



MEMORIA ANUAL 2022

ÍNDICE

1. El LEC-PH.....	2
2. Motivación de la Memoria.....	3
3. Personal	3
4. Actividades	4
4.1. Investigación.....	4
4.1.1.Participación en Proyectos de I+D+I solicitadas por grupos del PAIDI.....	4
4.1.2.Participación en publicaciones (Anexo III)	6
4.1.3.Aportaciones en congresos (Anexo III).....	6
4.1.4.Participación en organización de congresos (Anexo III).....	7
4.1.5.Participación en campañas arqueológicas solicitadas por grupos del PAIDI.....	8
4.2. Transferencia.....	9
4.3. Divulgación.....	9
4.4. Formación.....	10
4.4.1. Del personal del LEC-PH.....	10
4.4.2. De alumnado de Doctorado y Máster.....	11
4.4.3. Tutorización de prácticas de empresa.....	12

Anexo I. Acta de la Comisión de Investigación Ordinaria, 04/05/2022 (extracto)

Anexo II. Tasas previstas para 2023 (pendientes de aprobación)

Anexo III. Productividad

Anexo IV. Imágenes

1. EL LEC-PH

El Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico es un ambicioso proyecto que hunde sus raíces en los trabajos desarrollados desde el año 2004 en la Universidad de Cádiz (UCA) a través de la Línea de Arqueometría y Conservación del Laboratorio de Corrosión y Protección (LABCYP) del Grupo del Plan Andaluz de I+D+I Corrosión y Protección TEP-231. El objetivo de esta Línea era prestar servicios a investigadores, administraciones públicas y empresas en el ámbito de la investigación sobre materiales de origen arqueológico y la propuesta de tratamientos de conservación y recuperación de los mismos. En esta primera etapa se firman 12 contratos del artículo 83 de la LOU por un importe de 113.493,02 €, se ejecutan cuatro proyectos de investigación por un importe de 188.507 €, se obtiene una patente y se publican 15 artículos indexados en JCR. En el ámbito de la formación se dirigen 2 Tesis Doctorales y se tutorizan 10 Trabajos Fin de Máster.

Esta línea se consolida en 2018 gracias a la concesión de una subvención para infraestructuras Dotación del Laboratorio de Estudios y Conservación de Materiales del Patrimonio Histórico (LEC-PH), con destino al Instituto de Investigaciones Marinas (INMAR) de la Universidad de Cádiz (Programa Estatal de Generación de Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico del sistema de I+D+I. Subprograma Estatal de Infraestructuras de Investigación y Equipamiento Científico-Técnico en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020) con un presupuesto de 368.783,10 € sin IVA.

Una vez finalizado la compra e instalación de los equipos tras el proceso de licitación, el 22 de abril de 2022 se solicita al Vicerrectorado de Política Científica y Tecnológica de la UCA, la creación de un Servicio Periférico en el INMAR con la denominación de **Laboratorio de Estudios y Conservación de Materiales del Patrimonio Histórico (LEC-PH)**. La Comisión de Investigación Ordinaria del abril celebrada el 4 de mayo de 2022 aprueba en su Punto 9 del Orden del Día la creación del Servicio Periférico (**Anexo I**). En octubre se remiten, para su valoración y aprobación, las tasas de los servicios ofertados para el año 2023 (**Anexo II**).

La función principal del LEC-PH es ofrecer a los investigadores y profesionales, pertenecientes a la UCA y otras instituciones de investigación y empresas, una serie de servicios que comprenden desde la realización de estudios y análisis del patrimonio hasta la ejecución de proyectos de conservación y restauración del material cultural, histórico y arqueológico, contribuyendo a consolidar el área de especialización de *"El Valor Cultural del Mar"* del Campus de Excelencia Internacional del Mar (CEIMAR).

El LEC-PH distribuye su trabajo en dos grandes secciones temáticas, absolutamente complementarias y necesitadas la una de la otra, que definen la denominación del laboratorio: el Laboratorio de Estudio de Materiales, situado en

el Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos (CASEM) y el Laboratorio de Conservación y Restauración de Materiales, emplazado en el Edificio Simón Bolívar.

2. Motivación de la Memoria

El objetivo de esta memoria de actividades 2022, que pretende convertirse en un documento anual, es alienar al LEC-PH con los compromisos de transparencia de la UCA, con la finalidad de facilitar a todas las personas interesadas, miembros o no de nuestra comunidad universitaria, el acceso libre, de forma clara y resumida, a la información más relevante de nuestras actividades de investigación, transferencia, divulgación y formación, como garantía de una correcta gestión de los fondos públicos y rendición de cuentas a la sociedad. Se incluyen además algunas actividades del año 2021, dado que del mismo no hay una memoria.

Esta memoria y las futuras, serán accesibles a través de la página web de LEC-PH (<https://lec-ph.uca.es/>) y se pondrán a disposición del Vicerrectorado de Política Científica y Tecnológica y de la Dirección del INMAR en el mes de diciembre del año en curso.

3. Personal

Actualmente, el LEC-PH cuenta con tres profesionales de la plantilla de la UCA:

Manuel Bethencourt Núñez. Investigador responsable del LEC-PH. Es Catedrático de Universidad en el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica de la Universidad de Cádiz. Contrato: funcionario de carrea. Contacto: manuel.bethencourt@uca.es.

Elisa Fernández Tutela. Personal Técnico de Apoyo. Graduada en Conservación y Restauración de Bienes Culturales (UGR), Máster en Diagnóstico del Estado de Conservación del Patrimonio Histórico (UPO), Máster en Arqueología Náutica y Subacuática (UCA). Actualmente es doctoranda en el programa de Historia y Arqueología Marítima (UCA). Contrato: laboral, desde 28/04/21 hasta 27/04/24. Contacto: elisa.tudela@uca.es.

Marina Goñalons Lapiedra. Contratada con cargo al Programa Garantía Juvenil Quinta y Sexta Fase. Graduada en Conservación y Restauración de Bienes Culturales (UPV-EHU). Máster en Arqueología Náutica y Subacuática (UCA). Contrato: laboral en prácticas, desde 31/03/21 hasta 31/03/23. Contacto: marina.gonalons@uca.es.

Por otro lado, el LEC-PH colabora con numerosos investigadores y grupos de investigación, nacionales y extranjeros. Durante el año 2022 han realizado estancias en el laboratorio **Nicolás C. Ciarlo**, investigador adjunto del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Argentina) y **Diana Arano**

Robles, conservadora-restauradora del Instituto Nacional de Antropología e Historia (México).

4. Actividades

El LEC-PH da servicio a distintos grupos de investigación, administraciones públicas y empresas, y también desarrolla su propia labor de investigación, comprometiéndose con cada intervención, apostando por los criterios de adecuación, mínima intervención y mínimo impacto ecológico en sus tratamientos. También se compromete con la puesta en valor la importancia de la formación, difusión y la sensibilización de la sociedad para la preservación y estudio del patrimonio cultural; ofreciendo talleres, apoyo a estudiantes y visitas guiadas a las instalaciones. A continuación, se presentan de forma resumida las actividades llevadas a cabo durante el año 2022.

4.1. Investigación

4.1.1. Participación en Proyectos de I+D+I solicitadas por grupos del PAIDI

- **Participación en proyectos de arqueología terrestre**

Necrópolis Megalítica de la Lentejuela (UCA). Este yacimiento es una necrópolis compuesta por más de cinco estructuras megalíticas que pueden encuadrarse entre el Neolítico Final y la Edad del Cobre. Dentro del proyecto (PGI de la Junta de Andalucía, 2022-2027), el LEC-PH ha ayudado a elaborar el plan de conservación de estas estructuras y el posible material arqueológico asociado. Investigadores Responsables: Serafín Becerra, Eduardo Vijande (grupo HUM-440).

Fábricas de salazón romanas de la calle San Nicolás (Algeciras) (UCA). Este proyecto se engloba en el marco de un contrato del artículo 83 formalizado con el Ayuntamiento de Algeciras. El LEC-PH ha participado en labores de conservación *in situ*, realizando trabajos de extracción controlada, consolidación y protección de paramentos (Figuras 1-4, Anexo IV). Actualmente se está elaborando un proyecto de intervención de material procedente de la campaña en el laboratorio. Investigador Responsable: Darío Bernal (grupo HUM-440).

Excavación preventiva del tholos de Peñarroyo I (Benalup-Casas Viejas, Cádiz) (UCA). El LEC-PH ha participado en tareas de asesoramiento *in situ* durante la campaña de excavación (Figura 5, Anexo IV) y actualmente participa en las tareas de conservación y estudio de objetos metálicos procedentes del

yacimiento. Responsable: Vicente Castañeda (grupo HUM-831) y María Lazarich (grupo HUM-440).

Estudio del conjunto monetario de San Nicolás (Algeciras) (UCA). Este proyecto contempla la limpieza y estabilización de 106 monedas de aleación de cobre para permitir el estudio posterior por parte de los investigadores (Figura 6, Anexo IV). Responsable: Alicia Arévalo (grupo HUM-440).

- **Participación en proyectos de arqueología subacuática**

Arqueomallornauta (UCA). Este proyecto, donde colaboran las universidades de Barcelona, Cádiz y de las Islas Baleares tiene como objetivo analizar el tráfico marítimo en Mallorca en la Antigüedad Tardía a través de los hallazgos subacuáticos. A lo largo de 2022 se llevó a cabo la excavación del Pecio Ses Fontanelles, donde el LEC-PH participó *in situ* en la conservación de sus materiales, y parte de estos están siendo tratados actualmente en nuestras instalaciones (Figuras 7-9 Anexo IV). Investigador Responsable: Darío Bernal (grupo HUM-440).

Entre las columnas de Hércules, arqueología subacuática de un espacio privilegiado. La Bahía de Algeciras (HERAKLES), Programa Operativo FEDER Andalucía 2014-2020 (FEDER-UCA18-107327, Res. UCA/REC/12VPCT/2019). El Proyecto Herakles tiene como objetivo conocer el patrimonio arqueológico y subacuático en el Estrecho de Gibraltar desde la Bahía de Algeciras. Se han podido inventariar más de 150 pecios hundidos, desde el siglo V a.C. hasta la época contemporánea. Recientemente, se han llevado a cabo labores arqueológicas en Puente Mayorga, donde el LEC-PH ha participado *in situ* supervisando la conservación de los hallazgos (Figura 10, Anexo IV) y tratando los materiales en el laboratorio (Figura 11, Anexo IV). Investigador Responsable: Felipe Cerezo (grupo HUM-440).

- **Proyectos de arqueometría**

Vulnerability of Littoral Cultural Heritage to environmental agents: impact of Climate Change (VOLICHE). Plan Estatal, Retos, 01/01/2021-30/12/2023. Ref. PID2020-117812RB-I00. El objetivo principal de este proyecto es evaluar la vulnerabilidad del Patrimonio Cultural, tanto subacuático como emergido, las condiciones ambientales actuales y el efecto del impacto del cambio climático en su preservación *in situ*, estableciendo metodologías innovadoras aplicadas bajo una perspectiva holística, integrando el conocimiento de diferentes disciplinas e incluyendo la experiencia de las distintas partes interesadas y usuarios finales. Investigadores Responsables: Manuel Bethencourt (grupo TEP-231), Tomás Fernández-Montblanc (grupo RMN-205).

4.1.2. Participación en publicaciones (Anexo III)

I. Sánchez Pedreño, I. Salas, J.F. García Amado, S. García Trigo, M. Bethencourt Núñez (2022), Tratamiento de conservación a gran escala de piezas de artillería pesada de hierro fundido y procedencia subacuática. Procedimientos metodológicos. Ge-conservación nº 21, 16-28.

E. Fernández-Tudela, L.C. Zambrano, L. Lagóstena, M. Bethencourt (2022), Documentación y análisis de un cepo de ancla romano y sus elementos iconográficos y epigráficos sellados, Virtual Archaeology Review, 13(26), 147-162.

R. Morón, M.L. Matas, L.C. Zambrano, F. Cerezo, M. Bethencourt (2022), Caracterización, diagnóstico y conservación de los lingotes de cobre del Pecio Arapal (Sancti Petri, Cádiz), Cuadernos de Prehistoria y Arqueología, Anejo 6, 29-37.

E. Fernández-Tudela, L.C. Zambrano, M. Bethencourt (2022), Diagnóstico del estado de conservación de un conjunto de cepos de plomo de procedencia subacuática: uso de geles rígidos de agar-agar para su intervención, Cuadernos de Prehistoria y Arqueología, Anejo 6, 407-415.

T. Fernández, M. Bethencourt, A. Izquierdo (2022), Underwater Cultural heritage risk assessment methodology for wave-induced hazards: The showcase of the Bay of Cádiz, Frontiers in Marine Sciences, 9:1005514, 1-18.

4.1.3. Aportaciones en congresos¹ (Anexo III)

M. Goñalons, E. Fernández, M. Bethencourt, El Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico de la Universidad de Cádiz. Un ejemplo de buenas prácticas para la conservación del Patrimonio Cultural Subacuático, II Simposio de Patrimonio Cultural ICOMOS-España, 17-19/11/2022, Cartagena.

D. Arano, N.C. Ciarlo, M. Bethencourt, G. Carrasco-González, H. Barba. The metal sheathing and fastenings of wooden ships. Archaeometallurgical study of Carron, Ancla Macuca, HMS Forth and El Pesquero sites located at the Gulf of Mexico (late 18th to mid 19th Centuries) 43rd International Symposium on Archaeometry, 16-20/05/2022, Lisboa.

E.J. Toboso, D. Bernal, J.J. Díaz, E. Fernández. Comercio marítimo en el Estrecho de Gibraltar. Análisis del hallazgo de un fragmento de madera y de la carga de un navío romano tardorepublicano en el entorno de la Isla de Tarifa. I

¹ Dada la inexistencia de una memoria de 2021, se mencionan también la participación del LEC-PH en congresos de ese año.

Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática, 20-23/10/2021, Cádiz.

O.S. Ortega Pérez, M. Bethencourt, N.C. Ciarlo, T. Fernández Montblanc, Desaparición del Reina Regente: Causas del hundimiento y propuesta para su localización, I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática, 20-23/10/2021, Cádiz.

D. Arano, H. Barba, N.C. Ciarlo, M. Bethencourt, G. Carrasco-González, J. Reyes, I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática. Un acercamiento a la problemática del palimpsesto en naufragios: estudio de dos contextos arqueológicos subacuáticos en el arrecife Alacranes, México, 20-23/10/2021, Cádiz.

S. de León, L.C. Zambrano, M. Bethencourt, Estudio comparativo de productos de moldeo en conservación arqueológica subacuática, I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática, 20-23/10/2021, Cádiz.

E. Fernández, E. Toboso, Tratamientos de conservación de material orgánico subacuático procedente de Tarifa (Cádiz). El uso de PEG y colofonia como consolidantes, I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática, 20-23/10/2021, Cádiz.

E. Fernández, La conservación de la cerámica del pecio de La Ballenera (Algeciras) en el Laboratorio de Arqueología y Prehistoria (LABAP, Universidad de Cádiz), I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática, 20-23/10/2021, Cádiz.

L. Matas, M. Bethencourt, R. Morón, L.C. Zambrano, F. Cerezo, Caracterización, diagnóstico y conservación de los lingotes de cobre del Pecio Arapal, s. I d.C (Sancti Petri, Cádiz), MetalEspaña, 22-24/04/2021, Madrid.

E. Fernández, L.C. Zambrano, M. Bethencourt, Diagnóstico del estado de conservación de un conjunto de cepos de plomo de procedencia subacuática: uso de geles rígidos de agar-agar para su intervención. MetalEspaña, 22-24/04/2021, Madrid.

I. Sánchez, I. Salas, J. F. García, S. García, M. Bethencourt, Extracción simultánea de iones cloruro mediante electrolisis a 17 cañones y dos balas de hierro fundido de procedencia subacuática: metodología y desarrollo de herramientas MetalEspaña, 22-24/04/2021, Madrid.

4.1.4. Participación en organización de congresos² (Anexo III)

- Comité Científico del Congreso MetalEspaña 2021 “III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico”. 22-24 abril 2021, Madrid. Miembro del Comité: **M. Bethencourt**.
- Comité Científico del Congreso CIANYS 2021 “I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática”. 20-23 octubre 2021, Cádiz. Miembro del Comité: **M. Bethencourt**.
- Comité Organizador del “I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática, 20-23/10/2021, Cádiz. Comité Organizador. C. González, J. Moyano, S.J. López, N. López, E. Fernández, R. González, S. Solana.

4.1.5. Participación en campañas arqueológicas solicitadas por grupos del PAIDI

- Excavación las fábricas de salazón Romanas de la calle San Nicolás (Algeciras). Días 7, 8 y 20 de julio de 2022. Participantes: **E. Fernández y M. Goñalons**. CAU: IN20220700007, fecha de solicitud: 04/07/22, solicitante: D. Bernal (grupo HUM-440).
- Excavación en el pecio Puente Mayorga IV (Algeciras). Días 18 de abril a 5 de mayo de 2022 y del 16 de mayo al 12 de junio de 2022. Participante: **E. Fernández**. CAU: q20220300024, fecha de solicitud: 29/03/22, solicitante: F. Cerezo (grupo HUM-440).
- Excavación en el pecio Puente Mayorga IV (Algeciras). Días 5 a 15 de mayo de 2022. Participante: M. Goñalons. Excavación en el pecio Puente Mayorga IV (Algeciras). Días 5 a 15 de mayo de 2022. Participante: **M. Goñalons**. CAU fecha de solicitud: 06/04/22, solicitante: F. Cerezo (grupo HUM-440).
- Excavación en el pecio Ses Fontanelles (Palma de Mallorca). Días 16 de enero a 28 de febrero de 2022. Participante: **E. Fernández**. CAU: q20220100007, fecha de solicitud: 15/01/22, solicitante: D. Bernal (grupo HUM-440).
- Excavación en el pecio Ses Fontanelles (Palma de Mallorca). Días 15 de noviembre a 20 de diciembre de 2021. Participante: **E. Fernández**. CAU: q20211100003, fecha de solicitud: 05/11/21, solicitante: D. Bernal (grupo HUM-440).

² Dada la inexistencia de una memoria de 2021, se mencionan también la participación del LEC-PH en la organización congresos de ese año.

- Excavación del tholos de Peñarroyo y los dólmenes Celemín 1 y 2 (Cádiz). Día 7 de octubre de 2021. Participante: **E. Fernández y M. Goñalons**. CAU: q20211000003, fecha de solicitud: 04/10/21, solicitante: V. Castañeda (grupo HUM-831).
- Excavación en la zona de Puente Mayorga (Algeciras) (UCA). Días 27 y 28 de septiembre y 4 y 5 de octubre de 2021. Participante: **E. Fernández y M. Goñalons**. CAU: q20210700004, fecha de solicitud: 06/07/21, solicitante: F. Cerezo (grupo HUM-440).
- Excavación factoría de salazones s. V a.C – V d.C. Portopalo di Capo Passero (Sicilia) (UCA). Días 5 a 26 de septiembre de 2021. Participante: **E. Fernández**. CAU fecha de solicitud: 23/06/21, solicitante: D. Bernal (grupo HUM-440).
- Excavación pecio de La Ballenera (Algeciras) Campaña MANYS (UCA). Días 20 a 25 de junio de 2021. Participante: **E. Fernández**. CAU fecha de solicitud: 19/05/21, solicitante: F. Cerezo (grupo HUM-440).
- Registros fotográficos en la zona del Rinconcillo (Algeciras) Proyecto Herakles (UCA). Día 10 de febrero de 2022. Participante: **M. Goñalons**. CAU fecha de solicitud: 09/02/22, solicitante: F. Cerezo y R. González (grupo HUM-440).

4.2. Transferencia

Contratos con el exterior (art. 83 LOU) ³

Análisis arqueológico-histórico de una colección de artefactos del cargamento del pecio Deltebre I (1813). Referencia OT2021-122. Órgano financiador: Agència Catalana de Patrimoni Cultural. Cuantía: 2.499,86 € (IVA incluido). Investigador Responsable: **M. Bethencourt**. Fechas: del 18-11-2021 al 9-12-2021.

Análisis arqueológico-histórico de una colección de artefactos del cargamento del pecio Deltebre I (1813). Referencia OT2022-131. Órgano financiador: Agència Catalana de Patrimoni Cultural. Cuantía: 3.799,40€ (IVA incluido). Investigador Responsable: **M. Bethencourt**. Fechas: del 01-11-2021 al 31-11-2021.

4.3. Divulgación

Noche Europea de los Investigadores, 30/09/2022. El LEC-PH participó con dos talleres:

³ Dada la inexistencia de una memoria de 2021, se mencionan también un contrato de ese año.

- Conservando el Patrimonio Arqueológico Sumergido: cuando los desechos se vuelven historia. Investigador@s participantes: E. Tudela, M. Goñalons, M. Bethencourt.
- Cuando el océano y la tierra se encuentran: riesgos costeros y Patrimonio Cultural (SANDBOX). Investigador@s participantes: M. Bethencourt, T. Fernández-Montblanc, C. Ferrero, A. Izquierdo.

XXVI Cursos Internacionales de Otoño de la Universidad de Cádiz en Algeciras: Arqueología Subacuática en la Bahía de Algeciras. 29/11/2022 a 01/11/2022. Desde el LEC-PH, se presenta la conferencia “Conservación y restauración de materiales arqueológicos de procedencia subacuática. Casos prácticos de la bahía de Algeciras.” Investigadoras participantes: E. Tudela, M. Goñalons.

Seminarios del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC), 25/11/2022. Impartición del seminario “Influencia de las condiciones físicas, químicas y biológicas en el deterioro y protección del Patrimonio Cultural Subacuática: proyecto ARQUEOMONITOR. Investigadores participantes: M. Bethencourt, T. Fernández Montblanc.

XVI Feria Diverciencia (Algeciras, 2022), 04-05/05/2022. El LEC-PH participó en un stand: Taller sobre Arqueología y nuevas tecnologías (CEI-MAR). Participantes: M. Lara y E. Fernández.

Visitas Guiadas a los Campus. 15/12/2021 a 29/04/2022. A lo largo de todo el curso, el LEC-PH colaboró en la actividad organizada por la Unidad de Orientación Universitaria e Información, desarrollando labores de orientación al alumnado de Bachillerato, durante las visitas a las instalaciones de la Universidad de Cádiz. Participante: M. Goñalons.

4.4. Formación

4.4.1. Del personal del LEC-PH⁴

- E. Fernández: Estancia de investigación en el Servicio de Conservación, Restauración y Estudios Científicos del Patrimonio Arqueológico (SECYR) de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Tutor: Joaquín Barrio (Director del servicio): Tareas realizadas; adquisición y transferencia de conocimiento de las labores científicas de conservación y análisis de material arqueológico destacando el tratamiento láser en hierros y cobres con equipos Long Q-Switched (LGS) y Short Free Running (SFR) y la iniciación al trabajo en un laboratorio con un sistema de gestión de calidad certificado con la UNE-EN ISO 9001 2015, fechas de realización: 07/11/22 a 06/12/22. Ayuda Plan Propio: 500 €.

⁴ Dada la inexistencia de una memoria de 2021, se mencionan también tres cursos de ese año.

- E. Fernández: Curso online Técnicas Avanzadas de Fotogrametría 3D aplicada al Patrimonio. KORE Formación, fechas de realización: 02/05/22 a 15/06/22.
- E. Fernández: La conservación del patrimonio metálico en cobre y aleaciones. Instituto del Patrimonio Cultural de España, fechas de realización: 04/07/22 a 31/07/22.
- E. Fernández y M. Goñalons: Nuevas tecnologías aplicadas a la digitalización, estudio y análisis espacial del registro arqueológico. Universidad de Cádiz, fechas de realización: 16/12/21 a 22/12/21. Universidad de Cádiz.
- E. Fernández: Curso de Arqueología de Empúries. MAC Ampúries, fechas de realización: 04/07/21 a 24/07/21.
- M. Goñalons: E05. Cien años de la Factoría Ballenera de Algeciras. Universidad de Cádiz, fechas de realización: 01/12/21 a 03/12/21.

4.4.2. De alumnado de Doctorado y Máster

Durante el año 2022 han continuado los trabajos de investigación de las siguientes Tesis Doctorales:

- Historia y metalurgia de los revestimientos metálicos en embarcaciones de propulsión a vela de la España peninsular y americana circa 1780-1820. Alumna: Diana Arano Recio, Programa de Doctorado de Historia y Arqueología Marítimas. Directores: M. Bethencourt, N. Ciarlo, G. Carrasco.
- Diagnóstico de las alteraciones del plomo de procedencia subacuática y su caracterización a través de los cepos de plomo del Museo de Cádiz. Alumna: Elisa Fernández Tudela, Programa de Doctorado de Historia y Arqueología Marítimas. Directores: M. Bethencourt, L.C. Zambrano.
- Cambios y aportaciones de los navíos de 74 cañones de Romero Landa a la Construcción Naval Española del Siglo XVIII. Análisis histórico-arqueológico de los Ildefonsinos. Alumno: David Rafael Ruiz Blanco. Directores: M. Bethencourt, N. Ciarlo, A. Crespo.
- De Re Metallica Navales: Estudio de los sistemas de sujeción usados en el casco de madera de las embarcaciones militares de alto bordo españolas de los siglos XVII y XVIII. Alumno: Sergio José López Martín. Directores: M. Bethencourt, N. Ciarlo.

Durante el año 2022 han continuado los trabajos de investigación de los siguientes Trabajos Fin de Máster del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática.

- Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Alumna: Sara Ventura Acosta. Tutores: M. Bethencourt, E. Fernández.

- Estudio del comportamiento, mediante ensayos de corrosión, de seis muestras de forros de embarcaciones de cobre y aleación de cobre (latón). Alumna: Ana Bourrel Ortiz. Tutores: **M. Bethencourt, N. Ciarlo.**
- Caracterización y estudio arqueométrico de dos piezas de artillería de proveniencia subacuática. Alumno: Jesús Adrián Marcos San Fulgencio. Tutores: **M. Bethencourt, N. Ciarlo.**
- Empleo de vehículos autónomos para la evaluación de los cambios morfológicos en yacimientos subacuáticos. Alumna: Sara Franceschin. Tutor: **M. Bethencourt.**
- El navío Santísima Trinidad (1769-1805). Historia y estudio del lugar de su hundimiento. Alumno: Juan Rengel Ortega. Tutor: **M. Bethencourt.**

4.4.3. Tutorización de prácticas de empresa

- Realización de prácticas curriculares del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática (UCA). Tareas: Investigación y Conservación de objetos arqueológicos procedentes de la Bahía de Algeciras. Tratamientos de limpieza, estabilización y protección de objetos cerámicos, metálicos y orgánicos (Proyecto Herakles) en el LEC-PH. Alumna; Lucía Prados Vilar. Tutor académico; José Ángel Expósito (UCA). Tutora de empresa: **E. Fernández.** Fecha de realización: 11/07/22 a 24/07/22.

ANEXO I

Acta de la Comisión de Investigación Ordinaria, 04/05/2022 (extracto)

ACTA DE LA REUNIÓN, DE FECHA 04 MAYO DE 2022 (Abril), DE LA
COMISIÓN DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

Asistentes:

Prof. Dra. Dña. María Jesús Mosquera
Díaz,
Vicerrectora de Política Científica y
Tecnológica
Profa. Dra. D^a. Carmen Castro González
Prof. Dr. D. Arturo Morgado Estévez
Profa. Dra. D^a. Rosa Vázquez Recio
Prof.D. Carlos Costela Villodres

Prof. D. Rafael Bienvenido Bárcena
Prof. Jesús M. Cantoral Fernández

Invitados:

José María Rodríguez Izquierdo

Secretario:

Prof. Dr. D. David Jiménez Pavón

Se celebra a las 10:30 horas del día 04 de Mayo de 2022, la reunión ordinaria de la Comisión de Investigación (en adelante, CI) de ABRIL, bajo la presidencia de la Sra. Vicerrectora, Dña. María Jesús Mosquera Díaz.

A continuación, se desarrolla el siguiente orden del día:

1. Aprobación de actas anteriores

Se aprueba el acta de la CI ordinaria del 8 de Abril (marzo) de 2022 por unanimidad.

2. Informe de la Vicerrectora

La Sra. Vicerrectora procede a exponer su informe sobre las actividades de representación institucional que ha llevado a cabo y las reuniones y comisiones en las que ha participado.

Destaca entre otras cuestiones:

Representación Institucional

- Acto de Reconocimiento a la Excelencia Investigadora 2022. (29/04/22)

Reuniones relacionadas con la Política Científica y Tecnológica

- Reuniones INiBICA. (14/03/21)
- Reunión con Rector, Comité de Empresa PDI y sindicatos. (19/04/22)
- Reunión con Decanos y Directores Centros, y coordinadores de grados y másteres. Asunto: Ayudas nuevo Plan Propio UCA 2022-23. (21/04/22)

Comisiones y Fundaciones

- Sectorial I+D+i AUPA. (24/03/22)
- Comisión Sectorial I+D+i AULA. Asunto: Programa INVESTIGO. (18/04/22)
- Patronato extraordinario CEIMAR (19/04/22)
- Mesa negociación temas comunes de PDI. (20/04/22)

3. Resolución de Solicitudes de Ayudas del Plan Propio de Investigación y Transferencia

06.- Aprobación, si procede, de la propuesta provisional de adjudicación de la convocatoria TESIS INDUSTRIALES	Favorable
Han, Yaning (CLARIANT)	Propuesto
De Frutos Porras, José Manuel (GRUPO ENERGÉTICO)	Propuesto
Ojeda López, Adrián (ITTANIA ENSAYOS Y PROYECTOS)	Propuesto

7. Solicitudes de modificaciones de Proyectos FEDER-UCA y consultas

Analizada la documentación aportada por los investigadores para la solicitud de modificaciones de Proyectos FEDER-UCA, los técnicos comprueban el cumplimiento de los requisitos para **resolver como FAVORABLES 1 cambio de IP emergente, 2 cambios de partida presupuestaria y 3 altas de colaboradores:**

07.- Solicitudes de modificaciones de Proyectos FEDER-UCA y consultas	Favorable
CAMBIO Tutor IP Emergente : Hidalgo Figueroa, María Miembro equipo que tutaliza: Esther Berrocoso	✓
Cambio Partida Presupuestaria. IP. Luján Martínez, María	✓
Cambio Partida Presupuestaria. IP. Cordero Bueso, Gustavo Adolfo	✓
Alta/baja de Colaboradores.IP: Moreno Andrés, Javier (1 alta de colaborador)	✓
Alta/baja de Colaboradores.IP:Rodríguez Chia, Antonio Manuel (1 alta de colaborador)	✓
Alta/baja de Colaboradores.IP:Natalia Fernández Delgado (1 alta de colaborador)	✓

8. Solicitudes relacionadas con ayudas y proyectos del Plan Propio de la UCA

- Tras analizar memoria recibida en relación al proyecto PR2019-052, por el miembro de la comisión designado, el informe que se emite es POSITIVO.
-

08. Solicitudes relacionadas con ayudas y proyectos del Plan Propio de la UCA.	Favorable
Rosa María Vázquez Recio envía informe de valoración de proyecto de Manuel Cotrina PR2019-052 "Includ-ER: Inclusión Socio-Educativa de alumnado con Enfermedades Raras".	✓

9. Aprobación, si procede, de un nuevo servicio periférico asociado al INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIONES MARINAS (INMAR): "LABORATORIO DE ESTUDIOS Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO (LEC-PH).

- Tras analizar la documentación aportada para la solicitud, la CI acuerda aprobar el nuevo servicio periférico del INMAR.

ANEXO II

Tasas previstas para 2023 (pendientes de aprobación)

PROPUESTA DE TARIFAS AÑO 2023

DENOMINACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA: LABORATORIO DE ESTUDIOS Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO (LEC-PH)

RESPONSABLE DE LA PETICIÓN: CARMEN GARRIDO PÉREZ, DIRECTORA EN FUNCIONES DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS (INMAR)

RESPONSABLE CIENTÍFICO: MANUEL BETHENCOURT NÚÑEZ

INSTITUTO EN EL QUE SE INTEGRA: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS (INMAR)

PROTOCOLO DE USO GENERAL

Las tareas que se llevan a cabo en el LEC-PH tienen una peculiaridad respecto a los trabajos que se realizan en otros laboratorios de la Universidad de Cádiz, en cuanto al objeto de su trabajo. La complejidad y variedad de material del Patrimonio Cultural, junto a las alteraciones sufridas durante su abandono y excavación, hacen que la conservación sea una acción indispensable para el desarrollo de investigaciones arqueológicas. Este hecho se hace aún más evidente cuando se trata de Patrimonio Cultural Subacuático, definido por la Convención de la UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) en 2001, como el conjunto de todos los rastros de existencia humana que tengan carácter cultural, histórico o arqueológico, que hayan estado bajo el agua, parcial o totalmente, de forma periódica o continua, por lo menos durante 100 años. Gracias a la citada Convención, y a la Carta Internacional sobre la Protección y la Gestión del Patrimonio Cultural Subacuático de 1996, elaborada por ICOMOS (International Council on Monuments and Sites), se establecen una serie de **normas relacionadas con la conservación del Patrimonio Cultural Subacuático**. Estos acuerdos internacionales se encuentran ratificados por España, y en ambos casos se destaca la necesidad de que el proyecto de investigación tenga en cuenta la **conservación de los objetos y del sitio**, asegurándose de ello durante la intervención, el traslado y almacén temporal hasta su lugar de depósito final, gestionándolo en colaboración con las entidades correspondientes y asegurándose de su preservación a largo plazo. Todo ello se efectuará **en conformidad con las normas profesionales vigentes y atendidas por profesionales de este ámbito**. También se destaca la importancia de la difusión, educación, sensibilizando al público, colaborando con las comunidades y grupos locales, y ofreciendo una formación en arqueología subacuática, en las técnicas de preservación, etc., que también deben ser contempladas en el proyecto. A esto se suma que los informes deben incluir recomendaciones relativas a la conservación y preservación del sitio.

Por lo tanto, dada la importancia, sensibilidad y grado de protección de los materiales que se tratan o estudian en el LEC-PH, los trabajos que en él se realizan deben ser llevados a cabo por **especialistas con formación en conservación y restauración**, no pudiendo delegarse estos trabajos a otro personal sin la titulación adecuada.

La naturaleza de la materia constitutiva de los objetos arqueológicos y etnológicos pueden ser muy diversa (metal, cerámica, vidrio, piedra, madera, hueso, vegetal, etc.). Cada uno de estos objetos presenta un comportamiento peculiar ante el envejecimiento y la agresión de agentes externos, terrestres o acuáticos, planteando problemas particulares para cada caso, individualizables no sólo en cuanto a la naturaleza de la materia del soporte, sino a cada objeto en sí mismo. Debido a esto y desde el punto de vista metodológico, estos trabajos se caracterizan por la **gran cantidad y diversidad de técnicas** que se pueden requerir y por la necesidad de **materiales fungibles muy costosos**, que se deben emplear en función de la naturaleza del material y del estado en el que se encuentra, y del objeto del trabajo que se realiza (limpieza pasiva o mecánica, estabilización en baños de electrólisis, consolidación, pegado, reconstrucciones fidedignas, estudios metalográficos, etc.). A esto se une el factor tiempo en muchos de los tratamientos, que depende del estado del objeto y de las alteraciones presentes (por ejemplo, desde pocas horas para la limpieza mecánica de un objeto pequeño a meses o incluso años para los procesos de estabilización de grandes piezas).

Los materiales fungibles no se pueden tarifar debido a su diversidad, y los costes de su adquisición

deberán ser asumidos por el usuario final. Previo al inicio de los trabajos, el personal del LEC-PH informará al usuario de las necesidades de fungibles que requerirá el trabajo encomendado.

En cuanto a los equipos a emplear, se establecen las siguientes tarifas:

TIPO DE TARIFAS SEGÚN NORMATIVA	TARIFA	COMENTARIOS
Preparación de muestras para el estudio y caracterización de materiales arqueológicos		
Corte de muestras en cortadora de precisión.		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	5 €	Precio por sección de corte.
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	7,5 €	Precio por sección de corte.
C) Tarifa para otros usuarios externos	10 €	Precio por sección de corte.
Embutido de muestras en frío o en caliente según naturaleza del material.		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	10 €	Precio por pastilla.
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	7,5 €	Precio por pastilla.
C) Tarifa para otros usuarios externos	15 €	Precio por pastilla.
Preparación superficial en muestras embutidas: fases de lijado hasta un mínimo de 1200 grit.		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	5 €	Precio por pastilla. A partir de 5 muestras, precio de 4 € por pastilla.
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	7,5 €	Precio por pastilla. A partir de 5 muestras, precio de 6 € por pastilla.
C) Tarifa para otros usuarios externos	10 €	Precio por pastilla. A partir de 5 muestras, precio de 8 € por pastilla.
Preparación superficial en muestras embutidas: fases de pulido hasta un máximo de 3 µm.		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	5 €	Precio por pastilla. A partir de 5 muestras, precio de 4 € por pastilla.
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	7,5 €	Precio por pastilla. A partir de 5 muestras, precio de 6 € por pastilla.
C) Tarifa para otros usuarios externos	10 €	Precio por pastilla. A partir de 5 muestras, precio de 8 € por

		pastilla.
Examen a microscopio digital.		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	10 €	Precio por muestra examinada, con colección de fotos máxima de 10 tomas.
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	15 €	Precio por muestra examinada, con colección de fotos máxima de 10 tomas.
C) Tarifa para otros usuarios externos	20 €	Precio por muestra examinada, con colección de fotos máxima de 10 tomas.
Examen a microscopio metalográfico invertido.		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	10 €	Precio por muestra examinada, con colección de fotos máxima de 10 micrografías.
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	15 €	Precio por muestra examinada, con colección de fotos máxima de 10 micrografías.
C) Tarifa para otros usuarios externos	20 €	Precio por muestra examinada, con colección de fotos máxima de 10 micrografías.
Examen en microdurómetro, en escala Vicker.		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	10 €	Precio por muestra indexada, con colección de 5 indexaciones.
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	15 €	Precio por muestra indexada, con colección de 5 indexaciones.
C) Tarifa para otros usuarios externos	20 €	Precio por muestra indexada, con colección de 5 indexaciones.
Conservación y restauración de materiales		
Informe técnico en Diagnóstico del estado de conservación y/o propuesta de intervención		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	50 €	Precio por redacción de informe individual sin incluir técnicas de análisis

B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	75 €	Precio por redacción de informe individual sin incluir técnicas de análisis
C) Tarifa para otros usuarios externos	100 €	Precio por redacción de informe individual sin incluir técnicas de análisis
Trabajos de conservación y restauración en el laboratorio		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	20 €	Precio por hora de técnico
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	30 €	Precio por hora de técnico
C) Tarifa para otros usuarios externos	40 €	Precio por hora de técnico
Trabajos de conservación y restauración in situ		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	30 €	Precio por hora de técnico
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	45 €	Precio por hora de técnico
C) Tarifa para otros usuarios externos	60 €	Precio por hora de técnico
*Consultar desplazamiento fuera de la provincia		
Estabilización de material		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	A determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	A determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}
C) Tarifa para otros usuarios externos	A determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}
Control y medición de parámetros de baños (Cloruros, pH y conductividad)		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	5 €	Precio por muestra
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	7,5 €	Precio por muestra
C) Tarifa para otros usuarios externos	10 €	Precio por muestra
Tratamientos de electrólisis		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	A determinar	Según características

		específicas de cada caso ^{*2}
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	A determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}
C) Tarifa para otros usuarios externos	A determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}
Tratamientos de limpieza con equipos mecánicos (microabrasímetro, vibroincisor, etc.)		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	5 €/h	Precio por hora
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	7,5 €/h	Precio por hora
C) Tarifa para otros usuarios externos	10 €/h	Precio por hora
Tratamiento de consolidación		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	Por determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	Por determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}
C) Tarifa para otros usuarios externos	Por determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}
Acondicionamiento y embalaje		
A) Tarifa para usuarios internos de la UCA ^{*1}	Por determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}
B) Tarifa usuarios externos de organismos públicos/privados con actividad no lucrativa	Por determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}
C) Tarifa para otros usuarios externos	Por determinar	Según características específicas de cada caso ^{*2}

^{*1} Se aplicará un 40% sobre la Tarifa C a los investigadores pertenecientes al INMAR.

^{*2} Se realizará una propuesta económica individualizada según las características específicas de cada caso tras la evaluación de los técnicos especialistas.

Estas tarifas no contemplan otros gastos como alquiler de vehículo en caso de necesidad, dietas, kilometraje o cualquier gasto que surja en la preparación y desarrollo del trabajo. Estos gastos correrán a cargo del investigador responsable, al que se le informará previamente para su visto bueno.

INFORMACIÓN SOBRE EL INTERÉS DE LA INFRAESTRUCTURA PARA LA COMUNIDAD UCA

El LEC-PH del INMAR pone a disposición de los investigadores de la UCA, OPIs, administraciones públicas y empresas, los siguientes equipos:

Equipos para tratamientos por electrólisis y por limpieza pasiva: El objetivo perseguido con estos equipos es doble:

1) Estabilizar mediante procesos de electrólisis metales y otros materiales de diferente naturaleza y promoviendo la eliminación de concreciones y otros productos superficiales a través de baños. Para realizar este proceso electroquímico se cuenta con dos cubas electrolíticas con medidas interiores aproximadas de 150 cm y 50 de largo x 100 cm de ancho x 90 cm de altura, de material resistente a la corrosión y productos químicos, así como el sistema eléctrico adecuado incluyendo rectificadores de corriente y un sistema de prevención en la extracción de vapores.

2) Estabilizar materiales (piedra, cerámica, hueso, etc.) extrayendo las sales mediante procesos de inmersión pasiva. Se utilizarán para ello técnicas físico químicas por inmersión, alternado con agua destilada o productos químicos dependiendo del estado de conservación del material. Se cuenta con dos cubas contenedores específicos que permitan controlar los parámetros de los tratamientos de los materiales, de 150 cm de largo x 100 cm de ancho x 90 cm de altura, de material resistente a la corrosión y productos químicos.

Para aumentar la efectividad de los tratamientos, todos los baños cuentan con un sistema de agitación de líquidos mediante aire, y sistema de calefacción y enfriamiento.

Equipos para el control y medición de baños: El objetivo de los tratamientos en baños es llegar a una neutralización de las sales-cloruros presentes en los objetos de procedencia marítima. En el control de estos baños es imprescindible el empleo de equipos tecno-químicos que miden y dan un valor cuantitativo sobre la concentración de sales, pH, conductividad en el agua, etc. donde están sumergidos los objetos. El LEC-PH cuenta con un titrador para medición de cloruros con kit de aplicaciones para agua, valorador potenciométrico, disoluciones estándar de calibración y de sonda de pH, y dos equipos multiparamétricos, uno portátil y otro de sobremesa, con funciones de medición de pH, ORP, conductividad con soporte para electrodos.

Equipo para el suministro de agua desmineralizada: Los laboratorios de conservación deben trabajar con agua desmineralizada en todos sus procedimientos de limpieza y estabilización de materiales, preparación de disoluciones para los baños de tratamiento, etc. El LEC-PH cuenta con un equipo de desmineralización de agua con caudal de 400 L/h, soporte bastidor carrelado y columnas de intercambio de iones.

Armario de refrigeración para la conservación de materiales orgánicos: El objetivo de este equipo es conservar los materiales orgánicos a temperatura baja y constante, y evitar la proliferación de alteraciones biológicas. Para esto es necesario una cámara de refrigeración con temperatura regulable para la conservar y estabilizar los materiales orgánicos. Rango de temperatura de mínimo 0°C y máximo +20°C, y capacidad nominal de almacenaje de 1400 L.

