

Anastilosis virtual de tres hornos islámicos de Zaragoza como herramienta de interpretación e investigación arqueológica

Virtual anastilosis of three Islamic kilns in Zaragoza, as a tool for interpretation and archaeological research

Jorge Angás Pajas¹
Nuria Ramón Fernández²

Resumen

Durante los últimos diez años, diferentes tecnologías relacionadas con la geomática han emergido haciendo posible la obtención de una mejor y más detallada documentación geométrica del patrimonio cultural. Una de estas herramientas es el escáner 3D de luz blanca estructurada que permite una reproducción y análisis con una precisión por debajo del milímetro. En este artículo planteamos el uso de esta herramienta en combinación con técnicas fotogramétricas para una anastilosis virtual y análisis interpretativo, pieza a pieza, de tres hornos islámicos que fueron excavados en el casco histórico de Zaragoza en la década de los años noventa del pasado siglo.

Palabras clave: Zaragoza, horno islámico, escáner 3D, fotogrametría, anastilosis virtual.

Abstract

During the last ten years, different technologies related to geomatics have emerged making it possible to obtain better and more detailed geometric documentation of Cultural Heritage. One of these tools is the structured-light 3D scanner that allows reproduction and analysis with sub-millimetre precision. In this paper we propose the use of this tool in combination with photogrammetric techniques for virtual anastylosis and interpretative analysis, piece by piece, of three Islamic furnaces that were excavated in the historical centre of Zaragoza in the 1990s.

Keywords: Zaragoza, Islamic furnace, 3D scanner, photogrammetry, virtual anastylosis.

1. Introducción

El centro histórico de Zaragoza está declarado conjunto histórico-artístico desde 1978, por lo que está sujeto a un plan especial de protección ante cualquier actuación urbanística, lo que implica la necesidad de realizar excavaciones arqueológicas en los solares con anterioridad a la intervención. Dentro del boom de la construcción que se produjo en la ciudad en los años 80 y 90, hay que enmarcar la actuación llevada a cabo en la plaza Santo Domingo 25-26. La excavación dirigida

por José Luis Cebolla en 1996 dio resultados positivos con una estratigrafía secuenciada desde época contemporánea hasta la etapa islámica, en la que se localizaron los hornos que ocupan este artículo.

2. Contexto histórico

La plaza Santo Domingo se sitúa extramuros de la ciudad antigua, en una zona en la que ya desde la etapa clásica estaban asentados artesanos, en concreto alfareros (AGUAROD *et alii*, 1999; GÓMEZ *et alii*

1. Scanner Patrimonio e Industria *Spin Off* Universidad de Zaragoza. Grupo PPVE. <j.angas@3dscanner.es>.

2. Jefe de Sección de Arqueología del Ayuntamiento de Zaragoza. <nramon@zaragoza.es>.

2015). Tras unos años de vacío en la ocupación en la baja Edad Media, durante el reino de Taifas vuelve a convertirse en un espacio industrial con alfares. Este área ubicada en el actual barrio de san Pablo, abarcaba una extensa superficie de algo más de una hectárea con veintinueve alfares y testares (ESCUADERO, 2016: 206). La localización de estos obradores está determinada por la organización del espacio en las ciudades islámicas, en las que primaba el interés público y el principio de

“no causar mal ni molestias” y que encontramos codificadas en distintas normativas andalusíes (COLL Y GARCIA, 2010). La instalación de los talleres dependía del *Muhtasib* y, en general, buscaban situarse, por un lado, cerca de las materias primas necesarias (arcilla, agua y combustible) y, por otro, estar próximo a los mercados donde poder dar salida a sus productos, pero en el extrarradio de las ciudades para no molestar con humo, polvo, etc. (HERNANDEZ, 2014: 67).



Fig. 1. Plano de situación de los alfares zaragozanos.

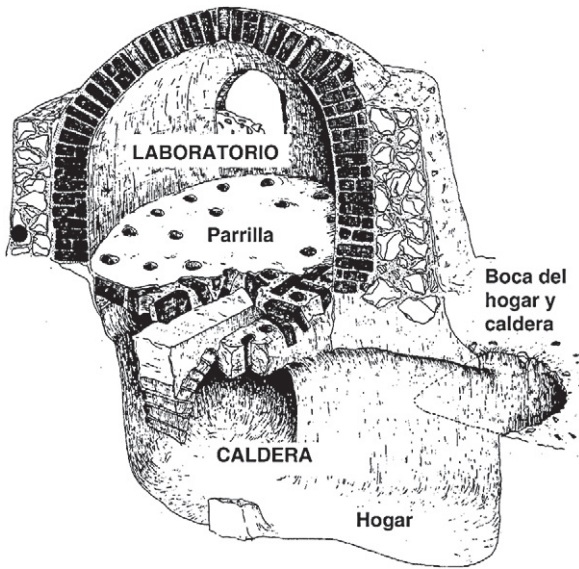


Fig. 2. Ejemplo de reconstrucción del horno de parrilla E.L. 94 de la Avda. Montgó/Teulada de Denia (GISBERT, 1990: 91).

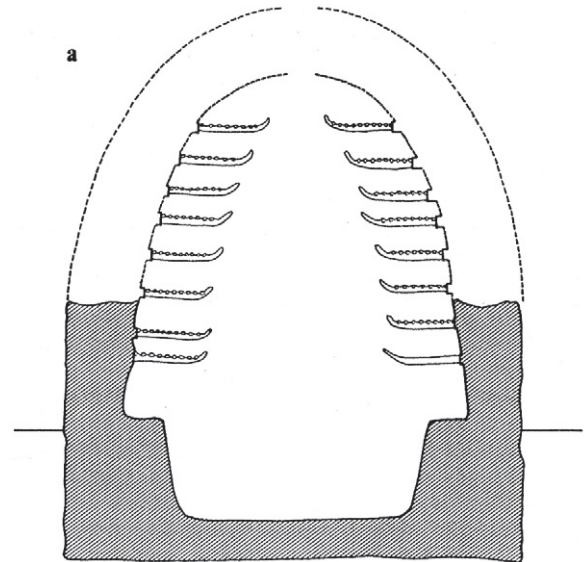


Fig. 3. Ejemplo de reconstrucción hipotética del horno de birlas de Gómez Ulla I, Zaragoza (MOSTALAC, 1990: 69).

Los trabajos en este solar, de aproximadamente 24 m², comenzaron a finales de 1995 realizándose cinco catas con resultados positivos, en las que se encontró fundamentalmente material cerámico y elementos de alfar, por lo que se realizó una excavación en extensión, con financiación privada y que ofreció una secuencia estratigráfica desde edad contemporánea al siglo X. La etapa islámica de la excavación comprende una ocupación en cuatro fases, que cronológicamente van desde la segunda mitad del siglo X al XIII. Nos interesa especialmente la fase III, fechada desde principios del XI hasta inicios del XII, ya que en ella se localizaron, en el extremo oeste del solar, dos hornos de birlas casi completos, un horno árabe con parrilla y un *testar* (VVAA, 2007a).

