



EL “ARTE” DEL MÁRMOL: UNA APROXIMACIÓN ARQUEOLÓGICA Y DIGITAL A LAS SERRERÍAS HIDRÁULICAS DEL SIGLO XIX EN EL VALLE DEL ALMANZORA (ALMERÍA, ESPAÑA)

THE “ARTE” OF MARBLE: AN ARCHAEOLOGICAL AND DIGITAL APPROACH TO 19TH CENTURY HYDRAULIC SAWMILLS IN THE ALMANZORA VALLEY (ALMERIA, SPAIN)

José Javier Carreño Soler^{a,*} , Alexis Maldonado Ruiz^b , Jorge Rouco Collazo^c 

^a Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Granada, c/ Prof. Clavera s/n, 18071 Granada, España. jjcarresoler@gmail.com

^b Faculty of Archaeology, Universiteit Leiden, Einsteinweg 2, 2333 CC Leiden, Países Bajos / Facultade de Xeografía e Historia, Universidad de Santiago de Compostela, Praza da Universidade 1, 15703 Santiago de Compostela, España.
a.maldonado.ruiz@arch.leidenuniv.nl

^c Instituto de Ciencias del Patrimonio, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Edificio Fontán, Bloque 4 Monte Gaiás s/n, 15707 Santiago de Compostela, España. jroucocollazo@gmail.com

Lo más importante:

- Se muestra el flujo metodológico para un análisis integral de Arqueología Industrial, incluyendo la aplicación de tecnologías de modelado 3D.
- Se analiza la materialidad de una de las primeras serrerías hidráulicas industriales de mármol de España, reconstruyendo su estructura y funcionamiento a mediados del siglo XIX.
- Se profundiza en el potencial de las herramientas digitales como elementos para la experimentación arqueológica, con interesantes aplicaciones a elementos del patrimonio industrial.

Abstract:

This work is framed within the historical processes of industrialisation that took place in the Almanzora Valley (Almería, Spain) throughout the 19th and early 20th centuries. This geographic depression located in the centre of Almería, province in the southeast of Spain, is structured by a river of the same name, with an irregular regime, which flows entirely through Almería territory. This river valley divides the province geologically and climatically from its source in the Sierra de los Filabres to its mouth at the Mediterranean Sea.

In this geographic and geological area, where the exploitation of marble has been a reality since prehistoric times, the so-called hydraulic sawmills emerged in the first half of the 19th century. These production complexes were based on a mechanised system known as ‘arte’ or ‘telar’. Fed by extensive networks of irrigation channels, the introduction of this hydraulic cutting mechanism made it possible to considerably speed up the processing of marble. This progressive mechanisation of the marble industry would lay the foundations of a prosperous economic sector that survives to this day, with a great international projection. A clear example of the development and evolution of these industrial complexes can be found in the so-called Nicoli Factory (Macael, Almería), which due to its location, age and longevity is an excellent case study.

This intricate historical context that gave rise to the hydraulic marble sawmills has been analysed through two growing theoretical lines with a strong methodological and interpretative heterogeneity: Industrial Archaeology and Virtual Archaeology. At the very confluence of both archaeological branches, this study presents a multidisciplinary methodological flow to study this heritage, focusing on the Nicoli Factory specific case (built in the 19th century). Thus, a historical and archival study has been carried out to locate and specify the Nicoli Factory chronologies of use. Subsequently, archaeological prospection was used to analyse and study the factory remains, which were quite altered. In addition to this, the remains digitisation was carried out using Structure from Motion photogrammetry with the support of an unmanned aerial vehicle (UAV). Based on the historical-archaeological data, together with the three-dimensional (3D) model of the environment and the factory remains, the authors proceeded to their digital analysis and the virtual reconstruction of what this factory would have looked like in the early production days. It is therefore a question of using 3D modelling as a method to test different construction and industrial work organisation hypotheses quickly, effectively, at low cost and without affecting the material heritage in any way. An interdisciplinary approach arises to demonstrate that the industrial past can be approached not only from more technical disciplines such as Architecture or Engineering, but also from the heart of Archaeology itself.

* Corresponding author: José Javier Carreño Soler, jjcarresoler@gmail.com



As the following lines explain, the use of these digital tools in studies of different periods of the past opens up new and interesting experimentation avenues beyond the mere dissemination of heritage. In this sense, virtual scenarios allow archaeologists not only to reconstruct the object, the structure or the landscape from the remains that exist today but also to face the challenges of the societies that built them. Virtual reconstruction thus becomes a kind of Experimental Archaeology, faster, more convenient and more integrative. Moreover, the fact of working in a virtual scenario allows for easy reproducibility of this reconstruction type; hypotheses can be easily tested or modified in the event of finding new data. Virtual Archaeology, therefore, offers interesting perspectives and tools even for periods closer to the present, which are a priori better known.

Keywords: hydraulic sawmill; industrial archaeology; unmanned aerial vehicle (UAV); virtual reconstruction; virtual archaeology; SfM photogrammetry

Resumen:

El presente trabajo se enmarca en los procesos históricos de industrialización producidos en el valle del Almanzora (Almería, España) a lo largo del siglo XIX y principios del XX. En esta comarca con larga tradición en la explotación del mármol surgieron, en la primera mitad del siglo XIX, las serrerías hidráulicas. Estos complejos productivos basaban su funcionamiento en un sistema mecanizado denominado como “arte” o “telar”. La introducción de este mecanismo de corte permitió acelerar considerablemente el procesado. Esta progresiva mecanización de la industria del mármol asentó las bases de un próspero sector económico. Los restos de esta fábrica han sido analizados a través de dos líneas teóricas crecientes y con una gran heterogeneidad metodológica: la Arqueología Industrial y la Arqueología Virtual. El presente estudio aporta un flujo metodológico multidisciplinar para la investigación de este patrimonio, aplicado al caso concreto de la fábrica de Nicoli (Macael, Almería), construida en el siglo XIX. Así, se ha combinado el estudio de fuentes históricas, la prospección arqueológica y análisis paramental de los restos de la fábrica de Nicoli, que han sido documentados a través de fotogrametría ‘*Structure from Motion*’ con el apoyo de un vehículo aéreo no tripulado (VANT). Con todos estos datos, se ha procedido a su análisis digital y a la reconstrucción virtual de cómo sería esta fábrica en los inicios de su producción. El objetivo es emplear el modelado para testar distintas hipótesis constructivas y de organización del trabajo industrial de forma rápida, efectiva, de bajo coste y sin ningún tipo de afección al patrimonio material. Este enfoque interdisciplinar surge para demostrar que el pasado industrial puede abordarse, no solo desde disciplinas más técnicas, como la Arquitectura o la Ingeniería, sino también desde el propio seno de la Arqueología.

Palabras clave: serrería hidráulica; arqueología industrial; vehículo aéreo no tripulado (VANT); reconstrucción virtual; arqueología virtual; fotogrametría SfM

1. Introducción. La Arqueología virtual en el ámbito industrial

Tras la Segunda Guerra Mundial, los intensos bombardeos alemanes llevados a cabo sobre numerosas ciudades británicas tuvieron como consecuencia la destrucción de gran parte del pasado industrial y de la imagen urbana con la que gran parte de la población británica se veía identificada. La profunda sensación de pérdida en esta sociedad, favoreció que, durante el período de posguerra, comenzaran a generalizarse asociaciones populares dedicadas a recuperar y conservar el patrimonio industrial en Reino Unido y otros países europeos. Estas conformarían la base sobre la que se terminaría construyendo una nueva rama de la disciplina arqueológica, la arqueología industrial. El origen de esta nueva aproximación arqueológica debemos integrarlo, por tanto, dentro de una dinámica que, como diría Gutiérrez (1997, p. 80) “estuvo más ligada al movimiento cívico que al interés de los medios científicos o académicos”.

Así, la arqueología industrial surgió a mediados del siglo XX en Reino Unido, no siendo hasta la década de los 60 de esa misma centuria cuando la disciplina irrumpió en el ámbito académico general (Pardo, 2016, p.10). Sin embargo, ni siquiera entonces se observó una activa participación de historiadores o arqueólogos, liderando su desarrollo arquitectos, ingenieros, economistas e incluso sociólogos (Cerdá, 2008). La contradicción que supuso el establecimiento de una nueva “arqueología sin arqueólogos”, implicó también que la renovación metodológica y conceptual que experimentaron en la segunda mitad del siglo XX el resto de ramas subsidiarias de la arqueología pasase aquí desapercibida (Cano, 2007).

A día de hoy, podemos definir la arqueología industrial como una rama arqueológica relativamente madura, que adolece aún de importantes carencias y una fuerte heterogeneidad metodológica (Cano, 2007, p. 53). Esta situación es especialmente evidente fuera del ámbito académico anglosajón (Cerdá, 2008). En países como España, la riqueza de restos arqueológicos de épocas más remotas eclipsa, inevitablemente, el pasado más reciente (Pardo, 2016).

Esta coyuntura terminó imprimiendo cierto cariz de marginalidad al estudio del patrimonio industrial, que será denostado por su cercanía con el presente. Una condición legitimada, y motivada durante años, por una escala del valor arqueológico fuertemente cronocéntrica, donde uno de los principales factores de atribución es habitualmente la antigüedad de los restos. Al establecer un límite entre el presente y el pasado, entre lo conservable y no conservable, es fácil desencadenar una realidad preocupante que genera, aún hoy, importantes dilemas teóricos, limitaciones a nivel de conservación patrimonial y la peligrosa descentralización del estudio arqueológico fuera de su razón de ser.

Paralelamente, en la década de los 90 del siglo XX se produce otro hito importante en el marco de la disciplina arqueológica. Surge la arqueología virtual (Reilly, 1991), como un nuevo enfoque más metodológico que teórico y capaz de integrarse en cualquier periodo histórico (Garstki, 2017; Maldonado, 2020; Remondino, 2011; Rouco, 2021). De esta forma, independientemente de la cronología y el objeto de estudio, la arqueología virtual aporta herramientas extraordinariamente útiles. De ella derivaron, entre otras, las tecnologías de digitalización como la fotogrametría ‘*Structure from Motion*’, el láser escáner y un amplísimo abanico de técnicas de análisis

virtual (Carrero *et al.*, 2018). La precocidad con la que estas técnicas se han integrado en el marco metodológico general de la arqueología ha provocado que hoy, más de 30 años después, sean cada vez más las intervenciones, grupos de investigación o proyectos arqueológicos que las aplican como parte fundamental de su flujo de trabajo.

Del mismo modo que la invención del telar mecánico, la máquina de vapor o el motor de combustión se convirtieron en importantes revulsivos para el desarrollo industrial, la aparición de la denominada como arqueología virtual marcó un antes y un después en el sistema actual de documentación del registro arqueológico (Beale y Reilly, 2017). Causa y consecuencia de la informatización de nuestra disciplina, la arqueología virtual abrió nuevas e interesantes líneas de investigación, potenció algunas preexistentes y preparó a la disciplina arqueológica para una renovación metodológica tan importante como necesaria.