Equipos de seguridad en los tratamientos de materiales: En el laboratorio se manipulan diferentes productos químicos (inflamables, básicos, ácidos) dependiendo del tratamiento a realizar, y se generan muchas partículas como resultado de los procesos de limpieza mecánica. El objetivo de estos equipos es alcanzar una prevención en seguridad e higiene tanto en el almacenaje de los productos como en su manipulación durante los tratamientos. Estos sistemas están encaminados tanto a la evaporación de gases, como a la aspiración de partículas sólidas. Para ello se cuenta con dos armarios de seguridad de productos químicos para almacenamiento de ácidos y bases con sistema de ventilación con filtro de carbón activo y capacidad de 60 L, un armario de seguridad de productos inflamables con sistema de ventilación y capacidad mínima de 60 L, un banco campana con doble aspiración para manipulación de ácidos y bases, cuadro electrónico con sistema de seguridad, instalación eléctrica y de iluminación, instalación a red de ventilación, aspirador con filtros y armario inferior, una campana para manipulación de sustancias tóxicas con parte inferior en metacrilato transparente con apertura frontal para introducir las manos y productos y medidas interiores aproximadas 60 cm x 60 cm x 60 cm, y tres grupos carrelados aspirantes para polvos, vapores de disolventes, ácidos, bases, etc., con expulsión exterior mediante tubo flexible, dos de ellos con un brazo auto portante y uno de ellos con dos brazos auto-portantes.

Equipos de tratamientos de limpieza, consolidación y control: Las actividades en un laboratorio de conservación son muy variadas, dependiendo del tipo de material y su estado de conservación. Siguiendo los protocolos de conservación que se inician con la limpieza y finalizan con la consolidación, es necesario alternar medidas de control para conocer el estado de conservación. El objetivo es llegar a una conservación estable de los objetos tratados. Para realizar esta tarea hay diferentes equipos técnicos que nos ayudan a establecer y llevar a cabo los métodos para obtener unos óptimos resultados de conservación: dos microabrasímetros con control mediante pedal, dos cámaras de arenado herméticas, tres microtornos de precisión, dos vibroincidores de precisión, dos microcinceles de precisión, dos equipos ablativos de ultrasonidos, dos aspiradores carrelados, un limpiador con generador de vapor carrelado, un equipo de consolidación vacío, dos desecadores de vidrio, dos agitadores magnéticos, dos hornillos eléctricos, una estufa digital de desecación con volumen interno 400 L y control de temperatura hasta un mínimo 280°C, un higrómetro medidor-indicador digital del contenido de humedad en tejidos y papel con electrodos, y portátil, un higrómetro medidor-indicador digital del contenido de humedad en madera y materiales de construcción con electrodos, y portátil, una balanza electrónica de precisión para laboratorio con precisión de 0,01 g, cuatro lámparas LED de luz natural con soporte orientable para suelo y mesa, dos lámparas con lupa con soporte orientable de suelo, dos data logger para mediciones de temperatura y humedad relativa en interior y exterior, un compresor silenciado con presión máxima de 10 bar, aire aspirado de 450 L/min y capacidad depósito de 270 L, y diverso material de laboratorio de vidrio y polipropileno.

Equipos para la preparación y análisis microestructural de materiales: El objetivo que se pretenden cubrir es el de estudiar la microestructura de distintos materiales (metal, cerámica, piedra) tras una óptima preparación de las muestras de trabajo. Para ello se cuenta con equipos necesarios para la preparación de superficies y caracterización de estos materiales, la determinación del tamaño de grano, dureza y morfología superficial, así como la preparación de muestras para estudios de microscopía electrónica de barrido y transmisión. El LEC-PH cuenta con: un microscopio estereoscópico con estativo de suelo y sistema óptico Greenough con vista de campo 3D con profundidad de campo de 12 mm y campo visual 35 mm, un microscopio digital de macroscopía 3D con estativo de sobremesa, que permite obtener análisis topográficos y perfiles en altura de la muestra, un microscopio metalográfico invertido con movimientos motorizados en los ejes XYZ, iluminación LED, técnicas de campo claro, campo oscuro y contraste interferencial (DIC), objetivos de calidad fluorita con 5x, 10x, 20x, 50x y 100x, dos luminadores de sobremesa con iluminación led, un microscopio para luz transmitida con iluminación LED, objetivos de calidad plan de 2,5x, 5x, 10x, 20x y 40x, oculares de 10x y campo 22 mm, y sistema de polarización, un sistema de empastillado para preparación de muestras metalográficas, con sistema de vacío para impregnación de la muestra, una cortadora y esmeriladora para muestras metalográficas y petrográficas, una pulidora automática para pulido de muestras metalográficas y pulido de láminas petrográficas, y un microdurómetro con indentador Vickers y rango de carga de 10 gf a 2 kgf.

Esta información puede ser la página web del laboratorio: <https://lec-ph.uca.es/>. Las consultas se pueden enviar al correo electrónico laboratorio.lecph@uca.es.

ANEXO III

Productividad

Participación en publicaciones



Tratamiento de conservación a gran escala de piezas de artillería pesada de hierro fundido y procedencia subacuática. Procedimientos metodológicos

Inmaculada Sánchez Pedreño, Ignacio Salas Pardo de Donlebún, Juan Francisco García Amado, Santos García Trigo, Manuel Bethencourt Núñez

Resumen: Este trabajo describe el tratamiento simultáneo de limpieza y extracción de iones cloruro, mediante electrolisis, de 17 cañones de hierro del siglo XVIII, de origen subacuático, procedentes de un hallazgo casual. En un contexto de bajo presupuesto, se desarrollaron cubas a medida y herramientas específicas para la desconcreción de las piezas: una barrena de alta precisión para acceder al ánima de los cañones y bases de trabajo giratorias. Además, se aplicó una nueva técnica de estabilización para piezas grandes de fundición mediante envolturas en material absorbente impregnado en NaOH. La selección de la densidad de corriente para los tratamientos de electrolisis se estableció mediante un ensayo previo, que demostró la mayor eficiencia de $50 \mu\text{Acm}^{-2}$ frente a $1000 \mu\text{Acm}^{-2}$. La descripción de las tareas realizadas, junto con las novedades metodológicas aportadas, conforman una valiosa información para futuras actuaciones en materia de conservación a gran escala del Patrimonio Cultural Subacuático (PCS).

Palabras clave: cañones de hierro, tratamiento electrolítico simultáneo, desarrollo de herramientas, extracción de cloruros

Large-scale conservation treatment of cast-iron heavy artillery pieces from underwater origin. Methodological procedures

Abstract: This paper describes the simultaneous cleaning and chloride extraction, through electrolysis treatment, of 17 underwater-origin cast iron barrels from XVIII century coming from a casual find. Within a low-budget context, customized vats were made. Specific tools for the cleaning of the pieces were also developed: a high-precision drill to access the bore of the barrels and rotating work bases. Moreover, a new stabilization technique for large casting pieces was applied by wrapping them in absorbent material impregnated in NaOH. The selection of the current density for the electrolysis treatment was established by a previous test, which demonstrated the higher efficiency of $50 \mu\text{Acm}^{-2}$ against $1000 \mu\text{Acm}^{-2}$. The description of the tasks performed, along with the novel methodological procedures provided, constitute a valuable information for future actions in the field of large-scale conservation of Underwater Cultural Heritage (UCH).

Keywords: iron barrels, simultaneous electrolysis treatment, tools development, chlorides extraction

Tratamento de conservação a grande escala de peças de artilharia pesada de ferro fundido e procedencia subaquática. Procedimentos metodológicos

Resumo: Este trabalho descreve o tratamento simultâneo de limpeza e extração de íons cloreto, mediante eletrólise, de 17 canhões de ferro do século XVIII, de origem subaquática, procedentes de um achado casual. Num contexto de baixo orçamento, foram desenvolvidas cubas sob medida e ferramentas específicas para a desconcreção das peças: uma broca de alta precisão para aceder ao interior dos canhões e bases de trabalho giratórias. Além disso, aplicou-se uma nova técnica de estabilização para peças grandes de fundição através da cobertura destas em material absorvente impregnado em NaOH. A selecção da densidade da corrente para os tratamentos de eletrólise foi estabelecida através de um ensaio prévio, que demonstrou a maior eficiência de $50 \mu\text{Acm}^{-2}$ em relação a $1000 \mu\text{Acm}^{-2}$. A descrição das tarefas realizadas, juntamente com as novidades metodológicas encontradas, formam uma valiosa informação para futuras ações em matéria de conservação em grande escala do Património Cultural Subaquático (PCS).

Palavras-chave: canhões de ferro, tratamento eletrolítico simultâneo, desenvolvimento de ferramentas, extração de cloretos

Antecedentes

El Patrimonio Cultural Subacuático (PCS) desvela información básica de las distintas etapas históricas en áreas muy diversas del conocimiento, no solo sobre aspectos puramente técnicos como la construcción naval, sino también sobre cuestiones como la organización y el desarrollo económico de las sociedades. Siguiendo los principios generales de la UNESCO aceptados en la Convención de París sobre la Protección del Patrimonio Cultural Subacuático en 2001, la preservación *in situ* debe considerarse la primera opción antes de emprender cualquier actividad dirigida al PCS. Sin embargo, con frecuencia tienen lugar actuaciones que contradicen dicho principio. Al margen de la extracción controlada de piezas con fines científicos en yacimientos catalogados, son comunes los hallazgos casuales en obras de naturaleza civil, donde la extracción de las piezas del lugar de la excavación resulta imperativa por cuestiones tanto de interés público, como políticas o presupuestarias. Cuando el hallazgo comprende piezas de gran tamaño de procedencia subacuática, los tratamientos de conservación sobre las mismas se dificultan exponencialmente debido, entre otros, a la complejidad de la manipulación y a los factores de deterioro extrínsecos propios del medio marino. Así, en la mayoría de hallazgos de piezas de estas características, las actuaciones dirigidas a su conservación se simplifican y acaban por ser insuficientes: la recuperación y puesta en valor de 16 cañones del siglo XVIII, en las murallas de Cádiz (Ramos Gil 2015), o los trabajos realizados sobre los cañones de la ciudad de San Francisco de Campeche en Méjico (Arano 2009), constituyen ejemplos en los que los tratamientos realizados para la conservación de las piezas no incluyeron la extracción de iones cloruro (Cl^-). En otras ocasiones se busca una solución de compromiso, consistente en volver a integrar los elementos metálicos en el medio marino. Así, en 2015, un conjunto de 28 piezas de artillería y 7 anclas pertenecientes a los pecios Delta I y Delta II, localizadas en las obras de ampliación del puerto de contenedores de Cádiz, fueron re-depositadas en el mar tras varios meses de espera en tanques de almacenamiento en tierra firme (comunicación personal). En todo caso, las actuaciones reflejadas en la bibliografía existente no muestran como una práctica común la extracción de iones cloruro en grupos de piezas metálicas de gran calibre.

La alta concentración de Cl^- presente en piezas metálicas, procedentes del medio marino, es directamente responsable de su deterioro mediante un proceso local de acidificación conocido como corrosión activa (Wang 2007, Watkinson, Al-Zahrani 2008). Por ello, la conservación a largo plazo de piezas de esta naturaleza está directamente ligada a la extracción de estos iones. Aunque en objetos de hierro se ha demostrado que la simple inmersión en disoluciones alcalinas permite su eliminación (Selwyn 2004, Schmutzler y Ebinger-Rist 2008), diversos autores han demostrado en las últimas décadas que la técnica de electrolisis, utilizada desde mediados del siglo XX (Plenderleith 1956), constituye un tratamiento de conservación más adecuado para piezas metálicas de procedencia subacuática (Doménech-Carbó *et al.* 2009, Coelho 2010, Degriygn 2010, Bethencourt y Zambrano 2011). Sin embargo,

la ejecución simultánea de esta técnica en piezas metálicas de gran envergadura requiere de grandes infraestructuras y una inversión económica considerable. Como muestra de esta dificultad, cabe mencionar trabajos homólogos realizados actualmente en España por tres de los centros de referencia en materia de restauración de arqueología subacuática. Así, el laboratorio del Centro de Arqueología Subacuática de Andalucía (CAS) dispone de cubas de electrolisis de diferentes tamaños y realiza tratamientos de estabilización catódica, si bien no suele abordar tratamientos de manera simultánea a piezas de gran tamaño. Algo similar ocurre en el Museo Nacional de Arqueología Subacuática (ARQUA), cuyo laboratorio ha realizado recientemente la extracción de Cl^- a dos culebrinas de bronce procedentes de la Fragata Mercedes (<http://www.culturaydeporte.gob.es/mnarqua/investigacion/proyectos/nsm.html>). En cuanto al Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH) de la Universidad de Cádiz, aunque dispone de cubas donde realizar trabajos de estabilización, estas no pueden, por limitaciones de tamaño, acoger objetos superiores a 150 cm. Tales circunstancias, unido a la inexistencia de trabajos publicados hasta la fecha sobre tratamientos simultáneos que pudiesen ser comparables atendiendo a la metodología, número y tamaño de piezas, dan idea de la dimensión del desafío planteado en este trabajo.

El objetivo de este trabajo es describir el conjunto de actuaciones de bajo coste llevadas a cabo para concluir, en un breve espacio de tiempo y de manera simultánea, los tratamientos de urgencia requeridos para la conservación de 17 cañones de hierro fundido de procedencia subacuática, extraídos tras un hallazgo casual. Para ello, mediante el uso de materiales comúnmente usados en otras disciplinas profesionales, se desarrollaron métodos y herramientas específicas que agilizaron y facilitaron los trabajos de limpieza, desconcreción y estabilización de las piezas. Además, los parámetros del tratamiento electrolítico se establecieron mediante un ensayo comparativo previo realizado sobre dos balas de cañón procedentes del mismo hallazgo. La información contenida en este trabajo puede resultar especialmente valiosa para acometer futuros trabajos de conservación a gran escala de grandes objetos metálicos de difícil manipulación, provenientes de yacimientos o hallazgos no planificados, que no cuenten con las infraestructuras y medios económicos suficientes.

Contexto arqueológico de las piezas y metodología aplicada

—Hallazgo de las piezas

En el año 2009, fueron halladas en el entramado defensivo relacionado con la Batería del Caballero Zuazo, San Fernando (Cádiz), [Figura 1A], 19 piezas arqueológicas presumiblemente del s. XVIII sumergidas en fango de la zona intermareal de un caño de marea. Durante las obras de excavación para el acondicionamiento de las infraestructuras del tranvía metropolitano Bahía de Cádiz,

se extrajeron 17 cañones de hierro fundido con ánimas de entre 7 y 13 cm, longitudes de entre 2,08 y 2,73 m y pesos finales, una vez limpios, de entre 647 y 1.918 kg, así como dos balas de cañón de 10,50 y 10,95 kg, ambas de calibre 32.

Extraídas el 7 de septiembre [Figuras 1B, 1C y 1D], a su llegada al laboratorio, tres meses más tarde, las piezas presentaban un avanzado proceso de corrosión debido a la ausencia de actuaciones de conservación a pie de obra. A instancia del Ministerio de Obras Públicas, la empresa Aula3 AIP S.L. aceptó el reto de realizar los correspondientes trabajos de conservación y restauración, que incluían entre sus fases la estabilización del metal y la extracción de cloruros mediante electrolisis. Reunido un equipo multidisciplinar compuesto por arqueólogos, restauradores e ingenieros, se habilitó un laboratorio de restauración específicamente diseñado para dar acogida a las 17 piezas metálicas de gran envergadura, que recibirían, de forma simultánea, el tratamiento electrolítico necesario para su conservación; una actuación sin precedentes que tuvo una duración de un año.

— Organización del espacio

Los trabajos tuvieron lugar en una nave industrial de 1000 m² de superficie total, ubicada en el polígono Fadrías, en San Fernando (Cádiz). Se acondicionaron 950 m² de superficie diáfana como *laboratorio húmedo*. Dicho laboratorio fue equipado con puente grúa, cubas de inmersión para tratamiento electrolítico, fuentes de alimentación regularmente distribuidas [Figuras 2A, 2B y 2C], un desionizador de agua, un sistema portátil de

aspiración de líquidos y mangueras de diferentes diámetros. En esta misma área, mediante el uso de una carpa portátil, se aisló un *espacio destinado a la desconcreción* de las piezas [Figura 2E], el cual fue dotado con martillos, cinces y micro-cinches, así como con herramientas específicamente fabricadas. El resto de la superficie lo compusieron espacios independientes, destacando el *laboratorio seco* de análisis de muestras [Figura 2D], que fue equipado con un medidor portátil de pH y temperatura, un electrodo de referencia de Ag/AgCl y un multímetro digital. La cantidad de iones cloruro eliminados fue monitorizada por métodos clásicos de valoración (Wang 2007, Burshneva y Smirnova 2010). Técnicas más ágiles para este propósito, como la cromatografía iónica (Coelho *et al.* 2014), no estaban disponibles en el año 2009.

—Estabilización inicial y desconcreción de las piezas. Fabricación de cubas a medida y desarrollo de herramientas específicas

La primera actuación realizada en el laboratorio fue la estabilización inicial de las piezas, la cual se realizó mediante su inmersión en una disolución acuosa de NaOH 5M, pH 13,3±0,6 y a temperatura ambiente. Utilizando materiales comúnmente empleados en otras áreas profesionales se diseñaron cubas de bajo coste a la medida de cada cañón; con este objetivo, se construyeron armazones rectangulares con listones de madera de pino y paneles de tablero marino reforzados en su parte superior e inferior. Posteriormente se introdujo una capa impermeable de polietileno de baja densidad, de 1200 galgas de espesor, a modo de “bolsa”

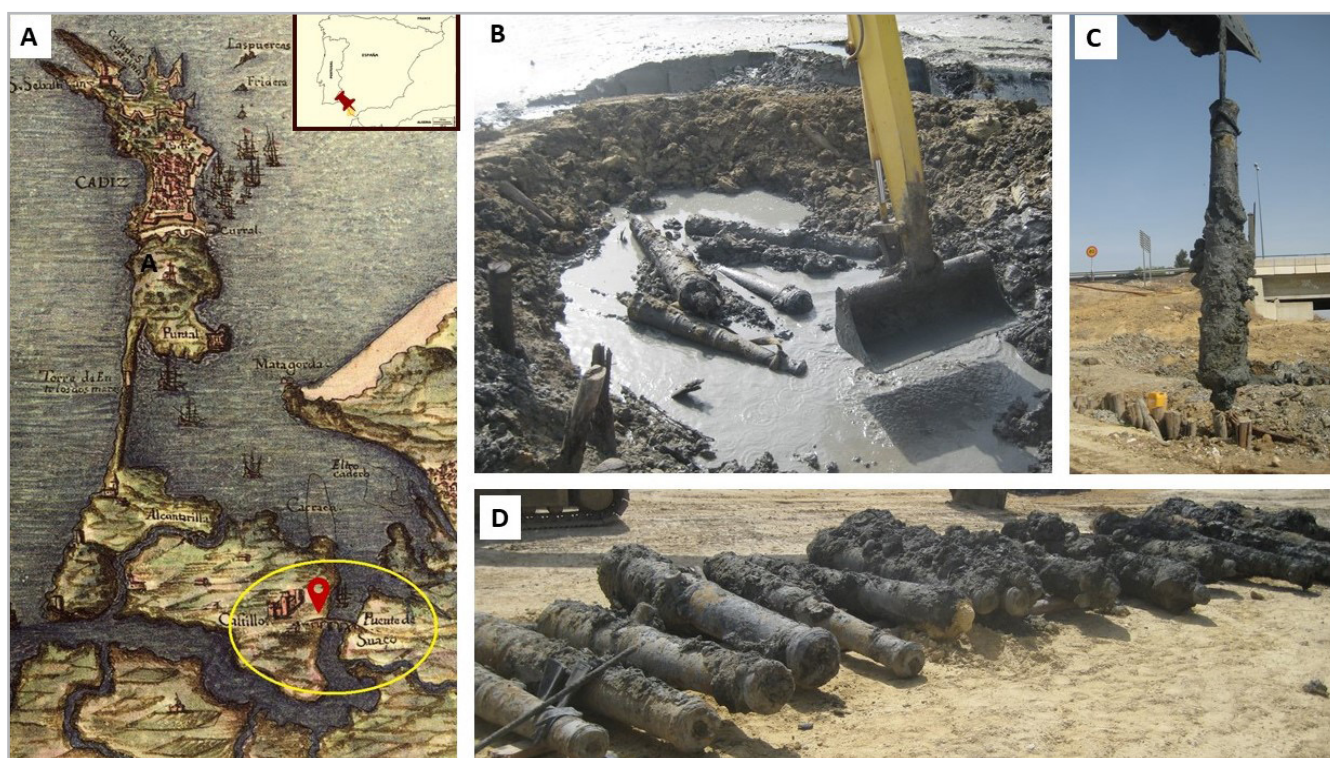


Figura 1. - Localización del hallazgo sobre un plano de la Bahía de Cádiz del s. XVIII (A). Extracción de las piezas (B, C y D). Fotografías de la Agencia de Obras Públicas de la Junta de Andalucía. Consejería de fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio.

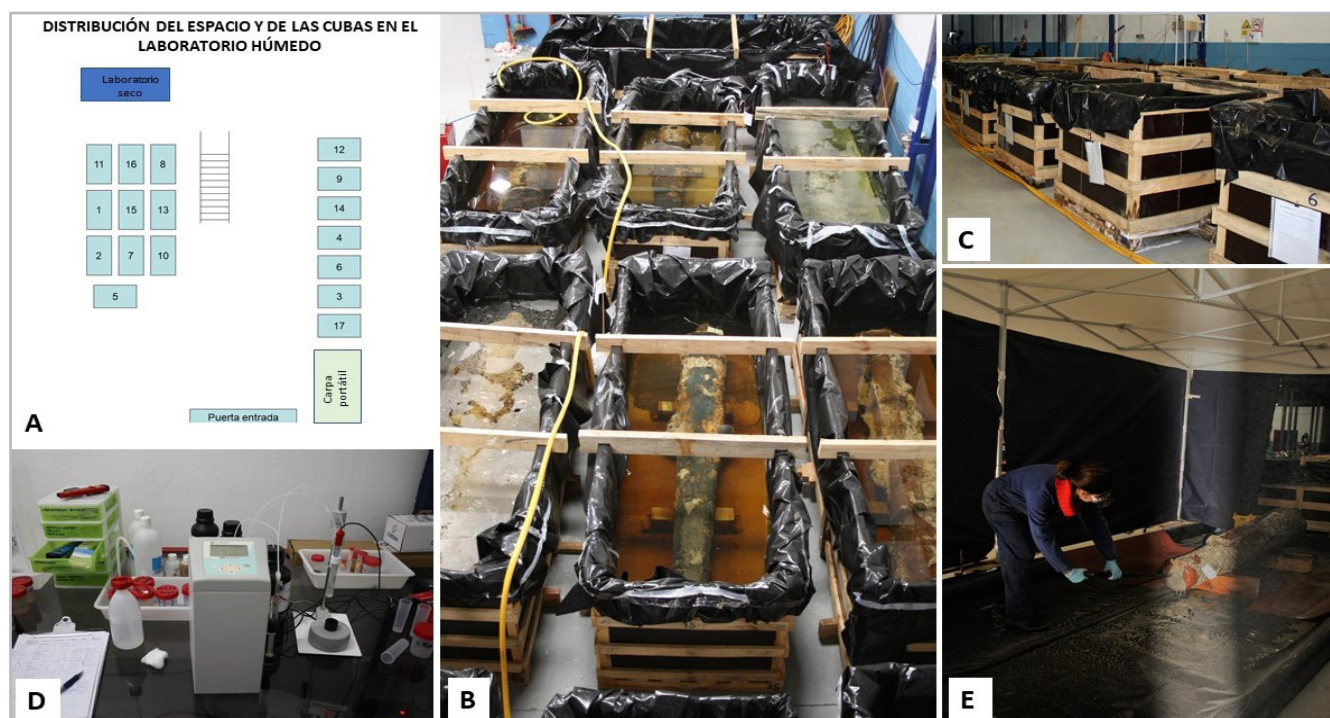


Figura 2.- Distribución del espacio y de las cubas con cañones sumergidos en disolución de NaOH 5M, dentro del laboratorio húmedo (A, B y C). Laboratorio seco (D). Espacio delimitado con carpa portátil (E). Fotografías de archivo de Aula3 AIP S.L.

[Figuras 2B y 2C]. Por último, se tallaron a medida, igualmente en madera de pino, piezas de apoyo para los cañones.

La fase de desconcreción se realizó fuera de las cubas, utilizando agua a presión, martillos y cinceles para las capas más gruesas de concreción, y micro-cinceles de aire

comprimido para las intervenciones de mayor precisión. Vista la dificultad de manipulación de las piezas, debido a su envergadura, peso y fragilidad, se diseñaron unas *bases de trabajo giratorias* [Figura 3] constituidas por dos estructuras metálicas de 70 cm de alto con forma de prisma de base rectangular. En la parte superior se colocaron dos



Figura 3.- Bases de trabajo giratorias (A, B y C). Ensayo de técnica de estabilización para piezas de gran calibre (A y C). Fotografías de archivo de Aula3 AIP S.L.

ruedas de caucho elástico natural con gran capacidad de carga. Además, varias perforaciones realizadas en los listones superiores de cada base permitían unir o separar las ruedas a conveniencia, haciendo de nuestras bases soportes adecuados para todas las piezas a tratar, independientemente de su tamaño.

Paralelamente, se desarrolló una *barrena portátil de alta precisión para la limpieza de las ánimas de los cañones*, apta para cualquier modelo, longitud y diámetro de cañón [Figura 4]. Esta fue fabricada a partir de un perforador

de base (usado en todo momento con 460 rpm), un gato elevador de vehículos y una estructura metálica sencilla. Disponía de una toma de agua para evitar el calentamiento debido a la fricción de la corona con el metal, facilitando al tiempo la evacuación de los restos. Por último, para minimizar la posibilidad de daños en el ánima durante el procedimiento, se acopló un sistema láser que permitió una alineación perfecta del ánima con las coronas de perforación, fabricadas en 7, 8, 9, 10, 11, 11,5, 12,5 y 13 cm de diámetro, conforme a los distintos diámetros de las ánimas de los cañones.

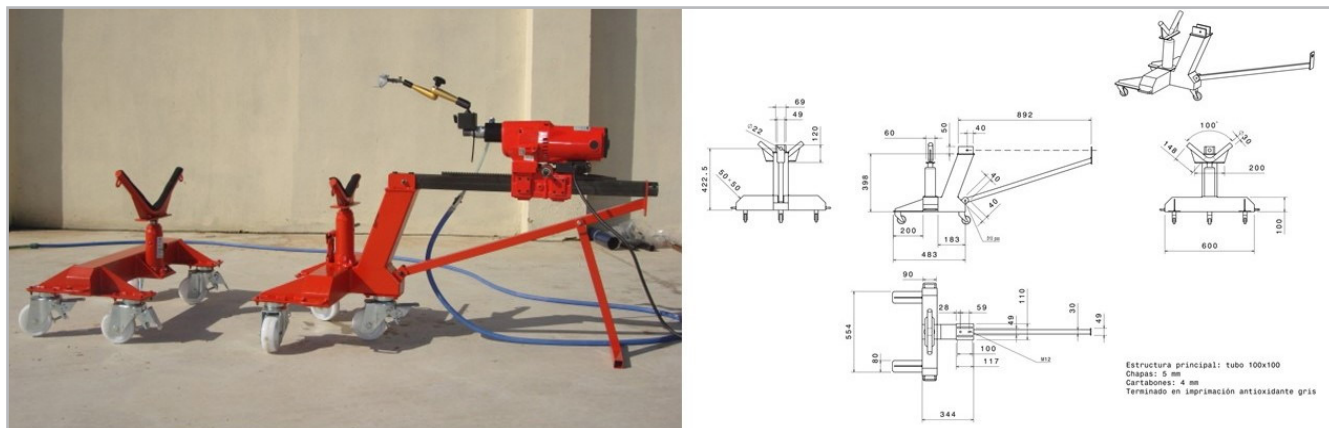


Figura 4.- Barrena de alta precisión (izquierda). Plano parcial del diseño original del sistema realizado por J. F. García Amado e Ignacio Salas Pardo (derecha). Fotografías de archivo de Aula3 AIP S.L.

— *Estabilización de urgencia para piezas de gran calibre*

A fin de evitar procesos de degradación propios de piezas extraídas de un medio húmedo a una atmósfera seca y oxigenada (Rimmer et al 2013), se desarrolló un modelo de *estabilización de urgencia para piezas de gran calibre*. Dicha técnica realizada a la temperatura ambiente del interior de la nave (15-26°C) se basó en un sistema de doble envoltura de la pieza, siendo la primera de ellas realizada con una bobina de trapo de algodón empapada en una disolución de NaOH 5M en agua corriente. El alto poder de absorción de este tejido, compuesto por un 80% de algodón, resultó óptimo para mantener la pieza húmeda. A su vez, dicha envoltura fue cubierta mediante una película plástica transparente, comúnmente utilizada como producto de embalaje. Por último, como medida de seguridad, el conjunto fue sellado con cinta de embalaje adhesiva de PVC, generando así la estanqueidad suficiente para mantener, temporalmente, la humedad de las piezas [Figuras 3A y 3C].

— Optimización de la densidad de corriente para el tratamiento electrolítico

Con el propósito de obtener datos útiles para el tratamiento de extracción de Cl^- que se aplicaría posteriormente a los cañones, se realizó un ensayo previo con dos balas de cañón de hierro procedentes del mismo hallazgo. Hamilton (1997) recomienda densidades de

corriente distintas en función de si se pretende una pasivación, una extracción de cloruros o una limpieza mecánica de la superficie de la pieza. Por su parte, Bertholon (2001) empleó densidades de corriente de hasta $1050 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ en tratamientos utilizados para la estabilización de piezas de hierro fundido de procedencia subacuática. A su vez, en 2001, se demuestra una mayor eficiencia en la extracción de cloruros en piezas de hierro forjado aplicando una densidad de corriente de $50 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Carlin *et al.* 2001). En una bala similar a las consideradas en este trabajo, Gil *et al.* (2003) aplicó una densidad de corriente de $50 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, mostrando su efectividad en la extracción de iones cloruro de la estructura de akaganeita, principal producto de corrosión del hierro en medio marino. Con estos antecedentes, y debido al alto grado de deterioro de las piezas halladas, se optó por $50 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ y $1000 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ como densidades de corriente a testar.

Así, se fabricaron celdas electrolíticas usando malla de acero galvanizado en caliente (1cm x 1cm de luz y un grosor de alambre de 1,90 mm), cables de electricidad de hilo de cobre y pinzas de cocodrilo. Se realizaron cuatro baños electrolíticos en NaOH 5M (2% p/v) con idéntico volumen de electrolito (43 l) para cada una de las balas, utilizando agua corriente para el primer baño y agua desionizada para los tres siguientes. Los cambios de baños fueron determinados en función de la estabilidad en los valores de las lecturas de la concentración de Cl^{-2} en el electrolito. La bala número 1 estuvo sometida a una densidad de 50

μAcm^{-2} y la bala número 2 a $1000 \mu\text{Acm}^{-2}$. Tras el cálculo del área de la esfera, se estableció un amperaje de 0,03 A para la bala número 1 y 0,8 A para la número 2. El ensayo tuvo una duración total de 2016 horas, dándose por concluido cuando el valor de la concentración de Cl^- se estabilizó por debajo de 50 ppm. Se optó por un control directo sobre el amperaje. Las mediciones de pH se realizaron diariamente, registrándose valores de entre 13,5 y 14,0 para la bala sometida a $50 \mu\text{Acm}^{-2}$ y de entre 12,8 y 13,8 para aquella sometida a $1000 \mu\text{Acm}^{-2}$. La medición del potencial catódico referenciado al electrodo de Ag/AgCl se realizó semanalmente, registrándose valores de entre -0,98 y -0,93 V para la bala sometida a $50 \mu\text{Acm}^{-2}$

y de entre -0,98 y -1,14 V para la bala sometida a $1000 \mu\text{Acm}^{-2}$. La temperatura se mantuvo entre 15 y 22 °C. Debido a la similitud en cuanto a la procedencia y estado de conservación entre las balas y los cañones, se trabajó con la hipótesis de que los resultados obtenidos en este ensayo podrían ser extrapolados al resto de las piezas de gran calibre.

Según muestran los gráficos, el sistema estructurado con $50 \mu\text{Acm}^{-2}$ reveló una mayor eficiencia al conseguir extraer más Cl^- a lo largo de la totalidad del tratamiento. Además, se observa que la extracción de dichos iones se produjo fundamentalmente al inicio del primer baño [Gráfico 1].

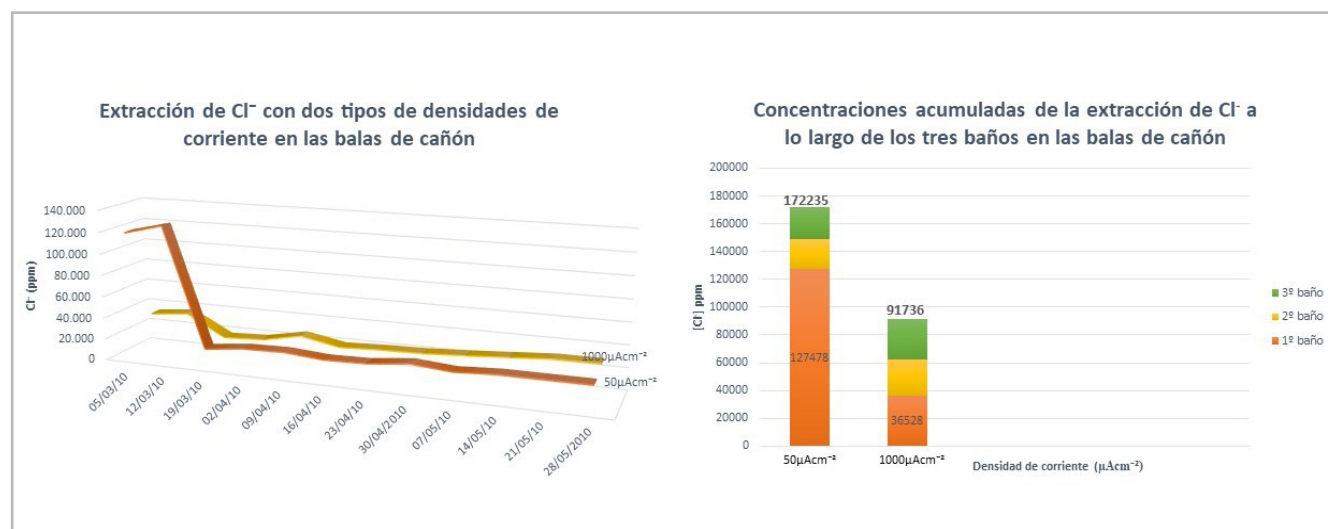


Gráfico 1.- Proceso de extracción de cloruros en las balas de cañón testadas.

Las lecturas en la concentración de Cl^- en el 4º baño dieron resultados “fuera de criterios”, indicando que la concentración de cloruros estaba por debajo de los 50 ppm. Asimismo, es interesante destacar que en la bala sometida a $50 \mu\text{Acm}^{-2}$ apenas se observó la aparición de burbujas en su superficie a lo largo de todo el tratamiento. Por su parte, la bala que soportó $1000 \mu\text{Acm}^{-2}$ expulsó menos Cl^- , aunque de manera más homogénea, y estuvo burbujeando desde el inicio de forma moderada pero continua debido a una mayor evolución de hidrógeno en su superficie. Considerando tales resultados, se optó finalmente por $50 \mu\text{Acm}^{-2}$ como densidad de corriente más fiable a aplicar en el posterior tratamiento electrolítico de los cañones.

—Tratamiento electrolítico para la extracción de Cl^- de los cañones

A lo largo de la nave se instalaron bases múltiples de electricidad con interruptores, fuentes de alimentación —colocadas sobre repisas cuyos laterales fueron perforados— y ventiladores acoplados a las mismas a fin de evitar el sobrecalentamiento de estas.

Para el montaje de las celdas galvánicas se insertaron en los cañones varillas roscadas de acero inoxidable. Estas se forraron a continuación con tubos de silicona para evitar el contacto con el ánodo de sacrificio. Dicho ánodo se fabricó mediante estructuras tubulares de malla de acero galvanizado en caliente, las cuales se colocaron alrededor de cada cañón [Figura 5]. Finalmente, se soldaron pinzas de cocodrilo a los correspondientes cables de electricidad, quedando cada pieza conectada y activada con parámetros de intensidad y corriente individualizados en función de la superficie de cada cañón.

La densidad de corriente aplicada en los tratamientos electrolíticos de los cañones fue de $50 \mu\text{Acm}^{-2}$. Así, se realizaron un total de tres baños electrolíticos en disolución de NaOH 5M, con un amperaje de 1,01-1,32 A, calculado mediante la suma de las áreas de los cilindros del cuerpo principal, los muñones, y la esfera del cascabel. La duración de los baños vino determinada por las lecturas semanales de la concentración de Cl^- en el electrolito. Con el fin de mantener el sistema en todo momento dentro del área de protección catódica del diagrama de Pourbaix para el hierro, se realizó un control semanal de pH, temperatura y potencial catódico [Tabla 1].

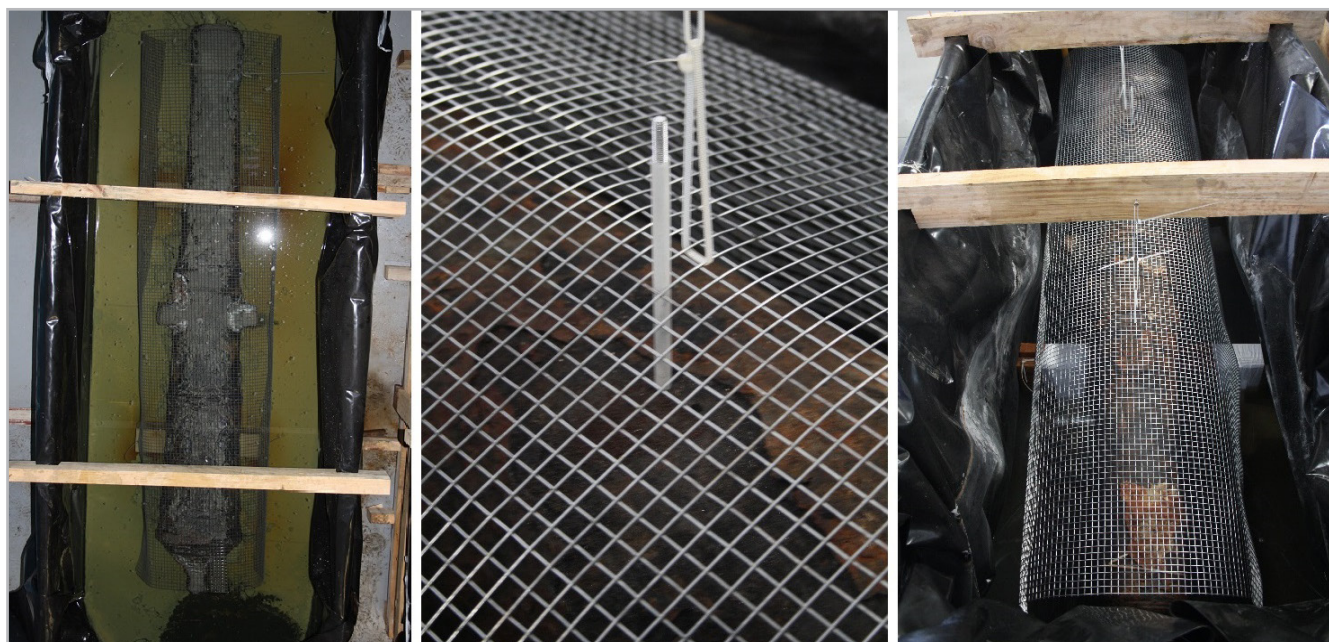


Figura 5.- Cañón depositado en cuba con celda galvánica pre-instalada. (A). Detalle de varilla roscada (B). Celda galvánica (C). Fotografías de archivo de Aula3 AIP S.L.

	Cañón 1		Cañón 2		Cañón 3		Cañón 4		Cañón 5		Cañón 6		Cañón 7	
	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE
pH	13,7	0,3	13,3	0,6	13,5	0,4	13,5	0,4	13,5	0,5	13,5	0,5	13,8	0,3
°C	19,4	0,3	19,1	5,0	19,3	4,6	19,3	4,5	19,3	4,9	19,1	4,7	19,1	4,7
Pot. Cat.	-1,003	0,153	-0,703	0,174	-0,901	0,134	-0,827	0,103	-0,983	0,142	-1,037	0,120	-1,009	0,142
	Cañón 8		Cañón 9		Cañón 10		Cañón 11		Cañón 12		Cañón 13		Cañón 14	
	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE
pH	13,4	0,4	13,2	0,5	13,6	0,3	13,6	0,3	13,6	0,3	13,6	0,4	13,3	0,6
°C	18,9	4,9	19,4	4,7	19,3	4,6	19,1	4,9	19,1	4,5	18,7	5,0	19,1	4,7
Pot. Cat.	-0,898	0,106	-0,969	0,157	-0,931	0,170	-1,039	0,118	-0,909	0,158	-0,982	0,157	-0,991	0,161
	Cañón 15		Cañón 16		Cañón 17		CONJUNTO DE 17 CAÑONES							
	Prom	DE	Prom	DE	Prom	DE								
pH	13,8	0,3	13,5	0,6	13,5	0,5	pH	13,5		0,2				
°C	19,2	4,9	18,8	4,8	19,5	4,9		19,2		0,2				
Pot. Cat.	-1,036	0,117	-0,868	0,062	-1,029	0,112		-0,948		0,090				
Prom=Promedio; DE=Desviación estadística														

Tabla 1.- Valores registrados de pH, temperatura (°C) y potencial catódico (promedio $\pm$ desviación estándar) durante el proceso de extracción de iones Cl⁻ en los 17 cañones de hierro fundido objetos de tratamiento.

Resultados y Discusión

— *Estabilización inicial mediante baños alcalinos. Reacciones químicas en las piezas*

Las cubas fabricadas para la estabilización y tratamiento electrolítico de las piezas mostraron su efectividad; el revestimiento de polietileno permaneció estable ante las

disoluciones alcalinas y las estructuras fabricadas en madera resistieron la presión ejercida por el volumen albergado en el interior de las mismas. Tras 24 horas sumergidas en una disolución acuosa de NaOH 5M, pH $13,3 \pm 0,6$ y a temperatura ambiente, se observaron afloraciones de distintas morfologías tanto en los cañones como en las balas [Figura 6]. Un análisis elemental de estos productos mediante espectroscopia de energía dispersiva (EDS), llevado a cabo en las instalaciones de la Universidad de Cádiz, reveló que se trataba de óxidos y oxihidróxidos de hierro.



Figura 6.- Afloraciones aparecidas en la superficie de las piezas tras 24 horas sumergidas en una disolución de NaOH 5M en agua corriente y pH $13,4 \pm 0,6$. Fotografías de archivo de Aula3 AIP S.L.

Durante la fase de desconcreción de los cañones, realizada fuera de los baños alcalinos, se observaron cambios de color en la superficie del metal que iba quedando expuesto a la atmósfera [Figura 7]. Las reacciones tuvieron una duración aproximada de 20 minutos y provocaron un viraje de color desde el blanco azulado o verde muy claro hasta el naranja, produciéndose únicamente en la superficie del metal que acababa de ser descubierto.