Ante la importancia de este hallazgo, ya que complementaba la información de la zona industrial de san Pablo que se llevaba excavando desde mediados de los 80 y al ser imposible conservarlos *in situ*, la sección de Arqueología del Servicio del Casco Histórico del Ayuntamiento de Zaragoza decidió hacer unos moldes de escayola de los tres hornos. El paso del tiempo y los avances informáticos, sobre todo en tecnología 3D, hizo que el Ayuntamiento se planteara reconstruir los hornos sin necesidad de positivizar los moldes, solventando en parte el problema de almacenaje que todo museo o institución dedicada a la conservación del patrimonio arqueológico tiene que afrontar. Para ello se contrató a la empresa de restauración y construcción Rubio Morte, que con la experiencia de Scanner Patrimonio e Industria realizaron los trabajos de reconstrucción tridimensional.

Las técnicas de documentación geométrica del patrimonio actuales permiten, para este tipo de ejemplos, la realización de una anastilosis virtual como hipótesis arqueológica totalmente inocua para la pieza arqueológica. De esta manera, para la reconstrucción tridimensional de estos tres hornos, se utilizaron técnicas fotogramétricas de correlación automática de imágenes, junto con la utilización de un escáner de luz blanca estructurada. Esta documentación geométrica ha permitido reintegrar virtualmente pieza a pieza, con una precisión por debajo del milímetro, obteniendo una visión final tal y como fue hallado en la excavación arqueológica. Asimismo, el modelo tridimensional generado constituye una excelente herramienta de investigación e interpretación arqueológica.

3. Antecedentes historiográficos y estado actual de la anastilosis virtual como herramienta arqueológica

Este proyecto ha abordado mediante la combinación de dos técnicas de documentación geométrica (fotogrametría y escáner 3D de luz blanca estructurada), las posibilidades de la anastilosis virtual como una herramienta arqueológica en la documentación, interpretación y divulgación de tres hornos islámicos. Actualmente podemos destacar el uso de estas técnicas de restauración virtual para la investigación científica, desde simulaciones arquitectónicas enfocadas hacia un carácter dual científico-divulgativo, hasta reconstrucciones escultóricas mediante la composición de unos pocos fragmentos hallados, que ofrecen

un vasto abanico de alternativas. De hecho, el empleo de esta técnica digital basada en modelos tridimensionales representa un salto cualitativo como herramienta de interpretación del patrimonio arqueológico. Esta tendencia la hemos constatado, sobre todo, a lo largo de los últimos cinco años, coincidiendo con la diversificación de numerosos tipos de programas informáticos. Citaremos a modo de ejemplo, la reconstrucción virtual de esculturas de diferentes tamaños como por ejemplo los Budas de Bamiyan (TOUBEKIS, 2011), el “Guerrero di Castiglione” (FATUZZO, 2011) o más recientemente la restauración de fragmentos de una escultura de terracota renacentista (ARBACE, 2013: 332-345).

El factor común entre estos tres ejemplos ha sido el deterioro parcial o total del bien por diferentes causas de las esculturas: algunas simplemente de carácter temporal como el “Guerrero di Castiglione”, otras por causas naturales, propiciado por un terremoto en la escultura en terracota de la Madonna de Pietranico, o de destrucción antrópica de carácter político-religioso en el ejemplo de los Budas de Bamiyan.

En la arqueología de la arquitectura destacamos el ejemplo de la reconstrucción virtual e interpretación de la casa de *Caecilius Lucundus* de Pompeya (DELL'UNTO *et al.*, 2013: 621-628). Se trata de los pocos ejemplos que encontramos que combina información arqueológica y fuentes históricas, basando la reconstrucción directamente sobre el modelo 3D dentro de un sistema inmersivo denominado CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*) para la formulación de las hipótesis de reconstrucción. Si analizamos otro tipo de reconstrucciones arqueológicas que han realizado también esta combinación a partir del modelo 3D escaneado, pero sólo a nivel infográfico, destacamos el proyecto de documentación de la casa, también en Pompeya, de la Diana Arcaizante (2007-2010)³.

En Aragón podemos comprobar igualmente, cómo estas técnicas han avanzado y se han desarrollado en los últimos años en las diferentes clasificaciones del patrimonio cultural (ANGÁS, 2015: 325-375). Citaremos, a modo de ejemplo, algunos casos relacionados

con la reconstrucción virtual en el arte rupestre, la arquitectura y la arqueología: en el caso de la reconstrucción de (1) varios paneles rupestres extraídos en los abrigos de Roca dels Moros y Els Gascons en Cretas (Teruel)⁴ (BEA y ANGÁS, 2016: 159-168), (2) en el acueducto de Los Bañales de Uncastillo (Zaragoza) como hipótesis arquitectónica, y un último caso (3) relacionado con la reconstrucción de una excavación arqueológica de urgencia del yacimiento de la I Edad del Hierro del Cabezo de la Cruz (Muel, Zaragoza), gracias a los materiales documentados en la excavación dirigida por Jesús Picazo y José María Rodanés de la Universidad de Zaragoza.

En todos ellos se constata la utilidad de este tipo de herramientas como fuente documental para formular interpretaciones y en último lugar, como instrumento divulgativo del patrimonio cultural. En este sentido debemos señalar la necesidad de asignar un equilibrio entre lo científico y lo divulgativo, estableciendo un control en este último apartado que no desvirtúe todo un trabajo científico hacia plataformas informáticas carentes —en muchos casos— de rigor histórico, absorbidas por una tendencia social.

En consecuencia, independientemente de las causas del deterioro, el incremento de este tipo de técnicas constituye una herramienta de estudio muy útil para las diferentes cuestiones arqueológicas, ya que una vez digitalizado permite formular múltiples interpretaciones y teorías, totalmente inocuas para el bien patrimonial. Sin necesidad por ejemplo, que tengan que ser transportadas desde un museo, en el caso de objetos muebles, repercutiendo también en un ahorro de tiempo, traslados, seguros, permisos, etc. De hecho, las posibilidades finales actuales representan únicamente una primera aproximación de la restitución digital. Las técnicas actuales utilizadas tienen un proceso generalizado donde prima la restitución manual⁵ sobre el empleo de un método con muchas posibilidades dedicadas a la generación de “modelos predictivos arqueológicos, rupestres, arquitectónicos y escultóricos” aplicable a cualquier bien cultural. Una automatización del método permitiría que se pudiesen incluir todas las variables

3. Véase la página web del proyecto en <http://www.dianaarcaizante.com/> (último acceso septiembre de 2016).

4. Consúltese el trabajo científico y divulgativo realizado en la APP “Matarranya Rock Art” (para plataformas IOS y Android) y su versión web en <http://3dscanner.es/matarranya/> (último acceso diciembre de 2016) dedicada a la reconstrucción tridimensional del arte desaparecido en diferentes abrigos rupestres de la Comarca del Matarraña/Matarranya (Teruel). Trabajo publicado: BEA, M.; ANGÁS, J. (2016): “Geometric documentation and virtual restoration of the rock art removed in Aragón (Spain)” en *Journal of Archaeological Science: Reports* 11, pp.: 159-168.