La confluencia entre la arqueología virtual y la arqueología industrial era una realidad esperable que, sin embargo, se produjo en un marco teórico poco definido por ambas partes (Alba y Cano, 2024; Staropoli *et al.*, 2023). Este peculiar escenario nos deja en una situación llena de oportunidades, pero también de importantes dificultades. Sin embargo, como ocurre con el propio desarrollo de la arqueología industrial, la integración de las herramientas digitales en los estudios de patrimonio industrial se ha producido de forma completamente descentralizada. Por ello, la pervivencia de esa “arqueología sin arqueólogos” que señalaba Cano (2007) sigue siendo una realidad en los estudios del pasado industrial que integran herramientas digitales (Rojas-Sola *et al.*, 2020; Shults *et al.*, 2023). Existen trabajos interdisciplinarios que ahondan desde varias perspectivas en un caso de estudio concreto, pero la ausencia de arqueólogas y arqueólogos en proyectos relacionados con nuestro pasado industrial sigue siendo preocupante. Algo especialmente evidente en los denominados como cementerios industriales, áreas donde el proceso de industrialización se terminó abandonando, o reduciendo significativamente, en algún momento de finales del siglo pasado (Alba, 2016). Si bien el papel de la arqueología no debe ser exclusivo en el estudio del patrimonio industrial, especialmente cuando estos abordan, por ejemplo, aspectos como el diseño y funcionamiento de la maquinaria, la disciplina arqueológica puede aportar nuevas e interesantes perspectivas a tener en cuenta.

El presente trabajo surge por tanto en un contexto complejo, histórica y metodológicamente hablando, pero no por ello menos interesante. A lo largo de las siguientes líneas ahondaremos en los procesos históricos de industrialización que se producen en el Valle del Almanzora (Almería, España) a lo largo del siglo XIX y comienzos del XX. Para ello, recurriremos a la digitalización, análisis y reconstrucción virtual de una de las piezas fundamentales de su engranaje histórico: las serrerías hidráulicas de corte de mármol. Este estudio se debe entender, por tanto, como un intento de demostrar que el pasado industrial puede abordarse también desde el seno de la arqueología. Desde un punto de vista no solo técnico, arquitectónico o digital, sino también arqueológico. La arqueología ha de involucrarse, de forma más activa, en la investigación, conservación y difusión del pasado industrial.

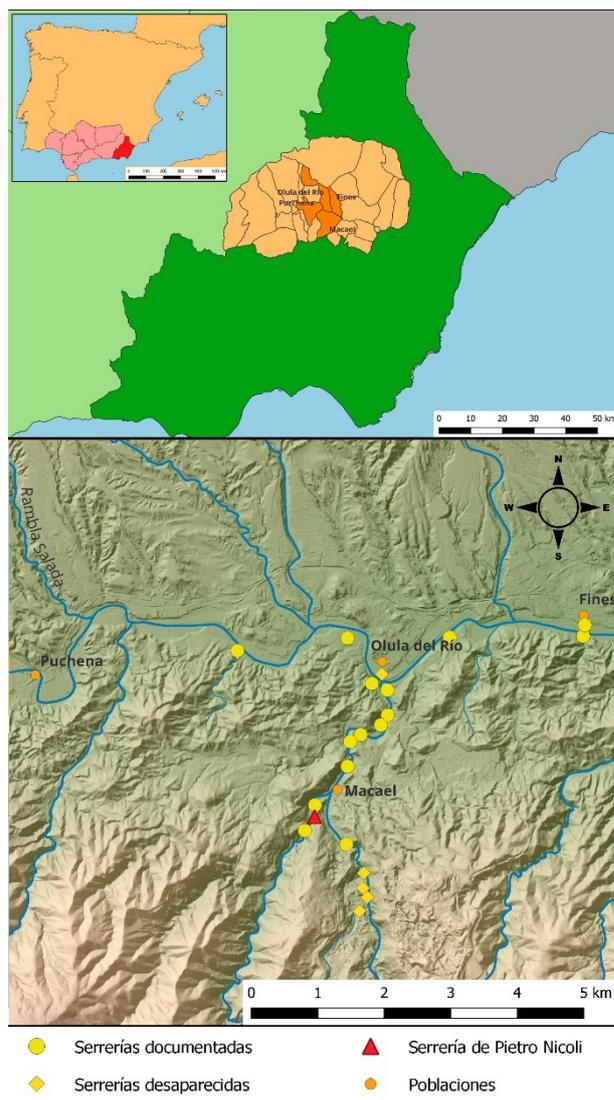


Figura 1: Ubicación del valle del Almanzora y relación de serrerías localizadas.

2. Contexto histórico y arqueológico

2.1. Contexto geográfico y geológico

Desde un punto de vista geográfico y geológico, la depresión del valle del Almanzora se ubica en el centro de la provincia de Almería, al sureste de España. Formada por el cauce del río homónimo, de régimen irregular y seco gran parte del año, el valle del Almanzora se extiende íntegramente por territorio almeriense. Este valle fluvial divide geológica y climáticamente la provincia desde su nacimiento en sierra de los Filabres hasta su desembocadura en el mar Mediterráneo (Fig. 1).

Mientras que, al norte, se enmarca por la sierra de las Estancias, el borde sur de la depresión lo conforma la sierra de los Filabres, ambos encuadrados en la zona interna de las cordilleras béticas. Geológicamente, en la sierra de los Filabres se distinguen dos áreas: la zona sur y central formada por el zócalo Nevado-Filábride con litologías silíceas paleozoicas y la parte norte, en la cual sobre el zócalo anterior descansan las capas triásicas de los complejos Ballabona-Cucharón y Alpujárride con gran presencia de rocas carbonatadas (Carreras y Navarro, 2010). Esta concentración da lugar a una gran masa de

mármol blanco y diferentes tipos de piedras decorativas, que afloran principalmente en el municipio de Macael, con extensión hacia los de Cobdar, Lijar y Chercos en el interior de la sierra.

La riqueza geológica de la zona ha ido configurando una de las industrias extractivas de roca ornamental más importante del país, concentrada principalmente en el área de Macael, y donde se han extraído y extraen actualmente diversas tipologías de mármoles (Carretero, 1995).

2.2. La industria del mármol en el valle del Almanzora

El aprovechamiento de estos filones de mármoles de la sierra almeriense de los Filabres, especialmente los ubicados en el término municipal de Macael, cuenta con una dilatada historia. Encontramos evidencias arqueológicas del uso diacrónico del mármol en prácticamente todas las sociedades que se han asentado en el valle del Almanzora y sierra de los Filabres desde el Neolítico (Cámlich et al., 1999; Martínez, 1987).

La extracción del mármol alcanza ya cierta notoriedad en la época romana (s. I-II d.C.), cuando es empleado para la fabricación de aras e inscripciones que encontramos dispersas en todo el ámbito regional (Lázaro, 1980). Sin embargo, no será hasta el periodo andalusí (s. X-XIV d.C.) cuando se constata una explotación de cierta envergadura, destinada sobre todo a la construcción de complejos palaciegos como Medina Azahara (Córdoba) o la Alhambra (Granada) (Cressier, 2004). En los siglos posteriores, la extracción de mármol continuó vinculada a la construcción y elaboración de edificios o piezas destinadas a la nobleza, la iglesia o la propia monarquía. No obstante, este modelo de explotación no fomentaba, en ningún caso, una producción sostenida o continuada. A nivel socioeconómico, esta situación terminó conformando una población trabajadora que se veía obligada a alternar la minería y la cantería del mármol con otras actividades económicas complementarias como la agricultura y la ganadería. A lo largo de este periodo y hasta prácticamente el siglo XIX, para la extracción del mármol se recurrió, por tanto, a cuadrillas temporales lideradas por un maestro cantero. Estas se dedicaban a la extracción y desbastado de este material de forma puntual y previo contrato. No podemos hablar, en ningún caso, de un mercado lo suficientemente estable para generar un tejido preindustrial consolidado (Carretero & Aznar, 2008, p. 251).

No será hasta el primer tercio del siglo XIX cuando, gracias a las políticas de libertad de industria y la abolición señorial del gobierno liberal, la población local recupere el control de la explotación del mármol y se inicie tímidamente la industrialización del sector (Carretero, 2022, p. 202). Este proceso se inicia en 1837 con la construcción en Fines, municipio cercano a Macael, de la primera serrería hidráulica plenamente mecánica de la comarca, la de Los Catalanes. Estos complejos productivos, también denominados como fábricas, basaban su funcionamiento en el empleo de norias que, alimentadas por grandes saltos de agua, generaban un movimiento de rotación mediante cigüeñal capaz de accionar las sierras de corte, denominadas “artes” o “telares”. Los principios básicos de este sistema mecanizado de corte, que ya eran conocidos en época romana y tardoantigua (Grewe, 2010; Kessener, 2010; Mangartz, 2010), se mejoran y adaptan ahora al mármol y a las condiciones hidrológicas únicas del valle del Almanzora.

La entrada en funcionamiento de la serrería hidráulica de Los Catalanes, capaz de procesar más material en menos tiempo, desencadenó un significativo incremento de la producción de mármol en la zona. Esto implicaría, a su vez, la necesidad de abrir nuevas canteras capaces de cubrir la creciente demanda de materia prima.

Como consecuencia del éxito de la fábrica de Los Catalanes, en la década de los cincuenta el modelo de serrería hidráulica se replicará en el resto de las poblaciones de la cuenca del Almanzora. Surgirán así nuevos de estos complejos en Olula del Río, Purchena y Macael, muchas de las cuales reaprovecharon las estructuras, o parte del sistema hidráulico, de algunos molinos harineros preexistentes. En tan solo 30 años, la región pasó de tener una única fábrica en Fines a nueve repartidas por toda la comarca (Fig. 1). Esta nueva tendencia productiva, así como los pingües beneficios que aportaba, terminaron convirtiendo la obtención y el procesamiento del mármol en un fuerte motor económico de la zona. Una dinámica de crecimiento que continuó, con bastantes altibajos, durante la segunda mitad del siglo XIX, con la apertura de nuevas serrerías. Para finales del siglo XIX y primeras décadas del XX, en el Valle del Almanzora se llegaron a construir, según las fuentes documentales, 22 fábricas de este tipo. Aunque muchas de ellas no funcionaron de forma coetánea, como parte de la investigación para la elaboración de este artículo se localizaron restos de al menos 16.

La construcción a finales de esta centuria de una extensa vía ferroviaria que comunicaba las explotaciones metalíferas y marmóreas del Valle del Almanzora con los puertos de Levante y el resto de la red nacional, supuso la ruptura del tradicional aislamiento que sufría la comarca (Carretero, 2022, p. 202; Anónimo, 1893). Años más tarde, al inicio del siglo XX, con la aparición de las primeras serrerías accionadas con motores de combustión y la tímida electrificación del tejido industrial se darán los pasos necesarios para la definitiva consolidación del sector del mármol como recurso económico decisivo de la región.

A pesar de la rápida modernización del sector, con la irrupción de los motores de combustión o la llegada de la electricidad, el modelo de serrería hidráulica seguirá conviviendo unos años más, hasta su total desaparición en la década de los 30 del siglo XX.

2.3. La fábrica de Pedro Nicoli (Macael)

Un claro ejemplo de esta pervivencia cronológica de las serrerías hidráulicas hasta épocas ya avanzadas lo encontramos, precisamente, en la fábrica de Pedro Nicoli. Por su ubicación, antigüedad y longevidad dentro de las numerosas serrerías hidráulicas existentes en la región del Almanzora, esta fábrica se convirtió en la opción más lógica sobre la que enfocar nuestro estudio y la posterior reconstrucción virtual. En efecto, gracias a que mantuvo el sistema de serrado hidráulico durante tanto tiempo se convierte en una de las que menos alteraciones posteriores presenta en sus restos estructurales. Sin embargo, consecuencia también de esta baja tasa de reutilización es que su estado de conservación, a expensas del salto de agua, era bastante deficiente (Fig. 2). A ello debemos sumar que su presencia en las fuentes documentales, asociada al nombre de Pedro Nicoli, nos aportaba los datos necesarios sobre su ubicación y estructura. Todos estos factores, la convertían en un caso de estudio excelente sobre el que llevar a cabo una reconstrucción virtual.