Investigaciones previas han demostrado la formación de hidroxiclорuro ferroso ($\beta\text{-Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) como principal

producto de corrosión en piezas de hierro sumergidas en medios marinos y anóxicos (Rémazeilles *et al.* 2009). Este autor también identificó productos con contenidos de azufre (FeS) debido a la presencia de bacterias sulfato-reductoras. En nuestro caso, aún sin información analítica, estudios realizados en sedimentos próximos al hallazgo revelaron igualmente una naturaleza anaerobia y marina de los mismos (Lara-Martín 2005), invitando a pensar que el ($\beta\text{-Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) bien pudiera ser uno de los productos de corrosión iniciales presentes en nuestras piezas.



Figura 7.- Cambios de color en la superficie del metal expuesto a la atmósfera inmediatamente después de su desconcreción. Fotografías tomadas en un periodo de 22 minutos. Ordenadas de arriba abajo y de izquierda a derecha. Fotografías de archivo de Aula3 AIP S.L.

Por otro lado, las hidroxisales de Fe(II) y Fe(III), comúnmente denominadas “green rust” (GR) (Bernal *et al.* 1959), son hidróxidos muy reactivos. Estudiados especialmente en el área de la corrosión, se puede distinguir entre GR1 — formado generalmente en presencia de Cl^- y CO_3^{2-} — y GR2, formado en presencia de aniones como el SO_4^{2-} (Génin *et al.* 2006). Varios autores han identificado la formación de GR1(SO_3^{2-}) y GR2(SO_4^{2-}) en piezas de origen marino procedentes de contextos anaeróbicos, así como la presencia localizada de GR1(Cl^-), al introducir las piezas de origen marino en medios alcalinos, sea por la oxidación de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ o $\beta\text{-Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$, o bien por su precipitación directa en presencia de Fe^{3+} y Fe^{2+} (Génin *et al.* 1993; Olowe *et al.* 1989; Stampfl *et al.* 1969). Asimismo, se describe como una práctica común la oxidación, en presencia de aire, de hidróxidos ferrosos $\text{Fe}(\text{OH})_2$ —obtenidos mediante la inmersión de sales ferrosas en disoluciones de NaOH y combinados con iones de Cl^- , SO_4^{2-} o CO_3^{2-} — para obtener óxido verde sintético (GRs), reconocido como un producto intermedio durante el proceso de oxidación del hierro en medios acuosos (Génin *et al.* 1998; Refait *et al.* 1997).

A este respecto, una investigación reciente realizada en piezas de hierro de procedencia marina ha estudiado el efecto del O_2 disuelto en disoluciones alcalinas aireadas y sin airear, identificando los productos de corrosión resultantes durante los tratamientos de estabilización (Kergourlay *et al.* 2018). Para ello, el autor monitorizó *in situ* la evolución de las capas de corrosión compuestas por $\beta\text{-Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ de las piezas, las cuales habían sido halladas en contextos anaeróbicos y sumergidas tras su extracción en una disolución de NaOH 5M, pH de 13,5 a temperatura ambiente. Los resultados, expuestos mediante mapas realizados con micro-difracción de rayos X (μXRD), en periodos de entre 23 y 56 minutos, mostraron la transformación del $\beta\text{-Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ en $\text{Fe}(\text{OH})_2$ y Fe_3O_4 en medios alcalinos no aireados, así como la formación de estos mismos óxidos e hidróxidos junto con la aparición local de GR1(Cl^-) en disoluciones alcalinas aireadas.

Por tanto, atendiendo a la naturaleza de las piezas tratadas en nuestro trabajo (hierro arqueológico), el contexto en el que fueron halladas (medio marino anaeróbico) y las condiciones de temperatura y alcalinidad a las que fueron sometidas durante su pasivación y desconcreción, sería razonable considerar que tanto las afloraciones mostradas en la figura 6, como las alteraciones de color recogidas por la figura 7, pudieran ser productos derivados de la evolución de las capas de corrosión compuestas por $\beta\text{-Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ en medios alcalinos. Estas imágenes resultan de especial interés y originalidad debido a la fugacidad de tales reacciones químicas. En todo caso, sería recomendable abordar estudios específicos a fin de contrastar la hipótesis expuesta.

— Herramientas específicas, técnica de estabilización de urgencia y tratamiento electrolítico

Las bases de trabajo giratorias no solo facilitaron la

ergonomía de los técnicos responsables de la desconcreción de los cañones, sino que agilizaron el proceso en sí mismo. Estas bases resistieron con robustez las cargas y vibraciones a las que fueron sometidas. Las ruedas que acogían las piezas facilitaron tanto el apoyo como el giro de los cañones, no causándoles daño alguno independientemente de la longitud y anchura de los mismos. Tras la limpieza mecánica de los cañones no se observaron registros documentales en sus superficies.

La barrena de alta presión consiguió realizar una limpieza precisa de las ánimas de los cañones, sin dejar marcas en las mismas; como muestra del óptimo rendimiento del sistema, el CAS solicitó la colaboración de la empresa para la limpieza de una pieza similar extraída durante una campaña del *Proyecto Trafalgar*. Dicha colaboración tuvo como resultado la recuperación de un saquete de metralla compuesto por 20 balas de pequeño calibre (Bethencourt y Zambrano 2011).

La técnica de estabilización de urgencia mantuvo las piezas empapadas en la disolución alcalina a lo largo de tres días. Este resultado es especialmente interesante ya que revela la efectividad de la misma en condiciones de temperatura ambiental media-alta, validando así su potencial aplicación a pie de obra en piezas de gran envergadura de origen marino. En un trabajo reciente se ha planteado como novedad la aplicación de un procedimiento similar al nuestro para hierros inamovibles consistente en la aplicación de NaOH mediante envolturas de material absorbente (Veneranda 2021), utilizado normalmente para la extracción de iones cloruro en piedra (Pozo A., J. S. *et al.* 2016), demostrando la originalidad de la técnica aplicada en su momento en nuestras piezas.

Los tratamientos electrolíticos de los cañones resultaron efectivos y tuvieron una duración de entre 9 y 11 meses, dándose por concluidos cuando las lecturas de la concentración de Cl^- se estabilizaron en valores de 80 ± 20 ppm.

— Fin del tratamiento y divulgación

Las fases finales del tratamiento de restauración de las piezas no son objeto de este trabajo, habiendo sido realizadas por un equipo de profesionales diferente al que presenta este artículo. Según comunicación personal, las piezas se neutralizaron con baños de agua desionizada y se secaron mediante la aplicación de acetona, quedando a continuación expuestas al aire. Posteriormente, se aplicó una disolución de ácido tánico en alcohol metílico al 3% (p/v). Por último, se aplicó una capa protectora de Inrcal 44 mediante pulverizado.

La restauración de este grupo de piezas arqueológicas y su gestión posterior generaron el interés popular, que se evidenció mediante su divulgación a través de titulares en prensa local y regional, así como en los informativos de la cadena de televisión regional en Andalucía [Figura 8].



Figura 8.- Fotografía de archivo de los cañones recién restaurados extraída de la edición del 9 de junio de 2011 del Diario de Jerez (fondo). Repercusión mediática (derecha).

Conclusiones y consideraciones finales

Por la envergadura de las tareas realizadas, el trabajo descrito supone un hito en el tratamiento simultáneo de conservación de piezas histórico-arqueológicas, de artillería pesada de procedencia subacuática. Las cubas y las herramientas de bajo coste específicamente desarrolladas —barrena de alta precisión y bases de trabajo giratorias—, así como la técnica de estabilización de urgencia utilizada, demostraron su efectividad a lo largo del tratamiento agilizando las tareas realizadas. Además, un estudio comparativo previo, realizado en piezas procedentes del mismo hallazgo, permitió comprobar la mayor eficiencia de $50 \mu\text{Acm}^{-2}$ frente a $1000 \mu\text{A cm}^{-2}$ como densidad de corriente a aplicar en el posterior tratamiento electrolítico. Desde nuestro punto de vista, el conjunto de tales singularidades, enmarcado en un contexto de bajo presupuesto, convierten las labores de conservación descritas en una referencia para futuras actuaciones homólogas.

Materiales y proveedores

Medidor pH modelo Phep 4. HANNA INSTRUMENTS S.L.

Titrador SALT-matic 23. CRISON Instruments, SA.

Desmineralizador modelo Lunik 2002. Termómetro modelo Key. Micro-cinzel Modelo CTS 178. Vibro-incisor Modelo CTS F1. Fuente de alimentación Tti CPX200 DUAL. En C.T.S. ESPAÑA.

Fuentes de alimentación ajustables HQ Power PS1503SB de 0-15V y 3A. <https://www.velleman.eu>

Electrodo de referencia CRISON 52-40 Ag/AgCl. CRISON Instruments, SA.

Agradecimientos

A todas y cada una de las personas que formaron parte del equipo de trabajo, a los revisores anónimos por la aportación de perspectiva que sirvió para mejorar el trabajo y al Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH) de la UCA, financiado por FEDER-MICIN EQC2018-004947-P.

Referencias

GOBIERNO DE MÉXICO, INSTITUTO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA E HISTORIA (INAH). "Aplican tratamiento a cañones centenarios de Campeche". <https://inah.gob.mx/boletines/1065-aplican-tratamiento-a-canones-centenarios-de-campeche>

BERNAL, J.D., DASGUPTA, D., RMACKAY, A.L. (1959). "The oxides and hydroxides of iron and their structural interrelations". En *Clay Miner. Bull*, 4: 15-30.

BERTHOLON, R AND RELIER C. (1990). "Les métaux archéologiques". En *La conservation en archéologie. Méthodes et pratique de la conservation-restauration des vestiges archéologiques*, Masson, Paris, France, 163-22.

BERTHOLON, R. (2001). "Nettoyage stabilisation de la corrosion par électrolyse". En *La conservation des métaux*, Volfovsky, C. (Coord.) Paris. CNRS EDITIONS, 83-101.

- BETHENCOURT, M Y ZAMBRANO, L. (2011). "Análisis de cloruros en la zona grafitizada de un cañón de hierro procedente del pecio Bucentaure (La Caleta, Cádiz) tratado mediante polarización catódica de baja intensidad". En *IV Congreso Latinoamericano de Conservación y Restauración de Metal*, Madrid, 256-270. <https://doi.org/10.13140/2.1.4906.7849>
- BURSHNEVA, S. AND SMIRNOVA, N., (2010). "Archaeological Iron Conservation Colloquium" –Extended Abstracts Session 3: Alkaline Chloride Extraction, State Academy of Art and Design, Extended Abstracts, 24th to 26th June Stuttgart, Germany.
- CARLIN, W., KEITH, D. AND RODRÍGUEZ, J. (2001). "Less is more: measure of chloride removal rate from wrought iron artifacts during electrolysis". En *Studies in Conservation*, 46: 68-76.
- COELHO, J.C. (2010). "Estudo da eficiência de técnicas electroquímicas na remoção de cloretos em amostras de uma bala de canhão proveniente de um naufrágio do séc. XVIII", Dissertações de Mestrado, Repositório da Universidade de Lisboa, Comunidades & Coleções, Faculdade de Ciências (FC).
- COELHO, J.C., OLIVEIRA, C.M., CARVALHO M. D. AND FONSECA I.T.E. (2014). "The efficiency of electrochemical methods for the removal of chloride ions from iron marine archaeological objects: A comparative study". En *Materials and Corrosion*, 65(1): 38-44. <https://doi.org/10.1002/maco.201206584>
- CORNELL, R. AND GIOVANNOLI, R. (1986). "Factors that govern the formation of multi-domainic goethites". En *Clays and Clay Minerals*, 34(5): 557-564. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1986.0340509>
- DEGRIGNY, A., (2010). "Use of electrochemical techniques for the conservation of metal artefacts: A review", En *Journal of Solid State Electrochemistry* 14(3):353-361. <https://doi.org/10.1007/s10008-009-0896-0>
- DOMÉNECH-CARBÓ A., DOMÉNECH-CARBÓ M.T. AND COSTA V. (2009). "Electrochemical methods in Archaeometry, Conservation and Restoration", En *Series: Monograph in Electrochemistry* (Ed. F. Scholz), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 166.
- GÉNIN J.M.R., BOURRIÉ G., TROLARD F., ABDELMOULA M., JAFFREZIC A., REFAIT P., MAITRE V., HUMBERT B., HERBILLON A. (1998). "Thermodynamic equilibria in aqueous suspensions of synthetic and natural Fe(II)-Fe(III) green rusts: occurrences of the mineral in hydromorphic soils". En *Environ Sci. Technol*, 32: 1058-1068. <https://doi.org/10.1021/es970547m>
- GÉNIN, J.M.R.; OLOWE, A. A.; RÉSIK, B.; BENBOUZID-ROLLET, N. D.; CONFENTE, M.; PRIEUR, D. (1993). "Marine corrosion of stainless steels: chlorination, and microbial effects". En *European Federation Corrosion Series*; The Institute of Materials: London, 10:162-166.
- GÉNIN J.M.R., ABDELMOULA, M., RUBY, C AND UPADHYAY C. (2006). "Speciation of iron; characterisation and structure of green rusts and FeII-III oxyhydroxycarbonate fougérite". En *C. R. Geoscience* 338: 402-419. <https://doi.org/10.1007/s10751-011-0500-8>
- GIL, M.L.A., SANTOS, A., BETHENCOURT, M., GARCÍA, T., FERNÁNDEZ-BASTERO, S., VELO, A., GAGO-DUPOR L. (2003). "Use of X-ray and other techniques to analyse the phase transformation induced in archaeological cast iron after its stabilisation by the electrolytic method". En *Analytica Chimica Acta*, 494: 245-254. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2003.08.012>
- HAMILTON, D. (1997). "Basic Methods of Conserving Underwater Archaeological Material Culture". Nautical Archaeology Program, Department of Anthropology, Texas, A&M University.
- KERGOURLAYA F., RÉGUERB S., NEFFA D., FOYA E., PICCAB F.E., SAHEBC M., HUSTACHEBS., MIRAMBETDF., DILLMANNA P. (2018). "Stabilization treatment of cultural heritage artefacts: In situ monitoring of marine iron objects dechlorinated in alkali solution". En *Corrosion Science*, 132: 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.12.028>
- LARA-MARTÍN P.A., GÓMEZ-PARRA A., PETROVIC M., BARCELÓ D., GONZÁLEZ-MAZO E. (2005). "Distribution of organic pollutants in coastal sediments of Cádiz Bay (SW Spain)". En *Ciencias Marinas* 31(1B): 203-212. <https://doi.org/10.7773/cm.v31i12.95>
- MINISTERIO ESPAÑOL DE CULTURA Y DEPORTE. "Proyecto Nuestra Señora de las Mercedes". <http://www.culturaydeporte.gob.es/mnarquia/investigacion/proyectos/nsm.html> [Consulta: 05/11/2019].
- OWE, A. A.; BAUER, PH.; GÉNIN, J.-M. R.; GUE'ZENNEC, J. (1989). "Moessbauer Effect Evidence of the Existence of Green Rust 2 Transient Compound from Bacterial Corrosion in Marine Sediments". En *Corrosion*, 45 (3): 229-235. <https://doi.org/10.5006/1.3577848>
- PLENDERLEITH, H. J. (1956). *The Conservation of Antiquities and Works of Art*. London. Oxford University Press.
- POZO A., J. S.; RIVAS, T.; LÓPEZ, A. J.; FIORUCCI, M. P.; RAMIL, A. (2016). "Effectiveness of granite cleaning procedures in cultural heritage: A review". *Sci. Total Environ*, 571: 1017-1028. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.090>
- RAMOS GIL, A. (2015). "Recuperación de 16 cañones del siglo XVIII, y su puesta en valor en las murallas de Cádiz". En *Actas del II Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico. MetalEspaña 2015*. Real Casa de Moneda, Segovia, 200-205.
- REFAIT, PH.; GÉNIN, J. M. R. (1997). "Mechanisms of oxidation of Ni(II)-Fe(II) hydroxides in chloride-containing aqueous media: role of the pyroaurite-type Ni-Fe hydroxychlorides" En *Clay Minerals* 32(4): 597-613
- RÉMAZEILLES C., NEFF D., KERGOURLAY F., FOY E., CONFORTO E., GUILLMINOT E., REGUER S., REFAIT PH., DILLMANN PH. (2009). "Mechanisms of long-term anaerobic corrosion of iron archaeological artefacts in seawater". En *Corrosion Science*, 51: 2932-2941. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.022>
- RIMMER, M., WATKINSON, D. AND WANG, Q. (2013). "The impact of chloride desalination on the corrosion rate of archaeological iron". En *Studies in Conservation*, 58(4): 326-337. <https://doi.org/10.1179/2047058412Y.0000000068>

SCMUTZLER B. AND EBINGER-RIST, B.N. (2008). "The conservation of iron objects in archaeological preservation – Application and further development of alkaline sulphite method for conservation of large quantities of iron finds". En *Materials and Corrosion*, 59(3), 248-245. <https://doi.org/10.1002/maco.200804109>

SELWYN, L. (2004). "Overview of archaeological iron: the corrosion problem, key factors affecting treatment, and gaps in current knowledge", Metal 04: Proceedings of the International Conference on Metals Conservation, Canberra, Australia, 4-8 October 2004, 294-306.

STAMPFL, P. P. (1969). "Ein basisches eisen-II-III-karbonat in rost". En *Corrosion Science*, 9:185-187. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(69\)80029-6](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(69)80029-6)

UNESCO (2001). Convención de la Unesco. La Protección del Patrimonio Cultural Subacuático. París. http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=13520&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html [Consulta: 08/10/2019].

VENERANDA, M., PRIETO-TABOADA, N., CARRERO, J.A. COSTANTINI, I., LARRAÑAGA, A., CASTRO, K., ARANA G. AND MADARIAGA, J.M. (2021). "Development of a novel method for the in-situ dechlorination of immovable iron elements: optimization of Cl⁻ extraction yield through experimental design". En *Scientific Reports*, 11:10789. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90006-y>

WANG, Q., (2007). An Investigation of Deterioration of Archaeological Iron". En *Studies in Conservation*, 52(2): 125-134. <https://doi.org/10.1179/sic.2007.52.2.125>

WANG, Z., XU, C., CAO, X., AND XU, B. (2007). "The Morphology, Phase Composition and Effect of Corrosion Product on Simulated Archaeological Iron". En *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 15(3): 433-438. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(07\)60104-9](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(07)60104-9)

WATKINSON, D. AND A. AL-ZAHRANI, A. (2008). "Towards quantified assessment of aqueous chloride extraction methods for archaeological iron: De-oxygenated treatment environments". En *The Conservator*, 31: 75-86. <https://doi.org/10.1080/01410096.2008.9995234>

Autor/es



Inmaculada Sánchez Pedreño
puracsp@gmail.com
 Aula3 Actuaciones Integrales sobre el Patrimonio S.L.
<https://orcid.org/0000-0003-3670-8820>

Inmaculada Sánchez Pedreño es Licenciada en BBAA por la Universidad de Sevilla y Master en Patrimonio Histórico Arqueológico por la Universidad de Cádiz. Realizó su proyecto de master titulado: "La Restauración de Bienes Culturales Subacuáticos: Técnicas Básicas para Madera, Hierro y Bronce". Desde el año 2005 hasta el 2012 se ha formado realizando cursos dirigidos de manera específica a la conservación y restauración del Patrimonio Cultural Subacuático en instituciones como el Centro de Arqueología Subacuática de

Andalucía (CAS) y el Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya. Ha asistido a jornadas de Museología en el ARQUA y participado en cursos de postgrado como el VIII Postgraduate Course "Silicon Plastination Technique (S10)", realizado por la Universidad de Murcia. Fue becada por el CAS para participar en el proyecto del programa Interreg ARCHEOMED en el año 2008. Su experiencia profesional ha sido desarrollada como restauradora en el Museo Naval de San Fernando en Cádiz durante periodos comprendidos entre el 2006 y el 2013 y como directora y coordinadora del departamento de restauración de Aula3 AIP S.L. entre los años 2009 y 2011. Participó como ponente en el congreso MetalEspaña2020 y actualmente trabaja como profesional independiente y colabora con la Facultad de Letras de la Universidad de Oporto (FLUP) y con la Bridge Collection del WOW (World of Wine) en Vila Nova de Gaia, Portugal.



Ignacio Salas Pardo de Donlebún
salassignacio@gmail.com
 Aula3 Actuaciones Integrales sobre el Patrimonio S.L.

Ignacio Salas Pardo de Donlebún es Licenciado en CC de la Información por la Universidad Complutense de Madrid y Master en Patrimonio Histórico Arqueológico por la Universidad de Cádiz. Socio fundador de la empresa Aula3 Actuaciones Integrales sobre el Patrimonio, ha realizado el curso *Restauración de Material Arqueológico Subacuático* por el Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya del Museo d'Arqueologia de Catalunya, el curso "Construcción Naval: su registro Arqueológico", realizado por el Instituto Andaluz de Patrimonio y el VIII Postgraduate Course "Silicon Plastination Technique (S10)", realizado por la Universidad de Murcia en el año 2009. Como periodista, ha acompañado los acontecimientos relacionados con la Arqueología Subacuática en España desde el año 2000. Actualmente trabaja para los informativos de Canal Sur en C/ Carpinteros de Ribera, 2, CP 11012 Cádiz.



Juan Francisco García Amado
garcia_amado@hotmail.com
 Airbus Operations

Juan Francisco García Amado es Titulado en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Cádiz. Especialista en construcción de maquinaria Con formación especializada en metrología industrial trabajó durante 8 años en taller de mecanizado de precisión diseñando mejoras en maquinaria industrial para General Motors. Cuenta con 4 años de experiencia en inspección de utillajes aeronáuticos. Apasionado de la arqueología subacuática, ha colaborado asesorando y diseñando maquinaria específica en actuaciones dirigidas a la conservación y restauración del PCS realizadas por la empresa Aula3 AIP S.L. entre los años 2009 y 2011. Hace 15 años que trabaja en automatización de procesos y robótica en Airbus Operations: Calle Portugal, 9. 11519 Puerto Real, Cadiz, Spain.

**Santos García Trigo**

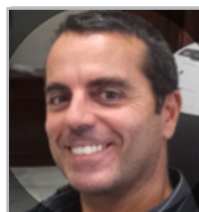
sgtrigo@gmail.com

Aula3 Actuaciones Integrales sobre el
Patrimonio S.L.

Santos García Trigo es Licenciado en Derecho. Especialista en Derecho Medioambiental por la Universidad de Educación a Distancia (UNED) y Master en Patrimonio Histórico Arqueológico por la Universidad de Cádiz. Apasionado de la arqueología subacuática ha sido socio fundador de la empresa Aula3 Actuaciones Integrales sobre el Patrimonio y redactando del proyecto de Reglamento de Arqueología Subacuática de la Republica de Cabo Verde, encargado por la Agencia Española de Cooperación Internacional, en colaboración con el CAS en el año 2009. Colaborador habitual y asesor del departamento de restauración de Aula3 AIP S.L. Actualmente es delegado en Delegación del ISFAS en Soria. Rda/ Eloy Sanz Villa 8. 42003 Soria.

Artículo enviado el 21/02/2021

Artículo aceptado el 16/12/2021


<https://doi.org/10.37558/gec.v21i1.970>
**Manuel Bethencourt Núñez**

manuel.bethencourt@uca.es

 Universidad en el Departamento de Ciencia
 de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y
 Química Inorgánica de la Universidad de Cádiz
<https://orcid.org/0000-0002-0488-7097>

Manuel Bethencourt Núñez es Catedrático de Universidad en el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica de la Universidad de Cádiz. Su investigación se ha circunscrito en general al estudio de los procesos de corrosión de aleaciones metálicas en medio marino, al desarrollo de métodos de protección de bajo impacto ambiental y a estudios arqueométricos. Otras líneas de investigación han sido el desarrollo de nuevas técnicas electroquímicas para el estudio de los procesos de corrosión, especialmente el Ruido Electroquímico, y el desarrollo de recubrimientos de oxinitruros de circonio. Ha publicado un total de 103 trabajos. De estos, un número importante están indexados con índice de calidad relativa: 69 en JCR, 77 en Web of Science, u 80 en Scopus. 18 son artículos en publicaciones científicas con índice de calidad relativa y 16 son libros o capítulos de libros en investigación. Su índice h es 24. Ha presentado 126 trabajos presentados en 72 congresos, la mayoría publicados en libros con ISBN, y es autor de 2 Patentes Internacionales y 2 Registros de la Propiedad Intelectual (software). Investigador responsable de 7 proyectos de investigación (1 europeo, 5 nacionales y 1 autonómico), numerosos contratos de investigación para la industria y tres solicitudes de grandes infraestructuras científicas en programas de incentivos FEDER. También ha participado como investigador en los equipos de 15 proyectos de investigación nacionales, regionales y europeos, y en 19 contratos de investigación. Ha dirigido 6 Tesis Doctorales, 9 Trabajos Fin de Máster, 3 Tesis de Licenciatura, y 2 Proyectos Finales de Ingeniería. Actualmente dispone de 4 tramos o sexenios de investigación y 1 de transferencia. Ha sido Vicerrector de Investigación y Transferencia de la UCA (2011-2015).

DOCUMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN CEPO DE ANCLA ROMANO Y SUS ELEMENTOS ICONOGRÁFICOS Y EPIGRÁFICOS SELLADOS

DOCUMENTATION AND ANALYSIS OF A ROMAN ANCHOR STOCK AND ITS ICONOGRAPHIC AND EPIGRAPHIC SEALED ELEMENTS

Elisa Fernández-Tudela^{a,*} , Luis C. Zambrano^b , Lázaro G. Lagóstena^c ,
Manuel Bethencourt^a 

^a Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Facultad de Ciencias de Mar y Ambientales-Instituto de Investigaciones Marinas (INMAR), Universidad de Cádiz, Avenida República Árabe Saharaí, s/n, 11510, Puerto Real, España. elisa.tudela@uca.es, manuel.bethencourt@uca.es

^b Consejería de Cultura, Junta de Andalucía, Museo de Cádiz, Plz. de Mina, s/n, 11004, Cádiz, España. luisc.zambrano@juntadeandalucia.es

^c Departamento de Historia, Geografía y Filosofía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Cádiz, Av. Dr. Gómez Ulla, 1, 11003, Cádiz, España. lazaro.lagostena@uca.es

Lo más destacado:

- Se presenta la metodología de documentación 3D llevada a cabo para estudiar y analizar un cepo de plomo de época antigua y su conjunto iconográfico y epigráfico inédito.
- La aplicación de programas SIG y de procesamiento de nubes de puntos ha permitido documentar detalles microsuperficiales de la superficie del cepo no apreciables a simple vista.
- El análisis volumétrico y el modelado 3D presenta una ventaja a la hora de conocer más detalles sobre las anclas con cepos de plomo de época antigua.

Abstract:

This paper aims to present the documentation and analysis methodology carried out on a lead trap from the ancient period, which belongs to the collection of traps in the Museum of Cádiz (Andalusia, Spain). The anchor stock had some interesting characteristics for this research: on the one hand, from the point of view of conservation and restoration, due to the alterations it presented; on the other hand, from a historical and archaeological point of view, it showed signs of reliefs on its surface hidden under the alteration products. After removing different layers of alteration that covered the surface during conservation and restoration treatments, an unpublished iconographic and epigraphic programme, as well as possible marks of use and manufacture were revealed. The poor state of conservation of the original surface made it impossible to visualise the details as a whole, so the authors applied photogrammetric methods, and subsequently processed models using various GIS analysis and point cloud processing software.

Two photogrammetric models (in Agisoft PhotoScan) were made to document the trap in general: one prior to the conservation and restoration process; plus a second three-dimensional (3D) model once the surface had been cleaned. The purpose of the second model was to visualise the reliefs programme in general, as well as the various surface details. The first complete 3D model of the object was used to perform a virtual reconstruction of the anchor including the elements that did not preserve, using a 3D modelling program (Blender).

Nine areas of the stock surface were selected for the analyses of the various iconographic and epigraphic features, which were documented and processed in Agisoft PhotoScan. The Digital Elevation Model (DEM) and point cloud models were then processed with different analyses tools in Geographic Information System (GIS), such as QGIS also including point cloud processing software (CloudCompare).

Our results document a piece of highly interesting information from its surface consisting of reliefs of four dolphins; there are at least four rectangular stamps: two of them with possible inscriptions, plus an anthropomorphic figure. Thanks to the comparative data, one conclusion is that the four dolphins were made with the same stamp during the stock manufacturing process. Furthermore, the authors were able to reconstruct the dolphin stamp, partially preserved in each of the reliefs, by unifying the 3D models, thus revealing the original set. This system of stamping by means of reusable dies is well known in other elements such as amphorae, but has not been studied in the specific case of lead traps.

Regarding the epigraphic elements, the 3D documentation methodology revealed numerous micro-surface details, not visible under conventional documentation techniques, which could help specialists to interpret these inscriptions. Although they have not been analysed in this research, its documentation has facilitated observing surface details that

* Corresponding author: Elisa Fernández Tudela, elisa.tudela@uca.es

could refer to the manufacturing processes (moulds and tools) or the traces of use, providing historical information on this object. Moreover, the virtual reconstruction of the anchor has promoted the formation of hypotheses on the anchor dimensions and original appearance.

The different tools used, such as raster analysis through shadow mapping and point cloud alignment, proved to be very effective. They have fulfilled the established objectives and have helped to design a possible analysis methodology for future lead traps with decorative elements. These types of artefacts recovered from underwater sites are very common in museum collections. In many cases, their state of conservation and the difficulty in handling them due to their size and weight make it difficult to document surface details. In this case, the multidisciplinary work of conservation and 3D documentation allows for high-quality documentation that is easy to access and exchange between researchers. The combined use of photogrammetric techniques with virtual RTI (V-RTI) provides a non-invasive method for the object, low cost and easy processing compared to other conventional methods.

Keywords: 3D recording; structure-from-motion (SfM) photogrammetry; geographic information system (GIS); virtual reflectance transformation imaging (V-RTI); hillshade; lead stock

Resumen:

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología de documentación y análisis llevada a cabo sobre un cepo de plomo de época antigua perteneciente a la colección de cepos del Museo de Cádiz (Andalucía, España). La eliminación de los diferentes estratos de alteración que cubría la superficie durante los tratamientos de conservación y restauración dejó al descubierto un conjunto iconográfico y epigráfico inédito, así como posibles huellas de fabricación y uso. Sin embargo, el estado de conservación deficiente de la superficie original no permitía visualizar los detalles en su conjunto mediante técnicas convencionales, por lo que se decidió el empleo de la documentación fotogramétrica y posterior tratamiento de los modelos mediante diferentes herramientas de análisis en Sistemas de Información Geográfica (SIG) como QGIS y procesamiento de nubes de puntos (CloudCompare). El análisis tridimensional (3D) viene siendo empleado con éxito en la documentación de detalles superficiales sobre objetos arqueológicos. La combinación de los métodos tradicionales con las ventajas de la fotogrametría ha demostrado una mejora sustancial del método. Los resultados obtenidos gracias a la metodología empleada sobre la pieza objeto de esta investigación han revelado detalles microsuperficiales del conjunto iconográfico y epigráfico imposibles de apreciar mediante técnicas de documentación convencionales. El bajo coste y la facilidad de aplicación, así como las posibilidades de procesamiento posterior de los datos obtenidos con diferentes programas, hacen de esta metodología una herramienta muy útil frente a otras técnicas. Los datos microsuperficiales obtenidos, junto con los obtenidos mediante la reconstrucción 3D, aportan una valiosa información para la interpretación del objeto. Las tareas llevadas a cabo también plantean una metodología de estudio eficaz para el análisis de otros cepos de plomo, una tipología de material muy abundante en colecciones de museos a lo largo de todo el Mediterráneo y parte del Atlántico y cuyo estudio permitirá conocer más sobre las anclas de época antigua, sus características morfológicas, procesos de fabricación, elementos epigráficos e iconográficos, mecanismos de alteración, etc.

Palabras clave: documentación 3D; fotogrametría SfM; Sistema de Información Geográfica (SIG); imágenes de transformación de reflectancia virtual (V-RTI); mapa de sombras; cepo de plomo

1. Introducción

Los cepos de plomo son piezas muy abundantes en colecciones de museos a lo largo de todo el Mediterráneo e incluso parte del Atlántico y Mar Negro (Bravo, b1976; Hristov, 2013). Junto con la caña, el zuncho y las uñas, formaban parte de la estructura de las anclas y cumplían la función de aportar peso y favorecer el agarre de estas en el fondo marino. El uso del plomo para la fabricación de cepos se conoce desde al menos el siglo VII a.C. y se extiende hasta el siglo III d.C., cuando se va sustituyendo por el hierro como material de fabricación de anclas (Haldane, 1984). La abundancia del plomo y sus características físico-químicas como la resistencia a la corrosión, la facilidad de fundirlo y su peso lo han hecho un material muy apropiado para el uso en actividades comerciales relacionadas con el medio marino, tales como la navegación y la pesca (Cano, 2003; Rosen & Galili, 2007).

Los cepos han sido objeto de estudio durante décadas por diferentes investigadores que han aportado información referente a las tipologías, posibles cronologías, procedencia de la materia prima, etc. (Bravo, a1976; b1976; Haldane, 1984; Kapitän, 1984; Kuleff, Djingova, Alexandrova, Vakova & Amov, 1995; Perrone, 1979).

Pese al elevado número de cepos registrados en los museos, en la mayoría de los casos se tratan de elementos sin contexto arqueológico por tres motivos: 1) recuperaciones no-documentadas; 2) expolios sistemáticos; o 3) hallazgos aislados. Este hecho ha dificultado en muchas ocasiones su estudio. Sin embargo, al inicio de este trabajo se ha podido constatar que en estas piezas hay diferentes aspectos e interrogantes (métodos de fabricación, análisis epigráficos e iconográficos, procesos de alteración, tratamientos de conservación, etc.) que están aún abiertos a la investigación y cuyo estudio podría ayudar a conocer mejor las anclas de época antigua y todos los aspectos relacionados con su origen, producción, cronología, rutas marítimas a las que se asociaban, etc.

En este sentido el cepo objeto de estudio depositado en el Museo de Cádiz presentaba un grave estado de conservación con riesgo de pérdidas por desprendimiento en diversos y valiosos elementos superficiales (marcas de uso y fabricación, relieves iconográficos y epigráficos). Esta circunstancia determinó la necesidad de intervenir el objeto para frenar la degradación y preservar su valor documental (Fig. 1).



(a)



(b)



(c)

Figura 1: Detalles de los elementos decorativos bajo los productos de alteración: a) Posible figura antropomorfa; b) Delfín; c) Cartela rectangular con posible inscripción.

La realización de un estudio del estado de conservación mediante técnicas de análisis (difracción de Rayos X, microscopio electrónico de barrido con microanálisis y microscopio óptico y mineralógico) seguido de un tratamiento de desconcreción controlado en toda la superficie, ha permitido dar a conocer lo que se podía intuir débilmente bajo los productos de alteración, un conjunto iconográfico y epigráfico de gran interés que aporta datos muy relevantes de cara a un estudio histórico-arqueológico del objeto.

La retirada de los diferentes estratos de alteración permitió conocer una superficie original con un estado de conservación aceptable en general pero muy alterada en algunas zonas puntuales. Dicha intervención venía justificada por la necesidad de visualizar los detalles originales subyacentes y así proceder a una correcta interpretación de los mismos (Fig. 2).

En este trabajo se expone la metodología llevada a cabo con el objetivo de documentar y visualizar el cepo como objetivo general y el conjunto iconográfico y epigráfico como objetivo específico.

2. Un cepo de plomo depositado en el Museo de Cádiz

2.1. Descripción tipológica

El cepo objeto de estudio forma parte de la colección de cepos de plomo del Museo de Cádiz. Se desconoce su procedencia exacta, pero se atribuye a la zona de La Caleta (Cádiz, Andalucía). El entorno subacuático que rodea la ciudad de Cádiz ha sido escenario de numerosos hallazgos durante décadas. Uno de los principales escenarios de estos se encuentra alrededor de la zona anteriormente citada (La Caleta) que engloba una serie de bajos rocosos en los que se han documentado numerosos cepos. Entre estos bajos, destaca por el número de cepos localizados en el mismo La Cepera, cuyo hidrónimo resume la historia de hallazgos de estos elementos (Fig. 3). Algunos de estos cepos aún se conservan *in situ*, pero lo mayoría han sido extraídos y un gran número de ellos permanecen depositados en el Museo de Cádiz (García & López, 1980).

El cepo objeto de estudio está fabricado en plomo en una sola pieza con medidas aproximadas de 129 cm de longitud x 19 cm de ancho x 17 cm de alto. Cuenta con dos brazos y una caja central hueca con vástago de plomo. La caja, de forma ligeramente rectangular, cuenta con un bisel en sus cuatro esquinas superiores, probablemente para favorecer la fijación a la caña de madera (Fig. 4). Se desconoce el peso real del cepo pero según otros cepos documentados en el Museo de Cádiz con similares características que han sido pesados estaría en torno a los 100 kg.

Según las dos clasificaciones más comunes nos encontramos ante un cepo de tipología Kapitän III.C y Haldane III.B. (Haldane, 1984; Kapitän, 1984). Según Haldane (1984) esta tipología se enmarcaría entre los siglos III a.C. y III d.C. Esta horquilla cronológica, que resulta muy amplia, podría intentar acotarse mediante un análisis histórico-arqueológico del conjunto iconográfico y epigráfico presente en el cepo objeto de estudio que conserva relieves de cuatro delfines, una figura antropomorfa y cinco cartelas, dos de ellas con aparente detalles de epígrafos conservados.

Para facilitar la descripción del conjunto hemos denominado las caras de los brazos que contienen los relieves como anverso y reverso, y a su vez como derecha e izquierda (Fig. 5).

El cepo cuenta con relieves en ambas caras de cada brazo. En la vista denominada anverso encontramos una disposición idéntica en ambas caras (derecha e izquierda). Esta consiste en dos cartelas con inscripciones y un delfín dispuestos en ese orden desde la caja hacia los extremos de los brazos (Fig. 5).

En el caso de la vista denominada como reverso no se puede apreciar el conjunto al completo al contar con un mal estado de conservación de la superficie original, especialmente en la cara izquierda. La cara derecha, mejor conservada, nos muestra una secuencia desde la caja hacia el extremo del brazo con una figura antropomorfa, un delfín, una cartela y relieves de lo que podría ser otra cartela (Figs. 5 y 6). En la cara izquierda se conserva un delfín en mal estado de conservación. Siguiendo el mismo patrón que los relieves del anverso,



Figura 2: Detalle de los cuatro relieves con representación de delfines donde se aprecia pérdida de superficie original: a) RD-2; b) RI-2; c) AI-3; d) AD-3.



Figura 3: Mapa de ubicación de la zona de procedencia de los cepos de plomo depositados en el Museo de Cádiz.

cabe suponer que esta cara debía contener los mismos relieves que la cara derecha, pero no se puede afirmar debido al mal estado de conservación de la superficie original.

La técnica de sellado en los relieves estudiados indica un proceso de manufactura indirecto. En las paredes verticales del molde realizado en arena o arcilla refractaria (Bravo, 1976; Haldane, 1984) se imprime la matriz del relieve mediante presión manual dejando una forma hueca o negativo del relieve. El plomo líquido

vertido sobre el molde reproduce una vez solidificado el conjunto del cepo con los sellos en relieve.

En algunos casos de cepos documentados con inscripciones, se aprecian trazos irregulares que sugieren que estas marcas fueron trazadas con punzón sobre el molde *en negativo* (Perea, 2004). En raras ocasiones se han documentado inscripciones mediante la técnica de incisión en frío, más habitual en contramarcados de lingotes de plomo (Ferrer & Sinner, 2019). Sin embargo, en otros casos, como es el cepo objeto de este estudio, se aprecian la impronta rectangular en los que se enmarcan inscripciones u otros relieves, lo que sugiere el empleo de cuños en el molde (Fig. 7).

La representación iconográfica de delfines en elementos históricos relacionados con el comercio y la navegación es algo muy común a largo de toda la Antigüedad clásica. En ocasiones se los relaciona, junto a otros atributos marinos, con el culto a diferentes divinidades, la navegación segura, el buen augurio o la riqueza derivada del comercio. Además, se ha relacionado con la expresión de la potencia comercial de ciudades marítimas (Martínez, 2011), como es el caso de Carthago Nova, donde encontramos delfines sellados en los lingotes de plomo procedentes de sus minas o sus acuñaciones monetarias.

3. Metodología de documentación

Para llevar a cabo estos objetivos se ha optado por el empleo de la documentación fotogramétrica basada en la técnica Structure from Motion (SfM) para la



Figura 4: Vistas generales del cepo objeto de estudio.

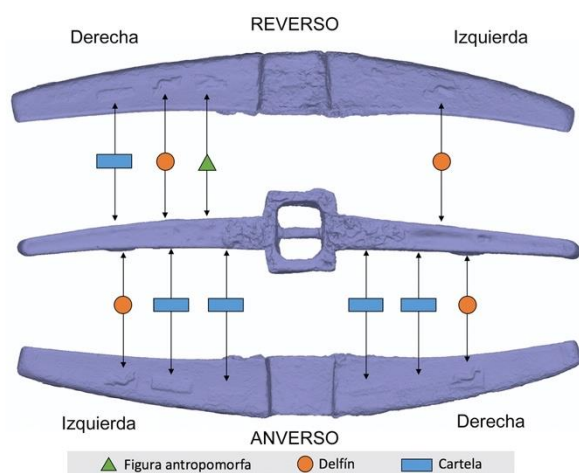


Figura 5: Esquema disposición conjunto iconográfico.

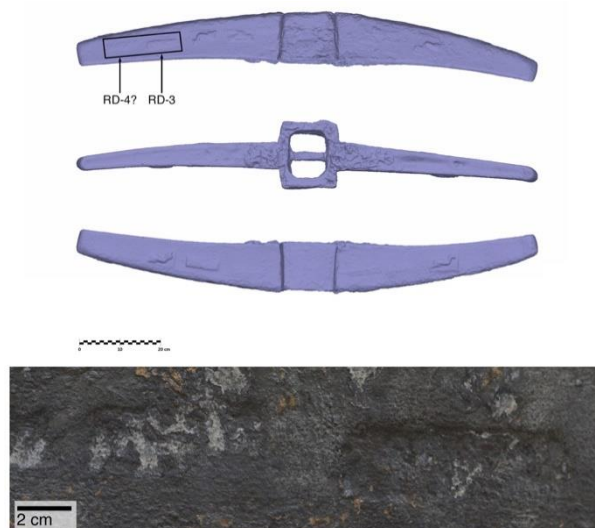


Figura 6: Posible cartela en mal estado de conservación.

generación de modelos 3D de alta resolución. Estos modelos se han trabajado posteriormente con diferentes programas de procesamiento de nube de puntos 3D, como son [CloudCompare v. 2.10.2](#), análisis SIG ([QGIS v. 3.10](#)); modelado 3D ([Blender v. 2.79](#)) y edición 2D ([Photoshop CC 2017](#) y [AutoCAD 2016](#)).

Para llevar a cabo el análisis de los detalles del conjunto se han empleado técnicas de visualización con SIG a partir de los MDE generados de la nube de puntos densa.

Para ello se ha optado por el uso del programa libre QGIS (v. 3.10). Este programa, al igual que otros como

Meshlab o CloudCompare, permite aplicar sobre una malla o una nube de puntos densa diferentes herramientas como MRM (Morphological Relief Model); RTI (Reflectance Transformation Imaging); o APSS (Algebraic Point Set Surfaces) para visualizar y analizar relieves microtopográficos ([Torregrosa-Fuentes, Spairani, Huesca, Cuevas & Torregrosa, 2018](#)).

