, Jaén España* (pp. 317-320). Roma: Ed. Quasar.
- Fernández-García, M.^a I. (2013b). Notas acerca de las estructuras de producción de Los Villares de Andújar. En M.^a I. Fernández-García (Coord.). *Una aproximación a Isturgi romana: El complejo alfarero de Los Villares de Andújar, Jaén España* (pp. 69-74). Roma: Ed. Quasar.
- Fernández-García, M.^a I. (Coord.). (2013c). *Una aproximación a Isturgi romana: El complejo alfarero de Los Villares de Andújar, Jaén España*. Roma: Ed. Quasar.
- Fernández-García, M.^a I. (2015). *La terra sigillata de origen bético: un camino aún por recorrer*. En M.^a I. Fernández, C., Morillo, A., Zarzalejos, M.^a M. (Coords.). *Manual de cerámica romana. II: cerámicas romanas de época altoimperial en Hispania: Importación y producción*, (1^a ed., pp. 231-320). Alcalá de Henares - Madrid: Museo Arqueológico Regional - Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y en Ciencias, Sección de Arqueología. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10481/38991>
- Gil-Melitón, M. y Lerma, J. L. (2019). Historical military heritage: 3D digitisation of the Nasri sword attributed to Ali. *Virtual Archaeology Review*, 10(20), 52-69. DOI: <https://doi.org/10.4995/var.2019.10028>
- Historic England. (2017). *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice*. Recuperado de: <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/photogrammetric-applications-for-cultural-heritage/>
- Lerma, J. L., Cabrelles, M., Navarro, S. y Seguí, A. E. (2013). Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital. *Cuadernos de arte rupestre*, 6, 85-90. Recuperado de: <https://riiunet.upv.es/handle/10251/61249>
- López-Menchero, V. M. y Grande, A. (2011). Hacia una carta Internacional de Arqueología Virtual. *Virtual Archaeology Review*, 2(4), 71-75. DOI: <https://doi.org/10.4995/var.2011.4558>
- Maqueda, R. y Luque, M. (2015). Fotogrametría para la realización de un Catálogo Virtual en 3D de alta calidad, accesible y gratuito. *Virtual Archaeology Review*, 6(13), 35-40. DOI: <https://doi.org/10.4995/var.2015.4369>
- Martínez, A. L., Ruiz, A. y Rubio, M. A. (2010). Digitalización y visualización 3D de cerámica arqueológica. *Virtual Archaeology Review*, 1(2), 133-136. DOI: <https://doi.org/10.4995/var.2010.4715>
- Martínez Rubio, J., Fernández Martín, J. J. y San José Alonso, J. I. (2018). Implementation of 3D scanner and digital photogrammetry in the documentation process of the Merced Church, Panama. *EGA Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 23(32), 208-219. DOI: <https://doi.org/10.4995/ega.2018.9811>
- Moscatti, P. (1990). L'analisi quantitativa nell'archeologia di epoca storica. *Archeologia e calcolatori*, 1, 39-40. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3761827>
- Orton, C. (1982). *Mathematics in archaeology*. Cambridge: Cambridge university press.
- Orton, C. y Hughes, M. (2013). *Pottery in archeology*. Cambridge: Cambridge university press.
- Reilly, P. (1990). Toward a Virtual Archaeology. En K. Lockyear y S. Rahtz (Eds.). *Computer Applications in Archaeology* (pp. 133-139). Oxford: British Archaeological Reports, INT Series, 565. Recuperado de: https://proceedings.caaconference.org/files/1990/21_Reilly_CAA_1990.pdf
- Ruiz, J. F., Sebastián, M., Quesada, E., Pereira, J. M., Fernández, S., Pitarch, A.,... y Dolera, A. (2016). 4D. Arte rupestre. Monitorización del Abrigo del Buen Aire I (Jumilla), Cueva del Mediodía (Yecla), Cañica del Calar II (Moratalla), Abrigo Grande de Minateda (Hellín) y Solana de las Covachas (Nerpio). *Centro de estudios de prehistoria y arte rupestre (CEPAR)*. Monografía 3. Recuperado de: <http://www.cuadernosdearterupestre.es/arterupestre/libro4D.pdf>
- Shennan, S. (1992). *Arqueología cuantitativa*. Barcelona: Crítica.
- Torres, J. C., Cano, P., Melero, J., España, M. y Moreno, J. (2010). Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio. *Virtual Archaeology Review*, 1(1), 51-54. DOI: <https://doi.org/10.4995/var.2010.4768>