Figura 2: Foto de la fábrica de Pedro Nicoli obtenido mediante VANT como parte del levantamiento fotogramétrico.

El complejo propiamente dicho se ubica en la margen derecha del río Laroya, en un área conocida como Los Huertos. Junto a la serrería hidráulica de Bergela y la de Fuente Maestra conforma un grupo estructural que se sitúa a lo largo de una acequia principal que toma las aguas del manantial de Fuente del Ayón o Grande, actual Fuente Maestra. Al igual que otras muchas fábricas de mármol erigidas a lo largo del siglo XIX, se construye muy cerca de un molino harinero previo, probablemente del siglo XVI, aprovechando así parte de su caudal y estructura hidráulica (Castillo, 1998, p. 134) (Fig. 3).

La serrería en cuestión fue construida a mediados de la década de los años cincuenta del siglo XIX. Desde su puesta en marcha aparece vinculada al marmolista italiano Pietro Nicoli Barsolini. Este vaciador, escultor y arquitecto natural de Carrara (Italia), aparece vinculado a la naciente industria del mármol almanzorí desde finales de la década de los cuarenta del siglo XIX. En 1858 encontramos la primera referencia documental a la serrería donde vemos a Nicoli como tributario por “una fábrica de serrar el mármol con dos artes”¹ (Fig. 3). Una situación fiscal que se mantiene hasta 1862, cuando desaparece de la contribución industrial local.

En los siguientes sesenta años no encontramos más referencias al funcionamiento de la serrería. No obstante, gracias a una escritura de compraventa de 1880 del molino harinero cercano a la misma², sabemos que esta siguió vinculada a la industria del mármol, no como serrería, pero sí al menos como taller y almacén.

No será hasta la década de los años veinte del siglo XX, cuando la industria del mármol se encuentre a pleno rendimiento en la comarca, que esté de nuevo en marcha. En 1921 localizamos la fábrica bajo la dirección de los marmolistas locales Gabriel Martínez Pardo y Ángel Gutiérrez Reina. Ambos figuran como contribuyentes por “un aparato de aserrar mármol movido con fuerza hidráulica en el pago de los Huertos”³. Es durante este segundo periodo de su vida útil cuando se introduce el motor de combustión⁴ como parte de su maquinaria, reduciendo a un 15% el empleo de la fuerza hidráulica⁵, lo que haría a la fábrica menos dependiente de la irregularidad hídrica.

Finalmente, en 1929 pasa a manos de Julio Gualdo Requena, siendo este su último periodo de uso conocido. Tras esta fecha, ya no encontramos más referencias a su funcionamiento. La cercanía

¹ Archivo Histórico Municipal de Macael (1858). Contribución industrial. Hacienda, Intervención económica, Cod. 4.01. AHMM, Macael.

² Archivo Histórico Provincial de Almería (1880). Archivos notariales. Notarios de Purchena. P-7219 ,f. 263-271. AHPAL, Almería.

³ Archivo Histórico Municipal de Macael (1930). Registro de altas y bajas de la matrícula industrial de los años de 1921 a 1930. Hacienda, Intervención económica, Cod. 4.01. AHMM, Macael.

⁴ La industria del mármol, como cualquier otro sector económico, vivió su desarrollo estrechamente ligado al progreso tecnológico. Aunque fue el motor hidráulico el que dio comienzo a la industrialización del sector, una vez asentado este y como parte de la progresiva modernización de estos espacios, se introdujeron el motor de gas pobre, el de combustión interna y, posteriormente, el eléctrico.

⁵ Archivo Histórico Municipal de Macael (1922). Hacienda, Intervención económica, Cod. 4.01. Registro de altas y bajas de la matrícula industrial de los años de 1921 a 1930.

cronológica con la crisis de la construcción de 1935 y la deriva similar de varias serrerías del río Laroya a lo largo de los años 30, nos hace presuponer un cese definitivo de su funcionamiento en estas fechas.

3. Metodología

3.1. Análisis documental y localización de la fábrica

En un estudio integrado dentro de lo que se conoce como Arqueología Industrial resulta esencial la consulta de las fuentes documentales primarias, dada la relativa abundancia y el detalle de las mismas. Estas se configuran como el necesario nexo de unión entre el ámbito historiográfico y el más puramente arqueológico.

Sin embargo, y a pesar de la aparente cercanía cronológica de nuestro objeto de estudio, abordar el análisis documental de las serrerías de mármol del valle del Almanzora entre los siglos XIX y XX, no resultó una tarea fácil. A pesar de la proliferación en las últimas décadas de los estudios sobre arqueología y patrimonio industrial, hasta la fecha no se han tomado en consideración este tipo de vestigios. Iniciativas como la reciente recuperación del legado histórico-cultural del trabajo del mármol en la cuenca de Macael se han centrado, mayoritariamente, en el aspecto etnológico e historiográfico, dejando de lado el ámbito arqueológico (García, 1996; González, 2017) A todo ello, debemos sumar la descentralización de los archivos, la naturaleza perecedera de los documentos y el descuido generalizado de los fondos. Este importante vacío de información documental acrecienta aún más las lagunas históricas y arqueológicas, generando peligrosas dinámicas de olvido y descuido patrimonial.

Llegados a este punto, partíamos, por tanto, de un pleno desconocimiento acerca del número de serrerías con las que contó la comarca. Por este motivo, resultó fundamental para la ubicación y posterior análisis y reconstrucción realizar un estudio archivístico y documental previo. Para ello se planteó la consulta y recopilación de la información alojada en varios archivos locales y provinciales como el Archivo Histórico Provincial de Almería (AHPAL) y el Archivo Histórico Municipal de Macael (AHMM). Allí se localizaron y analizaron varios registros de carácter tributario (contribuciones industriales, amillaramientos, etc.), que arrojaron información relativa a la ubicación y el impacto económico de la fábrica dentro del sector del mármol comarcal a lo largo del período estudiado (Fig. 3).

3.2. Prospección e inspección de la estructura

Los datos obtenidos durante el trabajo de investigación nos permitieron realizar una primera aproximación al número de serrerías con los que contaba la cuenca y una ubicación aproximada de estas. El paso siguiente fue un concienzudo trabajo de campo para poder trasladar del papel a un punto geográfico aquellas fábricas documentadas. En muchos de los casos, las transformaciones del paisaje por las explotaciones industriales, los cambios en la toponimia de los espacios donde se encuentran y la propia evolución de los edificios, dificultaron su localización.

Con la serrería ubicada, se llevó a cabo una primera inspección física del edificio. En esta se realizó una disección, siguiendo una metodología puramente arqueológica, separando las estructuras originales de aquellas que son añadidos posteriores a su cierre, qué elementos pertenecían a su periodo de funcionamiento como serrería hidráulica y cuáles no (Fig. 4). Tras este análisis previo se procede a realizar un inventario y descripción minuciosa de la serrería, atendiendo a las técnicas constructivas empleadas y levantando un boceto de su distribución original. Estos datos son fundamentales para llevar a cabo un buen levantamiento fotogramétrico, ya que nos permiten planificar el registro de la estructura y el área circundante de forma mucho más precisa.

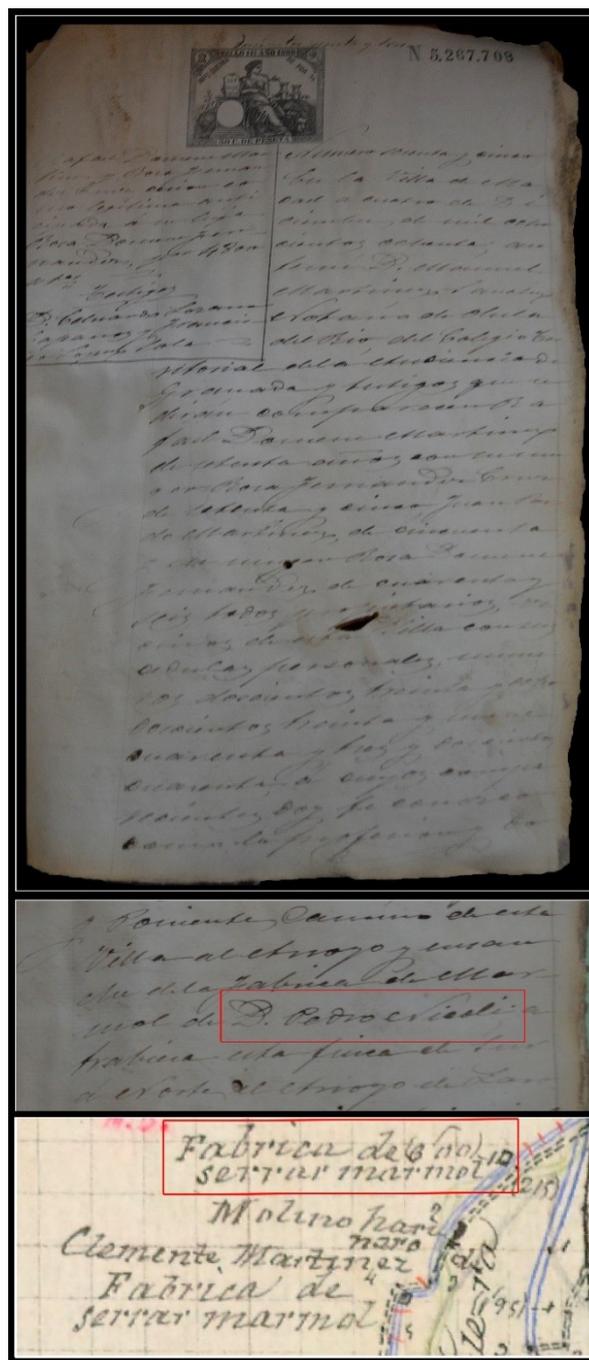


Figura 3: Extractos de algunos de los registros de carácter tributario consultados en el AHMM y el AHPA donde se menciona la figura de Pedro Nicolí y su serrería.