Adicionalmente ha sido empleado el programa CloudCompare v. 2.10.2 para el análisis de cuatro de los relieves a partir de las nubes de puntos densas.

Diferentes metodologías y protocolos de documentación 3D, así como las herramientas anteriormente citadas

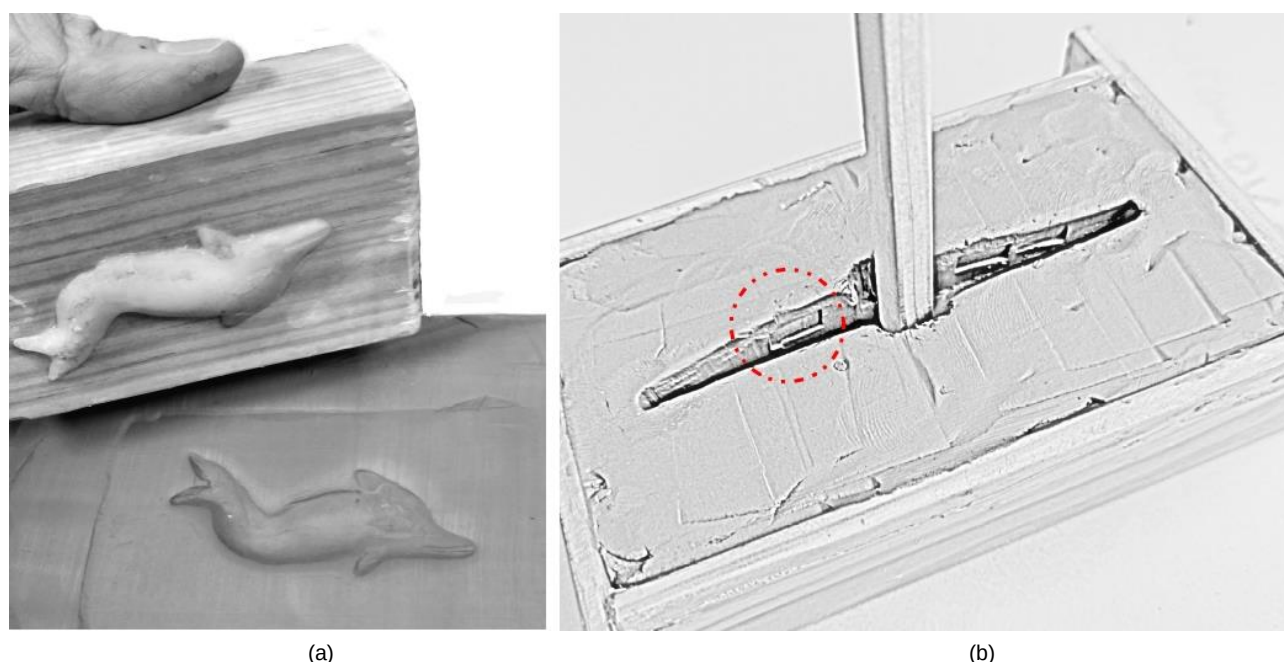


Figura 7: Posible proceso de fabricación y sellado: a) Detalle de la impronta de la figura iconográfica en negativo sobre la pared del molde realizada con un cuño; b) Localización de la impronta en el molde preparado para recibir la colada de plomo. Proceso realizado por Luis C. Zambrano.

han sido empleadas en diferentes investigaciones recientes dando buenos resultados en la documentación y visualización de elementos en los que la documentación 2D tradicional resultaba insuficiente, permitiendo desarrollar diferentes metodologías para el estudio de arte prehistórico (Cerrillo-Cuenca, Bueno-Ramírez & Balbín-Behrmann, 2019; Torregrosa-Fuente, *et al.*, 2018), elementos epigráficos e incisiones en diferentes soportes (Andreu & Serrano, 2019; Carrero-Pazos & Espinosa-Espinosa, 2018; Solem & Nau, 2020; Valente & Barazzetti, 2020), sellos anfóricos (Lech, Matera & Zakrzewski, 2021), superficies en objetos arqueológicos (Fiorini, 2018), o incluso microdetalles en textiles arqueológicos (Goldman, Linn, Shamir, & Weinstein-Evron, 2018) o marcas de huellas dactilares (Bennison-Chapman & Hager, 2018).

3.1. Registro fotogramétrico

El registro fotogramétrico se ha realizado en diferentes fases de trabajo:

- Fase 1. Previa al tratamiento de desconcreción. Objetivo: obtención del modelo 3D para el análisis morfológico y la reconstrucción 3D del ancla.
- Fase 2. Tras el tratamiento de conservación. Objetivo: obtención del modelo 3D general con los detalles superficiales.
- Fase 3. Detalles de los motivos iconográficos. Objetivo: documentación de alta resolución de los detalles microsuperficiales.

Las fases de trabajo de interés para esta investigación han sido la Fase 1 y la Fase 3. La Fase 2 se realizó con el objetivo de obtener una visión general del cepo, su conjunto iconográfico y epigráfico y los detalles superficiales una vez desconcrecionado.

Para el proceso de documentación se ha empleado diferente equipamiento (Tabla 1) y herramientas (trípode, iluminación led, escalas y dianas).

Para asegurar una correcta resolución y adquisición de los detalles superficiales se ha fijado como objetivo un GSD (*Ground Sampling Distance*) menor a 0.5 mm/pix (Fases 1 y 2) y menor a 0.2 mm/pix (Fase 3), teniendo en cuenta que el valor de GSD debe ser 2-3 veces menor al tamaño real del detalle más pequeño a documentar (Nicolae, Nocerino, Menna, & Remondino, 2014).

Durante la Fase 1 se tomaron un total de 198 fotografías con una distancia media hasta el objeto de 55-60 cm para obtener el GSD deseado, con un tamaño de imagen de 4032x3024 píxeles, apertura de diafragma f/2,2, tiempo de exposición 1/35, ISO 64.

Tabla 1: Detalles equipamiento fotográfico.

	Cámara	Sensor (mm) (MP)	Objetivo
Fase 1	IPHONE SE	35x29 (12)	f/2,2
Fase 2	NIKON D610	DX 35,9 x 24,0 (24,3)	AF-S NIKKOR 60 mm f/2.8 AF
Fase 3	SONY ILCE- 6000	APS-C 23,5x15,6 (24,3)	Sony E de 16- 55mm f3.5-5.6 OSS

Para la Fase 2 se realizaron 81 tomas a una distancia hasta el objeto de 90 cm, con un tamaño de imagen de 6016x4016 píxeles, apertura de diafragma f/4, tiempo de exposición 1/250, ISO 450, distancia focal 55 mm f/3.5. Se empleó un trípode para favorecer la estabilidad de la cámara y permitir una distancia entre el objeto y la cámara fija.

Para la Fase 3 se seleccionaron 10 zonas de interés donde se podían apreciar detalles iconográficos y epigráficos. Las zonas se han documentado por separado para realizar un estudio de los detalles superficiales en profundidad de cada una de ellas. Cada zona se ha clasificado (anverso/reverso y derecha/izquierda) y numerado para facilitar la gestión y lectura de la información a lo largo de la investigación (Fig. 8).

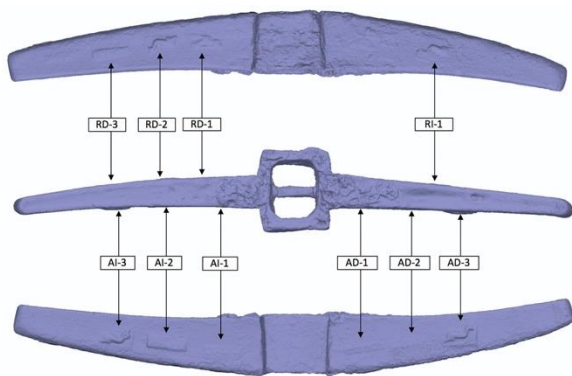


Figura 8: Esquema nomenclatura asignada.

Los parámetros de la cámara han sido resolución 6000x4000 píxeles, apertura de diafragma f/4, tiempo de exposición 1/60, ISO 125, distancia focal 16 mm f/3.5. En todos los casos se ha optado por una distancia entre la cámara y la superficie del cepo de entre 30 y 40 cm.

Para la Fase 1 se ha realizado una sola toma de imágenes obteniendo un único modelo fotogramétrico que ha quedado abierto en la parte inferior. Esta decisión ha estado definida por la finalidad de este primer modelo 3D que no precisaba de un modelo cerrado con precisión y la imposibilidad de moverlo en el momento de la toma de datos. En el caso de la Fase 2 se han realizado dos procesos de toma de imágenes con dos posiciones diferentes del cepo, dando lugar a dos nubes de puntos que posteriormente han sido alineadas, obteniendo así un modelo cerrado. Para ello el cepo se ha posicionado sobre cada una de las dos caras laterales de la caja. La Fase 3 se ha llevado a cabo mediante la documentación individualizada de las 10 zonas de interés como ya se ha especificado anteriormente, obteniéndose 10 modelos fotogramétricos.

Para la obtención de la nube de puntos y malla en 3D (Fases 1-3) y MDE de los de modelos 3D (Fase 3) se ha empleado el programa [Agisoft PhotoScan](#). En todos los casos la metodología seguida ha sido la misma.

Los parámetros de orientación de las fotos en el caso de los modelos de la Fase 1 y Fase 2 se han realizado con precisión media y parámetros de reconstrucción de la nube de puntos densa de calidad alta. Se han aplicado máscaras en todas las fotografías para obtener una nube de puntos densa más limpia. Los modelos se han escalado manualmente empleando la escalas métrica de 30 cm incluida en la tomas fotográficas. Para comprobar la eficacia del escalado del modelo fotogramétrico se han comprobado medidas conocidas del objeto, como la altura y anchura de la caja. Una vez obtenidos los modelos se han exportado en formato .OBJ para su trabajo en otros programas. En el caso de la Fase 1 se ha realizado retopología del modelo 3D para facilitar su manejo. Este proceso ha consistido en reducir y ordenar la geometría del modelo 3D original mediante el uso de la herramienta [Instant Meshes](#), permitiendo así obtener un modelo 3D menos pesado. A este modelo posteriormente se le pueden proyectar las texturas originales mediante Blender, quedando un modelo más fácil de manejar debido a su menor tamaño pero sin perder detalles.

En el caso de la Fase 3, de mayor interés para el objetivo principal de esta investigación, se ha optado por una precisión de orientación máxima y una calidad en la nube de puntos densa extra alta (Tabla 2). Para esta fase se han empleado 3 dianas de 3 mm (codificación de 12 bits) generadas por el mismo programa e impresas en papel (Fig. 9).

Estas mismas dianas se han empleado para escalar manualmente los modelos y para la introducción de 3 puntos mínimos de coordenadas relativas necesarios para poder generar el MDE. Una vez detectadas las dianas mediante la herramienta de detección de dianas de PhotoScan, y conociendo las distancias entre los puntos y el tamaño de las dianas, se han escalado y posicionado los modelos. Para el escalado se ha empleado el método de distancia entre targets o dianas (Fig. 9) con una precisión media de 0.001 (m).

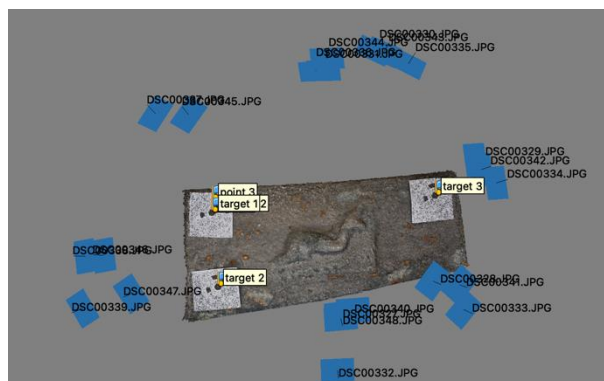


Figura 9: Nube de puntos densa con dianas.

Para establecer el plano de referencia de los modelos de la Fase 3, necesarios para la generación del MDE, se ha empleado una de las dianas en cada uno de los modelos. Para ello se han establecido tres marcadores sobre la diana, uno en el centro y dos en los extremos de la zona coloreada de las dianas que coinciden con un ángulo de 90° a 0.01 (m) respecto al centro. El marcador central corresponde con las coordenadas XYZ de 0.00 (m) mientras que los otros dos se posicionan uno en el eje X y otro en el eje Y, ambos a 0.01 (m) respecto marcador central, quedando así establecido el plano de referencia para generar el MDE.

Los MDE se han generado a partir de las nubes de puntos densas en lugar de a partir de las mallas 3D. Esto se debe a que, a pesar de obtenerse mejores resultados a partir de las mallas 3D, los MDE obtenidos a través de puntos ofrecen menor detalle pero son más precisos al evitarse la simplificación de los procesos de generación de mallas ([Torregrosa-Fuente et al., 2018](#)).

3.2. Análisis y visualización de los detalles iconográficos y epigráficos con diferentes programas

3.2.1. QGIS

Una vez obtenidos los MDE de los modelos fotogramétricos de la Fase 3, se exportaron en formato .TIFF para trabajarlos con el programa QGIS. En este caso hemos optado por la herramienta RTI virtual (V-RTI). Esta técnica se basa en la iluminación interactiva de la pieza dando como resultado diferentes reflejos y sombras, mediante iluminación virtual.

Tabla 2: Parámetros del proceso fotogramétrico de la Fase 3.

	ANVERSO				
	Cámaras	Puntos de enlace	Proyecciones	Error re-proyección (pix)	Puntos nube densa
AD-1	34	28.931	89.534	0.986	4.994,157
AD-2	34	30.421	108.504	0.673	4.971,154
AD-3	22	25.182	76.591	0.616	5.771,369
AI-2	23	11.802	39.203	0.598	3.009,799
AI-3	24	16.079	49.731	0.659	3.793,020
	REVERSO				
RD-1	28	17.849	58.286	0.709	7.294,629
RD-2	23	17.803	63.114	1.68	7.030,484
RD-3	27	19.407	57.916	0.724	5.616,519
RI-1	30	17.855	62.579	0.777	6.570,182

En el caso del programa QGIS se ha empleado el plugin *Terrain shading* que incluye las herramientas usadas de análisis del terreno ráster: mapa de sombras (*hillshade*), *relieve* y *sky-view factor*. Entre las diferentes herramientas, el mapa de sombras nos ha permitido obtener los mejores resultados a la hora de analizar los detalles iconográficos, en especial en el caso de las cartelas con posibles inscripciones.

En todos los casos la metodología llevada a cabo ha consistido en importar los archivos .TIFF, y posteriormente extraer la zona ráster mediante extensión de corte para seleccionar la zona de estudio. Una vez seleccionada la zona se le ha aplicado la herramienta mapa de sombras a través de las propiedades de capa. Dentro de los parámetros de renderizado de estas herramientas se pueden modificar algunos factores que hacen referencia a la iluminación como la altitud, el ángulo de orientación sobre la superficie (azimut) o el factor Z. Además, se pueden modificar los factores del color de render como el modo de mezcla, el brillo, el contraste, la saturación o la mezcla de colores. Una de las ventajas de esta técnica es que la variación de los valores permite resaltar detalles microsuperficiales difíciles de apreciar a simple vista. Esto nos permite conocer detalles como el tamaño y forma de los posibles cuños y realizar hipótesis y comparaciones entre los diferentes elementos del conjunto decorativo. En este sentido esta herramienta resulta de gran utilidad a la hora de estudiar posibles detalles epigráficos (Carrero-Pazos et al., 2018). En nuestro caso contábamos con cuatro cartelas bien definidas de aproximadamente 9 cm de ancho por 3 cm de alto y otra posible cartela en mal estado de conservación (Fig. 6). El principal objetivo ha sido intentar documentar estas inscripciones con la intención de permitir un estudio más detallado del conjunto iconográfico y epigráfico.

La metodología a seguir ha sido la misma detallada anteriormente obteniéndose los mejores resultados con la herramienta mapa de sombras de QGIS (Fig. 10).

3.2.2. CloudCompare

Este programa se ha empleado para el análisis de los relieves de los cuatro delfines (RD-2, RI-1, AD-3 y AI-3). Cada una de las figuras se encuentran enmarcadas en



Figura 10: Herramienta hillshade aplicada con diferentes parámetros sobre un mismo MDE.

un rectángulo que se corresponde con la impronta del cuño usado en el proceso de fabricación. Cada uno de los elementos contaba con un estado de conservación diferente en el que se había perdido información, no pudiéndose apreciar en su totalidad en ninguno de los casos.

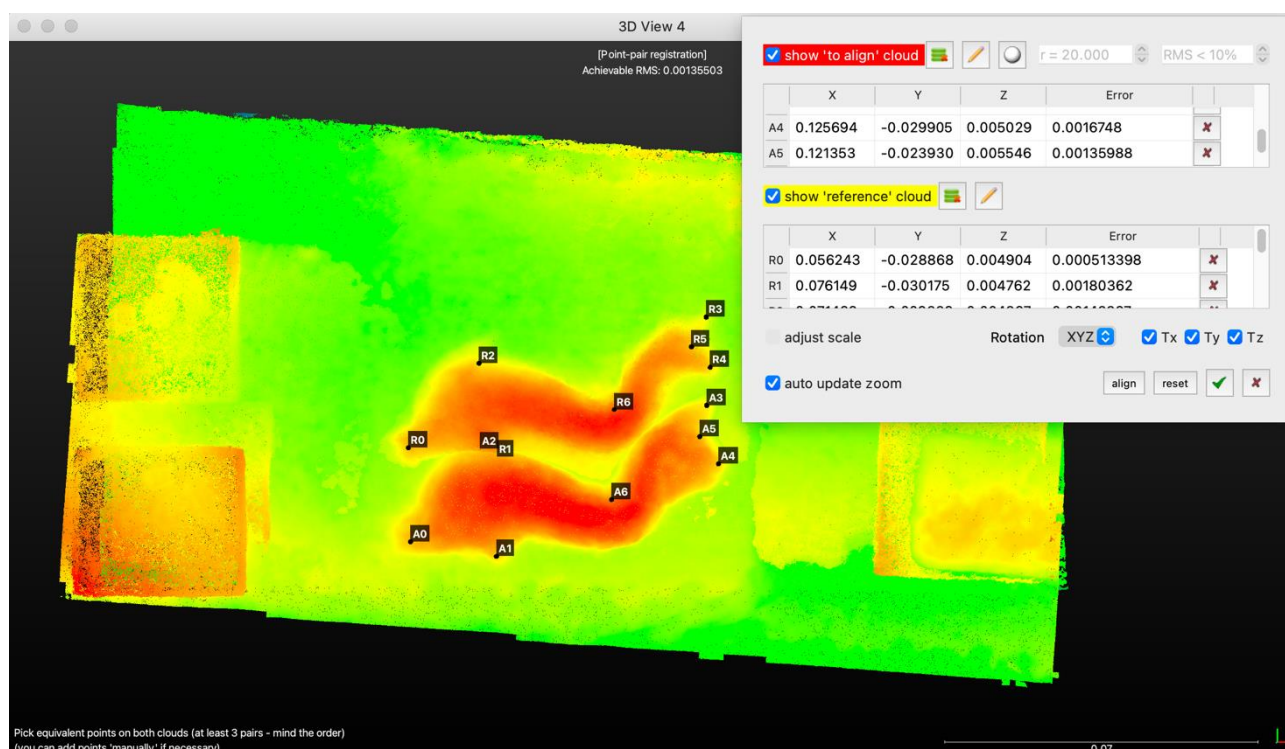


Figura 11: Proceso de alineación de nubes de puntos densa en CloudCompare con una precisión media de 1 mm.

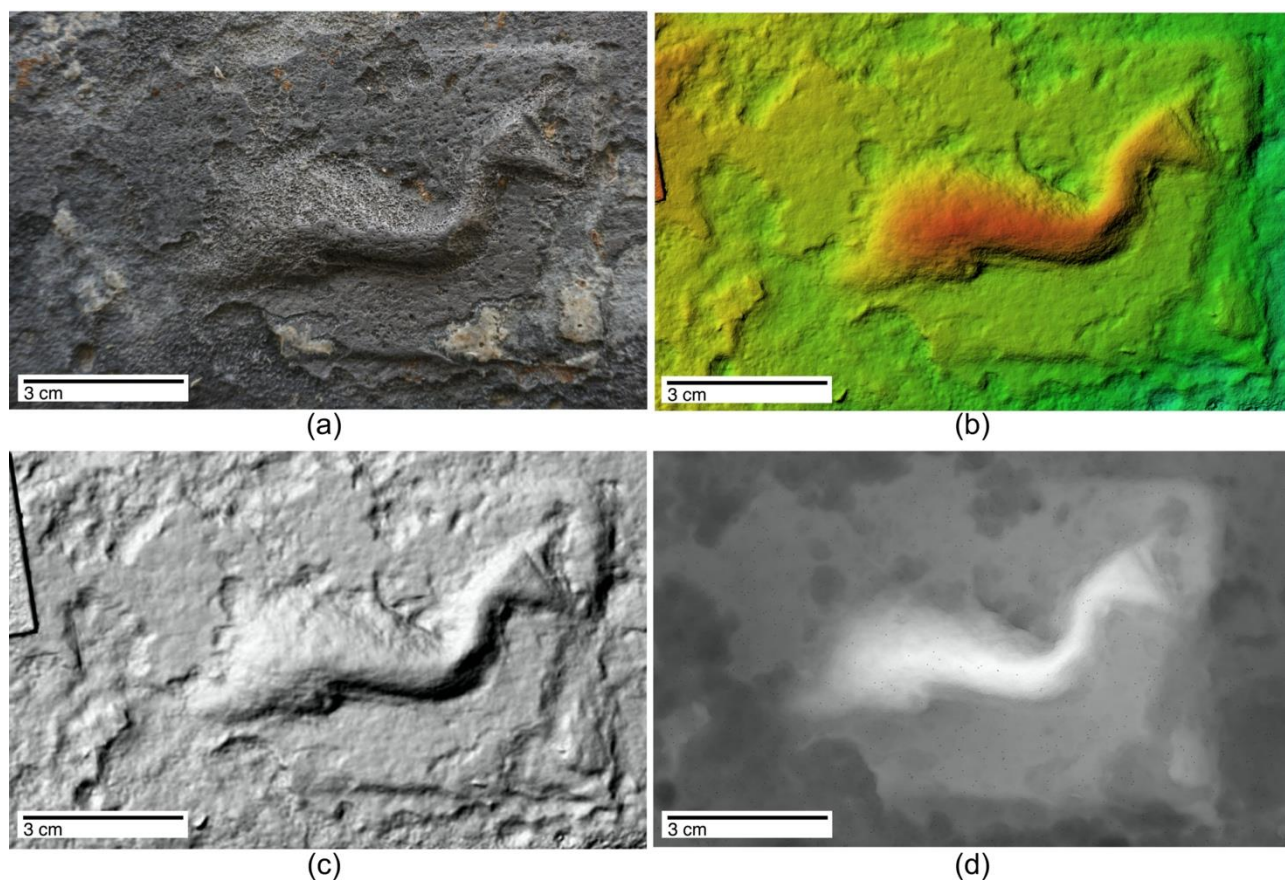


Figura 12: Documentación del relieve del delfín RI-2. (a) Imagen real; (b) MDE obtenido con PhotoScan; (c) Shillshade QGIS; (d) visualización mediante la variación de la escala de representación en CloudCompare.

El objetivo del uso de CloudCompare ha sido identificar los detalles de estos relieves y establecer un posible origen a partir del mismo cuño.

La metodología ha consistido en la alineación de las nubes de puntos mediante la herramienta *alinear* de CloudCompare. Este proceso consiste en identificar al

menos cuatro puntos comunes de las dos nubes de puntos a alinear. En este caso se han identificado elementos comunes conservados en los sellos, como por ejemplo los extremos de las colas de los delfines, el inicio de la aleta superior o la aleta inferior, todos estos elementos se conservan en mayor o menor medida en cada uno de los cuatro relieves (Fig. 11). En este proceso no fue necesario reescalar los modelos ya que ya habían sido escalados en PhotoScan. Previamente a la alineación se han exportado las coordenadas en Z, también asignadas en PhotoScan, para la escala de visualización (scalar field). De esta forma se genera una visión a modo de MDE de la nube de puntos teniendo en cuenta la coordenada en Z. Una vez alineadas las

nubes se han aplicado diferentes escalas de representación para mejorar la visualización de los detalles microsuperficiales (Fig. 12).

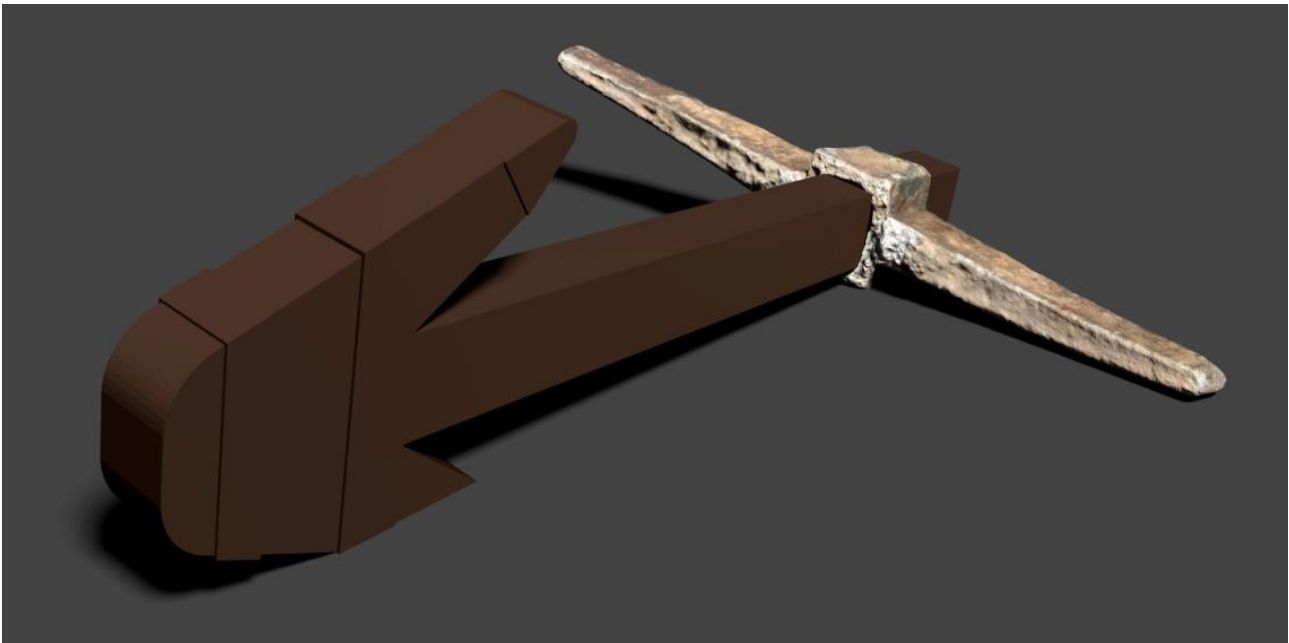
Los resultados obtenidos de los cuatro relieves han sido posteriormente combinados mediante programa de edición gráfica (Adobe Photoshop CC 2017).

3.3. Análisis volumétrico del modelo 3D

La Fase 1 de documentación durante las etapas iniciales de la investigación tuvo el objetivo de analizar tanto los aspectos estructurales del cepo como la sección de la caña o el tamaño que debió de tener el ancla a través de la anastilosis virtual con Blender.



(a)



(b)

Figura 13: Reconstrucción virtual: a) posición del cepo y la caña durante el proceso de fabricación; b) posición del ancla en el fondo marino. Elaboración propia a partir de Hadas, 2005.

La anástilosis virtual consiste en la reconstrucción virtual de los elementos faltantes del objeto a través de los elementos conservados y conocidos (Bravo, 1976; Kapitän, 1984). Para llevar a cabo esta reconstrucción a escala se empleó el estudio realizado en un ancla hallada casi completa a excepción del cepo de plomo (Hadas, Liphshitz & Bonani, 2005). Este hallazgo excepcional nos ayuda a entender la estructura de un ancla de estas características ya que conserva toda su estructura principal, incluyendo la caña y el travesaño de madera que habría quedado en el interior del cepo de plomo una vez fabricado. Durante este proceso se han empleado los programas AutoCAD 2016 para realizar un plano con las medidas escaladas y Blender para realizar una reconstrucción del ancla (Fig. 13).

4. Discusión

A la hora de analizar los relieves se han obtenido mejores resultados mediante el uso de herramientas de análisis del terreno ráster, en especial del mapa de sombras. Los parámetros aplicados que han aportado mejores resultados han dependido de las características de los relieves. Para el estudio de las cartelas con posibles inscripciones la aplicación de estas herramientas de manera conjunta ha permitido conocer más detalles como los posibles elementos epigráficos (Figs. 14 y 15), que presentan cierta similitud con los documentados en un cepo de plomo con inscripciones neopúnicas datado en torno al siglo I a.C. (Chatonnet, 2007), las características de los cuños empleados o la posible presencia de relieves en zonas peor conservadas (Fig. 16). Un análisis histórico-arqueológico de esta información recuperada podría ayudar a acortar la horquilla cronológica propuesta según su atribución tipológica (Haldane, 1984), ya que los elementos iconográficos y epigráficos que presenta nuestro cepo permiten proponer una cronología para el mismo entre el siglo III a.C. y el I a.C. Como resultado del tratamiento aplicado, se mejora notablemente la posible lectura de la epigrafía presente en los elementos sellados, y aunque no es el objeto concreto del trabajo, se refuerza la propuesta de interpretarlos como una grafía púnica, similar a las registradas de manera más usual sobre la producción anfórica púnica (Ramon, 1995), pues es posible identificar caracteres compatibles con el alfabeto neopúnico.

En el caso de elementos con mayor volumen como los delfines, los mapas de sombras han permitido resaltar diferentes detalles que resultaban difíciles de observar *in situ* como los márgenes de las cartelas o ciertos elementos de las figuras del relieve (Fig. 10). Sin embargo, esta herramienta resulta insuficiente en relieves con demasiados detalles al no permitir visualizar de manera conjunta todos los detalles en una misma imagen. En este sentido el programa CloudCompare nos ha aportado una mejor visualización de estos elementos.

La posibilidad de alinear las nubes de puntos densa mediante elementos conservados nos ha permitido demostrar que se trata de un mismo cuño empleado para la fabricación del cepo. Esta herramienta permite determinar las zonas comunes de las diferentes figuras, así como las zonas faltantes o peor conservadas (Fig. 17).

Otras herramientas propias del programa CloudCompare, empleadas en diferentes estudios para comparar nubes de puntos de un mismo modelo (Cerrillo-Cuenca et al., 2019; López-Martínez et al., 2018), no han sido empleadas en esta investigación, pero podrían resultar útiles en un futuro a fin de evaluar la similitud entre relieves realizados con un mismo cuño en diferentes objetos. Para ello sería necesario establecer una metodología de trabajo que incluya una toma de datos muy precisa de los diferentes relieves. La creación de una base de datos de modelos de nubes de puntos densa permitiría realizar este tipo de investigaciones entre diferentes cepos.

La visualización de los relieves bajo diferentes parámetros de representación ha permitido combinar las zonas mejor conservadas de cada uno de los elementos, dando como resultado una visión más completa del sello. Se ha podido documentar un sello rectangular de 13 cm de ancho por 9 cm de alto aproximadamente con la figura de un delfín con unas dimensiones de 11 cm de ancho por 6 cm de alto (Fig. 18).

Las Fases 1 y 2 de trabajo enfocadas a conocer las características estructurales del cepo de manera general, han permitido formular una hipótesis del posible tamaño del ancla. Gracias a la reconstrucción virtual de todos los elementos faltantes nos hacemos una idea de un ancla de aproximadamente 2.20 m de longitud incluyendo todos sus elementos (Fig. 13). Esto debe tomarse como un dato muy general ya que se ha realizado a partir de un paralelo de ancla que conservaba los elementos de madera (caña, brazos y travesaño), pero no el cepo.

Los trabajos llevados a cabo en la Fase 3 nos han permitido documentar y analizar en profundidad los elementos superficiales del cepo. El principal objetivo, que era ampliar la calidad del registro documental, ha sido posible gracias al empleo de herramientas SIG y de gestión de nubes de puntos.

Estas herramientas resultan de gran interés para documentar otros detalles superficiales no previstos como son las marcas de fabricación y uso descubiertas sobre el objeto. En esta línea de investigación podemos encontrar estudios realizados sobre las marcas incisas en roca que buscan determinar mediante el análisis de la documentación 3D el uso de herramientas líticas o metálicas (Zotkina & Kovalev, 2019). Poder documentar el conjunto de estos detalles superficiales y compararlos con otros cepos que presentan marcas similares podría aportar datos sobre el uso útil o sobre los procesos de fabricación de estos objetos. Esta interesante línea de investigación, que no es objeto de este trabajo, requeriría de una base de datos amplia de marcas sobre plomo.

La metodología habitual para llevar a cabo la técnica de RTI es mediante el uso de toma de datos con una cámara, una bóveda oscura, diferentes puntos de iluminación y esferas que se colocan en la superficie a documentar. Este método tradicional tiene algunas desventajas como la dificultad de documentar ciertas superficies curvas o la limitación de posprocesado de la documentación final (Solem & Nau, 2020).

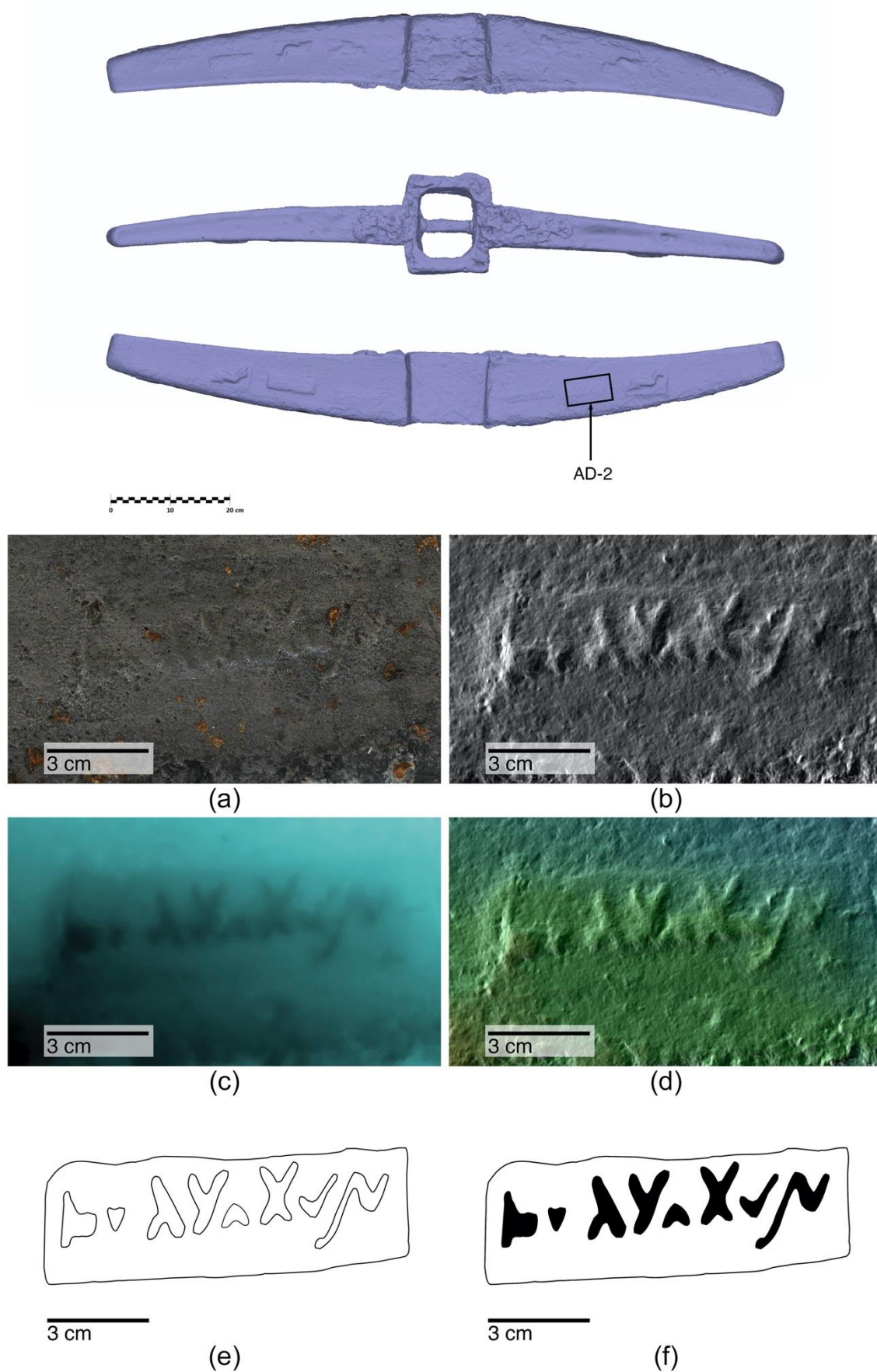


Figura 14: Detalles de la cartela con sello epigráfico (AD-2): a) Fotografía; b) MDE + Hillshade; c) MDE + color + incremento de contraste; d) Hillshade modo mezcla con MDE; e) y f) Dibujo.

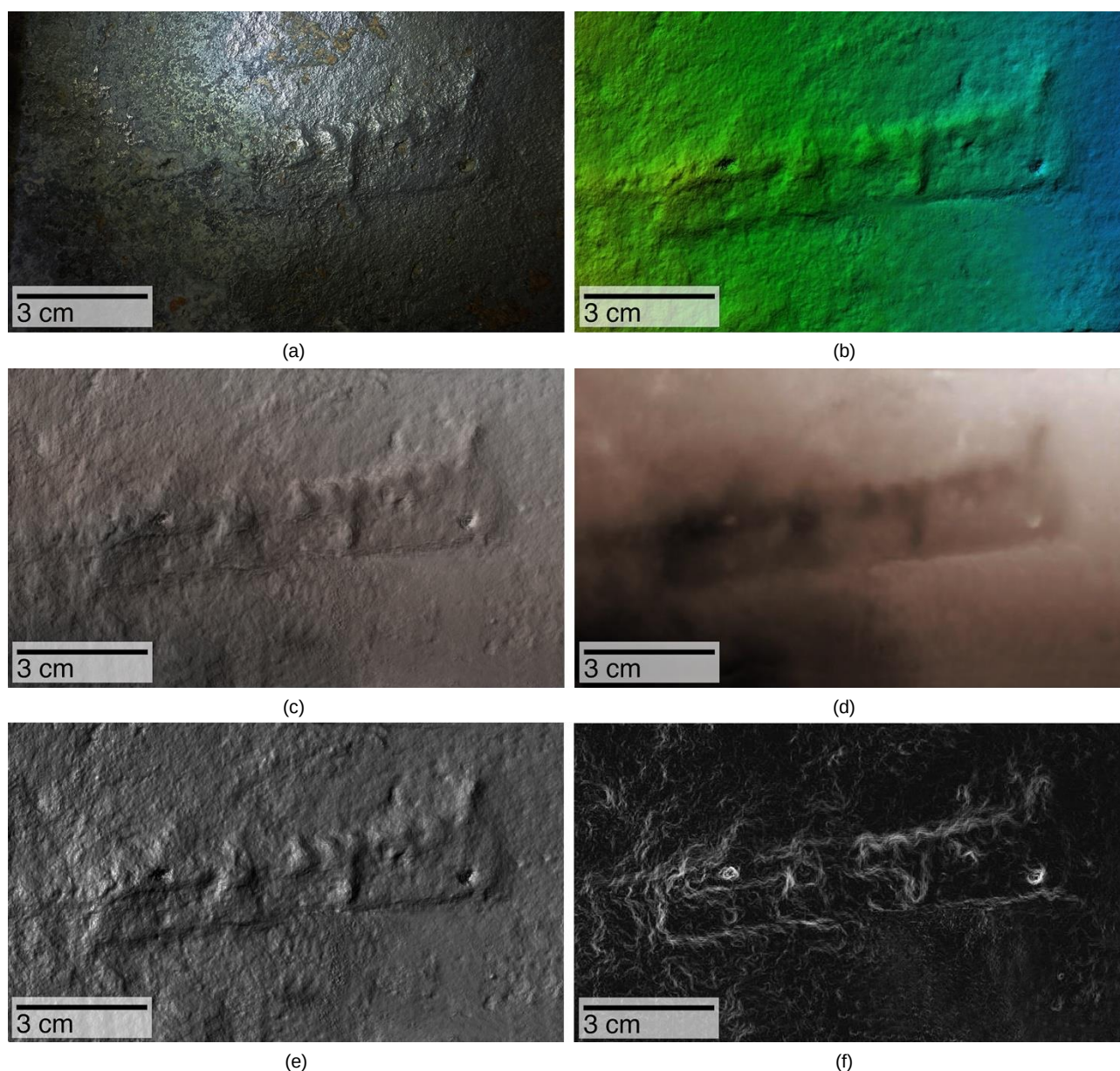


Figura 15: Detalles de la cartela con sello epigráfico (AD-1): a) Fotografía; b) MDE; c) Sky-view factor; d) MDE + color + incremento de contraste; e) Hillshade con factor Z 2; f) Hillshade multidireccional y aumento de factor Z.

El uso combinado del V-RTI junto a otras técnicas de procesamiento de imagen ha supuesto una óptima metodología a la hora de documentar el cepo. A pesar de suponer una pérdida de resolución en los resultados finales frente al método RTI tradicional (Solem & Nau, 2020), el bajo coste económico y la facilidad de aplicación, así como las posibilidades de procesamiento de la información posterior con diferentes programas hace que las ventajas suplan la pérdida de precisión. Al mismo tiempo se facilita el intercambio dinámico de datos entre investigadores.

Otro de los aspectos interesantes que brindan los procesos fotogramétricos es la posibilidad de realizar cálculos volumétricos a partir de los modelos 3D. Sin embargo, en estos cálculos entran en juego numerosas variantes (estado de conservación, detalles estructurales, dimensiones reales, etc.) (Poigt, 2015) que condicionan la exactitud de los resultados. Por lo que resulta sencillo obtener resultados erróneos,

que se magnifican de no establecer con rigor la escala de los modelos.

El proceso de reescalado de los modelos no solo afecta a los cálculos volumétricos, sino que es crucial a la hora de llevar a cabo procesos como la comparación de nubes de puntos o el análisis de los MDE. En este sentido la metodología de reescalado mediante el uso de escalas métricas y distancias entre dianas ha resultado suficiente, siendo necesario depurar la técnica en un futuro en el caso de llevarse a cabo cálculos volumétricos de los modelos.

5. Conclusiones

Las técnicas digitales de documentación suponen métodos no invasivos que permiten analizar y estudiar los diferentes elementos aportando una herramienta complementaria a las técnicas convencionales como el dibujo, la fotografía o el calco. Independientemente de la imprescindible interpretación del investigador a la

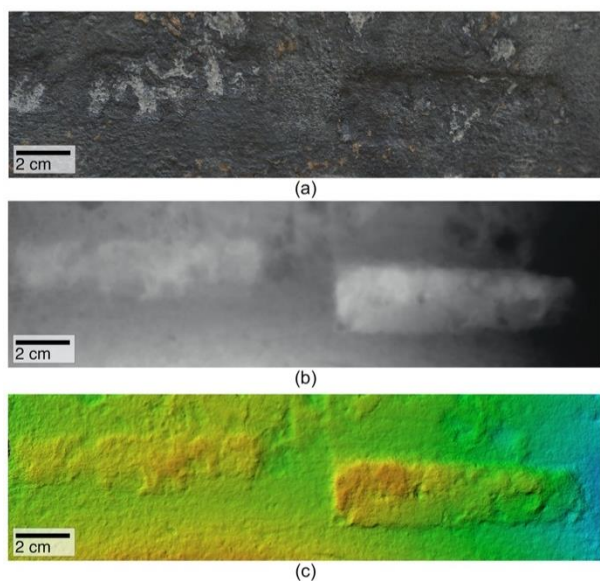


Figura 16: Detalles de cartela (RD-3) y posible restos de cartela: a) Fotografía; b) MDE (en escala de grises); y c) MDE.