5. Debemos considerar que los procesos de restitución son generalmente manuales controlados por el componente subjetivo del técnico que realiza —sobre datos físicos, históricos y estilísticos— las diferentes pruebas digitales. Por esta razón es necesario puntualizar un cambio cultural sobre los denominados “intrusismos profesionales” que cada vez más han sido conceptualmente sustituidos por “formaciones híbridas” que permiten una mayor integración y control sobre las técnicas aplicadas al patrimonio. Por consiguiente cada vez existe una mayor formación interdisciplinar que establece, por ejemplo, que el propio arqueólogo articule los mecanismos necesarios de restitución digital conforme a su formación.

que fuesen susceptibles de afección a cada conjunto cultural, y de esta manera se pudiesen alcanzar simulaciones temporales gráficas y geométricas que determinasen y aclarasen los diferentes procesos, tanto en la realización como en el deterioro sufrido. Sin duda, son planteamientos futuros mucho más complejos y ambiciosos que necesitan tener en cuenta un conjunto de variables por consensuar entre un equipo interdisciplinar de arqueólogos, historiadores, historiadores del arte, restauradores, químicos, biólogos, geólogos, etc. Estas preconizaciones representarían un nuevo campo de aplicación en la investigación y conservación preventiva del patrimonio cultural, inscrita entre los procesos de documentación y de difusión.

4. Metodología

El avance que ha experimentado la variedad de programas informáticos de correlación automática de imágenes mediante técnicas fotogramétricas para reconstrucciones tridimensionales, ha permitido un abanico de posibilidades para la arqueología. Estas técnicas han sido empleadas en excavaciones arqueológicas permitiendo la generación de ortofotos, modelos tridimensionales y posteriormente el dibujo planimétrico, en un corto espacio de tiempo. Igualmente, el uso de esta metodología ha sido empleada en el registro de objetos muebles dada su rapidez y automatización para piezas arqueológicas. Sin embargo, estas técnicas complementan a otro tipo de herramientas como los escáneres 3D de corto alcance. La calidad geométrica, sobre todo, para generar réplicas físicas por métodos de mecanizado (sustracción) o impresoras 3D (adición) de los escáneres 3D, les ha conferido un papel relevante en este aspecto. El funcionamiento de este tipo de escáneres utiliza luz estructurada en vez de láser según unos patrones conocidos que iluminan el cuerpo. El objeto debe ser –al igual que los escáneres de triangulación– de tamaño reducido, actuando a una distancia media de 70 centímetros. Las texturas se pueden captar, gracias a cámaras métricas integradas en el propio instrumento. Asimismo, se obtiene muy buenos resultados de pequeños elementos consiguiendo precisiones de pocas micras. Su uso está muy extendido dentro de la escultura o elementos patrimoniales de dimensiones similares gracias a su agilidad y portabilidad manual. Este carácter portátil en algunos modelos, como por ejemplo el usado en la digitalización de cada pieza de los hornos⁶, le confiere como una herramienta muy versátil para la documentación en zonas de difícil acceso con la combinación de otro tipo de sistemas de láser

escáner 3D terrestres (TLS). Para el registro de superficies brillantes tienen problemas similares como los escáneres de triangulación. Dependiendo de la naturaleza del bien patrimonial se pueden aplicar un tipo de spray especial –con una película que posteriormente se retira– para la digitalización tridimensional atenuando, de esta manera, totalmente los brillos y facilitando el registro.

La anastilosis virtual de los tres hornos islámicos ha llevado implícito un problema adicional ya que fue necesario interpretar, como si tratase de un puzzle, cada pieza con el fin de determinar el resto de fragmentos gracias a las diferentes comprobaciones y simulaciones geométricas. Asimismo, la utilización de técnicas fotogramétricas tuvo como objetivo obtener, de un modo paralelo, la geometría del modelo y su textura. Debido a la dificultad de la morfología de cada una de las piezas, solamente se utilizó la textura resultante de esta técnica. Por esa razón, finalmente, se combinó la geometría obtenida con la técnica del escáner 3D de luz blanca estructurada –por su alta precisión– con la textura fotogramétrica, descartando la textura del escáner y la geometría de las técnicas fotogramétricas.

El proceso metodológico desarrollado fue el siguiente:

1. Clasificación, selección y disposición manual de las piezas en cada horno.
La organización de cada pieza mediante filas resultó fundamental con el fin de automatizar el proceso de escaneado con piezas *a priori* correlativas en la secuencia geométrica. El tamaño medio por pieza fue de aproximadamente 1 x 0,80 metros con un peso medio por pieza entre 25 y 40 kg. El número de piezas documentadas fueron:
Horno 1. 8 piezas.
Horno 2. 31 piezas.
Horno 3. 26 piezas.
2. Doble escaneado de cada pieza mediante el sistema escáner de luz blanca estructurada.
3. Adquisición de imágenes de cada pieza mediante técnicas fotogramétricas con un patrón estandarizado de color.
4. Alineación geométrica del escaneado de cada pieza.
5. Correlación de las imágenes con coordenadas de apoyo extraídas de la nube de puntos del escáner y corrección radiométrica global.
6. Generación de la ortofoto de cada pieza mediante técnicas *Structure from Motion* (SfM).
7. Combinación de la geometría del escáner 3D con la textura obtenida.
8. Trabajos de comprobación y simulación entre las piezas mediante puntos comunes e hipótesis de unión entre ellas.