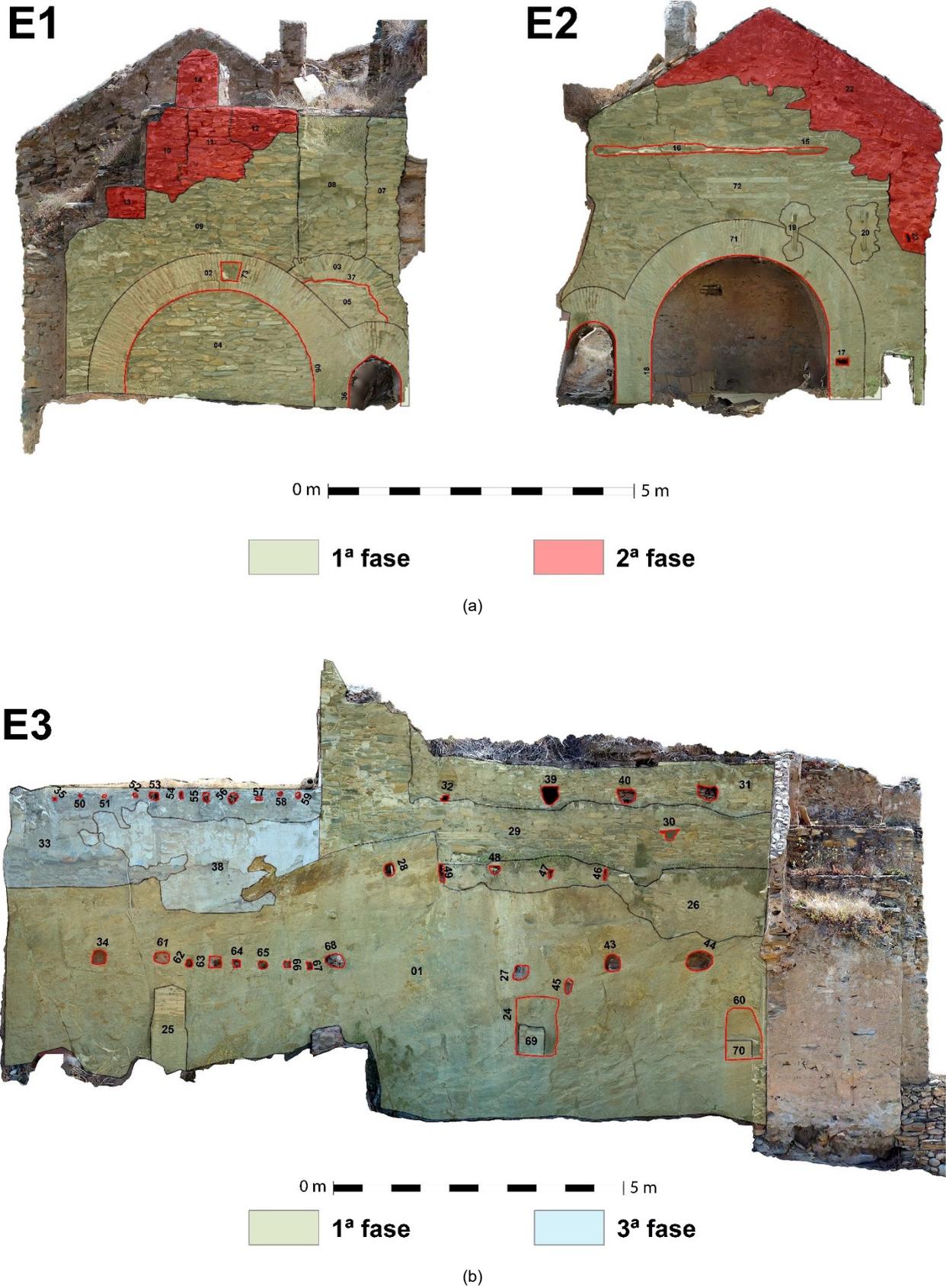


Figura 4: Análisis paramental de varios ortoalzados obtenidos del modelo fotogramétrico de la fábrica de Pedro Nicoli: a) Parte exterior del salto de agua (E1) y parte interior del salto de agua con el cárcavo donde se alojaba la noria (E2); b) Parte interior de la nave principal tallada en la roca y donde se aprecia el arranque de los arcos, parte de la acequia y de la casa superior (E3).

EL “ARTE” DEL MÁRMOL: UNA APROXIMACIÓN ARQUEOLÓGICA Y DIGITAL A LAS SERRERÍAS HIDRÁULICAS DEL SIGLO XIX EN EL VALLE DEL ALMANZORA (ALMERÍA, ESPAÑA)

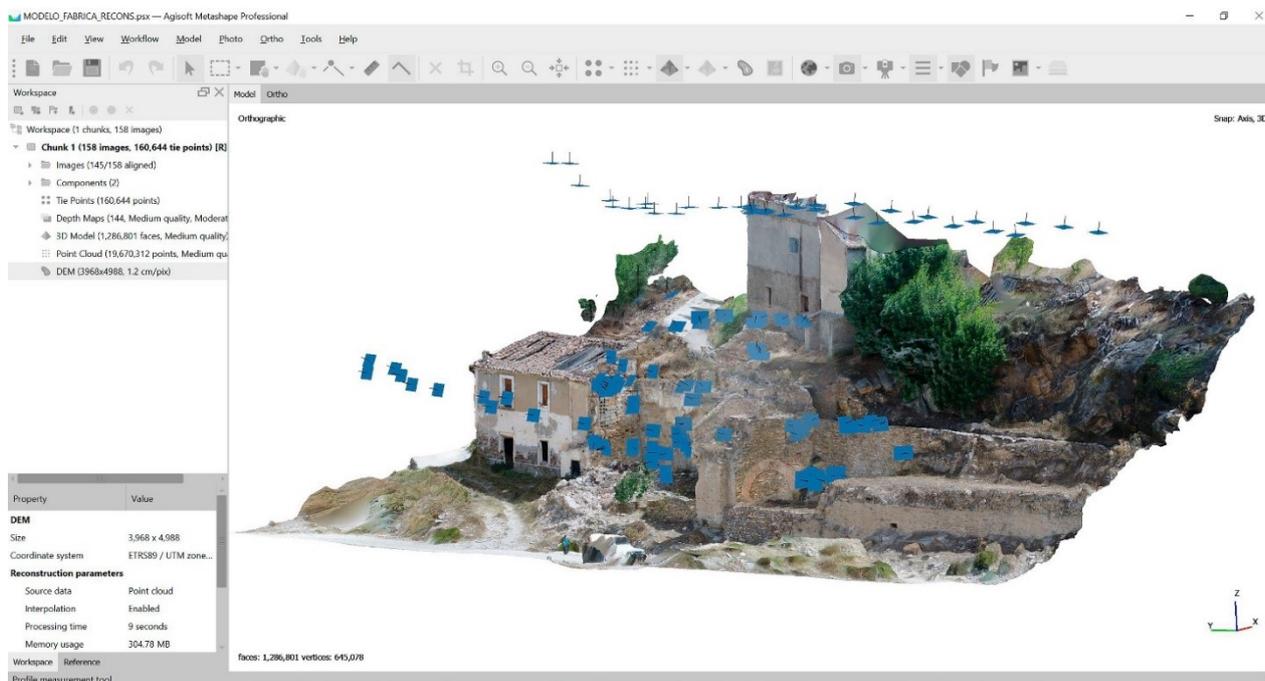


Figura 5: Modelo fotogramétrico de la fábrica de Pedro Nicoli obtenido mediante Agisoft Metashape v. 2.0.4.

3.3. Levantamiento fotogramétrico mediante VANT

Una vez realizada la prospección e inspección preliminar de la fábrica, se procedió al levantamiento fotogramétrico de la misma para obtener una documentación gráfica y topográfica precisa del estado actual de la fábrica.

La fotogrametría *Structure from Motion* es un método de levantamiento 3D a partir de la captura de una serie de fotografías con solape en auge en la arqueología en la última década por su gran calidad métrica y texturas fotorrealistas (Pereira, 2013). En nuestro caso, dada la altura de los restos constructivos y su morfología, se ha realizado la fotogrametría con el apoyo de un VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) para poder documentar correctamente los puntos de imposible acceso a pie (Benavides et al., 2020; Rouco & Benavides, 2023).

Concretamente, se ha empleado un dron DJI Phantom 4 Pro v. 2.0, con una cámara de 20 MP f/2.8 y un sensor CMOS 1/2.3". Este VANT se ha empleado para realizar un vuelo manual, tomando fotografías de todas las estructuras y el entorno de la fábrica, garantizando un 80% de solape que ha permitido obtener un modelo de gran calidad a partir de 158 fotos (Benavides et al., 2016; Benavides et al., 2020).

Para la correcta calidad métrica y la georreferenciación del modelo fotogramétrico (Bisson-Larrivée & LeMoine, 2022; Gabrilik et al., 2018; Marčić & Fraštia, 2023), este se ha coordinado empleando puntos de apoyo sobre el terreno con un GPS diferencial con correcciones en tiempo real vía la red móvil del Instituto Geográfico Nacional (IGN) español, con un margen de error de menos de 2 cm. Concretamente, se ha empleado un GPS GNSS Reach RS2.

Tras la captura fotogramétrica en campo, se ha procesado en laboratorio con la máxima calidad, siguiendo el flujo de trabajo habitual de la mayoría de los *softwares* para la generación de la malla tridimensional y la textura fotorrealista (Benavides et al., 2023) (Fig. 5). A partir de este modelo, se obtienen las ortofotografías y el Modelo Digital de Elevaciones (DEM) que sirven de base para el trazado de las planimetrías, además de ser también el punto de partida de la reconstrucción 3D, proceso que detallamos más adelante.

3.4. Procesamiento mediante SIG y CAD

Una vez obtenidas las ortofotografías y los DEM del modelo fotogramétrico, estas son importadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG). En nuestro caso optamos por emplear QGIS v. 3.28, un *software* libre con una alta capacidad de procesamiento. Este paso resulta esencial para comprobar la georreferenciación precisa de estos formatos bidimensionales y nos permite también ponerlos en relación con otra información cartográfica como los vuelos americanos de los años 50⁶, los datos LiDAR (2ª cobertura IGN), la ubicación del resto de fábricas localizadas en la región y las líneas de acequias que las surtían.

Igualmente, la interfaz de QGIS v. 3.28 nos permite llevar a cabo algunos tratamientos interesantes sobre los DEM que mejoran considerablemente la visualización de los mismos (Fig. 6). Un ejemplo de ello es el empleo de la herramienta *Analytical Hillshading*, la cual realiza un cálculo analítico de la sombra para una cuadrícula de elevación (Martínez et al., en prensa; Tarini et al., 2006).

Con toda esta información, las ortofotos y el DEM procesado son importadas a AutoCAD v. U.61.0.0, un *software* de diseño por ordenador (CAD) que empleamos para la elaboración de plantas interpretativas del trazado original de la serrería hidráulica. Esta última, junto al modelo tridimensional conformarán la base sobre la que se sustenta la reconstrucción virtual posterior.

⁶ Este tipo de fotografías, disponibles en el PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea del IGN), nos permiten examinar la

estructura de la fábrica a mediados de los años 50 del siglo pasado.