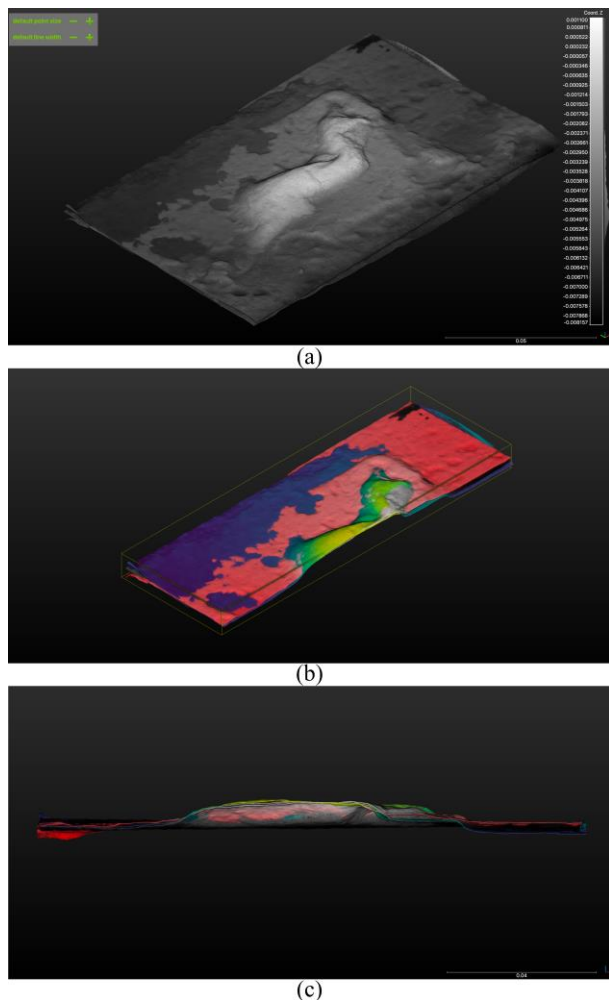


Figura 17: Nubes de puntos densas: a) Alineación de los cuatro relieves de delfines mediante detalles conservados; b) Sección transversal de las nubes en diferentes tonalidades donde se observan las diferencias en las zonas peor conservadas; c) Visión frontal de la sección.



Figura 18: Imagen resultado de la combinación de los cuatro relieves de delfines.

hora de analizar y estudiar los resultados obtenidos, la documentación 3D permite ampliar la información adquirida en el proceso objetivo de recogida de datos. Esto permite sin duda llegar a un análisis más en profundidad.

En el caso del cepo de plomo objeto de estudio, la metodología llevada a cabo ha permitido documentar y visualizar un conjunto iconográfico y epigráfico inédito compuesto por cuatro relieves de delfines; una figura antropomorfa; cinco cartelas, dos de ellas con elementos epigráficos parcialmente conservados y una posible cartela muy alterada.

El trabajo realizado ha permitido ofrecer nuevos datos sobre el cepo de plomo que hasta ahora no se conocían. Los datos obtenidos abren la posibilidad a un estudio mejor documentado que permita interpretar cuestiones como las marcas epigráficas o las posibles marcas de uso o fabricación. Además, la metodología de digitalización mediante técnicas no intrusivas de este y de otros cepos con características similares podría servir para crear una base de datos que ayude a comparar y analizar los diferentes detalles superficiales en especial la epigrafía sellada.

La reutilización de cuños es muy común en la cultura material antigua sobre el conjunto denominado *instrumentum domesticum*. Un ejemplo es el caso de la producción de envases cerámicos. En este sentido es de esperar que se reutilicen durante el proceso de fabricación, no solo como hemos visto en el caso de un mismo cepo, si no en otros del mismo fabricante o dueño.

Si bien los resultados obtenidos han sido en general buenos, en algunos de los modelos documentados se aprecia aún una falta de resolución y precisión que impide visualizar algunos elementos. En este sentido, con una toma de datos con fotografías de mayor calidad y resolución se podrían obtener mejores resultados, disminuyendo el ruido de los modelos 3D y evitando así la aparición de detalles superficiales erróneos. Esto podría conseguirse mediante la mejora de la planificación y configuración de la toma de datos, así como la selección de instrumental específico como lentes macro o cámaras de mayor resolución, lo que permitiría establecer un menor GSD (del orden de las micras) ayudando a identificar con más nitidez los detalles superficiales.

Se plantea la puesta en marcha de una metodología que determine el volumen de estos objetos partiendo de los modelos fotogramétricos. Estos trabajos serían útiles para hacer una estimación acertada de la masa de los cepos sin necesidad de recurrir a las peligrosas manipulaciones de estos objetos.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades, Agencia Estatal de Investigación y la Unión Europea bajo el proyecto financiado EQC2018-004947-P.

Referencias

- Andreu, J., & Serrano, P. (2019). Contributions of the digital photogrammetry and 3D modelling of Roman inscriptions to the reading of damaged tituli: An example from the Hispania Tarraconensis (Castiliscar, Saragossa). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 12, e00091. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00091>
- Bennison-Chapman, L. E., & Hager, L. D. (2018). Tracking the division of labour through handprints: Applying Reflectance Transformation Imaging (RTI) to clay 'tokens' in Neolithic West Asia. *Journal of Archaeological Science*, 99, 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2018.09.004>
- Bravo, J. (1976a). Evolución y técnica en la construcción de anclas antiguas. En *Ancorae Antiquae I*. Ceuta: Sala Municipal de Arqueología.
- Bravo, J. (1976b). *Cepos de anclas con relieves recuperados en el Mediterráneo Occidental*. En *Ancorae Antiquae I*. Ceuta: Sala Municipal de Arqueología.
- Cano, A. I. (2003). Aproximación al estudio de la minería del plomo en Extremadura y sus usos en época romana. *Bolskan: Revista de arqueología del Instituto de Estudios Altoaragoneses*, (20), 119-130.
- Carrero-Pazos, M., & Espinosa-Espinosa, D. (2018). Tailoring 3D modelling techniques for epigraphic texts restitution. Case studies in deteriorated Roman inscriptions. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 10, e00079. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2018.e00079>
- 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>
- Cerrillo-Cuenca, E., Bueno-Ramírez, P., & de Balbín-Behrmann, R. (2019). "3DMeshTracings": A protocol for the digital recording of prehistoric art. Its application at Almendres cromlech (Évora, Portugal). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 25, 171-183. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.03.010>
- Chatonnet, F. B. (2007). Première ancre à inscription néopunique. *Orientalia*, 76(1), 24-29.
- Ferrer i Jané, J., & Sinner, A. G. (2019). Baitolo, una doble inscripción ibérica en un cepo de ancla de plomo del siglo I a.C. *Palaeohispanica. Revista sobre lenguas y culturas de la Hispania Antigua*, (19), 147-167. <https://doi.org/10.36707/palaeohispanica.v0i19.207>
- Fiorini, A. (2018). Il metodo fotografico RTI (reflectance transformation imaging) per la documentazione delle superfici archeologiche. L'applicazione ai materiali di età protostorica. *Archeologia e Calcolatori*, 29, 241-258. <https://doi.org/10.19282/ac.29.2018.20>
- García, C., & López, M. D. (1980). Elementos de anclas antiguas del Museo de Cádiz. *Boletín del Museo de Cádiz*, 2, Cádiz, 67-72.
- Goldman, Y., Linn, R., Shamir, O., & Weinstein-Evron, M. (2018). Micro-RTI as a novel technology for the investigation and documentation of archaeological textiles. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 19, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.02.013>
- Hadas, G., Lipshitz, N., & Bonani, G. (2005). Two ancient wooden anchors from Ein Gedi, on the Dead Sea, Israel. *International Journal of Nautical Archaeology*, 34(2), 299-307. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2005.00061.x>
- Haldane, D. (1984). *The wooden anchor*. Texas: Texas A&M University.
- Hristov, I. (2013). *Antique stone anchors, stone and lead anchor stocks from the collection of The National Museum of History. End of 2nd ML B.C. - 3rd century A.D.* Sofia: UNICART.
- Kapitän, G. (1984). Ancient anchors-technology and classification. *The International Journal of Nautical Archaeology*, 13(1), 33-44.

- Kuleff, I., Djingova, R., Alexandrova, A., Vakova, V., & Amov, B. (1995). INAA, AAS, and lead isotope analysis of ancient lead anchors from the black sea. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 196(1), 65-76. <https://doi.org/10.1007/BF02036290>
- Lech, P., Matera, M., & Zakrzewski, P. (2021). Using reflectance transformation imaging (RTI) to document ancient amphora stamps from Tanais, Russia. Reflections on first approach to their digitalisation. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 36, 102839. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102839>
- López-Martínez, T., García-Bueno, A., & Medina-Flórez, V. J. (2018). New methodology for the assessment of cleaning treatments. Applications of photogrammetry for restoration. *Journal of Cultural Heritage*, 30, 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.09.019>
- Martínez, A. (2011). Iconografía sagrada fenicio-púnica en las monedas de Hispania siglos III al I a. C. *El Futuro del Pasado: Revista Electrónica de Historia*, 2, 579-600. <https://doi.org/10.14201/fdp.24666>
- Nicolae, C., Nocerino, E., Menna, F., & Remondino, F. (2014). Photogrammetry applied to problematic artefacts. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5, 451-456. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-451-2014>
- Perea, S. (2004). Zeus Kásios Sózon y Afrodita Sózousa, divinidades protectoras de la navegación. A propósito de dos cepos de anclas romanas procedentes del Cabo de Palos. *Mastia: Revista del Museo Arqueológico Municipal de Cartagena*, (3), 95-111.
- Perrone, M. (1979). *Ancorae antiquae: Per una cronologia preliminare delle ancore del Mediterraneo*. Roma: L'Erma di Bretschneider.
- Poigt, T. (2015). Volume measurement by photogrammetry. Applications for the weighing metrology studies. In *International Conference on Metrology for Archaeology*, 1, (pp.197-202), Benevento, Italy.
- Ramon, J. (1995). Las ánforas fenicio-púnicas del Mediterráneo central y occidental. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- Rosen, B., & Galili, E. (2007). Lead use on Roman ships and its environmental effects. *International Journal of Nautical Archaeology*, 36(2), 300-307. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2007.00145.x>
- Solem, D.-Ø. E., & Nau, E. (2020). Two new ways of documenting miniature incisions using a combination of image-based modelling and reflectance transformation imaging. *Remote Sensing*, 12(10), 1626. <https://doi.org/10.3390/rs12101626>
- Torregrosa-Fuentes, D., Spairani-Barrio, Y., Huesca-Tortosa, J. A., Cuevas-González, J., & Torregrosa-Fuentes, A. J. (2018). Application of automated photogrammetry and lighting techniques with GIS tools for visualisation and analysis of a slab with anthropomorphic reliefs. *Virtual Archaeology Review*, 9(19), 114-124. <https://doi.org/10.4995/var.2018.9531>
- Valente, R., & Barazzetti, L. (2020). Methods for ancient wall graffiti documentation: overview and applications. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 34, 102616. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102616>
- Zotkina, L. V., & Kovalev, V. S. (2019). Lithic or metal tools: Techno-traceological and 3D analysis of rock art. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 13, e00099. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00099>

MetalEspaña 2020/2021

III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico

Joaquín Barrio Martín
Milagros Buendía Ortuño (eds.)

SECYR >>
Servicio de Conservación, Restauración y
Estudios Científicos del Patrimonio Arqueológico



GOBIERNO
DE ESPAÑA
MINISTERIO
DE CULTURA
Y DEPORTE

ARQVA

Museo Nacional
de Arqueología Subacuática



MUSEO
CASA DE LA MONEDA

UAM Universidad Autónoma
de Madrid

Anejos nº 6 | 2022

Departamento de Prehistoria y Arqueología
Facultad de Filosofía y Letras,
Vicerrectorado de Investigación
Universidad Autónoma de Madrid

**Cuadernos
de Prehistoria
y Arqueología**
de la Universidad Autónoma de Madrid

CUADERNOS

de Prehistoria y Arqueología
de la Universidad Autónoma de Madrid

ANEJOS

6

2022

MetalEspaña 2020/2021

III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico

Joaquín Barrio Martín
Milagros Buendía Ortuño
(eds.)



Universidad Autónoma
de Madrid

Departamento de Prehistoria y Arqueología
Facultad de Filosofía y Letras
Vicerrectorado de Investigación
Universidad Autónoma de Madrid

© Departamento de Prehistoria y Arqueología
Facultad de Filosofía y Letras
Ciudad Universitaria de Cantoblanco
Universidad Autónoma de Madrid

<https://doi.org/10.15366/ane2021.6>

ISBN: 978-84-8344-853-3

Depósito Legal: M-24136-1995

Diseño y maquetación: Trébede Ediciones, S.L.
Imprime: Estugraf Impresores S.L.
Calle Pino nº 5 - Polígono Industrial Los Huertecillos
28350 Ciempozuelos - Madrid

Agradecimientos

A la Subdirección General de Museos Estatales y en especial a doña Carmen Jiménez Sanz; al Museo Casa de la Moneda (FNMT) y en especial a su director don Rafael Fera y Pérez, por el apoyo económico a la celebración del Congreso y a la publicación de estas Actas.

Acknowledgments

To the Subdirección General de Museos Estatales and especially to Ms. Carmen Jiménez Sanz; to the Museo Casa de la Moneda (FNMT) and especially to its director, Mr. Rafael Fera y Pérez, for the financial support for the celebration of the Congress and the publication of these Minutes.

Caracterización, diagnóstico y conservación de los lingotes de cobre del Pecio Arapal (Sancti Petri, Cádiz)

Characterization, diagnosis and conservation of copper ingots from the Arapal Wreck (Sancti Petri, Cadiz)

ROCÍO MORÓN

Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH)
Universidad de Cádiz. Edificio Simón Bolívar
Avenida Duque de Nájera, 16. 11002 Cádiz
romorongonzalez@gmail.com

FELIPE CEREZO

Facultad de Filosofía y Letras
Universidad de Cádiz
Avenida Doctor Gómez Ulla, 1. 11003 Cádiz
felipe.cerezo@uca.es
<https://orcid.org/0000-0003-0025-1726>

MARÍA LLUISA MATAS

Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH)
Universidad de Cádiz. Edificio Simón Bolívar
Avenida Duque de Nájera, 16. 11002 Cádiz
marialuisa.matas@uca.es
<https://orcid.org/0000-0002-5684-0290>

MANUEL BETHENCOURT

Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales
Universidad de Cádiz
Avenida República Saharaui s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz)
manuel.bethencourt@uca.es
<https://orcid.org/0000-0002-0488-7097>

LUIS CARLOS ZAMBRANO

Museo de Cádiz
Plaza de Mina, s/n. 11004 Cádiz
luisc.zambrano@juntadeandalucia.es
<https://orcid.org/0000-0002-7456-8147>

Resumen

Se presenta un estudio arqueométrico y diagnóstico sobre 78 lingotes de cobre extraídos en el entorno del islote de Sancti Petri. El estudio epigráfico de algunas inscripciones, con numerales romanos y letras en mayúscula, así como la forma de los sellos, permiten circunscribirlos a la época Romano Imperial. El estudio metalográfico revela una estructura propia de la fabricación por fundición, con huecos en la matriz por la desgasificación producida durante la fusión y posterior enfriamiento del metal, así como la dispersión de inclusiones de óxido de cobre y ausencia de dendritas. Se ha distinguido una pequeña secuencia estratigráfica compuesta por cuprita y carbonatos de cobre. El análisis elemental desvela una aleación de Cu (99,8 %), con Sb, Ag y As como elementos mayoritarios, mostrando coincidencias con lingotes analizados por otros autores y posible origen en la península ibérica. Las alteraciones presentes han dependido de las condiciones en las que cada lingote ha permanecido en el medio, aerobio o anaerobio. Establecidas las alteraciones se han realizado una serie de trabajos encaminados a la conservación y restauración de las piezas.

Palabras clave: lingotes de cobre romanos, técnicas de análisis, diagnóstico, conservación

Abstract

An archaeometric and diagnostic study has been carried out on 78 copper ingots extracted in the surroundings of the islet of Sancti Petri. The epigraphic study of some of the inscriptions, with Roman numerals and capital letters, as well as the shape of the seals, allow us to circumscribe them to the Roman-Imperial period. The metallographic study reveals a structure typical of manufacture by casting, with holes in the matrix due to the degassing produced during the melting and subsequent cooling of the metal, as well as the dispersion of copper oxide inclusions and the absence of dendrites. A small stratigraphic sequence composed of cuprite and copper carbonates has been distinguished. The

elemental analysis, reveals a 99.8 % Cu alloy, with Sb, Ag and As as major elements, showing coincidences with ingots analyzed by other authors with possible origin in the Iberian Peninsula. The alterations products developed have depended on the conditions in which each ingot has remained in the environment, aerobic or anaerobic. Once the alterations were established, a series of works aimed at the conservation and restoration of the pieces were carried out.

Key words: Roman copper ingots, analytical techniques, diagnosis, conservation

1. Introducción

Los minerales cupríferos de la península ibérica han sido explotados desde la Prehistoria, dejando numerosos rastros de evolución en sus procesos de minería y metalurgia. En época romana se explotaron de forma intensiva, alcanzando niveles de producción sólo superados en época industrial (García, 2003). Entre sus evidencias arqueológicas predominan armas, herramientas, adornos, elementos votivos y estatuaría. Destacan también los hallazgos de materia prima en lingotes de cobre, como forma de acumulación de metal para su transporte y comercio, que en numerosas ocasiones se producía a través de las rutas marítimas de la época. Parte de este material terminó en los fondos marinos tras el naufragio de las embarcaciones que lo transportaban. En época romana los hallazgos de lingotes de cobre se producen en el Mediterráneo y costas atlánticas peninsulares, donde la circulación de metales por vía marítima fue muy activa. Ejemplos ampliamente estudiados se encuentran en los pecios de Chipiona, del Cobre, Sud-Lavezzi-2, Maguelone-1 o Planier-2. Si bien muchos de ellos aparecen descontextualizadas tras una extracción no regulada, los estudios arqueométricos y epigráficos revelan como origen principal el sur de la Península, concretamente las minas piríticas del suroeste y de Sierra Morena. A estos ejemplos se unió en 2017 una colección de 78 lingotes procedentes del Pecio Arapal que han dado contenido a este trabajo, cuyo objetivo fue la caracterización de la composición elemental del metal y la identificación de los procesos y productos de alteración que presentaban mediante técnicas que han permitido realizar el estudio arqueométrico y establecer un diagnóstico del estado de conservación y una metodología de intervención que facilite el estudio de las inscripciones y sellos presentes y su futura preservación.

2. Material y método

Los lingotes estaban dispersos en un área de 200 m² en el entorno de la isla de Sancti Petri (Cádiz) entre 7-9 metros de profundidad, en depresiones erosionadas en roca arenisca calcarenita zoomórfica (figura 1), algunos muy concrecionados, otros muy erosionados y también unidos a la roca o enterrados en la arena.

Se han empleado diversas técnicas analíticas en función de la información que se deseaba obtener: microscopía óptica, metalográfica y electrónica de barrido equipada con microanálisis de Rayos X (SEM-EDX), difracción de Rayos X (DRX), fluorescencia de Rayos X (FRX), espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (IPC-MS) o de emisión atómica por chispa (OES). Las muestras destructivas se tomaron del lingote AR-064. Pese a presentar mucha pérdida de material y un diámetro incompleto, contenía la sección estratigráfica completa y representativa de toda la colección.

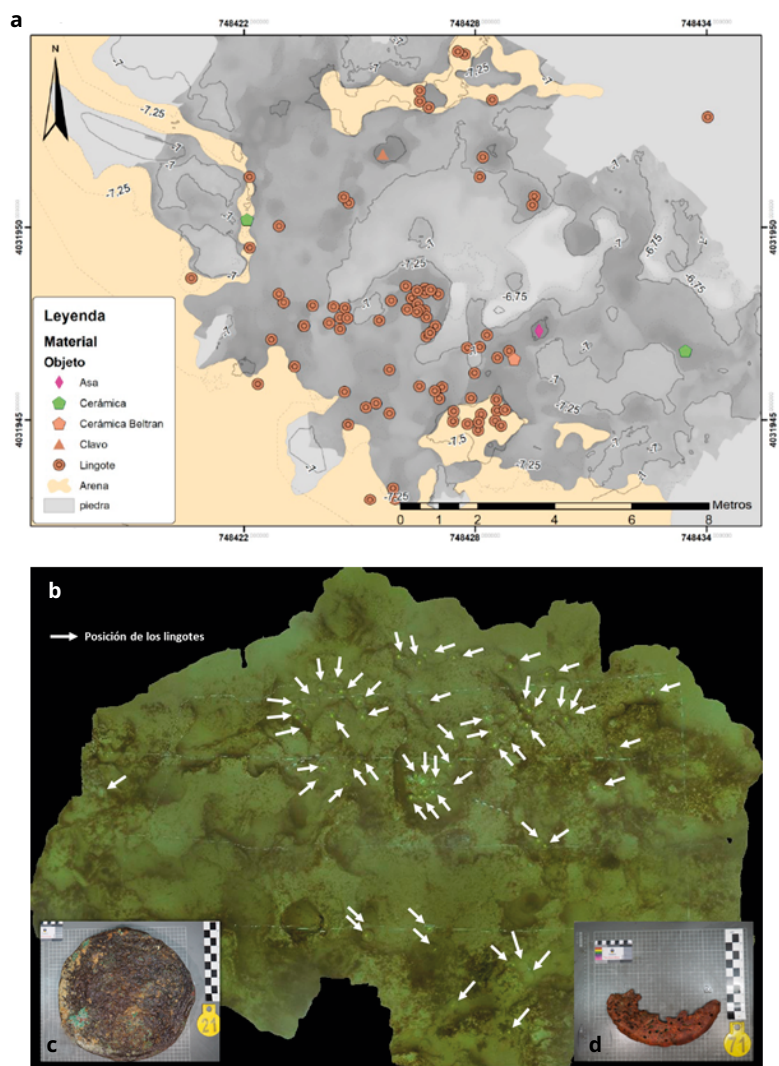


Figura 1. a. Localización de los materiales en el yacimiento en el que se representan los lingotes, los fragmentos de cerámica, un clavo y un asa moderna. b. Fotogrametría del yacimiento donde se aprecian los lingotes (señalados en blanco) dispersos entre la roca arenisca y en el sedimento arenoso. c-d. Diferente estado de los lingotes del Pecio Arapal representados por el lingote AR-012 (c) y AR-71 (d). (Felipe Cerezo)

Figure 1. a. Location of the materials in the site showing the ingots, ceramic fragments, a nail and a modern handle. b. Photogrammetry of the site showing the ingots (marked in white) scattered among the sandstone rock and in the sandy sediment. c-d. Different state of the ingots from the Arapal Wreck represented by ingot AR-012 (c) and AR-71 (d). (Felipe Cerezo)

3. Resultados y discusión

3.1. Descripción de los lingotes

Históricamente la tipología de los lingotes ha ido cambiando con las formas del horno y las lingoterías o la manera más cómoda de transportarlos y almacenarlos. Tylecote (1992) defiende una típica forma planoconvexa, mientras que Arboledas (2005) distingue entre troncocónicos (tipología I) y planoconvexos (tipología II). Los 78 lingotes se adscriben a la Edad Clásica, concretamente a la época Romano Imperial, y se relacionan con la tipología I, encajando en sus dimensiones, pesos, así como en otros aspectos de

su descripción formal. Se ha realizado una clasificación interna, distinguiendo a su vez dos patrones (tipos I.A y I.B) que, estando dentro de la misma tipología, tienen tamaños y perfiles no del todo idénticos. El criterio que se ha seguido para esta clasificación responde a sus dimensiones y formas. Los de tipo I.A tienen mayores dimensiones: diámetro medio de 38 cm, altura no mayor a 8 cm en los mejor conservados y peso medio de 26,2 kg. Los de tipo I.B presentan un diámetro medio de 32,5 cm, altura inferior a 7 cm y peso medio de 20 kg en los mejor conservados. Vallespín (1986) defiende que, a pesar de las diferencias de peso y ancho entre los lingotes, algunos pueden provenir del mismo molde. La sección transversal de sus perfiles puede indicar la forma del molde utilizado en la fundición. La altura de los lingotes va desde los 4 a los 8 cm (sin contar con los que presentan una gran erosión). Tylecote (1992) explica esta diferencia de altura de los lados suponiendo que los moldes fueron excavados en tierra y en pendiente. Las medidas y pesos de los lingotes del Pecio Arapal son muy similares a los de Chipiona y estos a su vez, a los valores de los de Sud-Lavezzi-2 (Domergue y Rico, 2010). Presentan una cara superior o anverso más o menos plana, con aspecto rugoso e irregular, mostrando en algunos casos pequeños orificios y protuberancias. El cobre fundido se vuelve poroso, formando agujeros o cráteres por la salida de burbujas de $H_2S(g)$ cuando el metal se enfría y se contrae (Marechal, 1997; Vallespín, 1986). Estas irregularidades son visibles también en los lingotes del Pecio del Cobre y de Chipiona. El reverso presenta una superficie porosa y áspera. Vallespín defiende que esta superficie se debe a las huellas dejadas por la arena cuando el metal fundido se vierte en un agujero en tierra. Por su parte, Rico *et alii* (2005) definen estas cavidades o alveolos asociados al enfriamiento como *nido de abeja-panal*. En la mayoría se distingue en el anverso una banda exterior lisa, que podría haberse producido por un enfriamiento rápido del metal cuando entra en contacto con el aire, creándose una temperatura diferencial entre el metal superficial y el metal subyacente (Domergue y Rico, 2010). Esta franja, que recorre todo el perímetro, también se aprecia en los lingotes de Plage de la Corniche-6 a Sete (Jezegou *et alii*, 2011). En el caso de los lingotes de Arapal, suponiendo que se trate de un fenómeno producido por el enfriamiento rápido, es posible que todos presentasen esta franja perimetral; pero debido a la erosión solo se aprecia en los mejor conservados, donde también se pueden observar algunas inscripciones. Para Marechal (1997) el aspecto «liso» del borde se explica porque cuando el metal entra en contacto con el molde de cerámica, arena, piedra o metal, en esta zona el metal se enfría más rápido y se «hincha» menos. Se trataría de un proceso físico y no mecánico, porque de otra manera se apreciarían otras marcas y no existiría la rugosidad presente. En los lingotes mejor conservados el borde no es totalmente liso. Probablemente se ha formado por un fenómeno físico de enfriamiento del metal fundido, que produce un replegado de la materia en los bordes, formándose ese aro concéntrico, que se aprovechará para realizar las inscripciones incisas. Mientras, en la zona interior se producen las burbujas que aportan un aspecto rugoso a su superficie.

3.2. Inscripciones y sellos

En un primer examen *de visu* solo se pudieron reconocer inscripciones o marcas en el anverso de algunos lingotes del tipo I.A, apareciendo algunas más sobre sus bordes tras los tratamientos de limpieza en lingotes de ambos tipos. Como se ha indicado las inscripciones incisas suelen aparecer en los bordes o en la franja perimétrica y pueden estar formadas por números o letras mayúsculas. Encontramos ambos tipos de marcas, que se repiten en varios lingotes distinguiéndose letras mayúsculas (R, N, D y A) y numerales romanos (CXX, III, X, XIII) (figura 2), así como otras marcas sin identificar debido al mal estado de la superficie. Los números podrían relacionarse con el peso o valor del lingote o bien con su número en un lote concreto. Mientras, las letras mayúsculas pueden apuntar al productor, dueño de la mina, comerciante o zona geográfica de producción. A falta de un estudio organoléptico, los sellos aparecen en el centro del anverso de los lingotes AR-017 y AR-040 ocultos tras una gruesa concreción. El resto

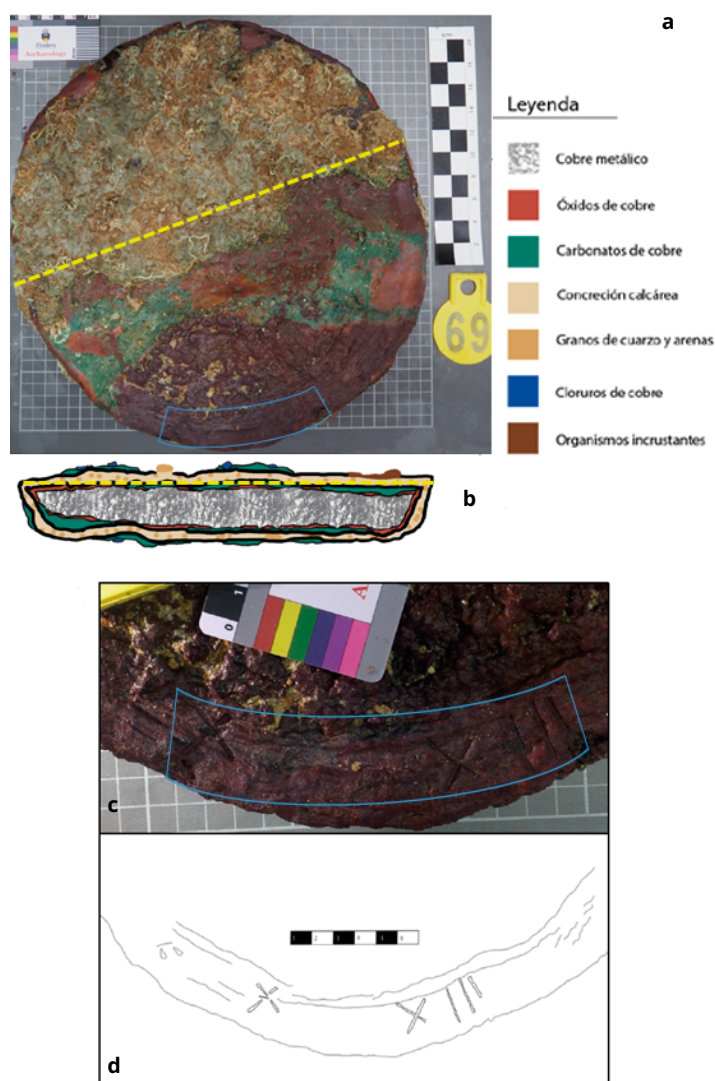


Figura 2. a. Lingote AR17-069, Tipo I.A, con diámetro máximo 43 mm y mínimo de 28,5 mm, altura máxima 6 cm y peso sin limpiar de 21,2 kg. b. Representación de la estratigráfica del lingote AR17-069. c-d. Detalle de la inscripción numeral X y XIII localizadas en el borde perimetral del lingote AR17-069 en su cara anversa. (Rocío Morón)

Figure 2. a. Ingot AR17-069, Type I.A, with maximum diameter 43 mm and minimum diameter 28.5 mm, maximum height 6 cm and uncleaned weight 21.2 kg. b. Stratigraphic representation of ingot AR17-069. c-d. Detail of the numeral inscription X and XIII located on the perimeter edge of ingot AR17-069 on its obverse side. (Rocío Morón)

de los lingotes son anepigráficos, bien porque no se les realizó inscripción, bien porque se ha perdido por los procesos corrosivos-erosivos del medio. Actualmente se está trabajando en esta fase documental.

3.3. Alteraciones

Resulta complicado establecer un único cuadro de alteración al tratarse de un conjunto tan grande, en el que cada lingote permaneció en unas condiciones ambientales singulares, afectado por procesos de alteración diferentes que pudieron ciclarse a lo largo del periodo de exposición al medio marino. Así,

los lingotes responden a varios cuadros de alteración, en unos casos relacionados con un medio aeróbico y en otros con un medio anaeróbico, propios de periodos alternantes de exposición y enterramiento. Además, no presentan un tipo de corrosión uniforme porque la pérdida de superficie metálica no es regular. Sin embargo, sí se puede considerar la erosión como el principal factor de alteración de los lingotes, protagonizada por los sedimentos removidos por las fuertes corrientes y el oleaje de la zona (Bethencourt *et alii*, 2018), que actúan como efecto abrasivo sobre el metal. Los desiguales efectos de la erosión sobre los lingotes, debido a la diferencia en la posición y localización de los mismos en el yacimiento, permite clasificarlos en varios cuadros de alteración en función de los porcentajes de concreción que presentan y de pérdida de materia:

- Grupo de 18 lingotes que no presentan concreción o no llega a cubrir más del 30 % de la superficie. Están erosionados y presentan pérdida de materia en diferentes grados. Se aprecian cráteres y cavidades que disminuyen su resistencia mecánica.
- Grupo de 28 lingotes concrecionados entre el 30-70 % que permanecían parcialmente enterrados, quedando una parte expuesta a un ambiente aeróbico y otra a un ambiente anaeróbico. Dentro de este grupo, se pueden distinguir algunas diferencias. En general, están erosionados y muestran una gruesa capa de concreción (figura 2). También se incluyen los que presentan erosión en toda la superficie, pero que posteriormente han desarrollado una capa de concreción mineral y biológica, debido a las fluctuaciones en el medio de enterramiento, quedando expuestos y enterrados de manera alternativa.
- Grupo de 32 lingotes con una gruesa capa de concreción en el 70-100 % de su superficie, que incorpora piedras, arenas del entorno y distintos tipos de organismos incrustantes. Esta colonización biológica y concreción mineral pudo actuar como una capa protectora, pudiendo llegar a situar al metal en la zona de pasividad del Diagrama de Pourbaix (Bethencourt *et alii*, 2018), pero también distorsiona sus formas y dimensiones reales y oculta la información arqueológica.

Teniendo en cuenta estos datos, algunos lingotes se depositaron inicialmente en medio anaeróbico tras un enterramiento rápido en el sedimento, momento cuando, sobre sus superficies se desarrollarían productos de corrosión (covellita-CuS, calcosita-Cu₂S) de color gris negruzco metálico. Posteriormente, debido a los cambios en la dinámica marina o geomorfología, serían expuestos de nuevo a un medio aerobio y a la erosión mecánica, formándose cuprita (Cu₂O), tenorita (CuO), cloruros de cobre (nantocita-CuCl, atacamita-Cu₂(OH)₃Cl, paratacamita-Cu₂(OH)₂Cl), y carbonatos básicos de cobre (malachita-CuCO₃·Cu(OH)₂, azurita-Cu₃(CO₃)₂(OH)₂). Probablemente cuando el flujo erosivo fuese intenso, estos productos de corrosión se eliminarían parcial o totalmente, dejando descubierto al metal.

Observando la erosión y concreción *a posteriori* de muchos lingotes, puede plantearse otra hipótesis de deposición. Inicialmente estarían expuestos a flujos intensos de energía que provocarían erosión, para pasar posteriormente a un ambiente menos erosivo que permitiría la formación de óxidos, cloruros, carbonatos y de una capa de concreción mineral y biológica. Estos lingotes se caracterizan por aparecer concrecionados parcial o totalmente pero previamente erosionados, revelando su posición en el sustrato y sintomático de las fluctuaciones que han podido sufrir en periodos de enterramiento-desenterramiento en el sedimento propios de la zona (Bethencourt *et alii*, 2018).

3.4. Análisis composicional y metalográfico

En un análisis crítico de los resultados obtenidos por las técnicas FRX, ICP-MS y OES, concluimos que aquellos basados en IPC-MS, en los que se emplearon patrones normalizados de distintas

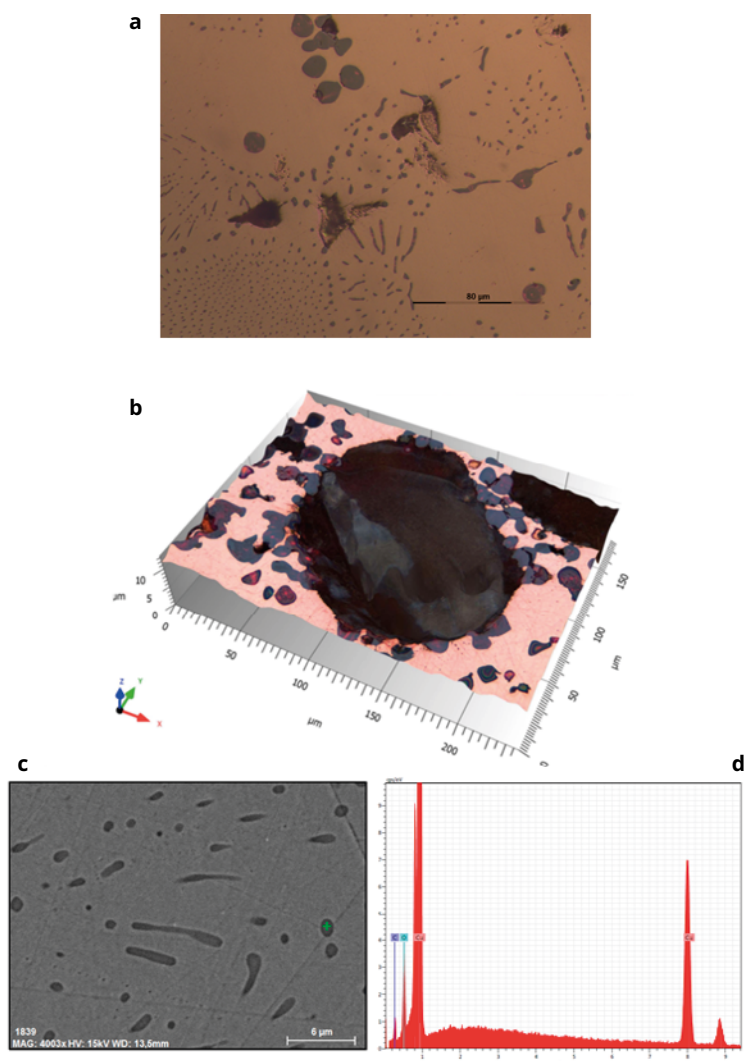


Figura 3. a. Imágenes de la muestra del lingote AR17-064 a 500 X, sin ataque metalográfico. Se aprecian inclusiones de formas globulares y aciculares, así como los límites o bordes de grano. b. Simulación 3D realizada con microscopio metalográfico sobre una inclusión con forma globular presente en la matriz. c-d. Resultado del análisis EDX (d) realizado sobre una inclusión con forma globular observada en SEM a 4003x (c). (Manuel Bethencourt)

Figure 3. a. Images of the AR17-064 ingot sample at 500 X, without metallographic attack. Inclusions of globular and acicular shapes can be observed, as well as the grain boundaries or edges. b. 3D simulation performed with metallographic microscopy on a globular shaped inclusion present in the matrix. c-d. Result of the EDX analysis (d) performed on a globular shaped inclusion observed in SEM at 4003x (c). (Manuel Bethencourt)

aleaciones base Cu, son los representativos. Los elementos mayoritarios en valores promedios fueron Sb (641 ± 60 mg/kg), Ag (183 ± 10 mg/kg) y As (176 ± 13 mg/kg), además de un $99,8 \pm 0,5$ %. Estos resultados muestran coincidencias con los resultados de los análisis de otros lingotes con posible origen en la Península (Plage de la Corniche-6 a Sete, Chipiona, Maguelone y Aljustrel). No obstante, algunos datos deben tomarse con precaución pues dependen de la sensibilidad de la técnica utilizada y el número de réplicas representativas.

La observación bajo microscopio estereoscópico muestra una notable dispersión de formas lenticulares por toda la superficie, a excepción de las capas más externas. Probablemente, estas formas se

correspondan con inclusiones de cuprita (Cu_2O) dispersas por la matriz de cobre, en el interior y en los bordes de granos. También se aprecia una pequeña secuencia estratigráfica en la zona más exterior de la muestra, que puede relacionarse con capas de alteración. La primera capa, más próxima al núcleo metálico, tiene un color morado-rojizo que incorpora cristales de distintos tamaños. Normalmente, la primera capa de alteración que se produce en el cobre es Cu_2O . Sobre esta se encuentra la capa más exterior de tonos verdosos y blancos, en la que también se distinguen distintos tamaños de granos. Esta capa está compuesta por malaquita ($\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$) (Díaz y García, 2011). En algunas zonas dentro de esta capa exterior se aprecian zonas más claras, posibles cloruros de cobre. En general, suelen aparecer en forma de depósitos y no como capa uniforme (Díaz y García, 2011). Esta secuencia revela cómo el cobre metálico sufrió un proceso de oxidación, cubriéndose de una capa de Cu_2O , seguida de una capa de carbonatos de cobre con incorporación de cloruros (CuCl y/o $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) de forma local. Sobre estas capas se desarrolló también una capa de CaCO_3 colonizada con organismos incrustantes, indicando un proceso de alteración propio de medios oxigenados (Bethencourt *et alii*, 2018).

Las imágenes obtenidas con microscopio metalográfico muestran similitudes con la metalografía de un lingote de cobre plano convexo de la Edad de Bronce donde aparecen inclusiones de Cu_2O con ausencia de dendritas (figura 3). También se distingue una microestructura con formas aciculares y nodulares. Además, existen poros de diferente tamaño dispersos por la totalidad de la muestra, que se pudieron observar a través de un perfil de rugosidad superficial aproximado. Este perfil demostró que se trataba de huecos posiblemente producidos por la desgasificación durante la fusión y posterior enfriamiento del metal.

Posteriormente, análisis puntuales en zonas seleccionadas de la muestra mediante SEM-EDX han confirmado estos resultados, revelando la presencia de óxido de cobre sobre las formas globulares (figura 3), y carbonatos de cobre y cloruros sobre el estrato de tonos verdosos. También se pudo distinguir calcio, carbono y silicio, elementos que forman parte de la concreción calcárea, de los sedimentos marinos en la capa más externa y, quizás, de los restos del molde de fundición.

3.5. Conservación

La remoción de las concreciones más duras se realizó con bisturí y microcincel. Posteriormente se realizó una limpieza química con EDTA 5 % en agar-agar y en carboximetilcelulosa y se realizaron ensayos con hexametafosfato 5 % en carboximetilcelulosa. Todas las pruebas se aplicaron a modo de papetas, con control periódico de su efectividad. Los lingotes se estabilizaron posteriormente en sesquicarbonato sódico al 5 %, se neutralizaron en agua desmineralizada, secaron y protegieron.

4. Conclusiones

Se ha realizado la caracterización y diagnóstico de 78 lingotes de cobre hallados en el entorno de la isla de Sancti Petri. La tipología discoidal troncocónica, caracterizada por un lado plano y el otro ligeramente convexo, la media de pesos y las distintas inscripciones representadas por numerales romanos y letras en mayúscula, así como la forma de los sellos similares a otros conjuntos de lingotes de cobre romanos, permiten adscribirlos a la época Romano Imperial.

Las técnicas analíticas revelan una aleación de Cu al 99,8 % con estructura propia de la fabricación por fundición, con huecos en la matriz por la desgasificación producida durante la fusión y posterior enfriamiento del metal, así como la dispersión de numerosas inclusiones de óxido de cobre, con ausencia de dendritas. También, se ha distinguido una pequeña secuencia estratigráfica compuesta

por cuprita y carbonatos de cobre. Tras el diagnóstico inicial sobre las alteraciones presentes (aeróbicas o anaeróbicas en función de su posición en el yacimiento) se han establecido protocolos de conservación habituales.