6. Modelo Artec MHT con una resolución de 0,5 mm. y una precisión de punto 3D de 0,1 mm.

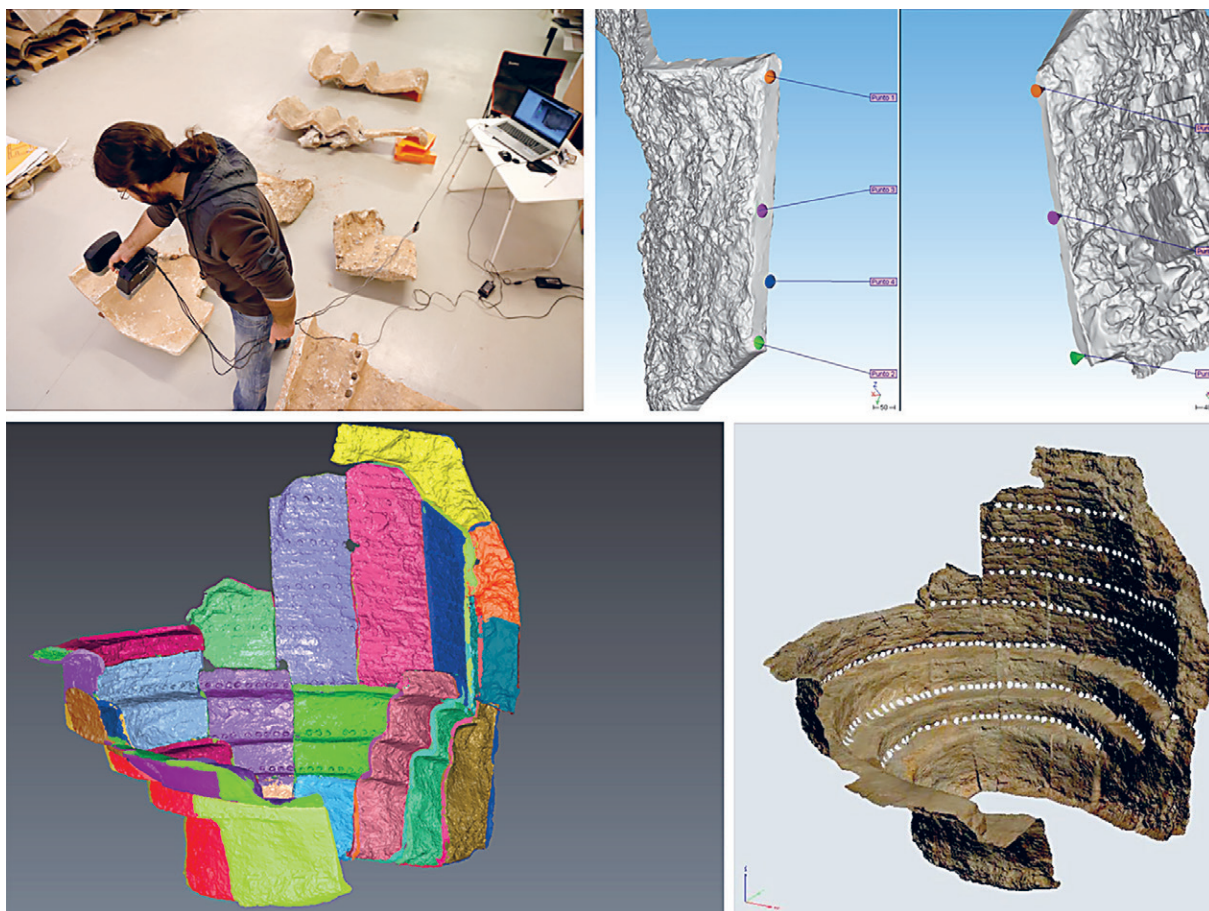


Fig. 4. Ejemplo de las fases metodológicas llevadas a cabo para la generación de la hipótesis arqueológica final del horno 3.

9. Alineación global de cada horno y unión de las líneas de corte y suavizado entre los modelos.
10. Generación del modelo final en diferentes tipos de formatos tridimensionales para su visualización, gestión, difusión y posible mecanizado.
11. Análisis interpretativo sobre su morfología.

5. Descripción de los hornos

Como se ha comentado, en este solar se encontraron las dos tipologías de hornos más utilizadas en época islámica: el de parrilla, que continúa con la tradición romana, y el de birlas, con antecedentes en el mundo islámico oriental.

Horno 1

En este primer caso sólo se encontró la parrilla de un horno de convección, de planta cuadrangular, que separaba la cámara de combustión del espacio de

cocción, y del que también se ha conservado una parte muy pequeña del alzado, de unos 70 cm alto, fabricado con ladrillos rectangulares⁷, que permite intuir que el laboratorio sería cuadrangular y sin perforaciones. Con la anastilosis virtual de horno, se ha constatado que la parrilla es una superficie horizontal compacta, de 2,16 por 2,21 m, posiblemente trabada con tapial, de la que se aprecian las uniones de las piezas rectangulares con la que fue construida. Esta plataforma presenta 8 filas de toberas paralelas que tienen una separación de aproximadamente unos 22 cm entre ellas, lo que facilita el reparto homogéneo del calor por todo el horno. Las perforaciones tienen unas dimensiones que van desde los 0,6 a 0,9 cm de diámetro⁸. Por último, la parrilla presenta un hueco⁹ en la entrada del horno que permitiría el acceso a la cámara de combustión, aunque desconocemos si esta cavidad marca el final de un canal horizontal o es parte del

7. Las dimensiones que se ha podido obtener de estos ladrillos son 3 x 10 cm.

8. Tenemos que hacer constar que estas medidas son aproximadas, ya que se han tomado de la reconstrucción en 3D,

y la escayola con la que se realizó el molde puede dar errores en dimensiones tan pequeñas.

9. Las dimensiones del hueco son 1,00 por 0,51 m.

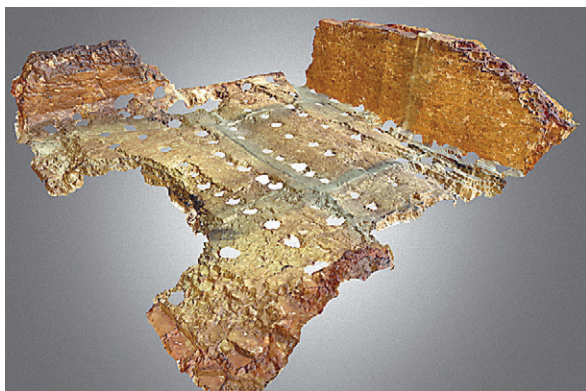


Fig. 5. Modelo tridimensional completo del horno 1.



Fig. 6. Vista isométrica del horno 2 mostrando las paredes exteriores.

pozo de alimentación, ya que ambos tipos son habituales en estos hornos árabes.

De acuerdo con la documentación de la excavación (VVAA, 2007a) también se identificaron los arcos y los pilares de sustentación de la parrilla, sin embargo, estos elementos no fueron incluidos en los trabajos de modelado, por lo que no sabemos si eran de ladrillo o adobe. Siguiendo la sistematización de Coll y García se correspondería con el tipo 4b horno de parrilla de planta cuadrangular (COLL y GARCIA, 2010), aunque no podemos especificar nada más a cerca del resto de los elementos, puesto que desconocemos como era el fondo de la caldera, el tiro o el sistema de alimentación.

Horno 2

En este caso se trata de un horno de barras o birlas, de casi 3 metros de altura, por tanto monocameral, de planta circular y canal horizontal de alimentación.

La cámara de combustión no está separada del laboratorio pero, en cambio, es de planta ovalada. Las paredes de esta caldera no están rectas, ya que presenta unos entrantes en los laterales largos que hace que la morfología de la sección sea troncocónica. Esta forma ayuda a realizar la transición a la planta circular que se desarrolla posteriormente en el laboratorio. Es precisamente esta morfología troncocónica, la que hace difícil la colocación de vasijas en este espacio a pesar de que el suelo es plano y, por consiguiente, impide que propongamos con total seguridad que se trata de un horno de barras con la cámara de fuego colateral, como en otros hornos peninsulares (figura 7).

La caldera tiene las paredes macizas y unas dimensiones de 2,00 m de ancho máximo, 2,70 m de largo y entre 70 y 95 cm de alto. La zona de unión entre la caldera y el canal horizontal de alimentación muestra un estrechamiento que progresivamente se va ampliando. El canal tiene forma cónica y realmente es un pequeño pasillo de aproximadamente un metro de largo, con una altura máxima de 1,25 m, exvasado al exterior por lo

que la anchura en la boca es de 1,20 m mientras que en la zona de la caldera es de 46 cm. Por el tamaño y la posición parece que únicamente servía para introducir el combustible en el horno, pero tampoco podemos descartar totalmente que este pasillo constituyera también una cámara de fuego como en el caso de varios hornos de Madinat Baguh (Priego de Córdoba) (CARMONA, 1994; CARMONA *et alii*, 2007: 191) o en Denia (GISBERT, 2000: 6-19), ampliando con ello el espacio para el combustible hasta 3,45 m (figura 8).