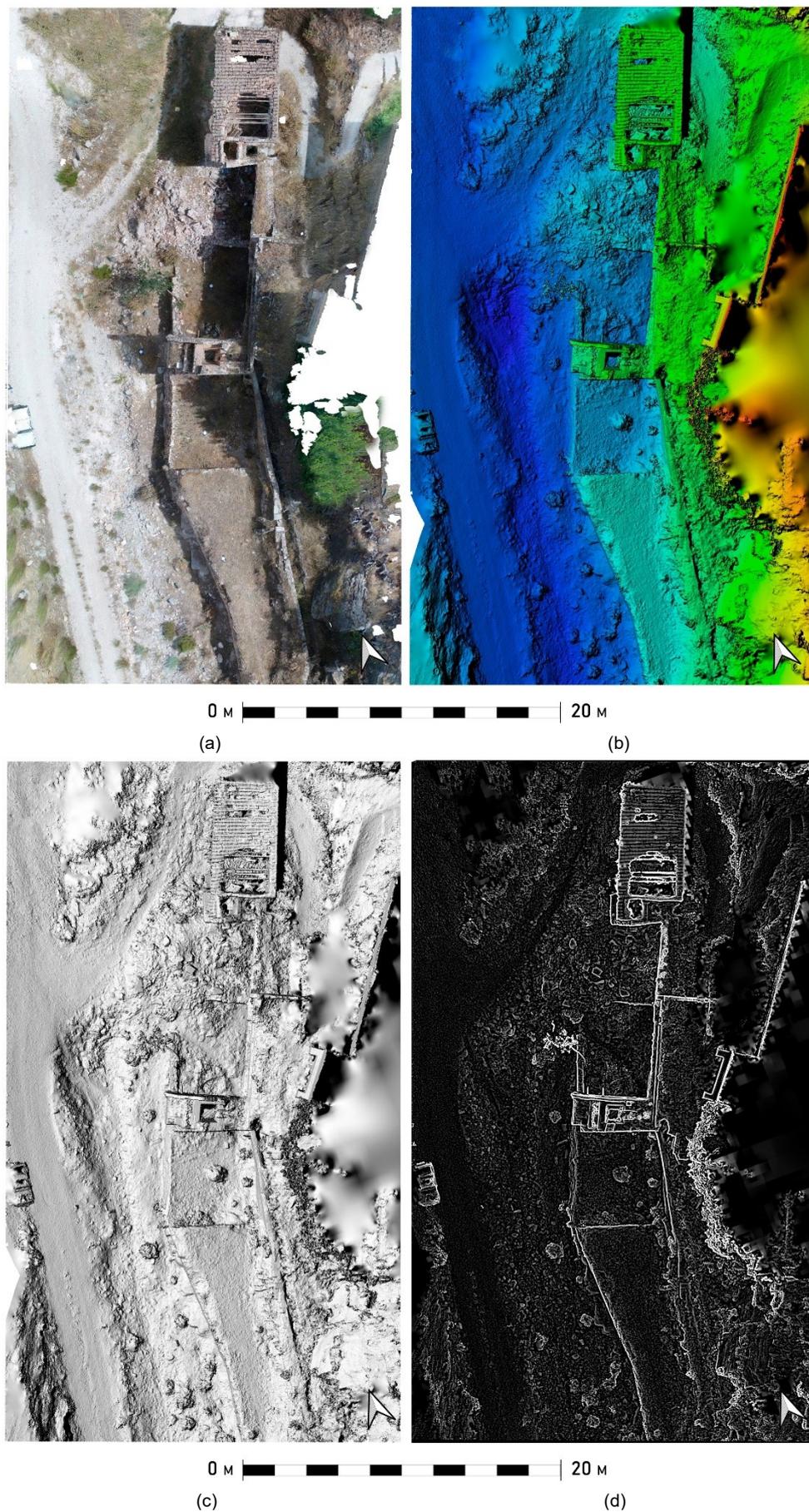
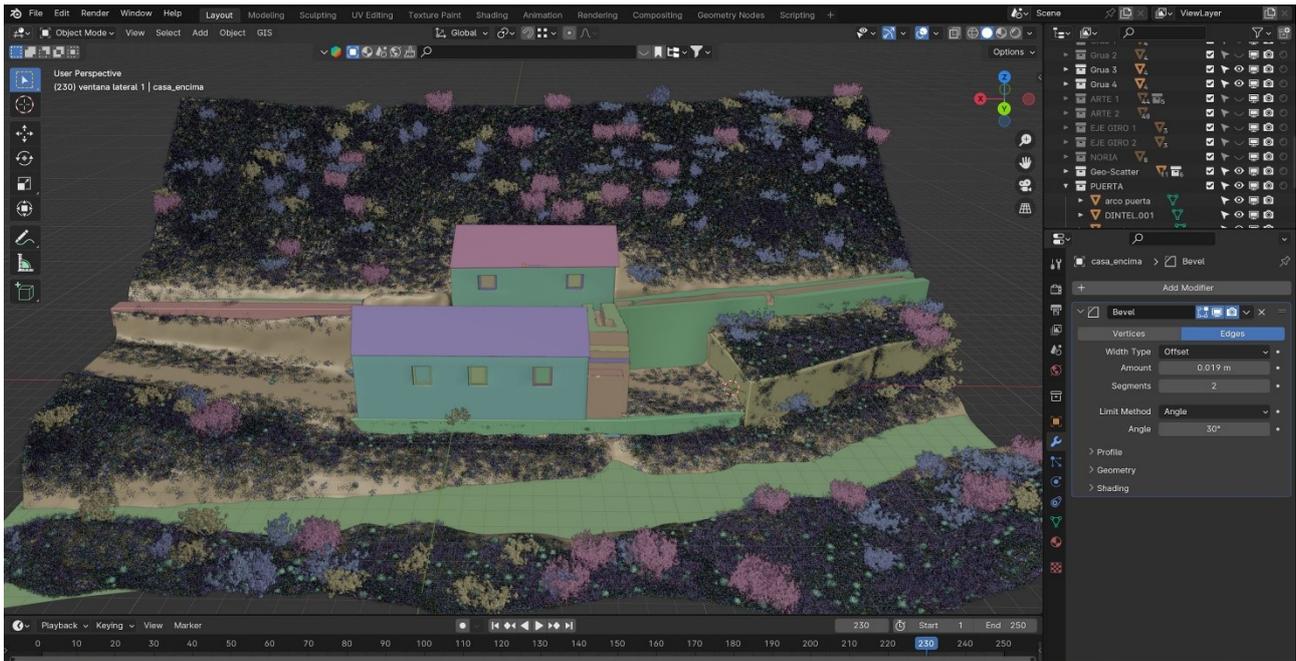


Figura 6: a) Ortofotografía obtenida en Agisoft Metashape v. 2.0.4; b) DEM obtenido en Agisoft Metashape v. 2.0.4. Tratamientos de imagen realizados en QGIS v. 3.28 para mejorar la visualización de la estructura de la serrería; c) Analytical Hillshading; d) Multi-Scale Topographic Position Index.

EL "ARTE" DEL MÁRMOL: UNA APROXIMACIÓN ARQUEOLÓGICA Y DIGITAL A LAS SERRERÍAS HIDRÁULICAS DEL SIGLO XIX EN EL VALLE DEL ALMANZORA (ALMERÍA, ESPAÑA)



(a)



(b)

Figura 7: Captura del proceso de modelado en Blender donde se pueden apreciar todas las estructuras sin texturizar:
a) Vista frontal; b) Vista cenital.

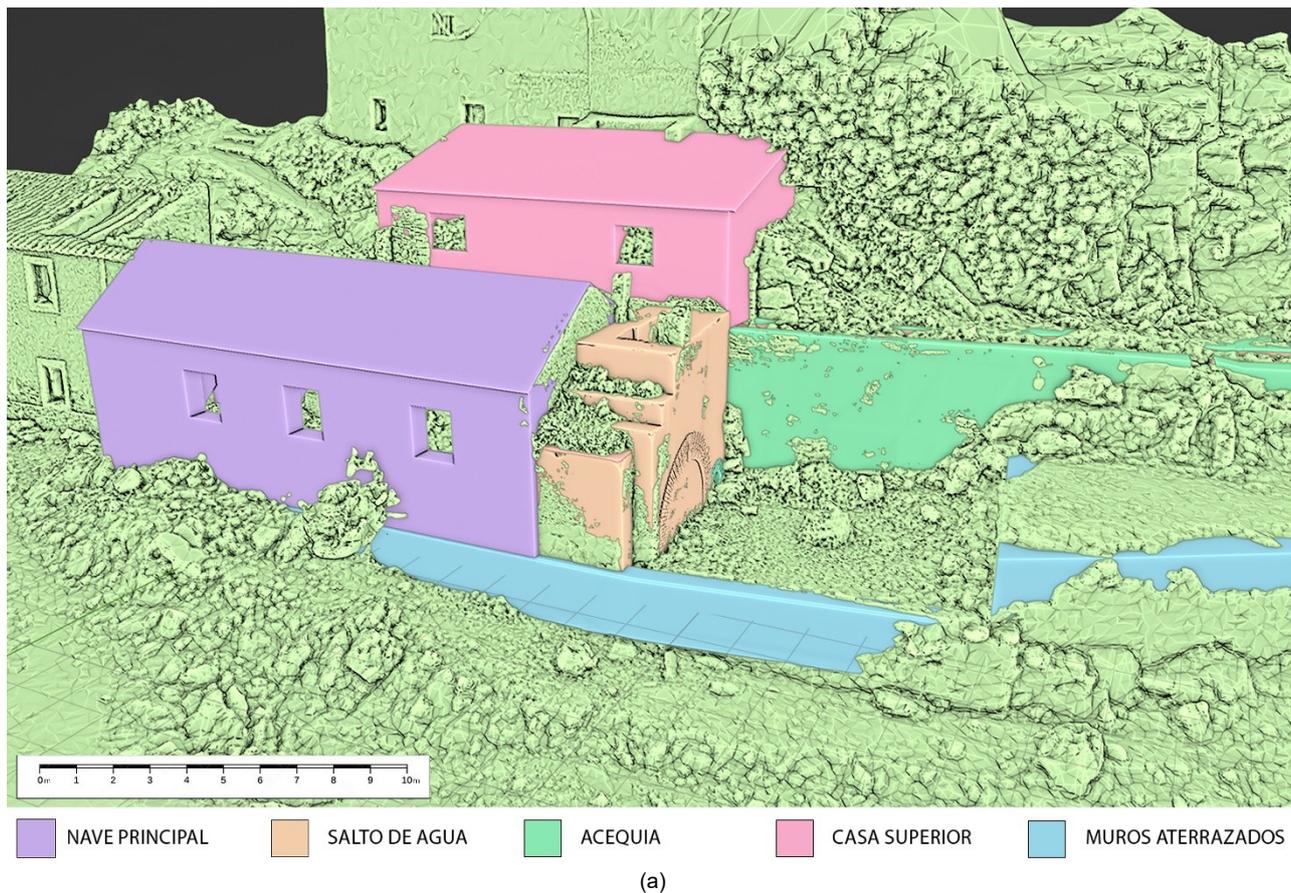


Figura 8: Superposición de los principales elementos de la reconstrucción sobre el modelo fotogramétrico de la fábrica de Pedro Nicoli: a) Vista sin renderizar; b) Vista renderizada.

3.5. La reconstrucción 3D como una forma de arqueología experimental de carácter virtual

Tras el estudio y la documentación llevada a cabo en la fábrica de Nicoli, el volumen de información del que disponíamos era enorme. Todos estos datos tenían que ser relacionados entre sí con el objetivo de trazar una hipótesis reconstructiva veraz que nos permitiese entrever como habría sido la disposición y el funcionamiento de una serrería hidráulica durante la mitad del siglo XIX.

El uso de reconstrucciones digitales en estudios del pasado es una realidad cada vez más habitual que, como veremos, abre nuevas e interesantes vías de experimentación más allá de la mera difusión patrimonial (Stanga et al., 2023; Süvari et al., 2023). En este tipo de escenarios virtuales, los arqueólogos pueden probar de forma precisa, cómoda, segura y respetuosa con el patrimonio diversas hipótesis sobre la naturaleza y la tecnología constructiva empleada en diferentes momentos del pasado.

Para ello decidimos emplear Blender v. 4.1, un programa informático multiplataforma que además es de código abierto (Fig. 7). Este software exige un meticuloso proceso de evaluación, a veces extraordinariamente complejo, a la hora de abordar el diseño y la construcción de elementos virtuales (Rodríguez et al., 2023). El enorme realismo con el que se puede diseñar, modelar y texturizar en Blender v. 4.1 permite al arqueólogo tomar decisiones muy similares a las que tuvieron que afrontar los constructores del pasado. Esto nos permite, no solo reconstruir una o varias estructuras, sino revivir o recrear el proceso de construcción en sí mismo (Lancaster y Matney, 2023).

4. Resultados

Cuando nos enfrentamos a una reconstrucción de escala mesoespacial, como es el caso de la fábrica de Nicoli, los detalles resultan fundamentales. A diferencia de lo que ocurre con reconstrucciones a mayor escala, aquí resultaba difícil simplificar los elementos sin perder realismo. Los resultados son modelos 3D complejos y pesados que ralentizan, inevitablemente, todo el flujo de trabajo. Sin embargo, abordar un proyecto de esta manera permite, por otro lado, analizar más minuciosamente la complejidad estructural de un edificio y su relación con el entorno.