Agradecimientos

Trabajo realizado en el LEC-PH de la UCA, financiado por FEDER-MICIN EQC2018-004947-P.

Bibliografía

- Arboledas, L. (2005): *Minería y metalurgia romana en el alto Guadalquivir: aproximación desde las fuentes y el registro arqueológico*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Bethencourt, M., Fernández-Montblanc, T., Izquierdo, A., González-Duarte, M.M. y Muñoz-Mas, C. (2018): "Study of the influence of physical, chemical and biological conditions that influence the deterioration and protection of UCH". *STOTEN*, 613-614: 98-114.
- Díaz, S. y García, E. (2011): *Técnicas metodológicas aplicadas a la conservación-restauración del patrimonio metálico*. Ministerio de Cultura. Subdirección General del Instituto del Patrimonio Cultural-España.
- García, J. (2003): *El papel de la minería y metalurgia en la Córdoba romana*. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba.
- Jezegou, M., Klein, S., Rico, C. y Domergue, C. (2011): "Les lingots de cuivre de l'épave romaine Plage de la Corniche 6 a Sete et le commerce du cuivre hispanique en Mediterranee occidentale". *Revue Archeologique de Narbonnaise. RAN*, 44-Dossier Metallurgie: 57-70.
- Marechal, J.F., (1997). "A propos d'un type nouveau de lingot de cuivre d'époque romaine". *BSNAF*: 383-393.
- Rico, C. y Domergue, C. (2010): "Nuevos documentos sobre el comercio de los metales hispánicos en la época romana. Los lingotes de Chipiona (Cádiz)". *HABIS*, 41: 163-184.
- Scott, D.A. (1991): *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*. Marina del Rey, CA: Getty Conservation Institute in association with Archetype Books.
- Tylecote, R. (1992): *A History of Metallurgy*. The Institute of Materials.
- Vallespin, O. (1986): "The Copper Wreck (pecio del Cobre)". *IJNA*, 15.4: 305-322.

Diagnóstico del estado de conservación de un conjunto de cepos de plomo de procedencia subacuática: uso de geles rígidos de agar-agar para su intervención

Diagnosis of the conservation status of a set of lead traps from underwater origin: use of rigid agar-agar gels for their intervention

ELISA FERNÁNDEZ TUDELA

Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales
Universidad de Cádiz
elisa.tudela@uca.es
<https://orcid.org/0000-0003-4565-7690>

LUIS CARLOS ZAMBRANO VALDIVIA

Museo de Cádiz
luisc.zambrano@juntadeandalucia.es
<https://orcid.org/0000-0002-7456-8147>

MANUEL BETHENCOURT

Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales
Universidad de Cádiz
manuel.bethencourt@uca.es
<https://orcid.org/0000-0002-0488-7097>

Resumen

Este trabajo ofrece una visión preliminar del estado de conservación del conjunto de 87 cepos de plomo de época antigua pertenecientes al Museo de Cádiz. Las alteraciones identificadas pueden diferenciarse en dos grupos principales, aquellas provocadas durante la vida útil del objeto, como deformaciones, fracturas y fisuras, etc., y las propias de la alteración físico-química del plomo en el medio subacuático. La abundancia de alteraciones a nivel superficial junto al gran número de los cepos que presentaban elementos superficiales de interés arqueológico, como marcas de uso y de fabricación o elementos decorativos, aconsejó realizar un diagnóstico conjunto del estado de conservación para dichas piezas afectadas por patologías similares. Este diagnóstico ha servido como base para establecer una doble metodología de conservación y restauración dirigida a la estabilización físico-química de los objetos y la recuperación de huellas documentales. Dentro de los objetivos de esta investigación estaba la identificación de las fases de alteraciones para lo que se han usado diferentes técnicas de análisis (DRX, SEM-EDX y MO). Para la posterior remoción selectiva de los productos de alteración inestables superpuestos a las huellas documentales se han realizado pruebas con geles rígidos de agar-agar y EDTA.

Palabras clave: cepo de ancla, plomo, alteración del plomo, EDTA, agar-agar

Abstract

This work offers a preliminary view of the state of conservation of a set of 87 lead stocks from the ancient times belonging to the Museum of Cadiz. The alterations identified can be divided into two main groups: those caused during the useful life of the object, such as deformations, fractures and cracks, etc., and those caused by the physical and chemical alteration of lead in the underwater environment. The abundance of surface alterations, together with the fact that a large number of the stocks studied had surface elements of great interest, such as marks of use and manufacture or decorative elements, made it necessary to carry out a diagnosis of the state of conservation of this large group of objects affected by similar pathologies. This diagnosis served as the basis for establishing a dual conservation and restoration methodology aimed at the physico-chemical stabilisation of the objects and the recovery of documentary traces. Among the objectives of this research were the identification of the phases of alterations for which different analysis techniques were used (DRX, SEM-EDX and MO). For the subsequent selective removal of the unstable alteration products superimposed on the documentary traces, tests were carried out with rigid agar-agar and EDTA gels.

Key words: anchor stock, lead, lead alterations, EDTA, agar-agar

1. Introducción

El empleo del plomo para la fabricación de cepos de ancla se documenta desde el 600 a. C., con el uso predominante de este metal durante la Edad Antigua hasta su posterior desplazamiento por el hierro. Los cepos de ancla romana fabricados en plomo son elementos muy comunes a lo largo de todo el Mediterráneo y parte del Atlántico.

Desde principios del siglo XX han sido objeto de estudio de diferentes autores que se han centrado en analizar la evolución, las tipologías y la atribución cronológica de estos (Haldane, 1984; Kapitän, 1984; Perrone, 1979).

A pesar del gran número de cepos de plomo de procedencia subacuática que se pueden encontrar en las colecciones de museos, dicha tipología de objetos ha suscitado en general escaso interés sobre sus problemas de conservación. Esto se debe principalmente a las características físico-químicas de este metal que lo hacen resistente a la corrosión, y en consecuencia ofrece unos cuadros de alteración moderados. Sin embargo, en ocasiones, la ausencia de tratamientos de conservación preventiva ha ocasionado, a medio y largo plazo, problemas derivados de patologías ocultas y no atendidas.

Esta investigación se centra en analizar las alteraciones físico-químicas existentes en un conjunto de cepos de plomo pertenecientes al Museo de Cádiz, con una problemática común basada en la superposición heterogénea de diferentes fases minerales sobre la capa original del objeto que dificulta su estudio e interpretación. La dificultad para la conservación y restauración de estos radica en el interés de las huellas documentales, que se encuentran ocultas bajo dichas alteraciones y en el hecho de hallarse sustentadas en un metal tan dúctil como el plomo donde cualquier instrumental producirá modificaciones destructivas.

Para el análisis de los productos de alteración se han empleado la Microscopía Óptica (MO), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con Microanálisis de Energía Dispersiva (EDS) y Difracción de Rayos X (DRX). Para el tratamiento de eliminación de estos se han realizado pruebas con gel agar-agar combinado con EDTA.

La colección de cepos de ancla en proceso de estudio cumple las características idóneas para llevar a cabo esta investigación ya que, a pesar del buen estado de conservación general, se aprecian rasgos de alteración genéricos y poco estudiados que son extensibles a la totalidad de los cepos de plomo de procedencia submarina. Un diagnóstico integral del estado de conservación es el punto de partida para diseñar una metodología que aborde simultáneamente la estabilización físico-química y la recuperación de huellas documentales ocultas bajo capas de concreción.

2. Material y método

El diagnóstico preliminar de las alteraciones se ha realizado mediante el análisis organoléptico. Atendiendo a los objetivos establecidos se han seleccionado diferentes técnicas analíticas: Microscopía Óptica (MO) a través de un microscopio estereoscópico modelo Leica Z6 ZPO A y microscopio metalográfico Leica DM ILM, que permitió una primera visualización y aproximación de las características y detalles de las muestras preparadas en sección transversal y embutidas en resina; Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con Microanálisis de Energía Dispersiva (EDS) mediante un equipo modelo Nava NanoSEM 450 Fei, empleado para la caracterización elemental de las diferentes capas de productos de alteración; Difracción de Rayos X (DRX) para la identificación de las diferentes fases minerales con un difractómetro Bruker model D8ADVANCE A25.

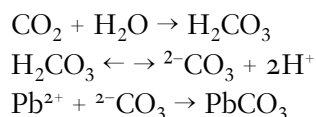
Las muestras se tomaron en diferentes zonas de uno de los cepos que presentaba las características de alteración comunes presentes en la mayoría de la colección. Las muestras fueron embutidas mediante una resina en frío para evitar la alteración del plomo. Posteriormente fueron pulidas y esmeriladas siguiendo el proceso que corresponde al Área A del metalograma Struers para metales blandos.

Para la recuperación de huellas documentales se empleó la limpieza química con la sal disódica del ácido etilendiaminotetracético (EDTA) vehiculizada en gel de agar-agar.

3. Resultados y discusión

3.1. La alteración del plomo arqueológico y su conservación

La alteración de los objetos de plomo ha sido ampliamente estudiada en el contexto de los ambientes arqueológicos terrestres. La alteración del plomo en estas circunstancias genera unos productos de alteración derivados de la relación del metal con el medio atmosférico. Un ejemplo es el proceso de carbonatación por acción del CO_2 que puede estar tanto en la atmósfera como en el sustrato del yacimiento terrestre. Este se combina con el agua formando ácido carbónico (H_2CO_3), un ácido débil cuya sal de plomo es el carbonato de plomo (PbCO_3):



Esta reacción se da en suelos húmedos y ácidos, creándose una capa porosa de carbonatos sobre la superficie del objeto. Esta capa es porosa y permite la difusión de iones que llegan al núcleo y rompen la capa de óxido de plomo (PbO) que protege al objeto, dando lugar a un proceso de mineralización continuo (Barrio *et alii*, 2005). Entre las fases minerales que podemos encontrar en plomos arqueológicos de procedencia terrestre están los carbonatos de plomo, siendo los principales minerales la cerusita (PbCO_3) y la hidrocerusita [$\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$], aunque también es posible encontrar referencias a la fosgenita [$\text{Pb}_2(\text{CO}_3)\text{Cl}_2$]; los sulfuros y sulfatos como la galena (PbS) y la anglesita (PbSO_4); u óxidos como el litargirio (PbO).

En el caso de medios acuáticos, la investigación ha sido más escasa. Los procesos de alteración que se van a dar en los metales dependerán de las características propias de este medio. Entre los productos de alteración citados en la bibliografía están la galena, la anglesita y la laurionita (Tylecote, 1983; MacLeod, 1991; Edwards *et alii*, 1992).

De forma generalizada, la bibliografía hace referencia a tres productos de alteración como los principales de los objetos de plomo arqueológicos en ambientes marinos: galena (PbS) para ambientes anaeróbicos, y anglesita (PbSO_4) y laurionita [$\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$] para ambientes aeróbicos (Pearson, 1979). Sin embargo, diferentes autores han estudiado el comportamiento de este metal en agua marina, describiendo la formación de diferentes fases minerales, especialmente los cloruros de plomo, pero también óxidos, sulfatos y sulfuros (Tylecote, 1983; Domenech-Carbó *et alii*, 2011).

Las diferencias entre los grados de alteración presentes en esta colección se deben a las características de los ambientes marinos a los que se han visto expuestos. Un medio marino aeróbico dará lugar a unos productos de alteración específicos que a su vez permitirán la colonización biológica del objeto una vez estabilizado. Sin embargo, encontramos cepos con apenas una pátina, generalmente de color oscuro, que hace pensar en un ambiente de alteración anaeróbico.

A estos ambientes de alteración en medios marinos se suman los mecanismos de alteración una vez extraídos del mar. En la mayoría de los casos se desconoce la procedencia exacta de los cepos depositados en el Museo, así como el momento y métodos de extracción, lo que impide conocer los mecanismos de alteración específicos a los que se han visto expuestos a lo largo de los años.

Los estudios sobre tratamientos de conservación y restauración de objetos arqueológicos de plomo se han centrado en los últimos años en tres métodos: la limpieza química de carácter ácido, los tratamientos electrolíticos de limpieza y de reducción, y más recientemente la limpieza láser (Barrio *et alii*, 2013). Siendo los más empleados la limpieza mecánica con agentes abrasivos en suspensión, seguida por la limpieza química con agentes quelantes (EDTA) y la reducción potencioestática de los productos de alteración en solución acuosa (Na_2SO_4) (Palomar y Cano, 2018).

3.2. Estado de conservación

El gran número de cepos estudiados y la diversa procedencia de los mismos implica una variada casística en los procesos de alteración observados. No obstante, es posible establecer una serie de alteraciones comunes que pueden dividirse en dos grupos principales. Por un lado, las propias de los daños físico-mecánicos sufridos durante la vida útil de estos objetos que se someten a grandes esfuerzos y continuos impactos por la funcionalidad propia del ancla como elemento de fondeo. Entre estas alteraciones podemos encontrar deformaciones estructurales (torsiones), deformaciones puntuales (aplastamientos y abolladuras), fracturas con pérdida de material, grietas pronunciadas o pequeñas fisuras (figura 1). Este tipo de alteraciones se engloban en lo que comúnmente se denomina como huellas de uso.

En el otro grupo de alteraciones hemos agrupado aquellas que son ocasionadas por los distintos factores medioambientales durante la permanencia de los objetos en el medio marino. En este denominado periodo de abandono cada objeto arqueológico experimenta un proceso de adaptación a las características mas o menos estables del lugar que ocupa. Las relaciones físico-químicas con el entorno producirán durante este periodo una serie de transformaciones a las que llamamos huellas de abandono.

Del conjunto de 87 ejemplares estudiados contamos con un total de 72 cepos completos y 15 cepos incompletos.

Las alteraciones superficiales las agrupamos según el grado de conservación de los productos de alteración. 80 ejemplares cuentan con abundantes productos de corrosión superficiales, y 7 que presentan solo una fina pátina (figura 1).

Entre el conjunto de alteraciones detectadas ha sido posible establecer tres categorías o cuadros de alteración genéricos donde asimilar cualquiera de los objetos estudiados:

- Grupo de cepos que presentan capas gruesas de productos de alteración homogéneas y uniformes con un buen grado de cohesión y adhesión al sustrato.
- Grupo de cepos que presentan productos de alteración heterogéneos con un alto grado de disgregación e inestabilidad física.
- Grupo de cepos con núcleo metálico poco alterado cubierto por una pátina de productos de alteración.

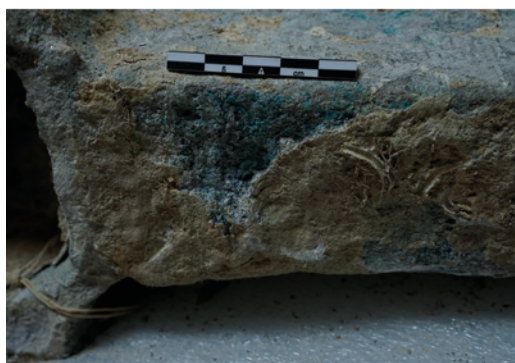
Del total al menos 11 presentan elementos superficiales identificables como decoración en relieve, inscripciones y huellas de fabricación y uso. El cepo seleccionado para las pruebas de limpieza presentaba relieves de cuatro delfines, una figura antropomorfa y al menos cuatro cartelas, una de ellas con restos de epigrafía.

3.3. Análisis de las alteraciones

El empleo de microscopia estereoscópica y metalográfica sobre las muestras tomadas en diferentes zonas de uno de los cepos permitió un estudio óptico inicial con aproximación de las características y detalles de las muestras (figura 2).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 1. a. Detalle de los diferentes estados de conservación presentes en la colección de cepos del Museo de Cádiz. b, c. Detalle de los productos de alteración presentes en la superficie y su grado de descohesión. d. Presencia de colonización biológica sobre los productos de alteración. e. Ejemplo de cepo que presenta escasos productos de alteración y donde se pueden apreciar posibles marcas de uso

Figure 1. a. Detail of the different states of conservation present in the collection of stocks in the Museum of Cádiz. b, c. Details of the alteration products present on the surface and their degree of decohesion. d. Presence of biological colonization on the alteration products. e. Example of a stock with few alteration products and where possible marks of use can be seen

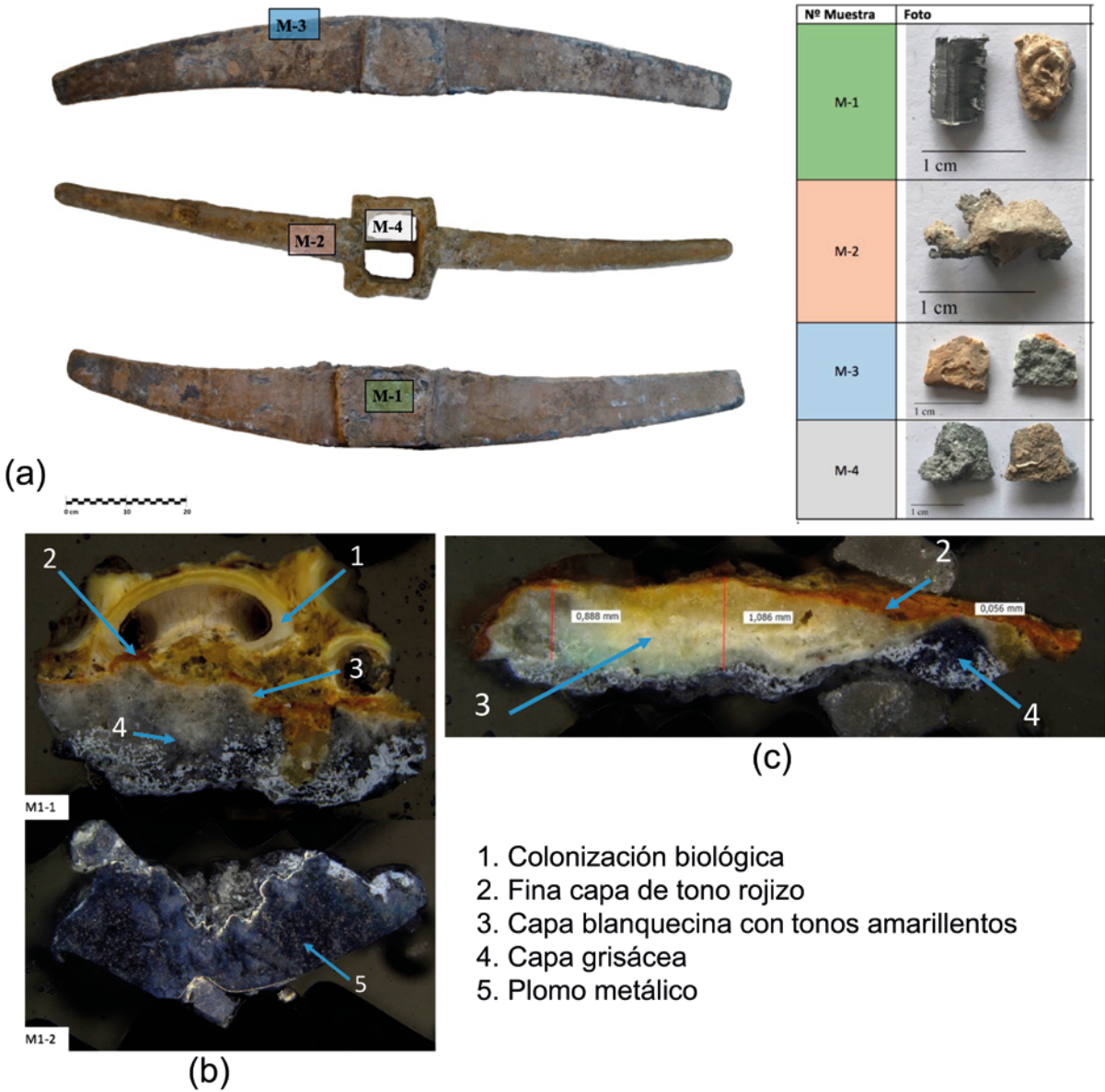


Figura 2. a. Detalle de la zona de toma de muestra para su análisis. b, c. Detalle de las muestras donde se pueden apreciar los diferentes estratos identificados bajo microscopía óptica (MO)

Figure 2. a. Detail of the sample collection area for analysis. b, c. Detail of the samples where the different layers identified under optical microscopy (MO)

Las primeras observaciones permitieron conocer una secuencia estratigráfica con diferentes productos de alteración que, tras cubrir la superficie metálica, habría permitido la colonización biológica del objeto.

Estos productos de alteración se concentran formando una amalgama con inclusiones de restos de sedimento, posiblemente granos de arena. Gracias a la observación bajo microscopio hemos podido identificar al menos 4 fases diferenciadas que concuerdan con las alteraciones presentes en el objeto y que se han ido depositando sobre el plomo metálico hasta permitir la colonización biológica (figura 2). Entre ellas destaca una fase mineral de color blanquecino que presenta poca consistencia y que se encuentra sobre la superficie metálica. La existencia de esta fase tiene como consecuencia la inestabilidad física de los estratos superficiales con elevado riesgo de desprendimiento en costra y pulverulencia

(figura 2). Sobre esta fase inestable se encuentran otros productos que se distribuyen a lo largo de la superficie de manera mas o menos homogénea. En la mayoría de las muestras se puede apreciar sobre el estrato de color blanquecino una capa de color rojizo de aspecto compacto con un grosor poco variable (entre 0,3 a 0,6 mm). Sobre esta se aprecia un estrato compuesto por una amalgama de productos de colonización biológica y restos de sedimento. En el caso de la muestra tomada en el interior de la caja, donde originalmente se situaría la caña de madera, podemos observar unos productos de alteración ligeramente diferentes. En este caso sobre el metal se aprecia un estrato de producto de aspecto cristalino y color gris oscuro seguido de la capa rojiza y finalmente un estrato de color amarillento, probablemente resultado de la colonización biológica.

Los resultados obtenidos mediante DRX sobre esta película blanquecina indicaron la presencia de dos fases minerales, cotunnita (PbCl_2) y penfieldita [$\text{Pb}_2\text{Cl}_3(\text{OH})$], ambos cloruros de plomo que han sido poco estudiados, pero que en alguna ocasión se han documentado en estudios analíticos de cepos de plomo de procedencia subacuática (Tylecote, 1983). En los análisis realizados no se han identificado otras fases minerales. Esto puede deberse a las limitaciones de identificación por parte de las técnicas de análisis empeladas o a las características de las muestras tomadas. Un mayor número de muestras analizadas y el empleo de otras técnicas analíticas ayudaría a esclarecer la ausencia o no de otros productos.

Una de estas posibles técnicas de identificación de fases minerales es la Espectroscopía RAMAN, empleada para el estudio de minerales y pigmentos a lo largo de las últimas décadas (Roret y Madariaga, 2014; Bersani y Lottici, 2016).

3.4. Tratamientos de conservación

Para la selección de los métodos de remoción de los productos de alteración se realizó previamente una revisión bibliográfica sobre el estado de la cuestión en el diagnóstico del estado de conservación de los plomos arqueológicos y sus tratamientos de conservación. En este caso la bibliografía específica ha resultado escasa debido a la falta de investigación sobre la alteración de plomo arqueológico de procedencia subacuática.

En el caso de la propuesta de conservación de uno de los cepos de la colección se ha optado por la remoción selectiva de los productos de alteración mediante EDTA combinado con gel de agar-agar. Este sistema permite realizar una remoción selectiva de los productos de alteración evitando el esfuerzo físico de las limpiezas mecánicas, que dejan marcas en la superficie dúctil del plomo.

La metodología llevada a cabo ha consistido en la realización de diferentes pruebas variando tiempo y porcentaje de la mezcla de gel agar-agar y EDTA disódico. Finalmente se estableció un porcentaje óptimo del 10 % de EDTA disódico en diferentes tiempos de aplicación en función de la zona a tratar (figura 3).

4. Conclusiones

Se ha realizado el diagnóstico del estado de conservación preliminar de las alteraciones presentes en la colección de 87 cepos del Museo de Cádiz que, de manera general, presentan aquellas propias de objetos de plomo de procedencia subacuática. La caracterización de los productos de alteración de uno de los cepos ha servido para conocer las fases minerales presentes en el mismo.

Por lo general las alteraciones parecen repetirse a excepción de algunos cepos que solo presentan una fina pátina de productos de alteración, posiblemente por tratamientos de conservación y restauración no documentados o por la alteración en ambientes específicos como por ejemplo zonas de lodos con características anaeróbicas.

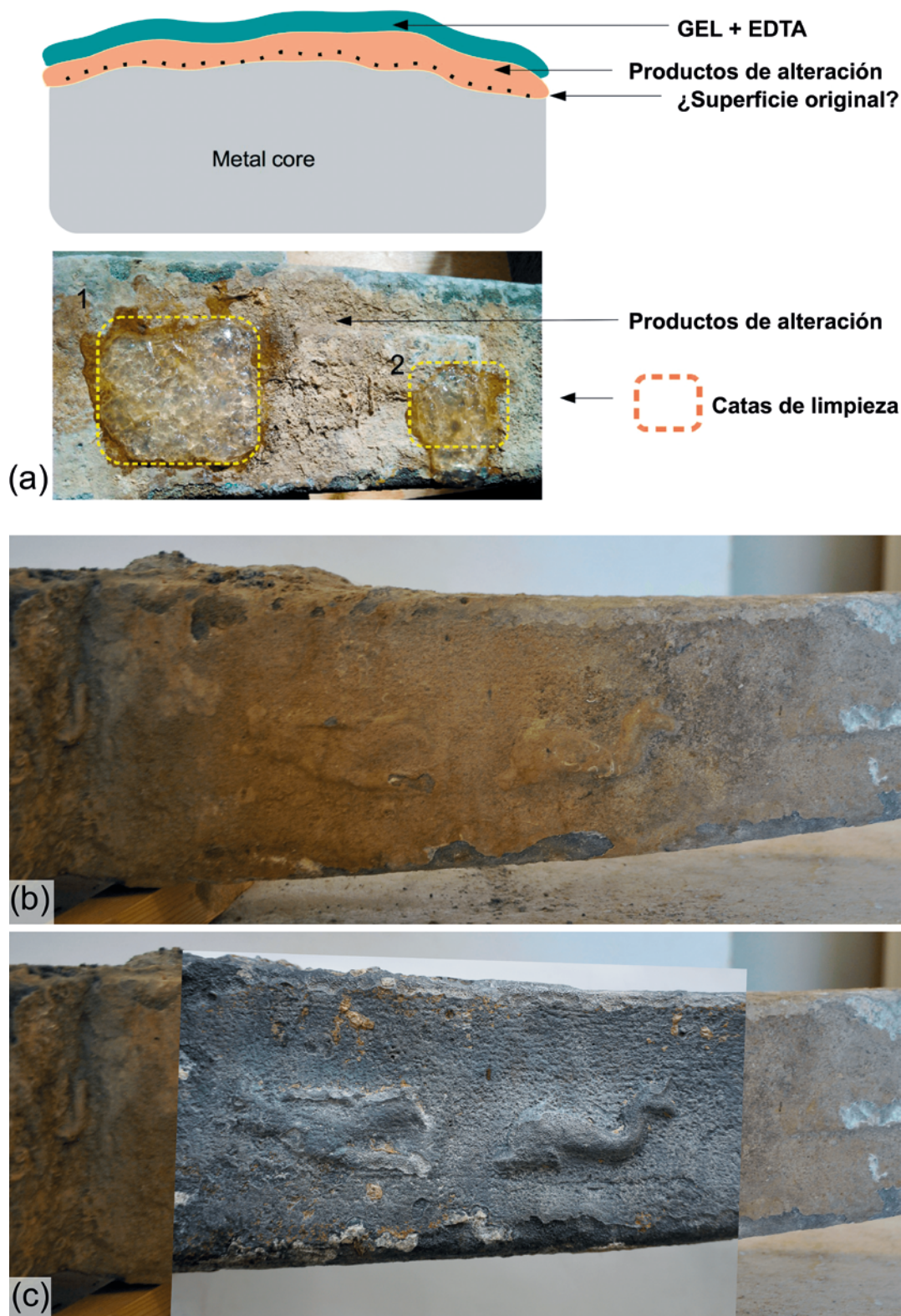


Figura 3. a. Esquema de la metodología empleada para la remoción de los productos de alteración mediante gel agar-agar combinado con EDTA disódica. b. Detalle de la superficie original antes del tratamiento de conservación y estabilización donde se puede apreciar la presencia de abundantes productos de alteración. c. Detalle de la superficie original tras el tratamiento

Figure 3. a. Diagram of the methodology used for the removal of the alteration products using agar-agar gel combined with disodium EDTA. b. Detail of the original surface before conservation and stabilization treatment, showing the presence of abundant alteration products. c. Detail of the original surface after treatment

La presencia de cepos con un mayor grado de alteración puede deberse a los ambientes a los que se han visto expuestos. Estos objetos en la mayoría de los casos han sido depositados en el Museo como fruto de extracciones descontroladas sin rigor arqueológico, lo que conlleva la falta de control en cuanto a las medidas mínimas de conservación preventiva.

Este estudio preliminar plantea la necesidad de realizar un análisis más exhaustivo de estos productos de alteración mediante la realización de muestreos en un mayor número de cepos de la colección objeto de estudio y el posible empleo de otras técnicas de análisis como la Espectroscopía Raman ya citada, ya que un diagnóstico más preciso de las alteraciones y sus productos servirá para optimizar los tratamientos y la eficacia de estos.

En cuanto a la metodología de restauración, los resultados se consideran satisfactorios por cuanto el EDTA disódico combinado con gel de agar-agar ha permitido remover los productos de alteración sin alterar la superficie original (figura 3). Este trabajo ha permitido recuperar diferentes elementos superficiales de gran valor documental como marcas de uso y elementos decorativos y epigráficos.

Agradecimientos

Trabajo realizado en el LEC-PH de la UCA, financiado por FEDER-MICIN EQC2018-004947-P.

Bibliografía

- Barrio, J., Cano, E., Pardo, A.I. y Chamón, J. (2005): "Investigación sobre el proceso de estabilización y limpieza por reducción potencioestática de un plomo epigráfico romano". *Investigación en conservación y restauración: II Congreso del Grupo Español del IIC*.
- Barrio, J., Pardo, A.I., Catalán, E., Gutiérrez, P. y Medina, M.C. (2013): "Técnicas de láser en la restauración de objetos de plomo y aleaciones blandas de procedencia arqueológica". *IV Congreso Latinoamericano de Conservación y Restauración de Metal*: 271-283.
- Bersani, D. y Lottici, P.P. (2016): "Raman spectroscopy of minerals and mineral pigments in archaeometry". *J. Raman Spectrosc.*, 47: 499-530.
- Domenech-Carbó, A., Domenech-Carbó, M.T. y Peiró-Ronda, M. A. (2011): "«One-Touch» Voltammetry of Microparticles for the Identification of Corrosion Products in Archaeological Lead". *Electroanalysis*, 23(6): 1391-1400.
- Haldane, D. (1984): *The wooden anchor*. Texas A&M University. Texas.
- Kapitän, G. (1984): "Ancient anchors-technology and classification". *The International Journal of Nautical Archaeology*, 13(1): 33-44.
- MacLeod, I.D. (1991): "Identification of corrosion products on non-ferrous metal artifacts recovered from shipwrecks". *Studies in Conservation*, 36: 222-234.
- Palomar, T. y Cano, E. (2018): "Comparative assessment of mechanical, chemical and electrochemical procedures for conservation of historical lead". *Journal of Cultural Heritage*, 30: 34-44. <<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.10.010>>.
- Pearson, C. (1987): *Conservation of Marine Archaeological Objects*. Butterworths.
- Perrone, M. (1979): *Ancorae antiquae: Per una cronologia preliminare delle ancore del Mediterraneo*. L'Erma di Bretschneider. Roma.
- Roret, P. y Madariaga, J.M. (2014): "Applications of Raman spectroscopy in art and archaeology". *J. Raman Spectrosc.*, 52: 8-14.
- Tylecote, R.F. (1983): "The Behaviour of Lead as a Corrosion Resistant Medium Undersea and in Soils". *Journal of Archaeological Science*, 10: 397-409.



OPEN ACCESS

EDITED BY

Amaia Ruiz de Alegría-Arzaburu,
Universidad Autónoma de Baja
California, Mexico

REVIEWED BY

Eduardo Cuevas,
Laboratorio de Ecología Espacial y del
Movimiento, Mexico
Christian M. Appendini,
National Autonomous University of
Mexico, Mexico

*CORRESPONDENCE

Tomás Fernández-Montblanc
tomas.fernandez@uca.es

SPECIALTY SECTION

This article was submitted to
Coastal Ocean Processes,
a section of the journal
Frontiers in Marine Science

RECEIVED 28 July 2022

ACCEPTED 10 October 2022

PUBLISHED 09 November 2022

CITATION

Fernández-Montblanc T,
Bethencourt M and Izquierdo A (2022)
Underwater Cultural heritage risk
assessment methodology for wave-
induced hazards: The showcase of the
Bay of Cadiz.
Front. Mar. Sci. 9:1005514.
doi: 10.3389/fmars.2022.1005514

COPYRIGHT

© 2022 Fernández-Montblanc,
Bethencourt and Izquierdo. This is an
open-access article distributed under
the terms of the [Creative Commons
Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). The use,
distribution or reproduction in other
forums is permitted, provided the
original author(s) and the copyright
owner(s) are credited and that the
original publication in this journal is
cited, in accordance with accepted
academic practice. No use,
distribution or reproduction is
permitted which does not comply with
these terms.

Underwater Cultural heritage risk assessment methodology for wave-induced hazards: The showcase of the Bay of Cadiz

Tomás Fernández-Montblanc^{1*}, Manuel Bethencourt²
and Alfredo Izquierdo³

¹Earth Sciences Department, University of Cadiz INMAR, Puerto Real, Spain, ²Department of Materials Science, Metallurgy Engineering and Inorganic Chemistry, University of Cadiz INMAR, Puerto Real, Spain, ³Applied Physics Department, University of Cadiz INMAR, Puerto Real, Spain

Coastal areas are characterized by high energetic conditions associated to the wave transformation process and by numerous underwater cultural heritage (UCH) sites whose preservation is crucial given their cultural and economic value. UCH management requires a decision support system to prioritize UCH interventions and actions for long-term preservation. This paper presents a novel UCH risk assessment methodology to quantitatively assess the impact of wave-induced hazards on UCH in coastal environments at a local level and the screening of UCH sites at risk. The UCH risk is calculated as a function of vulnerability (depending on archaeological materials, slope, and seabed type), hazard (decontextualization, scouring, and erosive wear), and exposure computed for the UCH sites registered in an archaeological database. The procedure was validated at two shipwreck sites, *Bucentaure* and *Fougueux*, in the Bay of Cadiz. An agreement between the risk index value and the *in situ* measurements of the rates of scouring and corrosion (used as a proxy of erosive wear) was observed. The methodology was tested in the Bay of Cadiz using an archaeological database containing 56 UCH sites. It allowed identifying the UCH sites at high risk: six are at risk of decontextualization, four are in peril of scouring erosion, and two are at risk of erosive wear. Two UCH sites at high risk of at least two hazards were also identified. This UCH risk assessment methodology is a stepping stone towards a decision support system that will give priority to research, prospection, management, and protection measures in the UCH sites analyzed to ensure their preservation in a context of climate change in the era of a sustainable blue economy.

KEYWORDS

coastal risk, coastal management, scouring, shipwreck, underwater cultural heritage

1 Introduction

A large number of underwater cultural heritage (UCH) sites are characteristic of coastal areas as a result of the intense use of those areas for human settlement as well as commercial and military purposes for centuries. The concentration of UCH sites is also a direct consequence of coastal sailing and perils such as stormy weather conditions, rocky shoals, or other hazards existing in those areas used for coastal navigation. Shallow coastal waters therefore contain numerous UCH sites. Intensive exploitation of ocean resources, along with the advances in acoustic seafloor mapping, and the expansion of scuba diving in recent decades have contributed to their discovery. Considering the abundance of shipwreck sites and other underwater archaeological structures, an archaeological study or *in situ* protection of all of them is currently unaffordable. Adopting measures to protect underwater archaeological remains, in accordance with the Convention on the Protection of the Underwater Cultural Heritage United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), is challenging when a large number of sites should be managed and considered for interventions with a limited budget.

Furthermore, shallow coastal waters are a very energetic environment where oceanographic agents such as waves, currents, and sediment characteristics determine a dynamic equilibrium. Changes in energetic (e.g., seasonal) conditions can generate the successive burial and exposure of UCH sites (Gregory et al., 2012; Fernández-Montblanc et al., 2016; Fernández-Montblanc et al., 2018), affecting the stability and degradation of UCH materials (Bethencourt et al., 2018; Gregory, 2020). These agents can control the proliferation of harmful organisms for the materials (Ruuskanen et al., 2015; Cámara et al., 2017; González-Duarte et al., 2018), sediment transport, and elimination of concretion layers that act as protective covers of certain archaeological objects (Bethencourt et al., 2018). Therefore, the degradation of UCH sites (Pournou, 2018; Gregory, 2020) may be aggravated in shallow water areas. At the UCH sites located in coastal waters, the degradation rates may experience episodic fluctuations associated with changes in the energetic conditions in the system (Ward et al., 1999). Waves can be considered a major hazard driver for the conservation of UCH sites in wave-exposed coasts. Given the magnitude of the wave force exerted and the sediment transport capacity in shallow water depths, waves contribute to the scattering of archaeological objects and induce scouring or abrasion by displacing sand grains. This results in the loss and degradation of archaeological material.

The scattering of archaeological objects or shipwreck remains caused by waves leads to archaeological decontextualization. It occurs when archaeological objects are transported from their original wreckage location, losing connectivity with their original context and other related archaeological objects.

Decontextualization of UCH artefacts occurs when drag forces induced by waves on the seabed are large enough to transport objects located at the UCH site. Additionally, wave forces and wave load can damage and transport part of the structure of a shipwreck, producing the disintegration and decay of the archaeological structure.

Wave-induced oscillatory flow and turbulence may lead to scouring around the shipwreck or other UCH sites (Quinn, 2006; Fernández-Montblanc et al., 2016). Scouring is a key process for the conservation of UCH because it is able to control the sediment budget around UCH sites. It is the result of the intensification of flow velocity by its interaction with near-seabed objects (Whitehouse, 1998). Scouring largely controls the integrity of the UCH sites. A wooden hull structure can collapse if a scour pit is formed around the archaeological remains. It determines the exposure of the archaeological material to the abrasive effect caused by the suspended sediment particles and also produces drastic changes in other environmental variables (i.e., oxygen concentration, benthic communities) governing the deterioration process (Ward et al., 1999; Quinn, 2006; Bethencourt et al., 2018; Gregory, 2020), for example, scour can increase the oxygen concentration that accelerates the microbial degradation process of the wooden remains (Björdal et al., 2000; Björdal and Nilsson, 2008) and increase the corrosion rates of active metals such as copper or iron (Angelini et al., 2013). Scour also controls the composition of the benthic community that affects the conservation of metallic objects (Bethencourt et al., 2018) or the degradation of stone materials (Cámara et al., 2017). The amplification of maximum orbital velocity and the appearance of shear stress and coherent flow structures caused by waves and seabed structure interactions are the main mechanisms in generating scour associated to waves (Sumer and Fredsøe, 2002). Wave-induced scour will vary depending on the structure's size and wave conditions (McNinch et al., 2006; Fernández-Montblanc et al., 2016).

Suspended sediment transported by currents or waves can produce abrasion by impacting on the surface of the archaeological materials [see Thompson et al. (2011)]. Erosive wear, a wave-induced hazard on UCH, is the process of progressively removing material from a surface due to the repeated impacts of solid particles present in the flow. If there is enough energy, each particle re-suspended in the flow can cut or fracture a small amount of material from the surface. If this is repeated over a long period of time, a significant loss of material may occur. The rate of erosive wear depends on several factors. The characteristics of the suspended particle and its shape, hardness, impact velocity, and impact angle are key factors, along with the properties of the surface being eroded (Bitter, 1963).

Hence, given the profusion of UCH sites in coastal areas and the hazardous conditions linked to wave action, the development of tools and methodologies to select and identify sites prone to

damage is necessary. This is especially relevant in a context of climate change, given the significant changes in wave energy expected by the end of the century (Mentaschi et al., 2017). These methods will allow the screening of UCHs that are more susceptible to be impacted by waves. It provides UCH managers with a tool for decision support in order to prioritize UCH interventions. This tool gives precedence to UCH sites where special measures must be implemented for *in situ* protection or where excavation and documentation must be a priority, as the loss of archaeological information is highly likely.

The present work therefore aims to develop a risk assessment method that takes into account the impact of wave-induced hazards on underwater cultural heritage. This paper is structured as follows: The Methods section describes the methodology developed and the datasets used to validate the proposed methodology; the Results section outlines the main results, including validation and UCH risk assessment in the case of the Bay of Cadiz; in the Discussion section, the applicability, limitations and potential of the methodology are analyzed based on the achieved results; and, finally, the main findings of this paper are summarized.

2 Methods

2.1 Study area

The Bay of Cadiz is an inlet located in the Gulf of Cadiz (southwest coast of the Iberian Peninsula) extending from Punta Candor to Sancti Petri tidal creek (Figure 1A). The seafloor mainly consists of unconsolidated sediments in which the mean grain size varies from very fine quartz sand to very fine gravel. Exceptions in this general pattern are the bedrock crops in the study area (Figure 1A). Wind waves can be considered the key hydrodynamic agent in the area with regard to UCH preservation. The active sector is defined between NNW and SE, with W being the most frequent and WSW the most energetic direction (Figure 1B). Mean wave climate is characterized by low energy [90% of significant wave height (H_s) is <1 m], although H_s can exceed 3 m for 105 hours in an average year (Figure 1C). The peak wave period (T_p) is rarely over 18 s, and the H_s – T_p joint probability plot shows two peaks from 5 to 9 s, and H_s = 1 m, which are representative of mean conditions, whereas for storm wave conditions, it is represented by T_p ~8–12 s and H_s > 3 m (Figure 1D). Tides are semi-diurnal, and the tidal range can be defined as meso-tidal (mean spring range of 2.96 m). Tidal current velocity decreases rapidly in shallow water areas with the exception of the channels and tidal creeks in the Bay of Cadiz.

From a historical and archaeological point of view, because of how old the Bay of Cadiz is as a center of sustained port dominance and the dynamism of the region in terms of maritime cultural activity for millennia, an incredibly large number of

UCH sites are observed. Among the existing archaeological sites, two coetaneous shipwrecks were selected to validate the UCH risk assessment methodology: the *Fougueux* and *Bucentaure* shipwreck sites. Both ships sank during a violent storm after the Battle of Trafalgar (1805). The *Bucentaure* represents a scattered shipwreck site including a total of 22 iron guns and the remains of an anchor (Figure 1E) seated at 12-m depth in the outer Bay of Cadiz (Figure 1A). The seafloor is a combination of a rocky seabed and gravelly quartz sand (D_{50} = 1.095 mm). Meanwhile, the *Fougueux* shipwreck site preserves an important portion of the wooden hull structure along with 31 cannons and an anchor (Figure 1F). *Fougueux* is seated at 7-m depth, and the seabed is mainly composed of unconsolidated sediments, medium and fine quartz sands (D_{50} = 0.177 mm), and a little rock shoal attached to the hull remains of the shipwreck.