En cuanto al laboratorio, la altura máxima conservada es de 1,75 m y la cámara, de forma circular, tiene un diámetro máximo de 2,60 m. A través de un escalón, que marca el final de la zona del hogar, se agranda el espacio hasta 2,05 m. A diferencia de lo que veremos en el horno 3, en este horno las hileras de perforaciones no se han colocado a continuación de cada grada sino que hay una relativa distancia, así en el lado izquierdo se sitúa a unos 45 cm, en cambio, en el lado derecho a unos 85 cm empiezan las líneas horizontales de agujeros para las barras. Desconocemos el motivo de esta diferencia de alturas a la hora de colocar las birlas o de la ausencia de la primera fila en el lado derecho, pero creemos que puede estar en función del tamaño de las vasijas y, por tanto, de la especialización del horno en determinadas piezas grandes. En este primer escalón se ha constatado la reparación de la pared del horno en algunas zonas por medio de tejas. Se han conservado un total de 4 filas de perforaciones paralelas. Tras la primera hilera existe otro pequeño escalón que vuelve a aumentar el área de cocción hasta un diámetro de 2,50-2,60 m. Estos bancos no sólo amplían el volumen práctico del horno, sino que también servían de refuerzo a las hileras de barras que, a su vez, aportaban una mayor estabilidad a las vasijas. (HERNANDEZ, 2014: 67; COLL y GARCIA, 2010) (figura 9).

La distancia entre la primera y la segunda fila de perforaciones es de unos 35 cm, el resto de hileras

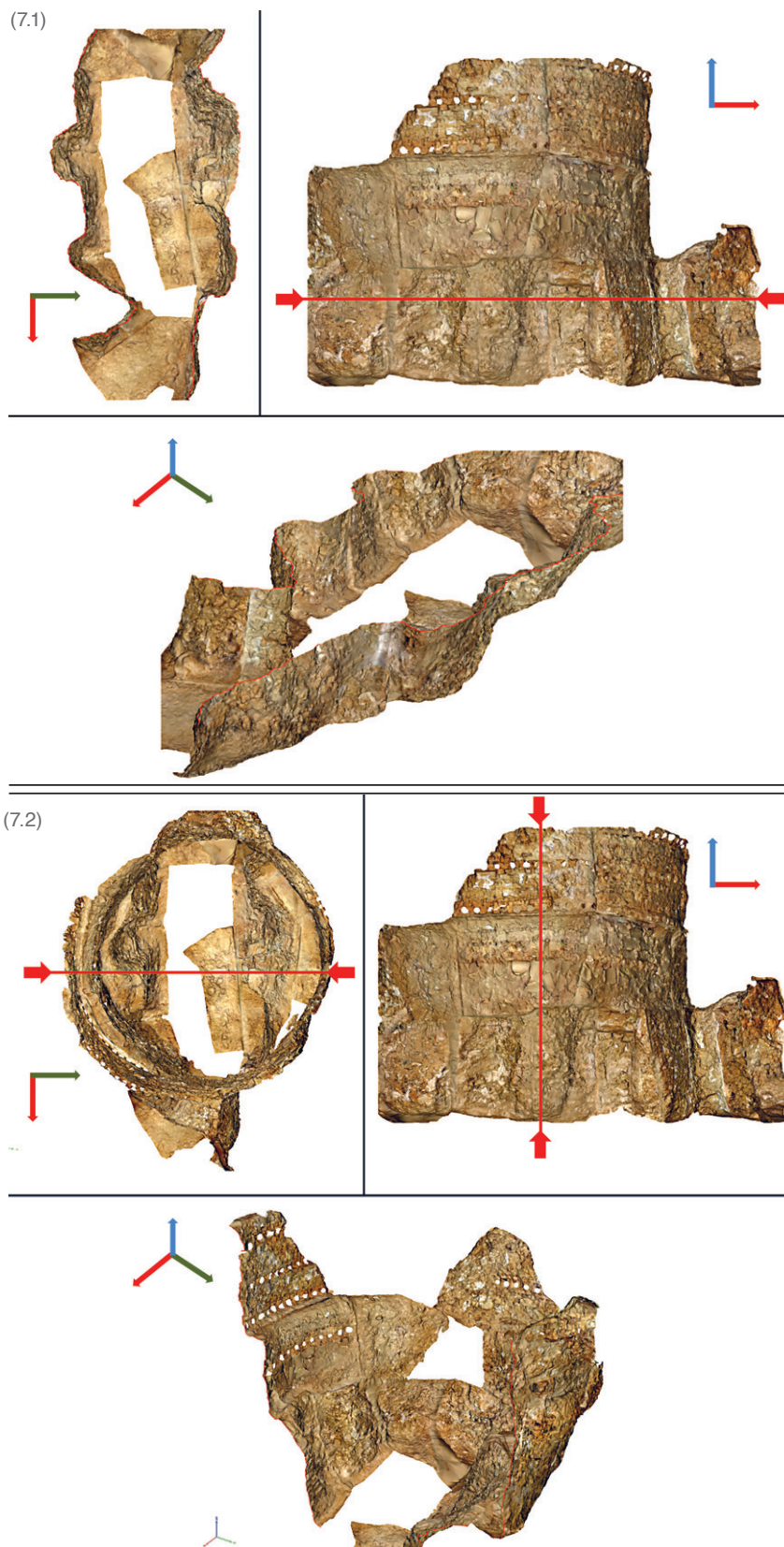


Fig. 7. Vistas sin escala de la sección sobre planta, alzado y perspectiva isométrica. Sección de la planta del laboratorio y canal de alimentación (7.1) junto con la sección vertical del horno 2 (7.2). Vistas sin escala de la sección sobre planta, alzado y perspectiva isométrica.



Fig. 8. Detalle de la diferencia de altura en la primera hilera de birlas del horno 2.

están separadas por unos 30 cm, es decir, que siguen el modelo habitual en la península para dejar el espacio útil adecuado para la colocación de las vasijas que está entre 20 y 30 cm. Los orificios son más o menos circulares de entre 5 y 6 cm de diámetro¹⁰, distando unos 4 ó 5 cm entre ellos. Desconocemos si los agujeros eran para la colocación directa de las birlas o si con anterioridad se introducía el cilindro, como se ha documentado en otros hornos zaragozanos (MOSTALAC, 1990: 70). En los moldes también se ha podido constatar que la fábrica de este horno alterna los ladrillos y los adobes, así se encuentran dos filas de ladrillos y una de adobe¹¹ y este esquema se repite hasta que hay que realizar la fila de las barras en donde la serie se reduce a una fila de ladrillos y una de adobes, colocándose en estos últimos los agujeros para las bir-



Fig. 9. Detalle de las tejas en el molde del horno 2.

10. Tenemos que hacer constar que estas medidas son aproximadas, ya que se han tomado de la reconstrucción en 3D, y la escayola con la que se realizó el molde puede dar errores en dimensiones tan pequeñas.

las. Tampoco se ha constatado, como en otros hornos del barrio de San Pablo, la presencia de filas de perforaciones más pequeñas para clavos o birlas muy pequeñas (ESCUADERO, 2016: 152) (figura 10).