Usando como base el modelo fotogramétrico, los modelos digitales de elevaciones y la planta realizada en AutoCAD v. U.61.0.0 se modeló la base territorial sobre la que se erigiría la serrería hidráulica (Figs. 7 y 8). Este punto no supuso excesivos problemas más allá de la eliminación del trazado urbano actual que ha terminado absorbiendo parte de la serrería o la creación de las terrazas con muros de mampostería sobre las que se apoyaría el cuerpo principal de la serrería. A la base territorial se añadieron varios elementos para aumentar el realismo como la vegetación o el río que discurriría cerca de la estructura (seco la mayor parte del año) (Fig. 7). Inmediatamente después nos centramos en modelar la base de los tres elementos estructurales principales relacionados con el procesado del mármol: la nave principal, el salto de agua y la acequia que lo abastecía (Fig. 8).

En este punto, la nave principal, debido a que está casi totalmente perdida, fue la que supuso más trabajo. Conocíamos la disposición horizontal de la misma gracias a las plantas interpretativas realizadas sobre los modelos fotogramétricos, pero desconocíamos la forma en que esta se podría articular verticalmente. Debemos entender, tal y como indica Alba (2016), que el concepto de belleza cambia radicalmente durante la época industrial cuando se redefine la relación entre forma y función de estas estructuras (Marrodán, 2007). Como veremos, esto es algo evidente en el caso de las serrerías de mármol, cuyos elementos arquitectónicos son mayoritariamente funcionales.

El primer paso para la reconstrucción de la nave principal de la serrería, fue la creación del suelo de la nave. Actualmente este se encuentra lleno de restos de derrumbe y basura, por lo que se rebajó el modelo hasta el nivel de uso que se había localizado durante la prospección inicial. A este suelo se le añadió una textura de loza de barro cocido, siguiendo los paralelos de otras fábricas analizadas hasta el momento. También se le realizó un vaciado de forma rectangular de 3 x 0.85 x 0.85 m justo debajo del cárcavo o arco del salto de agua. Este conformaría el foso hidráulico donde se alojaría la noria que daba fuerza motriz al sistema de serrado. El foso hidráulico tendría una boca vertedera que daría directamente al río y a través de la cual se drenaba, no solo el excedente de corriente utilizada por la noria, sino también el agua residual procedente de las tareas de corte.

Seguidamente se modelaron las arcadas a partir de los arranques que aún se conservan en la roca madre que hace de pared este del complejo, para después reconstruir los alzados de los muros exteriores. En este punto, la extraña disposición ladeada de los muros, un intento de adaptación de la entrada principal de la serrería al camino exterior por el cual llegarían y saldrían los cargamentos de mármol, daba un aspecto bastante irregular a la estructura. No obstante, esta disposición oblicua del muro, que se aprecia perfectamente en las ortofotografía y los MDE obtenidos (Fig. 6) parecía ser completamente funcional. En definitiva, la nave principal dejaba un amplio espacio interior de 6 m de alto, 5 m de ancho y 13 m de largo (Fig. 10). En él debían alojarse, al menos, dos sistemas de corte en paralelo, junto a varios espacios de trabajo como bancos de mármol. Creada la estructura principal añadimos los espacios para las ventanas, la puerta principal y una salida trasera con bóveda de arco de ladrillo. Esta última atravesaría también el salto de agua conectando la nave principal con una pequeña plaza que, muy probablemente, serviría de almacén al aire libre.

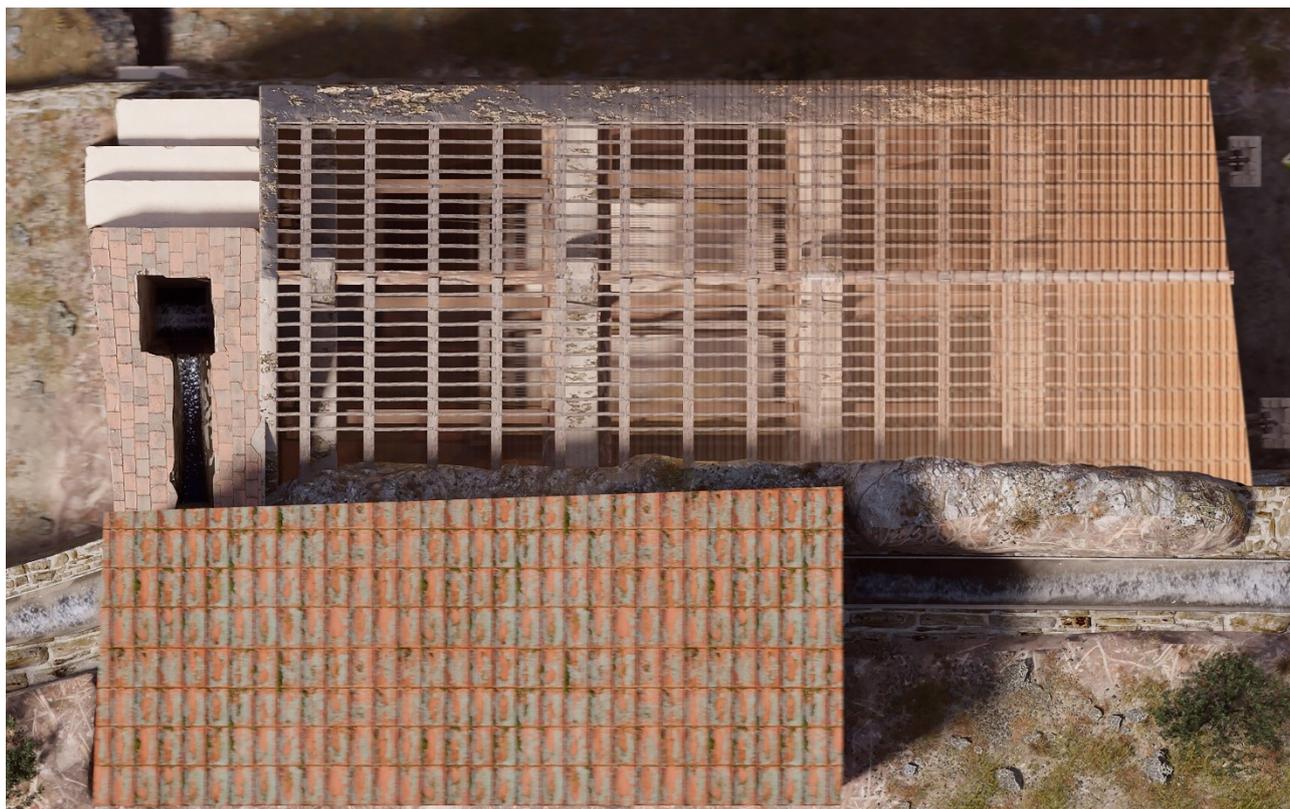
Configurada la base principal de la nave, se añadieron los pilares que arrancaban de la parte superior de los arcos. Estos últimos sostendrían parte del peso del entramado de vigas de madera y tejas planas alicantinas que compondrían el sistema de techumbre (Fig. 11). El desplazamiento oblicuo de los muros también supuso algunos problemas estructurales a la hora de integrar elementos como el tejado, el cual tuvimos que adaptar a la particular disposición muraria. Por este motivo, en los extremos norte y sur del tejado, las unidades de tejas planas alicantinas que diseñamos y distribuimos de forma entrelazada, tuvieron que ser recortadas. Una solución similar a la que se usa actualmente en las obras y a la que podrían haber recurrido los albañiles de la época.



Figura 9: Vista renderizada de la fábrica y el entorno. Esta es la vista más amplia que incluye la zona donde se acumulaba el mármol, la casa de encima y el tramo de acequia y parte de la rambla.



Figura 10: Reconstrucción del interior de la serrería hidráulica donde puede apreciarse el amplio espacio interno, los bancos de trabajo y el sistema del arte.



(a)



(b)



(c)

Figura 11: Sistema de techumbre de la fábrica de Pedro Nicoli: a) Vista cenital del entramado de vigas de madera y tejas; b) Forma en que se disponían las tejas planas alicantinas en el tejado; c) modelo 3D de una teja plana alicantina.



Figura 12: Vista interior de la serrería donde puede apreciarse parte del cárcavo y la noria junto a parte del sistema de serrado.

Por último, se integraron los detalles relativos al funcionamiento del propio sistema de corte, como son las cuatro grúas o escuadras de contrapeso. Estas se encontraban empotradas, directamente, en las paredes interior sur y exterior norte de la nave principal. En el interior de la estructura se modelaron dos bancos de trabajo de mármol y varios quinqués o lámparas que mejorarían la iluminación interior y permitirían trabajar en los turnos de noche (Fig. 10). Tal y como se detalla en las fuentes, el proceso de corte de los bloques de mármol ocuparía en torno a un mes y requería de una supervisión constante del alineamiento y nivel de las sierras. Para ello, había operarios trabajando 24 h y la iluminación diurna se supliría con la artificial que aportaban los quinqués. Con el objetivo de aportar una apariencia realista a todos los elementos estructurales de la reconstrucción empleamos varios materiales PBR (*Physical Based Rendering*) que modificamos y mezclamos manualmente para que imitasen la apariencia original del objeto representado.

El modelado del salto de agua resultó algo más sencillo. Salvo la parte interna del mismo, que conectaría el agua de la acequia surtidora, redirigiéndola a la noria, el resto de la estructura se conservaba prácticamente íntegra, por lo que nos limitamos a adaptar el modelo reconstructivo a las paredes del modelo fotogramétrico y darle una textura realista lo más similar posible. Al igual que en la parte de la nave principal empleamos una mezcla de varios materiales PBR de gran realismo que imitan la matriz de mampostería a base cantos rodados y el revoco de yeso

y cal exterior. Añadimos, no obstante, varias losas de mármol en los escalones laterales del salto, y un material de loza cocida que revestía la parte superior. Para el trazado de conducción del agua, tanto del salto como del canal de la acequia, se añadió un tipo de mortero hidráulico similar al localizado durante la prospección de esta y otras fábricas. En último lugar se diseñó la boca del desagüe que evacuaría el agua blanquecina, producto del corte de los bloques de mármol, del foso hidráulico del interior de la fábrica al río aledaño (Fig. 9).

Por su parte, el tramo de acequia se modeló siguiendo el trazado identificado tanto en la ortofotografía como el propio modelo fotogramétrico. El principal reto en este caso fue reconstruir la conexión interna entre el canal de la acequia y el canal del salto de agua. El canal interior de la acequia se encontraba, no obstante, profundamente erosionado en la parte más cercana a la fábrica, por lo que tuvimos que modelarlo de cero. Aplicamos la misma altura y anchura que se había localizado en los tramos de la acequia mejor conservados e imprimimos un leve inclinación norte-sur hacia la serrería. Por otros paralelos localizados en serrerías cercanos entendimos que el canal de conducción del agua estaría revestido, a su vez, de alguna especie de mortero hidráulico para garantizar su impermeabilidad. La construcción del tramo de acequia, parcialmente apoyado sobre la roca madre de la ladera, se complementaba con varios alzados de mampostería de cantos de río y piedras que sujetaban parte del terreno tal y como ha sido representado en la reconstrucción (Fig. 9).



Figura 13: Vista renderizada de la fábrica de Nicoli seccionada para observar la disposición de los artes de corte y las estructuras hidráulicas internas.

Encima de la serrería y apoyada parcialmente sobre el propio trazado de la acequia se localizó también otra estructura cuadrangular de menor tamaño que asociamos con algún edificio de habitación. No sabemos su relación exacta con la serrería, pero la lectura paramental llevada a cabo durante la prospección confirmó que era coetánea a la construcción de la propia serrería. Por este motivo, decidimos incorporarla también al modelo reconstruido.