2.2 Environmental and archaeological datasets

2.2.1 Bathymetry and sediment characterization

The present work is based on an eco-cartographic study including bathymetry and sediment characterization performed in 2011 (Spanish Ministry of Agriculture, Food and Environment, 2012). Multibeam-derived bathymetry was used for seafloor characterization in the wave model and to calculate the seabed slope. Seafloor mapping from multibeam backscatter was used to classify the seabed type (rocky/unconsolidated sediment). We used data from a field study in the whole Bay of Cadiz comprising 460 samples collected using a Van Veen grab sampler for sediment grain size characterization. A grain size analysis was conducted using the dry sieving method. The statistics of particle size distributions were calculated using the Folk and Ward method with the GRADISTAT software developed by Blott and Pye (2001).

2.2.2 Archaeological database

We created a dedicated archaeological database (ADB) for the Bay of Cadiz based on a scientific literature review including books, papers, and/or conference proceedings. Several bibliographic sources were employed (Guillemot and Meanteau; Lagostena, 2009; Lakey, 1987; García Rivera and Alonso Villalobos, 2005; Alzaga García et al., 2022). The ADB encompasses the archaeological resources identified and geolocalized in the outer Bay of Cadiz. The geolocation of the different UCH sites was established by georeferencing maps and figures of the scientific data sources in ARCGIS 10.1. The ADB contains relevant information about the main characteristics of the UCH sites including origin or provenance, chronology, composed materials organized into five categories (metallic, stone, glass, ceramic, and wood/organic materials), dominant material, and metadata regarding the data source. Basic

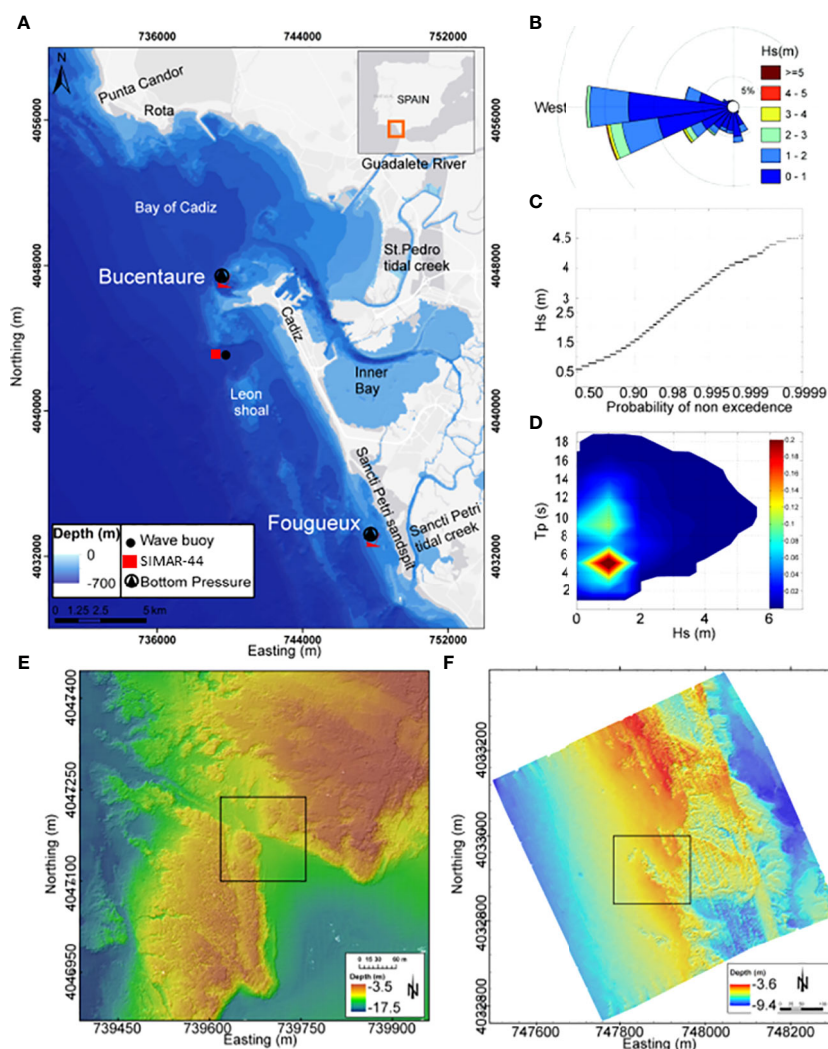


FIGURE 1

(A) Location of the studied sites. (B) Wave rose diagram of significant wave-height for directional wave buoy. (C) Scalar wave climate of significant wave height. (D) Joint distribution of significant wave height (Hs) and peak period (Tp). (E) Bathymetry of the Bucentaure site. (F) Bathymetry of the Fougues site (Fernández-Montblanc et al., 2016).

environmental characteristics of the sites (depth and seabed type), when available, were also added.

2.2.3 Wave database

A simplified version of the hybrid downscaling method (Camus et al., 2011; Diaz-Hernandez et al., 2021) was used to propagate the historical wave hindcast (SIMAR-44) in the outer Bay of Cadiz (Figure 1A). At first, a manual selection of a reduced number of sea states representative of the offshore wave hindcast climate was performed. Then, the selected N sea-states were propagated into the outer Bay of Cadiz using the SWAN third-generation wave model (Booij et al., 1999) implemented on a regular mesh (~37-m resolution). Finally, the whole wave hindcast in each cell of the computational domain was reconstructed based on the interpolation in a 3D matrix of

propagation coefficients for wave direction, peak period, significant wave height, and maximum near-bottom orbital velocity.

2.3 UCH risk assessment

The present work uses the 2009 UNISDR terminology on disaster risk reduction (<https://www.undrr.org/terminology>), and risk (R) is calculated as a function of the hazard (H) with a given probability, vulnerability (V), and exposure (E) [$R = f(H, V, E)$] (Field and Barros, 2014). We developed an UCH risk assessment methodology, whose workflow is schematized in Figure 2. The UCH risk assessment presented here is based on the risk index calculated at each specific location in accordance

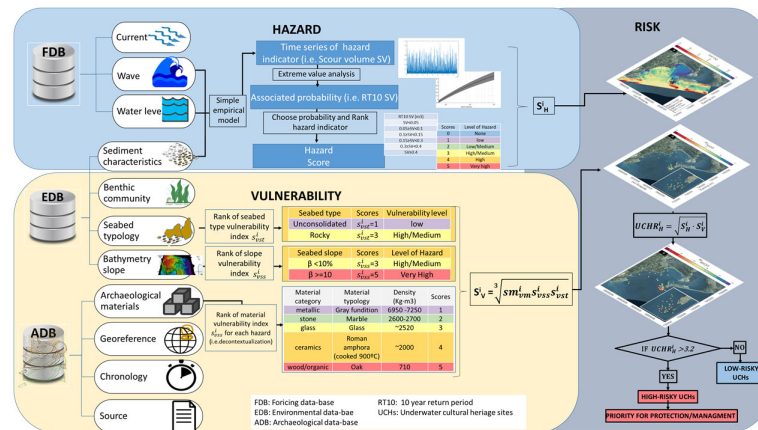


FIGURE 2
Workflow of the developed underwater cultural heritage risk assessment methodology.

with the main environmental and UCH site characteristics following an object-oriented approach. Each specific site registered in the archaeological database was considered an asset to be potentially damaged by the considered hazard. This paper focuses on the identification and screening of those UCH sites at high risk, where waves may imperil the sites, thus facilitating the loss of archaeological information and the degradation of archaeological materials and hampering the *in situ* preservation of UCH sites considered as a priority option. This conservation approach is included in Rule 1 of the Guidelines to the Annex of the Convention on the Protection of the Underwater Cultural Heritage—UNESCO that establishes *in situ* preservation as the first option for UCH protection. The methodology followed the scheme used in previous studies on coastal risk assessment at the regional scale [i.e., CRAFT1 (Armaroli and Duo, 2018; Ferreira et al., 2018)]. A GIS index and a simple empirical model-based approach were integrated to support decision making and prioritizing the investment in available resources and actions to counteract the effect of wind waves in the UCH sites at high risk.

The methodology was designed to be applied from the local to the regional scale $\approx O$ (10–100 km), targeting to avoid the request of very detailed environmental information (e.g., DEM resolution < 1 m).

A complete risk assessment would require exposure quantification based on the valuation of UCH sites. This high level of baseline information is rarely available at the local or regional scales. Therefore, we considered a similar market and not market value for all the UCH sites in the database, assuming equal exposure values for all the UCH sites. The risk index was then calculated as the root geometric mean of the hazard multiplied by vulnerability scores according to Eq. 1 (Gornitz, 1990; Viavattene et al., 2018).

$$UCHR_H^i = \sqrt{S_H^i \cdot S_V^i} \quad \text{Eq. 1}$$

where $UCHR_H^i$ is the UCH risk index for each hazard (H) at each specific archaeological site (i), S_H^i is the score of the hazard, and S_V^i is the score of the vulnerability at site i . $UCHR_H^i$ is an index (integer values from 0 to 5) associated to each UCH site that allows quantitatively comparing different UCH sites located in the region of analysis and showing the UCH sites at high risk of the specific hazards. The S_H^i is a six-class score ranging from 0 to 5 which correspond to none, low, low-medium, medium-high, high, and very high hazard. The level of hazard is defined in accordance with the magnitude of the hazard associated to a given non-exceedance probability expressed as a return period. The S_V^i is a score which ranges from 1 to 5 (low to very high classes) that represents the vulnerability of the UCH sites according to the characteristics of the archaeological material prevalent in the UCH site, its propensity to be affected by a certain hazard, and the environmental factors that increase or reduce the susceptibility of the UCH sites to the impacts produced by the considered hazards.

An UCH site is considered at risk if the risk index $UCHR_H^i > 3.2$. This threshold corresponds to the rounded root square of low (2) and very high (5) classes (Viavattene et al., 2018). UCH sites with higher values are those subject to the combination of medium and very high classes of vulnerability and hazard.

The vulnerability and hazard levels at each UCH site are specified in the sections below and summarized in Tables 1, 2. There is a lack of information relative to the definition of the hazard and vulnerability threshold to define the different categories of hazard and vulnerability levels. Therefore, those levels have been defined by expert judgment with local knowledge in oceanography and UCH conservation. The group of experts includes oceanographers, archaeologists, conservators, biologists, physicists, chemists, and engineers.

TABLE 1 Hazard indicator scores for decontextualization, erosive wear, and scouring.

Critical size of decontextualized object, Dcr (m) RT10	Erosive wear potential, EWP (J/m ³)RT1	Scouring volume, SV (m ³) RT10	Scores	Level of hazard
Dcr < 0.02	-20 ≥ EWP < -18	SV < 0.05	0	None
0.02 ≥ Dcr < 0.04	-18 ≥ EWP < -16	0.05 ≥ SV < 0.1	1	Low
0.04 ≥ Dcr < 0.08	-16 ≥ EWP < -13.5	0.1 ≥ SV < 0.15	2	Low/medium
0.08 ≥ Dcr < 0.12	-13.5 ≥ EWP < -12.5	0.15 ≥ SV < 0.3	3	High/medium
0.12 ≥ Dcr < 0.16	-12.5 ≥ EWP < -11.5	0.3 ≥ SV < 0.4	4	High
Dcr ≥ 0.16	EWP ≥ -11.5	SV ≥ 0.4	5	Very high

RT10 corresponds to the value of a 10-year return period and RT1 to a 1-year return period.

2.4 Hazard assessment

Previous studies have identified physical factors (Ward et al., 1999) and, more particularly, wind waves to be key in preserving UCH and in the evolution of UCH sites in shallow water sites (Quinn, 2006; Fernández-Montblanc et al., 2016). This work therefore focuses on wave-induced hazards on archaeological sites in shallow water. Three wave-induced hazards were selected considering their impact in the long-term preservation of UCH: archaeological decontextualization, scouring (SC), and erosive wear (EW). For those hazards, risk assessment was performed independently without taking into account multi-hazard interactions.

A simple three-step workflow was applied for the hazard assessment (Ferreira et al., 2018; Viavattene et al., 2018). First, the

time series of the hazard indicator was calculated in accordance with bathymetry, sediment, grain size, wave characteristics, and water level. Second, a fit to an extreme value distribution was applied to calculate the associated probability. In this case, the transformed-stationary methodology was applied, including a 72-h time window for storm decluttering and a constant threshold (97th percentile) to select the extreme event. Then, the selected hazard events were fit into the generalized Pareto distribution [see Mentaschi et al. (2016) for further details]. Finally, the hazard scores were defined by ranking the hazard indicator for the selected probabilities.

This methodology followed the so-called response approach (Garrity et al., 2007), which is widely used for coastal storm impact assessment. This approach consists in calculating the probability of occurrence of the hazard (*i.e.*, archaeological decontextualization),

TABLE 2 Vulnerability scores in common materials in underwater cultural heritage sites for decontextualization, erosive wear, and scour hazard.

Material category	Material type	Property: density (kg·cm ³)	Property: Brinel hardness scale	Proxy sensitivity to aerobic biological communities	Vulnerability score
Decontextualization					
Metallic	Gray iron	6.95–7.25			1
Stone	Marble	2.6–2.8			2
Glass	Glass	~2.52			3
Ceramics	Coarse ware	~2.0			4
wood/organic	Oak	0.71			5
Erosive wear					
Glass	Glass		482–550		1
Metallic	Gray iron		140–250		2
Ceramics	Coarse ware		120–125		3
Stone	Marble		35		4
Wood/organic	Oak		4–8		5
Scour					
Stone	Marble			–	1
Metallic	Gray iron			–	2
Ceramics	Coarse ware			+	3
Glass	Glass			++	4
Wood/organic	Oak			+++	5

The increase in sensitivity to biological degradation is indicated from low sensitivity (–) to very high sensitivity (+++).

but not of the driver, or variables governing the hazard (i.e., water level, wave period and significant wave height).

2.4.1 Archaeological decontextualization hazard

The decontextualization of an UCH artefact occurs when drag forces induced by waves on the seabed are sufficient to transport objects located in the UCH site. Furthermore, wave forces and wave load can damage and transport part of the damaged structure away from the shipwreck site, producing the disintegration and decay of the archaeological structure (Ward et al., 1999). The potential damage of scattering and loss of archaeological artifacts induced by waves was evaluated using Eq. 2 as proposed by Soulsby (1997) for the threshold motion of large-diameter particles, taking into account the sole action of wind waves.

$$D_{cr} = \left(\frac{97.9 U_b^{3.08}}{T p_{1.08} \left[g \left(\left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) - 1 \right) \right]^{2.08}} \right)^{0.5} \quad \text{Eq. 2}$$

where U_b is the undisturbed near-bed orbital velocity, T_p is the peak wave period, g is the gravitational constant, ρ_s is the density of the grain sediment, and ρ is the seawater density.

The scattering and loss of archaeological objects at UCH sites depends on the material, size, and shape of the archaeological objects. For the sake of simplicity, in the present study, a spherical shape and quartz density ($2,600 \text{ kg m}^{-3}$) was assumed based on the shape and density of the material employed to derive the empirical Eq. 2. This assumption does not represent the specific shape and density of the archaeological materials but allows calculating the potential decontextualization comparing the hazard of the different UCH sites without requesting specific and detailed information on the size, shape, or density of the objects or structures in the UCH sites. This information is incorporated into the risk assessment by specifying the vulnerability in accordance with the type of the archaeological material. Table 1 shows the decontextualization hazard scores. In this case, the selected probability corresponds to the 10-year return period, an intermediate value in the extreme distribution. The ranges of the hazard magnitude to score the hazards were defined and compliant with expert judgment based on local knowledge.

2.4.2 Scour hazard

The potential scour was estimated using the equilibrium scour depth. Calculating the equilibrium scour depth was based on Eq. 3 for maximum scour depth and Eq. 4 (Sumer and Fredsøe, 1990) for the maximum scour length for wave-induced scour on pipelines. A constant archaeological object/structure of a cylindrical shape of 1 m in diameter was assumed.

$$S_{max} = D \cdot 0.1 \cdot \sqrt{KC} \quad \text{Eq. 3}$$

$$L_{Smax} = D \cdot 0.35 \cdot KC^{0.65} \quad \text{Eq. 4}$$

where $KC = U_b \cdot T_p / D$ is the Keulegan–Carpenter dimensionless number, U_b is the maximum undisturbed near-bed orbital velocity, T_p is the peak wave period, and D is the structure diameter (1 m).

In the case of breaking or near-breaking wave conditions, the equilibrium scour depth was calculated according to expressions Eq. 5 and Eq. 6 proposed by Young and Testik (2009) for vertical and semicircular breakwaters applied for conditions $0.6 < KC_H \leq 9.0$ and $0.4 < fb \leq 1.7$,

where KC_H is the Keulegan–Carpenter number expressed as a function of the significant wave height (H_s , $KC_H = H_s \cdot \pi / D$), and fb is the ratio of the water depth and structure height ($(h - D) / H_s^2$, h is the water depth, and D is the structure/object diameter:

$$S_{max} = D \cdot 0.125 \cdot KC_H \sqrt{\psi} \quad \text{Eq. 5}$$

$$L_{Smax} = \begin{cases} D/2 \cdot KC_H, & KC_H > \pi, \text{ detached scour} \\ D \cdot KC, & KC_H \leq \pi \text{ attached scour} \end{cases} \quad \text{Eq. 6}$$

Both equations allow calculating the maximum scour depth and the length of the scour hole. If the scour mark is approximated to a triangular shape, the volume of scour can be calculated (Eq. 7) and used as an indicator of the magnitude of the scour.

$$SCV = \frac{1}{2} S_{max} L_{Smax} \quad \text{Eq. 7}$$

Table 1 presents the scour hazard scores. In this case, the selected probability corresponds to the 10-year return period, an intermediate value in the extreme distribution.

2.4.3 Wear hazard

Wear hazard refers to the erosive wear caused by solid particle erosion, the process that occurs on archaeological structures/artifacts in the seabed exposed to the impact of suspended sediment particles transported by waves. The optimal approach to evaluate this hazard includes estimating the volume of material eroded by a single grain impact (V_i) according to the impact wear equation proposed by Bitter (1963). However, this approach requires specific measurements and the details of the threshold energy required for impact as well as the kinetic energy necessary to erode a unit of volume of material, depending on the status of the different archaeological materials.

This information is not available at the regional or local scale for all the archaeological sites. Therefore, the erosive wear potential ($EWP = \log(KE \cdot IR)$) is used as an erosive wear hazard indicator. It is calculated using the kinetic energy ($KE = \frac{1}{2} (M_{sp} U_i^2)$ (where U_i is the grain velocity and M_{sp} the mass of the particle) of the impacting grain considering the direction that maximizes the erosion ($\alpha = 90^\circ$) multiplied by

the impact rate (Thompson et al., 2011) ($IR=C/M_{sp}$ assumed to be proportional to the sediment concentration divided by the mass of the sediment particle).

We can assume $U_i \approx U_b$ considering the low velocity lag between flow and sediment particles in non-concentrated flows (Nian-Sheng, 2004). $M_{sp} = (\frac{4}{3}) \cdot \pi (\frac{D_{50}}{2})^3 (\frac{\rho_s}{\rho})$ is calculated assuming spherical particles, quartz density ($\rho_s=2600\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), and seawater density ($\rho=1025\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Sediment concentration was calculated at a reference level of 0.5 m above seabed, assuming a logarithmic profile (van Rijn, 1993).

$$C(z) = C_o \left(\left(h - \frac{z}{k} \right) \left(\frac{a}{h-a} \right) \right)^{\frac{w_s}{k u_*}} \quad \text{Eq. 8}$$

where h is the water depth accounting for the tidal variability of the sea surface, z is the height above bed, a is the reference level ($a=10D_{50}$) (Nielsen, 1986), D_{50} being the median particle size; w_s the particle settling velocity, k the von Karman's constant (0.4), and u_* the wave friction velocity.

The reference concentration (C_o) is given from equation Eq. 9, and shield entrainment (θ_s) is given from Eq. 10 as proposed by Zyserman and Fredsøe (1994):

$$C_o = \frac{0.331(\theta_s - 0.045)^{1.75}}{1 + \frac{0.331}{0.46}(\theta_s - 0.045)^{1.75}} \quad \text{Eq. 9}$$

$$\theta_s = \frac{f_w U_b}{2g \left(\left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) - 1 \right)} \quad \text{Eq. 10}$$

and the critical shield parameter for the initiation of motion is given by the expression proposed by Soulsby (1997):

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2D_*} + 0.055 \left(1 - \exp(-0.02D_*) \right) \quad \text{Eq. 11}$$

where D_* is the dimensionless grain diameter:

$$D_* = D_{50} \left[\frac{g \left(\left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) - 1 \right)}{\Omega^2} \right]^{1/3} \quad \text{Eq. 12}$$

f_w is the wave friction factor for oscillatory flow assuming the sheet flow estimated as follows (van Rijn, 1993):

$$f = \begin{cases} \exp(-6 + 5.2 \left(\frac{A_w}{K_s} \right)^{-0.19}) & \text{rough oscillatory flow } (Re \geq 1e6) \\ 0.09(U_b A_w / \Omega)^{-0.2} & \text{smooth oscillatory flow } (1.5e5 \leq Re < 1e6) \\ 2(U_b A_w / \Omega)^{-0.5} & \text{laminar oscillatory flow } (Re \leq 1.5e5) \end{cases} \quad \text{Eq. 13}$$

$A_w = \frac{T_p}{2\pi} U_b$ is the peak orbital excursion, T_p is the peak wave period, U_b is the undisturbed near-bed orbital velocity, Ω is the kinematic viscosity ($1.075e-6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$), $K_s=2.5D_{50}$ is the bed roughness (Soulsby, 1997), and $Re=U_b A_w / \Omega$ is the Reynolds number.

The settling velocity w_s is calculated in accordance with the equation proposed by Soulsby (1997):

$$w_s = \frac{9}{D_{50}} \left[(10.36^2 + 1.049D_*^3)^{0.5} - 10.36 \right] \quad \text{Eq. 14}$$

The friction velocity is estimated in accordance with the equation proposed by van Rijn (1993):

$$u_* = \sqrt{\frac{1}{4} \rho f_w U_b^2 / \rho} \quad \text{Eq. 15}$$

The suspended sediment concentration is calculated for those sea states where the shield number exceeds the critical value ($\theta_s > \theta_{cr}$), and friction velocity is larger than settling velocity ($u_* > w_s$). If any of these conditions is not met, the suspended sediment concentration is assumed to be zero.

Table 1 presents the scores of the erosive wear hazard. In this case, the indicator is based on a high probability event corresponding to a 1-year return period. This high frequency value in the extreme distribution was selected to account for the continuous effect of erosive wear to damage UCH materials rather than the occasional (longer return periods) erosive wear effect that takes place for a limited time in an extreme event.

2.5 Vulnerability assessment

According to the 2009 UNISDR terminology, vulnerability is defined in terms of the conditions determined by physical, social, economic and environmental factors or processes which increase the susceptibility of an individual, a community, assets, or systems to the impacts of hazards. In this paper, vulnerability of UCH assets is determined by the characteristics of the archaeological material that prevails in the UCH site (metal, stone, wood, ceramic, and glass) and its tendency to be affected by a certain hazard and the environmental characteristics that increase the susceptibility of the UCH assets to be impacted by a hazard. The vulnerability index for the prevalent materials was established according to the specificity of the UCH site types in the study area and the main characteristics of the archaeological material. Thus, the vulnerability of metallic materials is defined in compliance with the specific properties of gray iron, the most frequent metallic material in the archaeological database of the case study. The ceramic vulnerability was established according to the properties of coarse ware, the type of archaeological artifact most represented in the ADB.

The vulnerability index related to the materials (sm_{vm}^i) is sensitive to the hazard considered. It is therefore defined in conformity with the specific properties of each material to cope with a certain hazard—for instance, stone materials (marble in our ADB) may be more vulnerable to erosive wear hazard than metallic (gray iron) ones, as they stand lower in the Brinell hardness scale or the equivalent hardness scale. However, marble is less vulnerable than gray iron to the impact of the decontextualization hazard based on the higher density

property used to define the propensity of materials to be transported by waves.

The vulnerability index related to the materials ranges from 1 to 5 after assigning a score (1 to 5) to the types of materials (metal, stone, wood, ceramic, and glass). The vulnerability assigned by materials and hazards is summarized in Table 2. It includes the categories and types of materials as well as the properties selected to assign the vulnerability.

Regarding the decontextualization hazard, we did not have real data of the objects in each site. We decided to establish the rank based on the density of the main materials that can be found in the sites. The values in Table 2 are commercial, except in the case of ceramics, and obtained from Vila Socias et al. (2007).

With respect to the erosive wear hazard, Table 2 shows the hardness values of the main types of materials located in the sites on the Brinell scale (Vander Voort, 2000). In the case of stone and wood, the value is established by comparison with another material capable of scratching it. Coarse ware is scratched with steel, which has a Brinell hardness number (BHN) of 125, and oak is scratched with copper, which has a BHN of 35.

In the case of scour hazard, Table 2 ranks the material according to its sensitivity of the aerobic biological communities. The scour processes facilitate the increase of dissolved oxygen transforming the anoxic condition of the sediment into well-oxygenated waters. The aerobic biological communities living in this environment produce the deterioration of the different materials depending on their nature (Pearson, 1987), for example, in the waters of the Bay of Cadiz, wood is badly affected by mollusks of the genus *Teredo*.

Moreover, vulnerability was defined accounting for the environmental factors (seabed slope s_{vss}^i and seabed typology s_{vst}^i), which increase or decrease the susceptibility of the UCH sites to the impacts of each assessed hazard. In this case, the vulnerability index related to the environmental factors was considered constant for all the hazards. According to expert judgment, the higher values of vulnerability level (5) were established for those conditions that significantly amplify the vulnerability, the lower value (1) was established for those conditions that significantly decrease the vulnerability, and a neutral value of 3 was established for those conditions that do not modify the vulnerability. Following this approach, the seabed slope increased the vertical and horizontal velocities and the turbulence because of the modification of waves and current velocity fields. These amplifications cannot be addressed properly with the resolution and processes parametrized in commonly used wave propagation models for coastal applications. They could lead to greater susceptibility of the UCH sites located at a sloped seabed to the impact of the decontextualization, erosive wear, and scour hazards. Therefore, a sloped seabed (>10%) was scored as high vulnerability class ($s_{vss}^i=5$) and a gentle sloped seabed as medium vulnerability class ($s_{vss}^i=3$). The second environmental factor considered is the type of seabed. In this paper, two categories, rocky and non-consolidated seabed,

were established in accordance with the seabed characteristics in the case study. However, they can be adapted to other categories (salt marsh vegetation, seagrass meadows, etc.). In this case, the UCH sites lying on a rocky seabed were scored as low vulnerability class ($s_{vst}^i=1$) and those on a non-consolidated one as medium vulnerability class ($s_{vst}^i=3$). Although the rocky seabed may house sand patches, the limited quantity of sediment potentially reduces the scour, and erosive wear is limited in comparison with the non-consolidated seabed. The decontextualization hazard is reduced because the irregularities in a rocky seabed may protect the archaeological objects hampering scattering by wave action. Table 3 lists the vulnerability scores according to the slope and the type of seabed.

The final vulnerability index S_V^i was calculated as the geometric mean of all the vulnerability indicators, the material-related vulnerability index (sm_{vm}^i) established from the ADB, and the environmental vulnerability indicator (seabed slope index (s_{vss}^i) and seabed type index (s_{vst}^i)). These values were established from the DEM dataset and the seabed type dataset. The final value of S_V^i may take values from 1, indicating low-vulnerability class, to 5, for the very-high-vulnerability class.

$$S_V^i = [sm_{vm}^i \cdot s_{vss}^i \cdot s_{vst}^i]^{1/3} \quad \text{Eq. 16}$$

2.6 Validation of the UCH risk assessment methodology

The *Fougueux* and *Bucentaure* sites were monitored, and metallic archaeological artifacts from each site were analyzed using archaeometric techniques to evaluate their degree of stability (Bethencourt et al., 2018). The result was used to validate the method for UCH risk assessment presented in this paper, focusing on erosive wear and scour hazards. Unfortunately, there are no data available to evaluate the decontextualization hazard in the study area.

At both sites, several cannons and anchors were selected as targets to establish their current conservation condition and to assess their prospects for *in situ* conservation. First, partial deconcretion was carried out, which allowed performing *in situ* measurements of the pH and corrosion potential of the iron object, E_{corr} [see Bethencourt et al. (2018) for further details]. The conservation status of the cannons was assessed by

TABLE 3 Vulnerability scores by environmental factors in underwater cultural heritage sites.

Slope, β (%)	Vulnerability score	Bed type	Vulnerability score
$\beta < 10$	3	Rock	1
$\beta \geq 10$	5	Not consolidated	3

measuring the thickness of the surface corrosion layer. Then, the mean corrosion rate of the archaeological object was estimated by dividing the surface corrosion layer by the number of years since wrecking.

The spatial pattern of the corrosion rates measured in the cannons of the *Fougueux* site was analyzed with regard to the seabed type and slope in order to evaluate the vulnerability index related to environmental factors. The method to estimate the erosive wear risk was also validated by comparing the corrosion rates calculated from *in situ* measurement at both sites as a proxy of the erosive wear at the sites.

The accretion–erosion model derived by subtracting different DEM from time lapsed bathymetric surveys conducted in the *Fougueux* and *Bucentaure* sites [see Fernández-Montblanc et al. (2016) and Bethencourt et al. (2018) for further details] was used to evaluate the UCH risk assessment for the scour hazard.

3 Results

3.1 Archaeological database

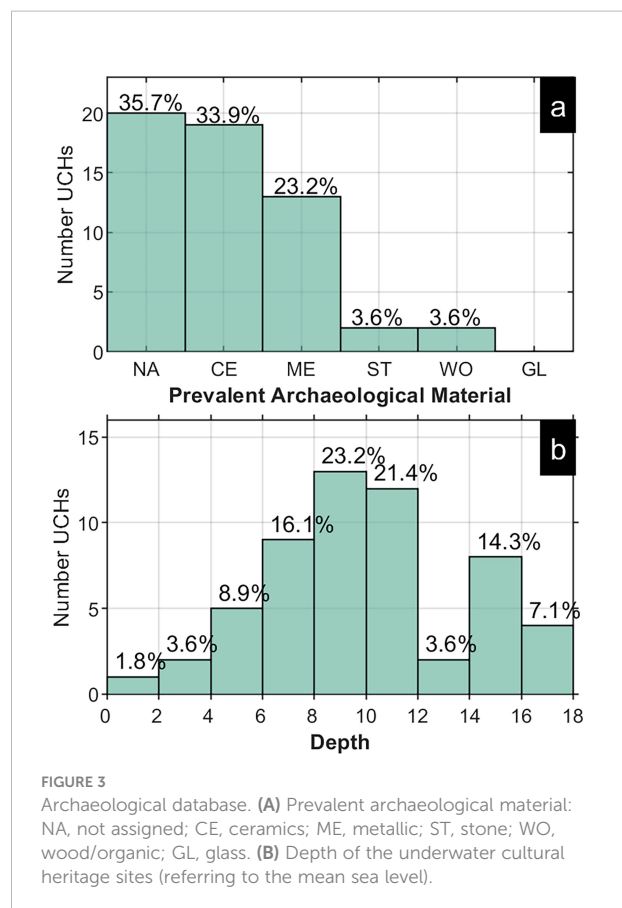
The ADB incorporated a total of 56 UCH sites located at the outer Bay of Cadiz. Regarding the archaeological material, ceramic (34%) and metallic (23%) materials are the most commonly prevalent materials in the UCH sites where this information is available. In the ADB, UCH sites are rarely composed of prevalent materials such as wood and stone (~4%). The ADB included 36% of the UCH sites without information relative to the archaeological material corresponding to the modern period (Figure 3A). For that period, metal was the most common material in the rest of the UCH sites included in the database when that information was available in the bibliographic references. Therefore, we assigned the metallic material as prevalent in those UCH sites lacking information relative to the material composition. Most of the sites (~47%) range from 8 to 12 m in depth, and few of them (5%) are in very shallow water (<4 m) (Figure 3B).

The bibliographic sources used to build the ADB include the main materials present in these sites. We divided them into five categories, each represented by the most common material, namely: metallic (gray iron), stone (marble), glass (glass), ceramics (coarse ware), and wood/organic (oak).

3.2 Hazard assessment in the Bay of Cadiz

3.2.1 Decontextualization hazard

Figure 4A shows the distribution of the maximum critical size of an object that could be moved due to wave action in a 10-year return period (RT10). Overall, the area is characterized by an average value of 0.12 m. Values larger than 0.15 m of critical size were observed in 25% of the outer bay, mostly in shallower



regions. Figure 4B relates the number of UCH sites located in areas with the different classes of hazard. Seven UCH sites are located in very-high-hazard areas ($D_{cr} \geq 0.16$ m) and nine in high-hazard areas ($0.12 \leq D_{cr} < 0.16$).

3.2.2 Scour hazard

The spatial pattern of scour hazard represented by the potential scour volume corresponding to RT10 is presented in Figure 5A. A potential scour volume of 0.32 m^3 is observed in most of the area, while values $>0.5 \text{ m}^3$ can be observed in the north, central, and southern coastal areas. Most of the UCH sites (~38%) show SC hazard values ranging from 0.3 to 0.4 m^3 . Only one UCH site is located in an area with a very high hazard category ($>0.7 \text{ m}^3$), while four UCH sites ($0.5\text{--}0.6 \text{ m}^3$) are in areas categorized as high-hazard areas (Figure 5B).

3.2.3 Erosive wear hazard

The erosive wear hazard ranges from -16 to -12 (Figure 6A). Most of the area is characterized by -13.5. The higher erosion potential (< -12.5) was observed in the mouth of the bay and in the southern areas. These areas combine higher wave bed shear stress and orbital velocity with finer sediment that can be easily resuspended. Most of the sites (~70%) in the central area are located in medium–high hazard areas, whereas only one UCH site was affected by high EW hazard (Figure 6B).

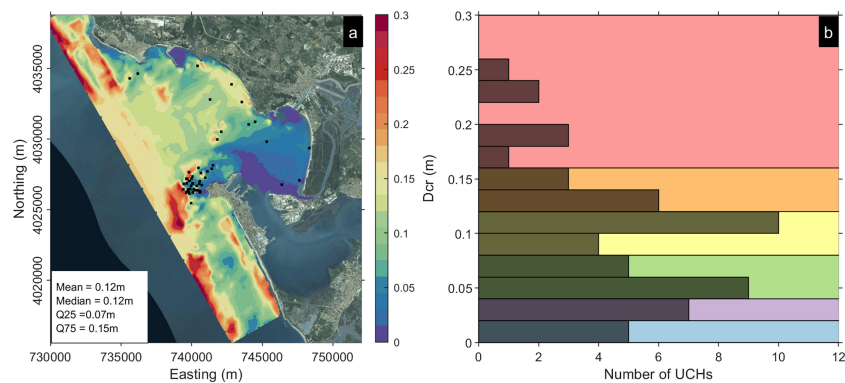


FIGURE 4

(A) Map of decontextualization hazard (critical diameter moved under wave action) in the outer Bay of Cadiz [black dots mark the position of the underwater cultural heritage (UCH) sites]. (B) Histogram of the hazard at UCH sites and hazard classes (background color).

3.3 UCH risk assessment in the Bay of Cadiz

3.3.1 Decontextualization risk

The calculated $UCHR_{DE}$ risk indexes are distributed around the median value of 2.5 (Figures 7A, B). The UCH sites with higher $UCHR_{DE}$ values (>3) are located in the southern area of the mouth of the Bay of Cadiz (Figure 8A), where six UCH sites exceeding the threshold of 3.2 are located (Figure 7B). Metallic materials are prevalent in five of them, and only one is a ceramic material showing a higher $UCHR_{DE}$ value (3.6). The UCHs composed of wood—therefore with a higher vulnerability index related to the prevalent material—are located in a low-energy area at the sandy coast of the inner bay characterized by low-wave orbital velocities.

3.3.2 Scour risk

The $UCHR_{SC}$ index oscillates between low-medium and medium-high values (1.5–2.5) in most of the UCH sites registered in the ADB (Figures 8A, B). A total of four UCH sites were identified as high-risk sites, all of them in the southern side of the mouth of the Bay of Cadiz (Figure 8A). Three of these UCH sites correspond to sites where metallic materials prevail, including the site with a higher $UCHR_{SC}$ (3.94). Only one site is composed of ceramic material ($UCHR_{SC} = 3.87$). The risk index in wooden UCH sites increases compared with the decontextualization hazard, with maximum values of 2.7.

3.3.3 Erosive wear risk

The risk imposed by the erosive wear hazard is depicted in Figure 9. The $UCHWR_{WE}$ index shows the lower spread ($Sd = 0.35$)

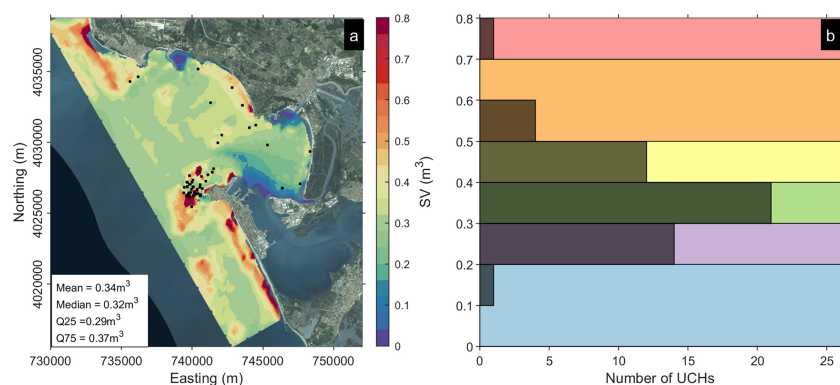


FIGURE 5

(A) Map of scour hazard (scour volume) in the outer Bay of Cadiz. (B) Histogram of the hazard at underwater cultural heritage sites and hazard classes (background color).

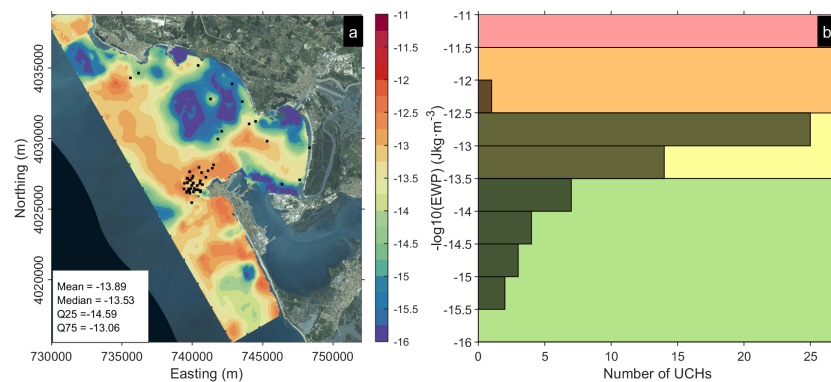


FIGURE 6

(A) Map of erosive wear hazard (log of erosive wear potential) in the outer Bay of Cadiz. (B) Histogram of the hazard at underwater cultural heritage sites and hazard classes (background color).

among the hazards analyzed. The most frequent categories of erosive wear risk for the UCH sites in the Bay of Cadiz are medium-high and high (Figures 9A, B). However, only two sites exceed $UCHR_{WE} > 3.2$. As in the previous cases, these sites are located in the area with a higher concentration of UCH sites. Those UCH sites include one site composed of metallic artifacts ($UCHR_{WE} = 3.24$) and another site where ceramic is the prevailing material ($UCHR_{WE} = 3.27$).

3.4 Validation of the UCH risk assessment methodology for erosive wear and scour hazards

The qualitative assessment of the vulnerability index related to the environmental factors in comparison with the estimated

corrosion rates (CR) of cannons at the *Fougueux* site indicates a good correlation between the higher values of corrosion rates in metallic artefacts and the seabed type and slope. Higher values of CR are associated to cannons located in sandy seabeds and slopes $>10\%$ (Figure 10). The statistical significance of the differences in the averages of CR of each group of cannons according to the environmental factor was evaluated through a *t*-test. A comparison between cannons located on a sandy bottom ($0.20 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$) and on a rocky bottom ($0.22 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$) indicates significant differences ($p\text{-value} = 0.03$) at 0.05% significance level. No significant differences were found between gentle slope seabeds ($<10\%$) ($0.21 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$) and sloped seabeds ($0.24 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$), although only one cannon was on a sloped seabed, thus reducing the test validity.

Regarding the risk assessment, good agreement was observed between CR, the proxy used to estimate the erosive

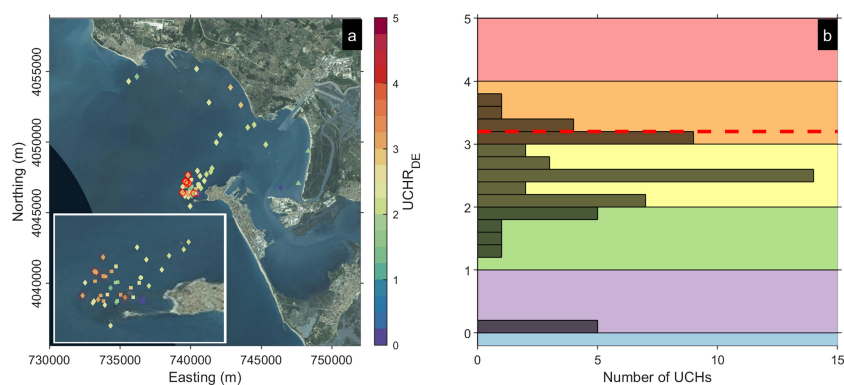


FIGURE 7

(A) Decontextualization risk in the outer Bay of Cadiz. Warm colors indicate a higher risk index, and the different shapes refer to the prevalent material (diamond, metallic; square, ceramics; filled circles, stone; triangles, wood/organic). The red circles represent the underwater cultural heritage (UCH) sites where $UCHR_{DE} > 3.2$. (B) Histogram of the decontextualization risk index. The red dashed line shows the threshold (3.2) used to identify UCH sites at risk.

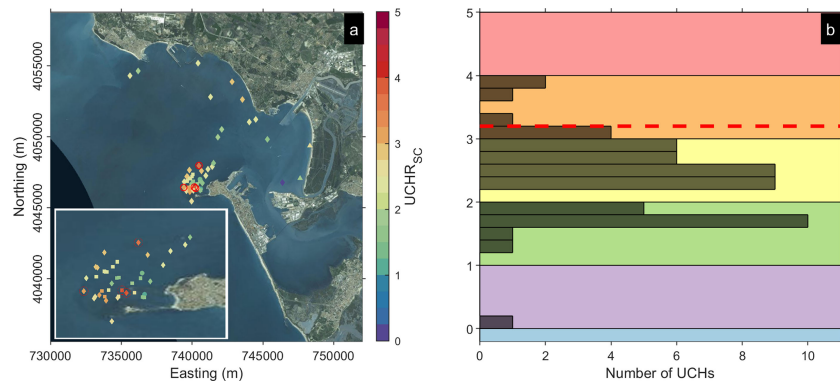


FIGURE 8

(A) Scour risk in the outer Bay of Cadiz. Warm colors indicate a higher risk index, and the different shapes refer to the prevalent material (diamond, metallic; square, ceramics; filled circles, stone; triangles, wood/organic). The red circles represent the underwater cultural heritage (UCH) sites where $UHR_{SC} > 3.2$. (B) Histogram of the scour risk index. The red dashed line shows the threshold (3.2) used to identify UCH sites at risk.

wear impact, and the erosive wear risk index calculated at the *Fougueux* and *Bucentaure* sites (Table 4). The averages of the cannons' CR were $0.11 \text{ mm} \cdot \text{year}^{-1}$ at the *Bucentaure* site and $0.22 \text{ mm} \cdot \text{year}^{-1}$ at the *Fougueux* site. The difference is statistically significant according to the *t*-test (p -value = $2e-9$). These values of corrosion rates correspond to 0 and 3.27 erosive wear risk index, indicating a large difference that marks the *Fougueux* site over the threshold to mark high-risk sites. No re-suspension was observed for the *Bucentaure* site that could lead to erosive wear potential (EWP) ($S_H=0$), whereas the EWP for RT10 was $9.5e-13$ ($S_H=4$) at the *Fougueux* site. The vulnerability score was similar at both sites ($S_V = 2.67$), which is the result of gentle slopes ($s_{vss}=3$) and sandy seabed as the dominant seabed types in the

sites ($s_{vst}=3$) and gray iron as the prevalent material ($sm_{vm}=2$). Although the corrosion rates provide integrated information of all degradation processes related to the marine conditions, erosive wear was recognized as the key process after completing a meticulous monitoring program in the sites⁴.