La reutilización de tejas también ha servido para sellar una grieta vertical en medio del horno. Descartamos que se trate de una reparación como en el caso arriba comentado, sobre todo por el tamaño de la misma. En cuanto a la función de la cavidad podría ser la de acceso para llenar el horno, ya que resultaría muy costoso deshacer y rehacer el canal de alimentación cada vez que se hiciera una hornada y, por otro lado, desconocemos las posibles características de la cubierta que podría realizar esta función. Las dimensiones de la oquedad –1,40 x 0,60 m– confirman en cierta medida esta utilidad, ya que permite la entrada de una persona con holgura suficiente para poder introducir las cerámicas necesarias. Se correspondería con el llamado brocal por Aguado (1999: 27) aunque en este caso en vez de gruesos adobes para cubrirlo se han utilizado fundamentalmente fragmentos de tejas.

El final del horno que tenemos actualmente se alza unos 20 cm sobre la cuarta y última fila de perforaciones conservada, desconociendo si había más hileras de agujeros o no. Sin embargo, por el perfil obtenido consideramos que lo conservado supone al menos dos tercios del horno. Como ya hemos comentado, carecemos de datos sobre del cierre del laboratorio y la posible existencia de chimenea, pero la morfología general indica que es un horno ovoide, al igual que otros hornos localizados en la península Ibérica (CRESPO y GALLARDO, 2014: 106) con la base y la cubierta más estrechas que la zona media del laboratorio. Siguiendo la sistematización de Coll y García se correspondería con el tipo 3b: horno de barras con dos gradas, de planta circular, con fondo de caldera simple, canal horizontal de alimentación del combustible y perforaciones horizontales en el muro (COLL y GARCIA, 2010).

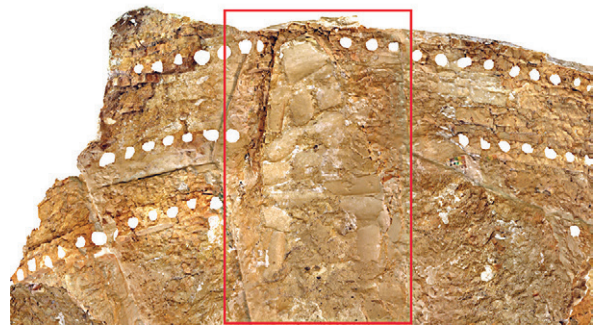


Fig. 10. Detalle del hueco tapado con tejas del horno 2.

11. Las medidas de los ladrillos se encuentran entre los 3 y 3,5 cm de ancho por 10 a 20 cm de largo. Los adobes miden entre 6 y 7 cm de ancho y entre 15 y 20 cm de largo.

Horno 3

Se trata de otro horno de birlas o barras, por tanto de tiro directo, vertical y monocameral, de planta circular pero sin canal de alimentación, del que se ha conservado 2,67 m de altura máxima. La caldera, al igual que en el caso anterior es ovalada con suelo posiblemente plano, sin embargo sus paredes son rectas, con una altura de 0,53 a 0,45 m hasta el primer escalón, la anchura máxima es de 1,35 m y la longitud 1,80 cm.

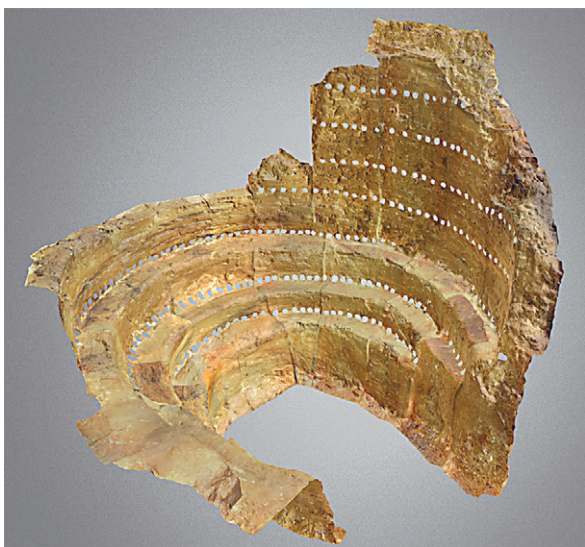


Fig. 11. Modelo 3D del horno 3.

El laboratorio consta de tres gradas superpuestas con sus correspondientes filas paralelas de perforaciones al final de cada una de ellas. El primer escalón se forma con la propia cámara de fuego con una anchura que varía desde los 23 cm a los 10 cm en las zonas más próximas a la boca. El segundo no tiene una altura uniforme puesto que es más alto por el lado izquierdo, desde la boca del horno alcanzando hasta los 24 cm, que por el otro donde no sobrepasa los 15 cm, en cambio la anchura sí que es similar, entre 20 y 23 cm. La última bancada también muestra algunas diferencias con altura entre 30 y 21 cm, respecto al ancho varía entre 26 y 17 cm. Cada uno de estos escalones amplía el espacio útil para la cocción desde un diámetro de 1,65 m con el primero, a 2,20 con el segundo y, finalmente, hasta los 2,53 m coincidiendo con la zona más amplia del horno.

Respecto a las hiladas de orificios para las barras se han conservado un total de siete. Las tres primeras coinciden con el final de cada grada, la cuarta se sitúa a una distancia mayor, entre 34 y 38 cm, en cambio las otras tres distan unos 29 cm las unas de las otras.

Excepto la separación de la cuarta fila que es mayor, el resto de las hileras de perforaciones están dentro de los parámetros normales de otros hornos localizados en España (COLL y GARCÍA, 2010). Posiblemente, la mayor distancia de la cuarta fila unido a que está inmediatamente encima de la última repisa indique una función concreta relacionada con el tamaño y/o peso de la vajilla que se colocaba en esta zona, ya que permite la colocación de cerámicas más grandes.



Fig. 12. Sección transversal del horno 3 sobre el modelo 3D en PDF.

A diferencia del horno anterior, en este sí se han detectado diferentes tipos de perforaciones en la parte central del horno. A una distancia de 10 centímetros de la cuarta línea de orificios para las barras se han localizado dos filas de pequeños agujeros¹² que distan entre sí unos 7 cm, por lo que su cercanía a la quinta fila de birlas es mucho mayor, sólo le separa unos 3 cm. Sin embargo, entre la quinta y la sexta sólo se realizó una fila para estas pequeñas perforaciones situada aproximadamente en el centro del espacio. Desconocemos su posible función, no obstante, al igual que plantea Escudero (2016: 152) para los hornos de la calle san Pablo 95 podrían corresponder a orificios para clavos (figura 13).

En el positivado de los moldes ha quedado claramente marcada las huellas de los ladrillos rectangulares¹³ con los que se levantó el laboratorio. En cambio para la fábrica de la caldera parece que se utilizó tapial. Este sistema constructivo también fue empleado en los escalones, es a partir de esta altura (1 metro) cuando aparece el ladrillo. No obstante, el frente de la

12. Las dimensiones de estos pequeños agujeros van de 1 a 2 cm como máximo.

13. Las medidas son unos 3 cm de ancho por 10 ó 12 cm de largo.



Fig. 13. Detalle de las perforaciones para birlas y para clavos.

última bancada está forrado con ladrillos¹⁴. Como vemos existe una diferencia en la construcción con el horno anterior, ya que no se aprecia la alternancia entre adobes y ladrillos.