El último elemento que integramos en la reconstrucción virtual fue el propio arte. Este sistema de corte mecanizado era el corazón y la razón de ser de la serrería hidráulica. Gracias a él se transformaban bloques macizos de mármol en delgadas láminas o tabletas que posteriormente se pulían en los bancos de trabajo. Aunque a día de hoy se conservan algunos artes de metal más recientes, la estructura de los primeros sistemas de corte sería de madera reforzada con piezas de metal. Desgraciadamente, de estos últimos, como el que habría en la fábrica de Nicoli, no se conserva ninguno. Existen, sin embargo, numerosas menciones en las fuentes documentales y algunos planos rudimentarios que empleamos como base para la reconstrucción de los dos sistemas de corte que habría alojados en la serrería (García, 1996, p. 129).

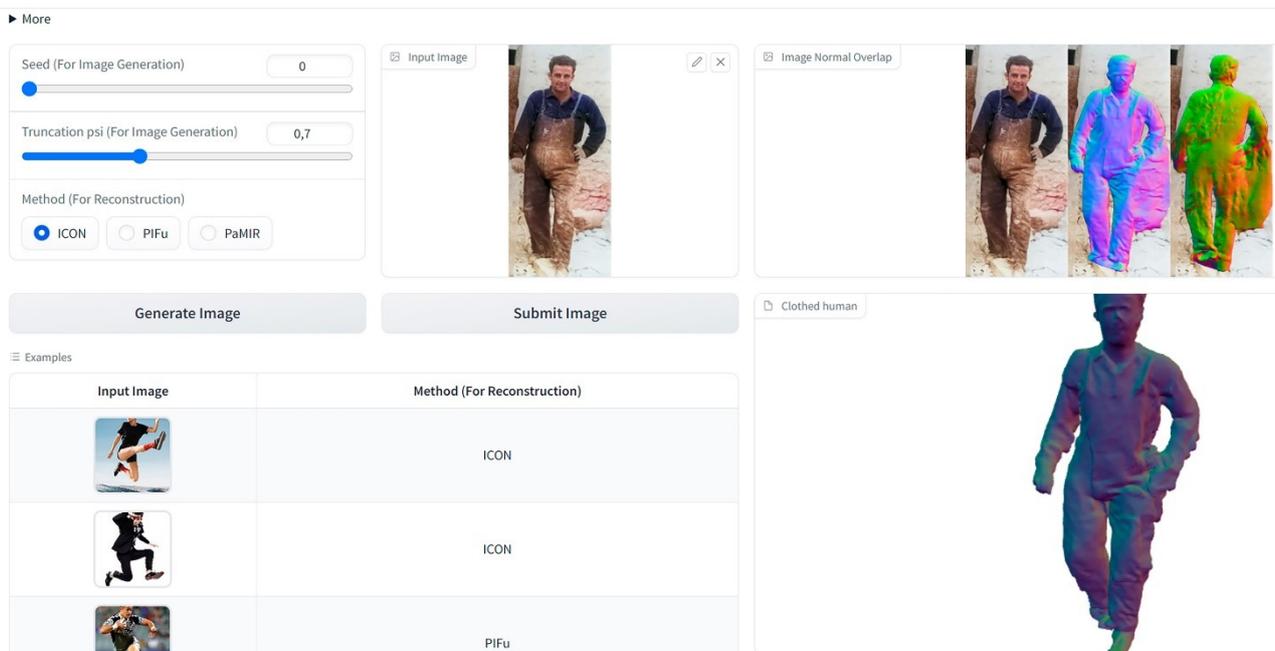
La noria que reposaba debajo del cárcavo del salto de agua, se apoyaría sobre dos pilares muy sencillos de mampostería y, gracias al agua de la acequia que caía desde arriba, generaba un movimiento rotatorio gracias a los cigüeñales de madera apoyados en sendos lados (uno para cada arte). Estos cigüeñales transmitían un movimiento de vaivén al balancín del arte sobre el que se

incrustaban entre 15 y 30 sierras de metal, cuyo número y distribución variaba dependiendo del grosor con el que quisieran obtener las tabletas de mármol (Figs. 10 y 12). Las sierras no tendrían un filo aserrado propiamente dicho, eran simples láminas de metal que cortarían el mármol gracias a la fricción que generaba el movimiento de vaivén de las sierras junto a una mezcla de arena de cuarzo y agua que aplicaban los operarios con regularidad. La altura de las sierras y el módulo de madera donde reposaban se controlaba mediante un sistema de poleas, escuadras y contrapesos situados al interior y exterior de la serrería. Serían necesarias dos escuadras y contrapesos por cada uno de los artes. Por su parte, los bloques que se procesaban solían tener unas dimensiones aproximadas de 1 m de largo, 50 cm de ancho y 50 cm de alto y se colocaban en fila sobre una base sólida que impediría a la sierra llegar al suelo (habitualmente también de mármol). Para poder cortar varios de estos bloques a la vez se fusionaban entre sí mediante un mortero de yeso, creando un enorme y rígido paquete de varios bloques. De esta manera, se garantizaba que ninguno de los bloques se moviese durante el proceso de corte (Figs. 10 y 13). El enorme tamaño de estas estructuras de madera y juntas de metal, sumado a la noria y los cigüeñales que los accionarían, suponía que, prácticamente dos tercios del espacio interior los ocuparía la maquinaria de corte (Figs. 10 y 13).

Por último, con el objetivo de crear personajes realistas y ambientados en un espacio de trabajo del siglo XIX, se empleó Hugging Face v. 4.40.2, una inteligencia artificial gratuita capaz de transformar texto o imágenes en



(a)



(b)

Figura 14: Proceso de creación de modelos 3D de personajes usando la inteligencia artificial de Hugging Face: a) De izquierda a derecha; fotografía original del siglo XX de un trabajador de una serrería de mármol, fotografía mejorada y coloreada con Adobe Photoshop v. 25.4, modelo tridimensional sin textura y modelo tridimensional con textura; b) Interfaz de Hugging Face.

modelos 3D de forma sencilla. A pesar de no generar modelos de alta resolución, para reconstrucciones de mediana escala como la que aquí nos ocupa es más que suficiente y supone un ahorro de tiempo considerable. Para ello se recopilaron varias imágenes de principios del siglo XX donde aparecían trabajadores de canteras, talleres de esculpido y serrerías de mármol. Las fotos seleccionadas fueron mejoradas y coloreadas mediante una combinación de filtros neuronales de Adobe Photoshop v. 25.4. Las fotografías se subieron al espacio de trabajo de Hugging Face v. 4.40.2 donde se convirtieron en modelos 3D con textura. Dichos modelos digitales se optimizaron e introdujeron en la composición de Blender v. 4.1 junto al resto de los elementos modelados (Fig. 14).

5. Discusión y conclusiones

La introducción de la serrería hidráulica en el valle del Almanzora durante el siglo XIX supuso un punto de inflexión en la consolidación del mármol como motor económico en la zona centro de Almería. Esta innovación configuró, sin género de duda, la base sobre la que se ha cimentado todo el desarrollo industrial del sector en los últimos 185 años. La generalización del modelo hidráulico en el trabajo del mármol permitió procesar una mayor cantidad de material en un menor tiempo, lo que incrementó considerablemente la producción. Esto supondría, en última instancia, una expansión no solo de las propias serrerías, sino de los talleres de esculpido y de las canteras de mármol que dependían directamente

de ellas. Este proceso de crecimiento que comenzaría en la segunda mitad del siglo XIX, terminó consolidándose a comienzos del siglo XX. A su vez, el claro éxito de esta industrialización del mármol en la comarca permitió e incentivó su irradiación hacia otros puntos de la Sierra de los Filabres como Chercos, Cóbdar, Lijar y Albánchez e, incluso, a poblaciones más distantes como Lubrín.

La cercanía cronológica en la que se enmarca nuestro estudio hace presuponer, no obstante, una mayor facilidad de análisis de este registro arqueológico. Lejos de ello, el altísimo volumen de información disponible (restos arqueológicos, fuentes escritas, fuentes orales) supone una ardua tarea interpretativa por parte del arqueólogo donde, más necesariamente que nunca, se debe implementar un enfoque multidisciplinar. Por otro lado, resulta contradictorio que, frente a la intensa actividad arqueológica desarrollada en otras etapas históricas, un pasado tan cercano a nosotros quede habitualmente relegado al olvido. Incluso en el ámbito académico, la peligrosa dinámica de capitalizar el valor del pasado, de cuantificar su importancia histórica en función de su antigüedad, nos lleva inevitablemente a la destrucción de un patrimonio de extraordinario valor.

El uso de las herramientas digitales como la fotogrametría con VANT o la reconstrucción 3D nos permite abordar, combinar y analizar, de forma mucho más precisa, toda esta información disponible. En este sentido, la arqueología industrial, en confluencia con la arqueología virtual, se configura como una alternativa necesaria que permite acceder, de forma mucho más efectiva, a nuestro pasado industrial.

A nivel estructural, la construcción de las serrerías hidráulicas del valle del Almanzora se cimenta, principalmente, en una dinámica de aprovechamiento basada en la cercanía de los recursos. En efecto, para el grueso de la construcción de la fábrica de Nicoli se emplearon sistemáticamente materiales procedentes de la zona más inmediata (cantos de río, pizarra, madera y, por supuesto, mármol). En términos generales, nos encontramos ante construcciones sencillas, fáciles de erigir y que no buscaban la belleza, sino la funcionalidad, una tendencia generalizada en el ámbito industrial. A pesar de ello nos encontramos con una construcción resistente, muy diáfana, espaciosa y que se articula a partir de una nave principal con varias arcadas de gran tamaño. Estas, al igual que el resto de elementos constructivos, no siempre presentan una regularidad dimensional ni formal. En el caso de la fábrica de Nicoli, por ejemplo, la luz de los arcos más cercanos al salto de agua es sustancialmente mayor y el arranque de los mismos parte de una posición más alta que aquellos más cercanos a la puerta principal. Esto es así para dar cabida a la maquinaria de corte y, especialmente, al sistema de escuadras y poleas que controlaban el contrapeso del arte. Otro ejemplo de esta irregularidad estructural son los muros exteriores de la nave, los cuales se encuentran claramente ladeados en lugar de configurar un espacio perfectamente rectangular. Esta disposición es también algo intencional que, muy probablemente, atiende a un intento de adaptar el cuerpo principal de la nave, ya no solo a la irregularidad del terreno, sino también al camino de acceso a la fábrica. Por último, junto a esta nave principal donde se alojaría el enorme arte de corte, encontramos una construcción mucho más sólida y compacta: el salto de agua. Esta estructura de forma cuadrangular se apoyaba directamente sobre la acequia,

la cual surtía de agua al mecanismo de corte. El salto de agua es probablemente la parte más antigua de la fábrica y se convertía en un elemento esencial para el funcionamiento de la misma, determinando incluso la disposición estructural del resto de la serrería.

Todos estos detalles constructivos fueron integrados paulatinamente durante la hipótesis digital llevada a cabo. A pesar de que muchos de ellos fueron observados durante la prospección de campo o confirmados por los documentos de archivo y paralelos existentes, a veces se generaban importantes incongruencias constructivas. Dado que el terreno de la hipótesis es a veces extraordinariamente complejo, la experimentación digital resultó esencial a lo largo de este trabajo. Un trabajo que se vio facilitado por la alta tasa de reproducibilidad que tienen estos archivos digitales. Esta aproximación no destructiva nos permitió buscar soluciones viables y realistas a problemas estructurales y espaciales desde una escala, no solo mesoespacial, sino también microespacial. Un claro ejemplo de ello fue cómo la integración de la reconstrucción virtual de la maquinaria de corte supuso replantear gran parte de la estructura interna de la fábrica. Más allá del valor divulgativo de las reconstrucciones virtuales, crear un modelo 3D genera una comprensión estructural mucho más holística y de gran utilidad dentro de todo el proceso de investigación. En este sentido, Blender v. 4.1, un programa informático de libre acceso y gran capacidad de procesado, ha demostrado ser una de las mejores alternativas actuales para una experimentación digital realista.