En cuanto a la cubierta únicamente podemos comentar que a partir de los 40 cm desde la última hilera de perforaciones, parece que se inicia el sistema de cierre empleando para ello ladrillos más grandes, de un grosor entre 4 y 5 cm y una longitud aproximada de 20 cm.

Siguiendo la sistematización de Coll y García se correspondería nuevamente con el tipo 3b: horno de barras, pero esta vez con tres gradas, de planta circular, con fondo de caldera simple y perforaciones horizontales en el muro (COLL y GARCÍA, 2010).

6. Resultados obtenidos

El uso de esta tecnología ha representado un punto de avance en la interpretación arqueológica de estos

tres hornos islámicos. La opción del ensamblaje manual de cada una de las piezas no permitía fácilmente su reconstrucción, debido sobre todo al peso de la estructura y, por ende, a su maniobrabilidad. De esta manera, este tipo de proyectos permiten un número infinito de comprobaciones y simulaciones con el fin de determinar el grado de similitud, geometría y encaje entre el conjunto de piezas que determine, finalmente, cómo fue el conjunto arqueológico.

Una vez obtenido el modelo tridimensional completo, resulta fácilmente gestionable en formatos estándares de intercambio. Uno de ellos ha sido el formato PDF3D¹⁵ que pese a haber sido superado por otro tipo de formatos (compatibles con WebGL), constituye a día de hoy un formato de intercambio útil para su visualización científica y divulgativa. De este modo permite, sin una experiencia técnica determinada, su visualización tridimensional, la generación de secciones en tiempo real en cualquiera de sus ejes (x, y, z), toma de medidas y programación de vistas. Los modelos finales se han generado, igualmente, en otro tipo de formatos estándares STL, OBJ, VRML sin compresión para un futuro mecanizado de cada horno a escala real.

Por último, existen un vasto conjunto de opciones de divulgación de los modelos tridimensionales bajo la especificación estándar WebGL¹⁶. La ventaja se traduce en una visualización directa sobre cualquier navegador compatible y dispositivo móvil, pudiendo recrear una visión inmersiva sin la necesidad de *plugins* adicionales (figura 14).

7. Conclusiones

Nos encontramos con que en un mismo solar de unos 24 m² se ha documentado un testar y tres tipos de hornos islámicos de diferente tipología, pero con la misma cronología. A pesar de carecer de otros datos se puede plantear la existencia de un obrador con tres hornos especializados y que posiblemente sirvieran para realizar diferentes modelos de cerámicas. Esta información se confirmaría con el estudio del testar y los materiales de la excavación.

El horno bicameral de parrilla es uno de los tipos de horno más extendidos por el Mediterráneo desde la antigüedad, y que perduraran en la etapa cristiana (COLL y GARCÍA, 2010). No es el único horno de parrilla encontrado en este área industrial, también se ha encontrado en la C/ san Pablo 116 (VVAA 2007b) o los seis de C/ san Pablo 95-113 (AGUAROD y ESCU-

14. Las medidas de estos ladrillos son más variadas alternando de 10 a 15 x 15 a 26 x 0,08 a 0,12 cm.

15. El formato PDF 3D representa un formato estándar abierto en el intercambio y gestión de modelos tridimensionales, aceptado como tal desde 2008 por la *International Organisation for Standardisation* ISO 32000-1 y ISO 32000-2.

16. Ejemplos de sistemas basados en *Web Graphics Library* (WebGL): 3D Hop, Sketchfab, X3DOM, JSC3D, three.js.

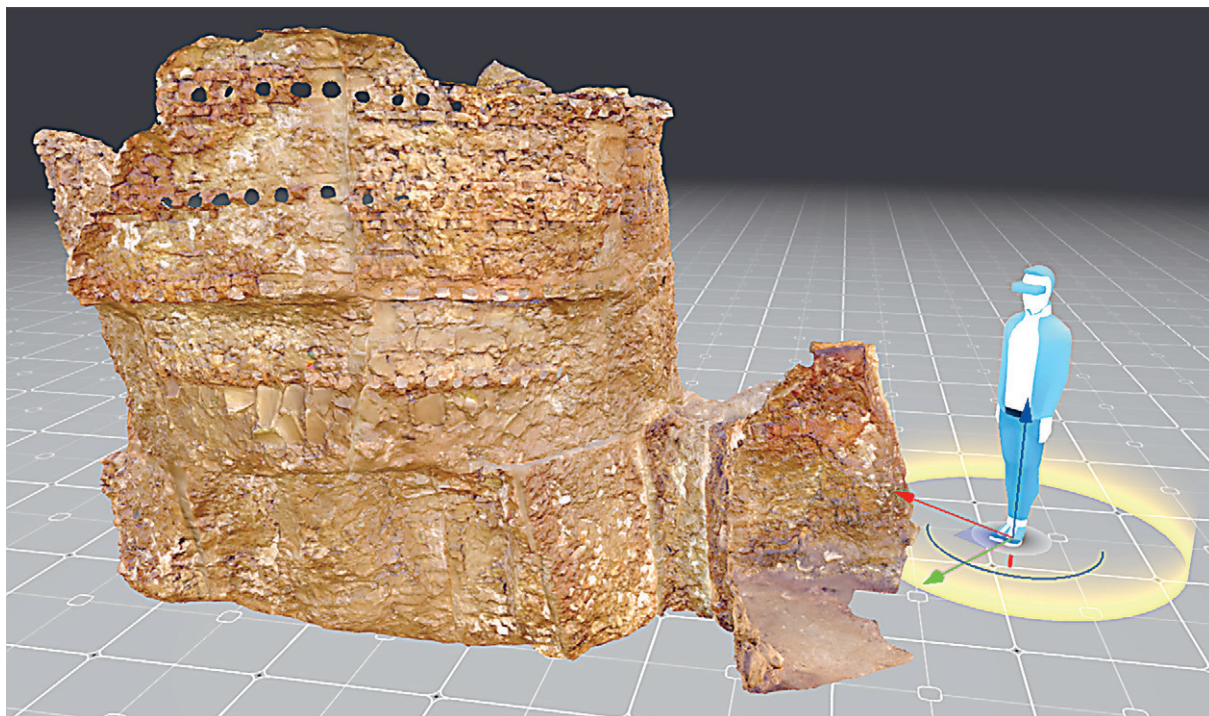


Fig. 14. Ejemplo de programación de realidad inmersiva sobre el modelo tridimensional del horno 2 con escala de un avatar de 1,6 m.

DERO, 1991). Con una tipología diferente de parrilla, pero con la misma cronología, hay que mencionar el horno de la C/ las Armas 117-119 (MOSTALAC, 1990: 65). Así mismo, aunque aún sin publicar, en la excavación de Gómez Ulla II también se localizaron tres hornos de parrilla similares al de la calle las Armas pero con unas dataciones que los acercan a la etapa cristiana.

Los hornos de barras tienen su origen en Oriente, concretamente los sitúan en Irán y Uzbekistán (THIRIOT, 1993; HERNANDEZ, 2014: 67). Estos hornos tienen una dispersión por todo el Al-Andalus que ha ido concretándose y aumentando paralelamente al número de excavaciones urbanas. En cuanto a la cronología en su mayoría se sitúa a finales del siglo X y principios del XI, coincidiendo con la datación de los dos hornos de la Plaza santo Domingo, aunque estos

tuvieron una vida útil algo más prolongada ya que se fecha su cierre a principios del siglo XII. Para Coll y García entre los elementos definitorios de estos hornos hay que mencionar no solo que son monocamerales sino la compartimentación vertical que las propias birlas crean en la cámara para una mayor funcionalidad (COLL y GARCIA, 2010). Otro elemento tipológico de estos hornos de barras zaragozanos es la presencia de los bancos en la parte baja del laboratorio, sin embargo no podemos decir nada de otros elementos estructurales que son importantes para el funcionamiento del horno como la cubierta, el tiro, la posible chimenea, la orientación, etc. Por último comentar que esta tipología de hornos se encuentra no solo en el barrio alfarero de san Pablo, sino que se ha documentado en otras zonas de la ciudad como en la excavación de Gómez Ulla (MOSTALAC, 1990:67).

8. Bibliografía

- AGUADO, J. (1999): "Hornos y alfareros en Tulaytula" en *Revista Tulaytula* nº 4. Toledo, pp.: 25-36.
- AGUAROD, M^a C. y ESCUDERO, F. de A. (1991): "La industria alfarera del barrio de san Pablo (siglos I-XIII)" en *Zaragoza, Prehistoria y Arqueología*. Ayuntamiento de Zaragoza. Zaragoza, pág.: 44.
- AGUAROD, M^a C. *et alii* (1999): "Los primeros resultados del estudio arqueométrico de un alfar de época romana en Zaragoza" en *Caesaraugusta* 73, Zaragoza. pp.: 77-87.
- AGUAROD, M^a C. *et alii* (1991): "Nuevas perspectivas de la

arqueología urbana en el periodo andalusí: La ciudad de Zaragoza (1984 – 1991)" en *Aragón en la Edad Media*, nº 9, pp.: 445-491

- ANGÁS, J. (2015): *Documentación geométrica del patrimonio cultural: análisis de las técnicas, ensayos y nuevas perspectivas*. Tesis doctoral inédita. Universidad de Zaragoza.
- ARBACE, L.; SONNINO, E.; CALLIERI, M.; DELLEPIANE, M.; FABBRI, M.; IACCARINO, A.; SCOPIGNO, R. (2012): "Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue" en *Journal of Cultural Heritage* 14, pp.: 332-345.

- BEA, M.; ANGÁS, J. (2016): "Geometric documentation and virtual restoration of the rock art removed in Aragón (Spain)" en *Journal of Archaeological Science: Reports* 11, pp.: 159-168.
- CARMONA, R. (1994): "Un alfar de época almohade en madinat Baguh. Informe de los resultados de la intervención arqueológica de urgencia desarrollada en el solar de C/ San Marcos 20, 22, 24 de Priego de Córdoba" en *Antiquitas* 5. Priego de Córdoba. pp.: 75-94.
- CARMONA, R. *et alii* (2007): "Nuevo horno de barras de época almohade de los alfares de madinat Baguh (Priego de Córdoba): aproximación formal a su producción cerámica" en *Antiquitas* 18-19. Priego de Córdoba. pp.: 189-214.
- COLL, J. (2013): "La producción cerámica medieval. Un balance entre el mundo islámico y el feudal. El caso del área valenciana." en García Porras (ed.): *Arqueología de la producción en época medieval*. Nakla. Colección de Arqueología y Patrimonio nº 15. Valencia. pp. 211-257.
- COLL, J. y GARCÍA, A. (2010): "Tipología, cronología y producción de los hornos cerámicos en Al-Andaluz" en *Revista on-line Arqueología Medieval* (18/05/2010).
- CRESPO, J. M. y GALLARDO, J. (2014): "El alfar almohade de la calle Terrer Leonés de Lorca (Murcia)" en *Alberca* 12. Murcia. pp.: 97-111.
- DELL'UNTO, N.; LEANDER, A.M.; DELLEPIANE, M.; CALLIERI, M.; FERDANI, D.; LINDGREN, S. (2013): "Digital reconstruction and visualization in archaeology Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project" en *Digital Heritage International Congress (Digital Heritage)*, 2013 1, pp.: 621-628.
- ESCUADERO, F. de A. (2016): "Los tambores musulmanes del alfar de la calle san Pablo 95-103 de Zaragoza" en *Saldvie* nº 11-2011, Zaragoza. pp.: 203-228.
- FATUZZO, G.; MUSSUMECI, G.; OLIVERI, S.M.; SEQUENZIA, G. (2011): "The "Guerriero di Castiglione": reconstructing missing elements with integrated non-destructive 3D modelling techniques" en *Journal of Archaeological Science* 38, pp.: 3533-3540.
- GISBERT, J. A. (1990): Los hornos del alfar islámico de la avenida Montgól/calle Teulada. Casco urbano de Denia (Alicante), en BARRANA, A. y AMIGUES, F. (eds.) *Fours de potiers et « testares » médiévaux en Méditerranée occidentale. Méthodes et résultats*. Collection de la casa Velazquez nº 28. Madrid, pp. 75-92.
- GISBERT, J.A. (2000): *Cerámica califal de Dénia*. Museo de la Universidad de Alicante.
- GÓMEZ, F. *et alii* (2015): "La producción cerámica en Caesar Ausgusta (Zaragoza) durante el s. I d. C. a través de los hornos de lucernas y cerámica común en las calles Boggiro y san Pablo" en *EX OFFICINA HISPANIA*, 2. *Cuadernos de Secah*, tomo II, Madrid. pp.: 439-460.
- HERNÁNDEZ, J. M. (2014): "El urbanismo islámico en la Sevilla medieval: transformaciones e impacto en los talleres alfareros. Una aproximación al estudio de los hornos cerámicos andalusíes" en *Revista Historia Autónoma*, 4; Madrid. pp. 63-82.
- MOSTALAC, A. (1990): "Los hornos islámicos de Zaragoza" en BARRANA, A. y AMIGUES, F. (eds.) *Fours potiers et « testares » médiévaux en Méditerranée occidentale. Méthodes et résultats*. Collection de la casa Velázquez nº 28. Madrid. pp.: 63-74.
- THIRIOT, J. (1993): "Bibliographie du four de potier à barres d'enfournement" en *IV Congreso de arqueología Medieval Española*. Alicante. pp.: 787-798.
- TOUBEKIS, G. (2011): "Preservation and Management of the UNESCO World Heritage Site of Bamiyan: Laser Scan Documentation and Virtual reconstruction of the Destroyed Buddha Figures and the Archaeological Remains", en *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*; 38,5/C19, pp.: 93-100
- VVAA (2007a). Ficha "Excavaciones arqueológicas de urgencia en los solares de plaza santo Domingo nº 25-26. Zaragoza" en GIMENO (coord): *Arqueología Aragonesa 1995-2005* (libro y CD). Zaragoza.
- VVAA (2007b). Ficha "Excavaciones arqueológicas realizadas en el solar sito en la calle san Pablo 116, Zaragoza" en GIMENO (coord): *Arqueología Aragonesa 1995-2005* (libro y CD). Zaragoza.