Gracias a él, casi 200 años más tarde, los arqueólogos no solo podemos reconstruir el objeto o el espacio material del cual solo existen escasos restos hoy, sino los problemas logísticos y los retos a los que pudieron enfrentarse los propios constructores. La reconstrucción virtual se convierte así en una técnica de gran utilidad para el análisis de los procesos lógicos, la cadena operativa que da sentido a la cultura material de distintas épocas del pasado. Su aplicación sobre el caso concreto de las serrerías hidráulicas del valle del Almanzora, y concretamente sobre la fábrica de Pedro Nicoli, nos ha permitido ir más allá de la tridimensionalidad de los programas informáticos, analizando una cuarta dimensión más abstracta: la concatenación de ideas, propósitos y problemáticas que derivan de la industria del mármol almanzorí.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al programa de becas predoctorales de la Fundación Juanelo Turriano; al Programa de ayudas a etapa posdoctoral da Xunta de Galicia (Consellería de Cultura, Educación, Formación Profesional e Universidades); y a un contrato posdoctoral Juan de la Cierva-Formación JC2021-046748-I financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea «NextGenerationEU»/PRT.

Referencias

- Alba, M. I. (2016). Paisajes industriales: utopías del pasado, recuerdos del futuro. *Revista* 180(38), 1–8. [https://doi.org/10.32995/rev180.Num-38.\(2016\).art-314](https://doi.org/10.32995/rev180.Num-38.(2016).art-314)
- Alba, M. I., & Cano, J. M. (2024). Improvements and methodological innovations in the application of the Historic Landscape Characterisation methodology to industrial heritage landscapes. *City, Territory, Architecture*, 11(1), 1-17. <https://doi.org/10.1186/s40410-023-00222-4>
- Anónimo, (1893). Report on the marble quarries of Macael in the Sierra de los Filabres. *Reports on subjects of general and commercial interest*. London: Foreign Office.
- Beale, G., & Reilly, P. (2017). After Virtual Archaeology: Rethinking archaeological approaches to the adoption of digital technology, *Internet Archaeology*, 44. <https://doi.org/10.11141/ia.44.1>
- Benavides, J. A., Aranda, G., Sánchez, M., Alarcón, E., Fernández, S., Lozano, Á., & Esquivel, J. A. (2016). 3D modelling in archaeology: the application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 495-506. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.11.022>
- Benavides, J. A., Martín, J. M., & Rouco, J. (2020). Levantamiento arquitectónico y análisis arqueológico del castillo de Piñar como punto de partida para su conservación. *Virtual Archaeology Review*, 11(22), 95-115. <https://doi.org/10.4995/var.2020.12397>
- Benavides, J. A., Rodríguez, J. M., & Rouco, J. (2023). Workflow for high definition documentation of the roman archaeological site of Herrera (Seville). *Disegnarecon*, 16(30), 2.1-2.10. <https://doi.org/10.20365/disegnarecon.30.2023.2>
- Bisson-Larrivéé, A., & LeMoine, J.-B. (2022). Photogrammetry and the impact of camera placement and angular intervals between images on model reconstruction. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 26, e00224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00224>
- Cano, J. M. (2007). Arqueólogos en la fábrica. Breve recorrido por la historiografía de la Arqueología Industrial. *SPAL*, 16, 53–67. <https://doi.org/10.12795/spal.2007.i16.04>
- Cámlich, M. D., Martínez, G., Martín, D., Afonso, J. A., González, P., & Goñi, A. (1999). Los inicios y consolidación de la economía de producción en la Depresión de Vera y Valle de Almanzora (Almería). *Saguntum*, 2, 475-483.
- Carreño, J. J. (2022). La explotación del mármol de Sierra de los Filabres (Almería): los ferrocarriles de vía estrecha de Macael y Cobdar a principios del s. XX. En P. Plasencia-Lozano, A. Rodríguez, R. Hernando, & S. Huerta (Eds.), *Actas del Duodécimo Congreso Nacional y Cuarto Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción. Mieres, 4-8 octubre 2022* (vol. 1, pp. 201-210). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Carreras, C., & Navarro, R. M. (2010). *Los territorios del agua: Sierra de los Filabres*. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.
- Carrero-Pazos, M., Vilas-Estévez, B., & Vázquez-Martínez, A. (2018). Digital imaging techniques for recording and analysing prehistoric rock art panels in Galicia (NW Iberia). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 8, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.11.003>
- Carretero, A. (1995). *La industria del mármol en Almería*. Almería: Universidad de Almería.
- Carretero, A., & Aznar, J. A. (2008). El mármol de Macael. Evolución de los medios de transporte". *TST: Transportes, Servicios y telecomunicaciones*, 27, 250-261.
- Castillo, J. (1998). *Macael y Laroya en la Alta Edad Moderna (1498-1650): Conquista, época morisca y repoblación*. Almería: Instituto de Estudios Almerienses.
- Cerdá, M. (2008). *Arqueología Industrial*. Valencia: Universitat de Valencia.
- Cressier, P. (2004). Historias de capiteles. ¿Hubo talleres califales provinciales?. *Cuadernos de Madinat al-Zahra'*, 5, 355-375.
- Gabrilik, P., la Cour-Harbo, A., Kalvodova, P., Zalud, L., & Janta, P. (2018). Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 4931-4959. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1434331>

EL "ARTE" DEL MÁRMOL: UNA APROXIMACIÓN ARQUEOLÓGICA Y DIGITAL A LAS SERRERÍAS HIDRÁULICAS DEL SIGLO XIX EN EL VALLE DEL ALMANZORA (ALMERÍA, ESPAÑA)

- Garstki, K. (2017). Virtual Representation: the production of 3D digital artifacts. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 24(3), 726–750. <https://doi.org/10.1007/s10816-016-9285-z>
- García, M. (1996). *El mundo de los canteros y el léxico del mármol*. Almería: Arraez Editores.
- González, J. A. (2017). *Canteros y caciques en la lucha por el mármol*. Almería: Instituto de Estudios Almerienses.
- Grewe, K. (2010). La máquina romana de serrar piedras. La representación en bajorrelieve de una sierra de piedras de la antigüedad, en Hierápolis de Frigia y su relevancia para la historia técnica. En G. Meneses (Ed.), *Las técnicas y las construcciones en la ingeniería romana. Congreso de las obras Públicas Romanas* (pp. 381-402). Madrid: Fundación de la Ingeniería Técnica de Obras Públicas.
- Gutiérrez, S. (1997). *Arqueología. Introducción a la historia material de las sociedades del pasado*. Alicante: Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Kessener, P. (2010). Stone sawing machines of Roman and Early Byzantine Time in the Anatolian Mediterranean. *Journal of the International Society of Molinology*, 70, 34–35.
- Lancaster, J., & Matney, T. (2023). Digitally constructing a late Early Bronze Age roof. Observations and conclusions. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 28, e00258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00258>
- Lázaro, R., (1980). *Inscripciones Romanas de Almería*. Almería: Cajal.
- Mangartz, F. (2010). *Die Byzantinischen werkstätten von Ephesos: Baubefund, Rekonstruktion, Architekturteile*. Mainz: Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums.
- Maldonado, A. (2020). *La Aplicación de la Fotogrametría (SFM) y las Nuevas Tecnologías para la Mejora de la Documentación, Difusión y Divulgación del Patrimonio Arqueológico de Pequeño y Mediano Tamaño* (Tesis doctoral, Universidad de Granada). <http://hdl.handle.net/10481/62261>
- Marčič, M., & Fraštia, M. (2023). Effect of camera network configuration on the accuracy of digitization of architectural objects, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 28, e00254. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00254>
- Marrodán, E. (2007). De la fascinación formal a la nostalgia. La ruina industrial en el paisaje contemporáneo. *Bienes culturales: revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español*, 7, 103-117.
- Martínez, G. (1987). El Cerro del Nacimiento (Macaél), un asentamiento argárico en el valle medio del río Almanzora. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 12, 81–100. <https://doi.org/10.30827/cpag.v12i0.1276>
- Martínez, R. M., Maldonado, A., Vera, J. C., Bretones, M. D., Balbín, R., & Bueno, P. (en prensa). El conjunto megalítico de Las Sileras (Córdoba). Una aproximación multiescala y digital a un rompecabezas grabado en piedra. *Trabajos de Prehistoria*, 81(1). <https://doi.org/10.3989/tp.2024.966>
- Pardo, C. J. (2016). *El patrimonio industrial en España. Paisajes, lugares y elementos singulares*. Madrid: Akal.
- Pereira, J. M. (2013). Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion. *Ph Investigación*, 1, 77-87.
- Reilly, P. (1991). Towards a Virtual Archaeology. En S. Rahtz y K. Lockyear (Eds.), *CAA90. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990* (BAR International Series 565) (pp. 132-139). Oxford: Tempus Reparatum.
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3, 1104–1138. <https://doi.org/10.3390/rs3061104>
- Rodríguez, E., Casals, J. R., & Celestino, S. (2023). Application of real-time rendering technology to archaeological heritage virtual reconstruction: the example of Casas del Turuñuelo (Guareña, Badajoz, Spain). *Virtual Archaeology Review*, 14(28), 38–53. <https://doi.org/10.4995/var.2023.17460>
- Rojas-Sola, J. I., del Río-Cidoncha, G., & Coronil-García, Á. (2020). Industrial Archaeology Applied to the Study of an Ancient Harvesting Machine: Three-Dimensional Modelling and Virtual Reconstruction. *Agriculture*, 10(8), 322. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080322>
- Rouco, J. (2021). *Las fortificaciones medievales de la Alpujarra Alta desde la Arqueología de la Arquitectura y del Paisaje* (Tesis doctoral, Universidad de Granada). <http://hdl.handle.net/10481/71115>

- Rouco, J., & Benavides, J. A. (2023). La fotogrametría SfM mediante UAS para la documentación de las fortificaciones de la Alpujarra (Granada y Almería, España). En M.G. Bevilacqua & D. Ulivieri (eds), *Defensive architecture of the Mediterranean* (vol 15, pp. 1139-1146). Pisa: Università degli Studi di Pisa, Universidad Politécnica de Valencia. <https://doi.org/10.12871/9788833397948143>
- Shults, R., Levin, E., Aukazhiyeva, Z., Pavelka, K., Kulichenko, N., Kalabaev, N., Sagyndyk, M., & Akhmetova, N. (2023). A Study of the Accuracy of a 3D Indoor Camera for Industrial Archaeology Applications. *Heritage*, 6(9), 6240-6267. <https://doi.org/10.3390/heritage6090327>
- Stanga, C., Banfi, F., & Roascio, S. (2023). Enhancing building archaeology: drawing, UAV photogrammetry and scan-to-BIM-to-VR process of ancient Roman ruins. *Drones*, 7(8). <https://doi.org/10.3390/drones7080521>
- Staropoli, L., Acevedo, V. J., Ávido, D. N., & Vitores, M. (2023). Reflections of the practice of digital archaeology: virtual cultural heritage construction and communication. *Virtual Archaeology Review*, 14(29), 118–135. <https://doi.org/10.4995/var.2023.19292>
- Süvari, A., Okuyucu, E., Çoban, G., & Eren, E. (2023). Virtual Reconstruction with the Augmented Reality Technology of the Cultural Heritage Components that have Disappeared: The Ayazini Virgin Mary Church. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 16(1), 1–16. <https://doi.org/10.1145/3579361>
- Tarini, M., Cignoni, P., & Montani, C. (2006). Ambient Occlusion and Edge Cueing to Enhance Real Time Molecular Visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(5), 1237-1244. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2006.115>