With respect to the scour risk assessment evaluation, the methodology highlights both sites as UCH sites at risk. The scour risk index presents higher values at the *Fougueux* site (3.65), whereas at the *Bucentaure* site (3.27) it slightly exceeds the threshold (3.2). This classification reflects the observations of the drastic morpho-dynamic changes ($S_{max} = 0.7 \text{ m}$) at the *Fougueux* site compared with those observed at the *Bucentaure* site ($S_{max} = 0.3 \text{ m}$) (Table 4).

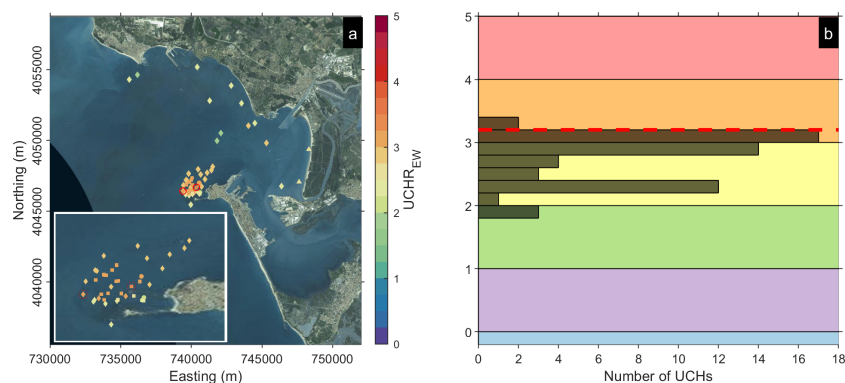


FIGURE 9

(A) Erosive wear risk in the outer Bay of Cadiz. Warm colors indicate a higher risk index, and the different shapes refer to the prevalent material (diamond, metallic; square, ceramics; filled circles, stone; triangles, wood/organic). The red circles represent the underwater cultural heritage (UCH) where $UHR_{SC} > 3.2$. (B) Histogram of the erosive wear risk index. The red dashed line shows the threshold (3.2) used to identify UCH sites at risk.

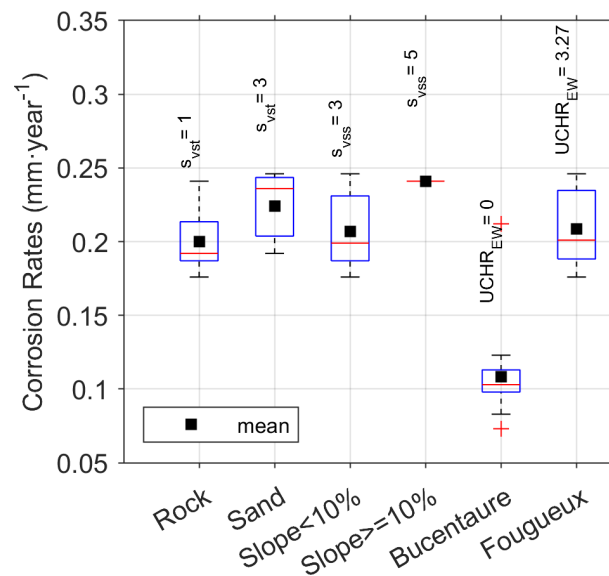


FIGURE 10

Box plot of corrosion rates by group according to the environment factor (vulnerability index assessment at the Fougueux site) and location (erosive wear risk at the Fougueux and Bucentaure sites).

4 Discussion

As a part of maritime cultural heritage, UCH constitutes a non-renewable cultural resource that must be preserved. UCH is only related to tangible assets and resources, while maritime heritage includes intangible assets (Kyvelou et al. 2022). Hence, UCH is a finite resource affected by natural threats (e.g., shipworms, microbiological decay, erosion, natural hazards) or anthropogenic pressures (e.g., pollution, dredging, bottom trawling using a dragnet, pillage). Among the natural threats, wave-induced hazards are a key player for the preservation of UCH in shallow water. This paper adapts the CRAFT1 methodology for coastal risk assessment (Armaroli and Duo, 2018; Ferreira et al., 2018) and presents a new methodology for UCH risk assessment associated to wave-induced hazards. This methodology can be adjusted and expanded to include other natural or anthropogenic-induced hazards. There are some

studies that focus on other specific hazards such as ship anchoring damage (Aps et al., 2020) or damage caused by bottom trawling to ancient shipwreck sites (Brennan et al., 2016). To the best of our knowledge, no similar methodological developments have been applied to UCH risk assessment to evaluate wave impact. This risk assessment method includes the quantification of the probability of the hazard and the vulnerability of UCH sites at risk in a systematic and transparent manner that facilitates the adoption of the methodology for UCH managers as well as the adaptation to their necessities.

Identifying UCH sites at risk is the first step in UCH protection and preservation. It requires a concentrated effort and allows optimizing protection measures at specific sites. Additionally, risk assessment enables identifying the threatened UCH sites, which is key to include UCH in maritime spatial planning (Kyvelou et al. 2022; Papageorgiou,

TABLE 4 Qualitative validation of erosive wear risk (average corrosion rates $\pm$ standard deviation) and scour risk (maximum scour) measured in the sites.

Site	RT1 E erosive wear potential (J/m ³)	RT10-scouring volume (m ³)	S_H	S_V	Erosive wear risk index	Scour risk index	Corrosion rates (mm·year ⁻¹)	Smax (m)
Erosive wear								
Bucentaure	0		0	2.67	0		0.11 $\pm$ 0.04	
Fougueux	9.5e ⁻¹³		4	2.67	3.27		0.21 $\pm$ 0.03	
Scour								
Bucentaure		0.62	4	2.67		3.27		0.3
Fougueux		1.09	5	2.67		3.65		0.7

2018). This is particularly important in the era of a sustainable blue economy where UCH, beyond its undeniable social and cultural value, can be considered a resource with uses of socio-economic relevance (Papageorgiou, 2019).

The proposed methodology is based on indicators that follow the principles of acceptability, reliability, simplicity of application, and low data requirements (Alexandrakis and Poulos, 2014). The acceptability of this methodology relies on the transparency of the methods for hazard and vulnerability computation as well as on the flexibility to be adapted for a specific coastal environment and the completeness of the ADB—for instance, the protective role of some ecosystems diminishing wave energy such as seagrass meadows (Infantes et al., 2012) can be incorporated by defining new categories in the seabed vulnerability index. Similarly, the ADB could be completed by incorporating other archaeological materials. The expertise and know-how of the managers and decision-makers could also be considered as well as changing the ranks of the hazards and vulnerability or the chosen probabilities (*i.e.*, RT1 for erosive wear or RT10 for scour and decontextualization hazards).

The methodology, built upon simple empirical models for the hazard computation, reduces the uncertainties associated to the many parameters appearing in more complex process-based models. It increases the reliability of the hazard computation methods considering the target of hazard intercomparison between different UCH sites. The reliability of the methodology including hazard and vulnerability components was evaluated for scour and erosive wear showing a good correlation with *in situ* measurements of scour and corrosion rates (used as a proxy of erosive wear). It is difficult to validate the UCH risk assessment for the decontextualization hazard given the lack of field measurements to quantify UCH decontextualization. The validation of UCH risk assessment should be expanded to different coastal environments covering various wave energy conditions and sediment characteristics and UCH sites containing different archaeological materials. The additional advantages of the method are the simplicity of the application and the low amount and availability of the required data. These advantages are related to the use of a simple empirical model and to the fact that the environmental information about depth and seabed type is readily available from nautical charts. The use of process-based models, *i.e.*, hydro-morphodynamic models, would be more accurate from the physical-chemical point of view, but there would be more uncertainties, and the simplicity of the interpretation of results would be reduced. They would also require a large amount of high-quality data for proper regional applications.

4.1 Limitations and challenges for UCH risk assessment

The use of a simple empirical model for hazard quantification overlooks several processes of major relevance for the analyzed

hazards, such as flow speed and turbulence enhancement, because of flow–structure interaction (Fernández-Montblanc et al., 2018; Quinn and Smyth, 2018). The inclusion of these processes would request high-resolution bathymetry (<1 m) and an enormous computational effort necessary for computational fluid dynamics. These limitations can be overcome at a later stage when a new risk assessment including these processes is targeted at UCH sites at high risk in order to provide accurate solutions to design protection measures. Other secondary processes such as the enhancement of bed shear stress due to the effect of wave–current interaction (Soulsby and Clarke, 2005) and wave–tide interaction (Kagan et al., 2001), accounting for the influence of bottom mobility (Kagan et al., 2005), sediment load stratification (Kagan et al., 2003), or the modification sediment concentration by the bed forms (Nielsen, 1986), can be incorporated using empirical and theoretical models.

In this paper, risk assessment was conducted for each hazard separately. Nevertheless, Figure 11 illustrates the concurrency of the three analyzed hazards in a single UCH site (Id15) and scour and decontextualization hazard concurrency (Id17). A multi-hazard analysis should be incorporated to evaluate if the hazardous events occur simultaneously in a cascading or cumulative manner over time (UNISDR, 2017)—for example, scour in sites Id15 and Id17 would facilitate the decontextualization of buried archaeological objects in those sites.

Regarding the vulnerability quantification, the limitations are linked to an ADB built upon bibliographic research. Underwater ADBs are very scarce, incomplete, or not publicly available to prevent illicit actions (Papageorgiou, 2019). These databases would allow identifying patterns affecting UCH and taking actions, which is often hampered by the lack of accessible data (Andreou et al., 2022). A more complete ADB in terms of UCH site characterization would allow the improvement of vulnerability quantification, *i.e.*, including chronology or conservation status as an additional vulnerability index. Additionally, it would allow expanding the analysis from a single prevalent material to all the materials that constitute the UCH site, thus providing a more complete UCH risk assessment.

Exposure is considered equal for all the UCH sites included in the ADB because of a lack of information. Quantifying exposure should be addressed through the valuation of UCH. The valuation of UCH includes the cultural capital or non-extractive value and the extractive or market-associated value as well as cultural tourism and recreational activities (Claesson, 2011). This information is key to know if an UCH site is worth being protected. Including this information could change the nine UCH sites at risk identified in the Bay of Cadiz.

Finally, the risk index definition should take the objectives and expertise of the stakeholders involved in UCH management into account by means of a participative process. It has been demonstrated in other disciplines that the involvement of stakeholders in risk assessment for the definition of vulnerability, hazard type, and risk thresholds allows gathering

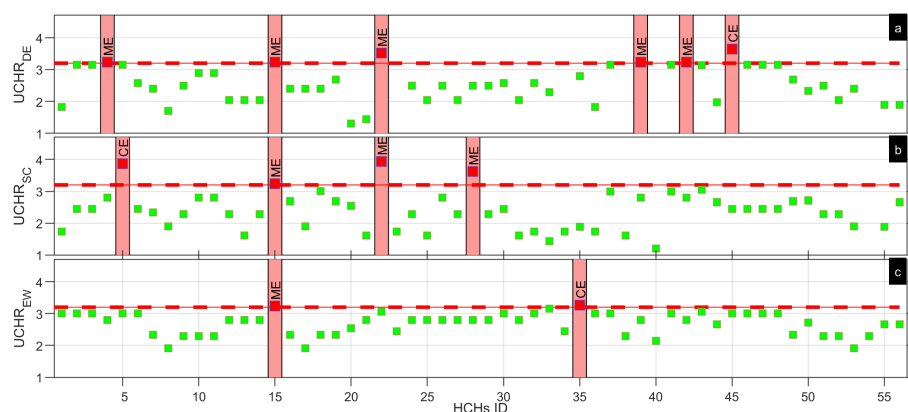


FIGURE 11

Risk index in the underwater cultural heritage sites located at the Bay of Cadiz. (A) Decontextualization risk. (B) Scour risk. (C) Erosive wear risk.

useful information to improve the indicators and to increase confidence in the risk assessment (Meadow et al., 2015; Viavattene et al., 2018).

5 Concluding remark

This paper presents a novel UCH risk assessment methodology to quantitatively assess the impact of wave-induced hazards on UCH in the coastal environment and to give precedence to the UCH sites at high risk. The risk assessment was performed for decontextualization, scour and erosive wear, and major natural hazards threatening the preservation of UCH in shallow water areas.

The methodology was validated at the *Bucentaure* and *Fougueux* sites through a comparative analysis including *in situ* measurements. The validation showed a good correlation between the risk index and the *in situ* measurements of scour and corrosion rates (used as a proxy of erosive wear). The methodology was tested in the Bay of Cadiz using an ADB containing 56 UCH sites, with metallic and ceramic materials being prevalent in most of them. The sites are seated at a depth ranging from 6 to 12 m. The methodology allowed identifying the UCH sites at high risk in the Bay of Cadiz: six are at risk of decontextualization, four are in peril of scour, and two are at risk of erosive wear. Moreover, the UCH risk assessment revealed the concurrency of at least two hazards in two of the UCH sites at high risk.

Even though the methodology has only been validated in a specific coastal environment, showing limitations related to the completeness of the ADB, it is a steppingstone towards a decision support system that will give priority to research, prospection, management, and protection measures in the UCH sites analyzed to ensure their preservation in the context of climate change in the era of a sustainable blue economy.

Data availability statement

The datasets presented in this article are not readily available, as raw data will be available on request with the exception of the archaeological data-base to ensure underwater cultural heritage preservation. Requests to access the datasets should be directed to tomas.fernandez@uca.es.

Author contributions

TF-M: conceptualization, methods, investigation, formal analysis, visualization, writing the original draft, writing, review and editing, management and coordination of the project. MB: methods, writing, review and editing, management and coordination of the project. AI: conceptualization, writing, review and editing. All authors contributed to the article and approved the submitted version.

Funding

This study was partially supported by the Ministry of Science and Innovation through the project “Vulnerability of littoral cultural heritage to environmental agents: impact of climate change (VOLICHE)” (PID2020-117812RB-I00 / AEI / 10.13039/501100011033) and CEI MAR through the project “Dynamic projections of waves and sea level in the Gulf of Cadiz and the Alboran Sea: Impact of climate change on coastal vulnerability and coastal cultural heritage” (CEIJ-015).

Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated

References

- Alexandrakis, G., and Poulos, S. E. (2014). An holistic approach to beach erosion vulnerability assessment *Sci. Rep.* 4, 6078. doi: 10.1038/srep06078
- Alzaga García, M., Márquez Carmona, L., Rodríguez Mariscal, N., Martí Solano, J., Higuera-Milena Castellano, A., Gallardo Abárzuza, M., et al. (2022). *Shipwrecks of the Iberian tradition in the Bay of Cadiz (Andalucía, Spain) BT - heritage and the Sea: Volume 2: Maritime history and archaeology of the global Iberian world (15th–18th centuries)*. Eds. A. Crespo Solana, F. Castro and N. Nayling (Cham: Springer International Publishing), 145–167. doi: 10.1007/978-3-030-86464-4_6
- Andreou, G. M., Nikolaus, J., Westley, K., el Safadi, C., Blue, L., Smith, A., et al. (2022). Big data in maritime archaeology: Challenges and prospects from the middle East and north Africa. *J. F. Archaeol.* 47, 131–148. doi: 10.1080/00934690.2022.2028082
- Angelini, E., Grassini, S., Tusa, S.A. B. T.-C. and C. @ of C. H. M. A. Adriaens (2013). “12 - underwater corrosion of metallic heritage artefacts,” in *European Federation of corrosion (EFC) series*. Eds. P. Dillmann, D. Watkinson and E. Angelini (Oxford: Woodhead Publishing), 236–259. doi: 10.1533/9781782421573.3.236
- Aps, R., Lees, L., Herkül, K., Roio, M., and Tönismaa, O. (2020). Towards STAMP approach based protection of underwater cultural heritage. *Proc. Int. Semin. Saf. Secur. Auton. Vessel. Eur. STAMP Work. Conf.* 2019, 169–178. doi: 10.2478/9788395669606-014
- Armaroli, C., and Duo, E. (2018). Validation of the coastal storm risk assessment framework along the Emilia-romagna coast. *Coast. Eng.* 134, 159–167. doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.08.014
- Bethencourt, M., Fernández-Montblanc, T., Izquierdo, A., González-Duarte, M. M., and Muñoz-Mas, C. (2018). Study of the influence of physical, chemical and biological conditions that influence the deterioration and protection of underwater cultural heritage. *Sci. Total Environ.*, 613–614, 98–114. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.007
- Bitter, J. G. A. (1963). A study of erosion phenomena part I. *Wear* 6, 5–21. doi: 10.1016/0043-1648(63)90003-6
- Björdal, C. G., Daniel, G., and Nilsson, T. (2000). Depth of burial, an important factor in controlling bacterial decay of waterlogged archaeological poles. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 45, 15–26. doi: 10.1016/S0964-8305(00)00035-4
- Björdal, C. G., and Nilsson, T. (2008). Reburial of shipwrecks in marine sediments: a long-term study on wood degradation. *J. Archaeol. Sci.* 35, 862–872. doi: 10.1016/j.jas.2007.06.005
- Blott, S. J., and Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 1237–1248. doi: 10.1002/esp.261
- Booij, N., Ris, R. C., and Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. model description and validation. *J. Geophys. Res. Ocean.* 104, 7649–7666. doi: 10.1029/98JC02622
- Brennan, M. L., Davis, D., Ballard, R. D., Trembanis, A. C., Vaughn, J. I., Krumholz, J. S., et al. (2016). Quantification of bottom trawl fishing damage to ancient shipwreck sites. *Mar. Geol.* 371, 82–88. doi: 10.1016/j.margeo.2015.11.001
- Cámara, B., de Buergo, M. Á., Bethencourt, M., Fernández-Montblanc, T., La Russa, M. F., Ricca, M., et al. (2017). Biodeterioration of marble in an underwater environment. *Sci. Total Environ.* 609, 109–122. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.103
- Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., and Cofiño, A. S. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coast. Eng.* 58, 453–462. doi: 10.1016/j.coastaleng.2011.02.003
- Claessens, S. (2011). The value and valuation of maritime cultural heritage. *Int. J. Cult. Prop.* 18, 61–80. doi: 10.1017/S0940739111000051
- Díaz-Hernández, G., Rodríguez Fernández, B., Romano-Moreno, E., and XXXL. Lara, J. (2021). An improved model for fast and reliable harbour wave agitation assessment. *Coast. Eng.* 170, 104011. doi: 10.1016/j.coastaleng.2021.104011
- Fernández-Montblanc, T., Izquierdo, A., Quinn, R., and Bethencourt, M. (2018). Waves and wrecks: A computational fluid dynamic study in an underwater archaeological site. *Ocean Eng.* 163, 232–250. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.062
- Fernández-Montblanc, T., Quinn, R., Izquierdo, A., and Bethencourt, M. (2016). Evolution of a shallow water wave-dominated shipwreck site: Fougues, (1805), Gulf of Cadiz. *Gearchaeology* 31, 487–505. doi: 10.1002/gea.21565
- Ferreira, O., Viavattene, C., Jiménez, J. A., Bolle, A., das Neves, L., Plomaritis, T. A., et al. (2018). Storm-induced risk assessment: Evaluation of two tools at the regional and hotspot scale. *Coast. Eng.* 134, 241–253. doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.10.005
- Field, C., and Barros, V. (2014). *Climate change 2014—impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects*. Available at: https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=aJ-TBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1142&ots=v2QuHid8HG&sig=aL_w43yx2tjPCqJRXSKatyJt24 (Accessed May 7, 2022).
- García Rivera, C., and Alonso Villalobos, C. (2005). (16) (PDF) *Los naufragios de Trafalgar*. Sevilla: Junta de Andalucía, Consejería de Cultura.
- Garrity, N. J., Battalio, R., Hawkes, P. J., and Roupe, D. (2007). Evaluation of event and response approaches to estimate the 100-year coastal flood for pacificcoast sheltered waters. *Coast. Eng.* 2006, *World Scientific Publishing Company*, 1651–1663. doi: 10.1142/9789812709554_0140
- González-Duarte, M. M., Fernández-Montblanc, T., Bethencourt, M., and Izquierdo, A. (2018). Effects of substrata and environmental conditions on ecological succession on historic shipwrecks. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 200, 301–310. doi: 10.1016/j.ecss.2017.11.014
- Gornitz, V. (1990). Vulnerability of the East coast, USA to future sea level rise. *J. Coast. Res.* 9(1), 201–237. Available at: <http://www.jstor.org/stable/44868636>
- Gregory, D. (2020). Characterizing the preservation potential of buried marine archaeological sites. *Herit* 3, 838–857. doi: 10.3390/HERITAGE3030046
- Gregory, D., Jensen, P., and Strætkvern, K. (2012). Conservation and *in situ* preservation of wooden shipwrecks from marine environments. *J. Cult. Herit.* 13, S139–S148. doi: 10.1016/j.culher.2012.03.005
- Guillemot, E., and Meanteau, L. *Mapa fisiográfico del litoral atlántico de Andalucía: 1/50.000 - publicaciones - junta de andalucía*. Available at: <https://www.juntadeandalucia.es/servicios/publicaciones/detalle/48731.html> (Accessed July 8, 2022).
- Infantes, E., Orfila, A., Simarro, G., Terrados, J., Luhar, M., and Nepf, H. M. (2012). Effect of a seagrass (*Posidonia Oceanica*) meadow on wave propagation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 456, 63–72. doi: 10.3354/meps09754
- Kagan, B. A., Alvarez, O., and Izquierdo, A. (2005). Weak wind-wave/tide interaction over fixed and moveable bottoms: a formulation and some preliminary results. *Cont. Shelf Res.* 25, 753–773. doi: 10.1016/j.csr.2004.09.021
- Kagan, B. A., Álvarez, O., Izquierdo, A., Mañanes, R., Tejedor, B., and Tejedor, L. (2003). Weak wave/tide interaction in suspended sediment-stratified flow: a case study. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 56, 989–1000. doi: 10.1016/S0272-7714(02)00306-2
- Kagan, B. A., Tejedor, L., Álvarez, O., Izquierdo, A., Tejedor, B., and Mañanes, R. (2001). Weak wave–tide interaction formulation and its application to Cádiz bay. *Cont. Shelf Res.* 21, 697–725. doi: 10.1016/S0278-4343(00)00099-6
- Kyvelou, S. S., and Henocque, Y. (2022). How to incorporate underwater cultural heritage into maritime spatial Planning: guidelines and good practices. *EUROPEAN COMMISSION European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency Unit D.3 – Sustainable Blue Economy*. Luxemburg: Publications Office of the European Union.
- Lagostena, L. G. (2009). *Catálogo del Patrimonio Histórico del Parque Metropolitano Los toruños*. Sevilla: Junta de Andalucía.
- Lakey, D. C. (1987). *Shipwrecks in the Gulf of Cadiz: a catalog of historically documented wrecks from the fifteenth through the nineteenth centuries, Institute of Nautical Archaeology (U.S.)*. Texas A & M University: United States-Spanish Joint Committee for Cultural and Educational Cooperation.
- McNinch, J. E., Wells, J. T., and Trembanis, A. C. (2006). Predicting the fate of artefacts in energetic, shallow marine environments: an approach to site management. *Int. J. Naut. Archaeol.* 35, 290–309. doi: 10.1111/j.1095-9270.2006.00105.x
- Meadow, A. M., Ferguson, D. B., Guido, Z., Horangic, A., Owen, G., and Wall, T. (2015). Moving toward the deliberate coproduction of climate science knowledge. *Weather. Clim. Soc* 7, 179–191. doi: 10.1175/WCAS-D-14-00050.1

- Mentaschi, L., Vousdoukas, M. I., Voukouvalas, E., Dosio, A., and Feyen, L. (2017). Global changes of extreme coastal wave energy fluxes triggered by intensified teleconnection patterns. *Geophys. Res. Lett.* 44, 2416–2426. doi: 10.1002/2016GL072488
- Mentaschi, L., Vousdoukas, M., Voukouvalas, E., Sartini, L., Feyen, L., Besio, G., et al. (2016). The transformed-stationary approach: a generic and simplified methodology for non-stationary extreme value analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 3527–3547. doi: 10.5194/hess-20-3527-2016
- Nian-Sheng, C. (2004). Analysis of velocity lag in sediment-laden open channel flows. *J. Hydraul. Eng.* 130, 657–666. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:7(657)
- Nielsen, P. (1986). Suspended sediment concentrations under waves. *Coast. Eng.* 10, 23–31. doi: 10.1016/0378-3839(86)90037-2
- Papageorgiou, M. (2018). Underwater cultural heritage facing maritime spatial planning: Legislative and technical issues. *Ocean Coast. Manage.* 165, 195–202. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2018.08.032
- Papageorgiou, M. (2019). Stakes and challenges for underwater cultural heritage in the era of blue growth and the role of spatial planning: Implications and prospects in Greece. *Herit* 2, 1060–1069. doi: 10.3390/HERITAGE2020069
- Pearson, C. (1987). *Conservation of marine archaeological objects* (London; Boston: Butterworths).
- Pournou, A. (2018). Assessing the long-term efficacy of geotextiles in preserving archaeological wooden shipwrecks in the marine environment. *J. Marit. Archaeol.* 13, 1–14. doi: 10.1007/S11457-017-9176-9
- Quinn, R. (2006). The role of scour in shipwreck site formation processes and the preservation of wreck-associated scour signatures in the sedimentary record - evidence from seabed and sub-surface data. *J. Archaeol. Sci.* 33, 1419–1432. doi: 10.1016/j.jas.2006.01.011
- Quinn, R., and Smyth, T. A. G. (2018). Processes and patterns of flow, erosion, and deposition at shipwreck sites: a computational fluid dynamic simulation. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 10, 1429–1442. doi: 10.1007/s12520-017-0468-7
- Ruuskanen, A. T., Kraufvelin, P., Alvik, R., Diaz, E. R., Honkonen, J., Kanerva, J., et al. (2015). Benthic conditions around a historic shipwreck: Vrouw maria, (1771) in the northern Baltic proper. *Cont. Shelf Res.* 98, 1–12. doi: 10.1016/j.csr.2015.02.006
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands* (London: Thomas Telford Publishing). doi: 10.1680/doms.25844
- Soulsby, R. L., and Clarke, S. (2005). *Bed shear-stresses under combined waves and currents on smooth and rough beds produced within defra project FD1905 Technical Report*. Wallingford: HR Wallingford.
- Spanish Ministry of Agriculture, Food and Environment. (2012). *Data from: Plan de Ecocartografías del litoral Español*.
- Sumer, B. M., and Fredsøe, J. (1990). Scour below pipelines in waves. *J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng.* 116, 307–323. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1990)116:3(307)
- Sumer, B. M., and Fredsøe, J. (2002). The mechanics of scour in the marine environment. *World Sci Sinapore*. doi: 10.1142/4942
- Thompson, C. E. L., Ball, S., Thompson, T. J. U., and Gowland, R. (2011). The abrasion of modern and archaeological bones by mobile sediments: the importance of transport modes. *J. Archaeol. Sci.* 38, 784–793. doi: 10.1016/j.jas.2010.11.001
- UNISDR (2017) *National disaster risk assessment words into action guidelines governance system, methodologies, and use of results*. Available at: https://www.unisdr.org/files/52828_nationaldisasterriskassessmentpart1.pdf (Accessed July 4, 2022).
- Vander Voort, G. F. (2000). Microindentation hardness testing. *Mech. Test. Eval.* 8, 0. doi: 10.31399/asm.hb.v08.a0003272
- van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Amsterdam: Aqua publications
- Viavattene, C., Jiménez, J. A., Ferreira, O., Priest, S., Owen, D., and McCall, R. (2018). Selecting coastal hotspots to storm impacts at the regional scale: a coastal risk assessment framework. *Coast. Eng.* 134, 33–47. doi: 10.1016/J.COASTALENG.2017.09.002
- Vila Socías, L., Hein, A., Kilikoglou, V., and Buxeda i Garrigós, J. (2007). Disseny amforal i canvi tecnològic al voltant del canvi d'era: L'aportació de l'Anàlisi d'Elements finits. *Empúries* 55, 27–38. Available at: <https://raco.cat/index.php/Empuries/article/view/138911>
- Ward, I. A. K., Larcombe, P., and Veth, P. (1999). A new process-based model for wreck site formation. *J. Archaeol. Sci.* 26, 561–570. doi: 10.1006/JASC.1998.0331
- Whitehouse, R. (1998). *Scour at marine structures* (London: Thomas Telford Publishing). doi: 10.1680/sams.26551
- Young, D. M., and Testik, F. Y. (2009). Onshore scour characteristics around submerged vertical and semicircular breakwaters. *Coast. Eng.* 56, 868–875. doi: 10.1016/J.COASTALENG.2009.04.003
- Zyserman, J. A., and Fredsøe, J. (1994). Data analysis of bed concentration of suspended sediment. *J. Hydraul. Eng.* 120, 1021–1042. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:9(1021)

Aportaciones en congresos



ISA 2020/2022

**43rd International Symposium on
Archaeometry**

Lisbon, 16th – 20th May 2022

BOOK OF ABSTRACTS



International Symposium on Archaeometry

Lisbon, 16th – 20th May 2022

The metal sheathing and fastenings of wooden ships. Archaeometallurgical study of Carron, Ancla Macuca, HMS Forth and El Pesquero sites located at the Gulf of Mexico (late 18th to mid 19th Centuries)

Arano, D.¹, Ciarlo, N.C.², Bethencourt, M.³, Carrasco, G.⁴, Barba, H.⁵

¹Sección de Restauración, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Campeche, México.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Instituto de Arqueología, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires – Programa de Arqueología Histórica y Estudios Pluridisciplinarios, Departamento de Ciencias Sociales, Universidad Nacional de Luján, Argentina.

³Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Instituto de Investigaciones Marinas (INMAR), Universidad de Cádiz, España.

⁴Departamento de Historia Moderna, Universidad de Cádiz, España

⁵Subdirección de Arqueología Subacuática, Componente Península de Yucatán, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México

Keywords: archeometallurgy; nautical and underwater technology; 18th and 19th century shipwrecks

After four decades of research, the Vice-Directorate of Underwater Archaeology of the National Institute of Anthropology and History in Mexico (SAS-INAH) recorded around 400 underwater archaeological contexts in the Gulf of Mexico and Mexican Caribbean. One of the great challenges has been the correlation of historical, archaeological and material information for dating and assessing the provenance of the vessels. The archeometallurgical analysis of copper-base sheathing and hull fastenings (bolts and nails) stand as a relevant mean for the interpretation of modern shipwrecks. During the 18th century and the dawn of the 19th century, the naval construction in the European nations was focused on increasing the quality of wooden vessels for the Atlantic sailing, given the conditions of tropical waters. For instance, the introduction of metal sheathing to protect the ship's bottoms from the action of wood boring organisms, was an essential measure. The studies developed in metallurgy and mining, combined with archeological data from shipwrecks, historical research and characterization of sheathing and fastenings samples from the shipwrecks Carron, Ancla Macuca, HMS Forth (1849) and El Pesquero, located at Campeche Bank and coast, allow assessing its main technological features. Furthermore, the results obtained helped to date the remains and discuss the sites formation processes, in particular the existence of palimpsests on two of the sites studied.

CYANIS 2021

**I CONGRESO IBEROAMERICANO DE ARQUEOLOGÍA
NÁUTICA Y SUBACUÁTICA**



CIANYYS 2021

LIBRO DE RESÚMENES



Comercio marítimo en el Estrecho de Gibraltar. Análisis del hallazgo de un fragmento de madera y de la carga de un navío romano tardorepublicano en el entorno de la Isla de Tarifa.

Maritime trade in the Strait of Gibraltar. Analysis of the discovery of a fragment of wood and the cargo of a late-republican Roman ship in the surroundings of the Island of Tarifa.

Ernesto J Toboso Suárez^a, Darío Bernal Casasola^b, José Juan Díaz Rodríguez^c y Elisa Fernández Tudela.^d

^aGerión Arqueología, España ejtoboso@gerionarqueologia.es; ^bUniversidad de Cádiz, España, dario.bernal@uca.es; ^cUniversidad de Cádiz, España, josejuan.diaz@uca.es; ^dUniversidad de Cádiz, España, Elisa.fernandez.tudela@gmail.com

Palabras Clave: arquitectura naval, comercio, ánforas

Resumen de comunicación.

A finales del año 2019, en el transcurso de los trabajos de prospección y sondeos subacuáticos en el puerto de Tarifa, motivados por el tendido de un cable submarino entre Ceuta y la Península Ibérica, se

localizó un pequeño fragmento del casco de una nave de época tardo-republicana, si bien el fragmento es una pequeña muestra del sistema constructivo de la nave.



Fig.1.Fragmento de casco del pecio de época tardo-republicana.

También se pudo documentar junto al fragmento de madera, parte de la carga que transportaba, concretamente tres ánforas completas, una Lamboglia 2 y dos Dresell 1 A, estas ánforas tardorepublicanas, procedentes de

distintos talleres italianos, tienen en común su reutilización para el transporte de salazón, procedente de las costas gaditanas y con destino mediterráneo. El conjunto de materiales puede relacionarse con el yacimiento cercano denominado

“las laminarias”, del cual se conocen restos de materiales dispersos de distintas épocas. Por tanto, los

nuevos hallazgos corroboran, la localización cercana de al menos un navío de época tardo-republicana.



Fig.2 Ánforas Dresell 1 A y Lambglia 2.

Bibliografía:

Bernal Casasola, D.; Arévalo González, A.; Lorenzo Martínez, L.; Aguilera, L. 2003, "Imitations of italic amphorae for fish sauce in roman Baetica. New evidence from the salt fish factory at Baelo Claudia", *Rei Cretariae Romanae Fautorum Acta*, vol. 18, pp. 305-313.

Carlos de Juan Fuertes, “La construcción naval del pecio de la Albufereta (Alicante). Un velero de comercio del S. I, procedente de la Bética”, *Saguntum: Papeles del Laboratorio de Arqueología de Valencia*, ISSN 0210-3729, ISSN-e 2174-517X, Nº 40, 2008, págs. 161-176.

Carlos de Juan Fuertes, “Una mirada a la arquitectura naval antigua mediterránea a través de la arqueología subacuática”, *Ingeniería naval*, ISSN 0020-1073, Nº. 897, 2011, págs. 71-75.

Patrice Pomey, “Un exemple d'évolution des techniques de construction navale antique: de l'assemblage par ligatures à l'assemblage par tenons et mortaises, Techniques et économie antiques et médiévales : le temps de l'innovation : colloque international” (C.N.R.S.) Aix-en-Provence, 21-23 mai 1996, 1997, ISBN 2-87772-147-7, págs. 195-203.

Desaparición del *Reina Regente*: Causas del hundimiento y propuesta para su localización.

Loss of the *Reina Regente*: Causes of sinking and proposal for its location.

Óscar S. Ortega Pérez^a, Manuel Bethencourt Núñez^b, Nicolás C. Ciarlo^c y Tomás Fernández-Montblanc^d

^aArmada Española-Instituto Hidrográfico de la Marina, España, oortper@oc.mde.es; ^bUniversidad de Cádiz, España, manuel.bethencourt@uca.es; ^cConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Instituto de Arqueología de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires, Argentina, nciarlo@conicet.gov.ar; ^dUniversidad de Cádiz, España, tomas.fernandez@uca.es

Palabras Clave: Crucero *Reina Regente*, Armada Española, modelo de dispersión lagrangiana, patrimonio cultural subacuático.

Resumen de comunicación.

El crucero *Reina Regente* de la Armada Española, botado en 1887, fue un buque de guerra moderno e innovador para la época, de líneas elegantes y con capacidades teóricas de maniobra, autonomía y combate extraordinarias para un buque de su porte (figura 1).



Fig. 1 - Crucero *Reina Regente* (Museo Naval de Madrid. MN-92030)

En la mañana del día 10 de marzo de 1895, salió de la Bahía de Tánger e inició navegación en

demanda del puerto de Cádiz. En esos momentos, arreciaba un temporal muy duro del suroeste y mar muy gruesa a arbolada. El *Reina Regente* nunca llegó a Cádiz, en medio de ese temporal desapareció junto con los 412 marinos de su dotación. A día de hoy aún se desconoce la localización de este pecio.

Prácticamente desde su entrada en servicio, comenzaron a plantearse dudas en cuanto al acierto de su diseño, condiciones de estabilidad, así como de su comportamiento en la mar, que se vieron acentuadas a partir de las importantes modificaciones realizadas en su diseño original. En esencia, estas consistieron en la sustitución de su artillería principal por otra de mayor calibre, lo que supuso un aumento en los pesos

altos del buque. Al respecto, tras el estudio de la curva de estabilidad del *Reina Regente* (CF Villaamil, 1896) y comparando los resultados con criterios actuales (CEFLOT, 2018), se concluye que esta modificación afectó a su estabilidad y comportamiento marino, aunque sin llegar a comprometer su seguridad en la navegación.

Por otra parte, las evidencias analizadas sugieren la existencia de deficiencias en el estado de alistamiento del buque el día de su última singladura. Principalmente, en la estanquidad de varios compartimentos, en los sistemas de achique, en la planta eléctrica y en las condiciones de habitabilidad (AGMAB, 1176/615; ACCGAR, 07/13).

A partir de todo lo anterior, de informes de la época y alegatos de testigos de las primeras maniobras a su salida de Tánger (AGMAB, 1176/614), se plantea la hipótesis de que el *Reina Regente* sufrió importantes inundaciones en sus compartimentos de más a proa, a las que tuvo que enfrentarse con medios de fortuna debido a sus ya citadas deficiencias de alistamiento. Ante esta situación, viendo peligrar su buque, el Comandante debió decidir abandonar su derrota original en demanda de Cádiz e invertir rumbo, tratando de capear el temporal y buscar resguardo.

Teniendo en cuenta que navegando popa a la mar, una ola puede disminuir hasta un 70% las

condiciones de estabilidad de un buque (CEFLOT, 2018), en algún momento el *Reina Regente* pudo ser alcanzado por una ola de longitud de onda similar a su eslora, acabando con su ya mermada estabilidad, haciéndole zozobrar y hundirse prácticamente al instante.

Al analizar documentación de la época, se obtuvo información coherente con la hipótesis anterior. En este sentido, tienen especial importancia las investigaciones realizadas por el CF Aguirre en abril de 1895 (AGMAB 1176/614). Los resultados alcanzados entonces, junto con las hipótesis planteadas referentes a la derrota y causas del naufragio, permiten establecer de forma tentativa una primera aproximación a la zona donde ocurrió el naufragio, situada entre los meridianos de Punta Camarinal y Cabo Trafalgar. Posteriormente, teniendo en cuenta los antecedentes de exploraciones en la zona, se consiguió definir un sector más reducido, que a los fines del estudio se denominó Área Inicial de Búsqueda (AIB) (figura 2).



Fig. 2 - Croquis AIB (elaboración propia sobre visor IDE-IHM).

En los días y semanas posteriores al naufragio, la mar arrojó diversos restos en distintos puntos de la costa. Partiendo de información inédita de estos restos (AGMAB, 1176/614), de la caracterización realizada del temporal del 10 de marzo de 1895, así como de datos oceanográficos y geofísicos de la zona, se ha implementado un modelo físico-matemático de dispersión lagrangiana con el objeto de simular las trayectorias de los restos del naufragio y determinar el punto de partida de dichos objetos, es decir el lugar donde probablemente se hundió el *Reina Regente*. La metodología utilizada se basa en trabajos de investigación anteriores, relacionados con el pecio del *Fougueux* (1805) (Fernández-Montbanc et al, 2018). Los datos obtenidos representan zonas definidas en términos probabilísticos. Aunque en este caso tiene un carácter preliminar, los resultados son coherentes con la reducción de la primera aproximación de zona de naufragio a la AIB, como zona más probable de localización del pecio del *Reina Regente*.

Con base en todo lo anterior, se propone un plan de prospección para la localización e identificación del *Reina Regente*. Este plan incluye la utilización de medios pertenecientes a la Armada, pero también contempla la necesaria coordinación y participación de otros organismos de las distintas

administraciones del Estado con competencias en materia de patrimonio cultural sumergido, todo ello en cumplimiento de la normativa vigente (Armada Española, 2019; Ley 16/1985; Ley 14/2007).

Agradecimientos:

Al Coronel IM D. Miguel Aragón por su inestimable ayuda.

Bibliografía:

- Archivo Central del Cuartel General de la Armada (ACCGAR). 007/13. Estado de vida y fuerza del Reina Regente del día 01 febrero de 1895.
- Armada Española-Centro de Doctrina de la Flota (2018). *I-CP-03(B) Estabilidad del buque*. B.N Rota, Cádiz.
- Armada Española (2019). Plan del Almirante de la Flota para la protección del Patrimonio Arqueológico Subacuático (Revisión 2).
- Archivo General de Marina Álvaro de Bazán (AGMAB). *Buques, Reina Regente, Pérdida 1895*. 1176/614.
- AGMAB. *Buques, Reina Regente, Hundimiento 1895*. 1176/615.
- Fernández-Montblanc T., Izquierdo, A. y Bethencourt, M. (2018). Scattered shipwreck site prospection: the combined use of numerical modelling and documentary research (Fougueux, 1805). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10, pp. 141-156.
- Ley 14/2007 del Patrimonio Histórico de Andalucía, 19 de diciembre 2007, núm 248, pp. 6-28.

Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico
Español, BOE, 29 junio de 1985,
núm 155, pp. 59193-59311.

Villaamil, F. y Castellote, J. (1896).
*Informe acerca de las causas
probables de la pérdida del crucero
Reina Regente*. Madrid

Un acercamiento a la problemática del palimpsesto en naufragios: estudio de dos contextos arqueológicos subacuáticos en el arrecife Alacranes, México.

An approach to the problematic of palimpsest in shipwrecks: study of two underwater archaeological contexts in the Alacranes reef, Mexico.

Diana Arano^a, Helena Barba-Meinecke^b, Nicolás C. Ciarlo^c, Manuel Bethencourt^d, Guadalupe Carrasco^e y Javier Reyes^f

^a Sección de Restauración, Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), Delegación Campeche, México, darano.camp@inah.gob.mx, ^b Subdirección de Arqueología Subacuática (SAS), Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), México, helena_barba@inah.gob.mx, ^c Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Instituto de Arqueología, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Argentina, nciarlo@conicet.gov.ar, ^d Instituto de Investigaciones Marinas (INMAR)-Universidad de Cádiz, Puerto Real, España, manuel.bethencourt@uca.es, ^e Departamento Historia Moderna, Contemporánea, de América y del Arte, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Cádiz, España, guadalupe.carrasco@uca.es, ^f Laboratorio Nacional de Ciencias Para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural, Centro de Investigación en Corrosión (LANCIC-CICORR), Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México, javreyes@uacam.mx.

Palabras Clave: Naufragios, siglos XVIII y XIX, palimpsesto, metodología, arqueometría.

Resumen de comunicación.

El Parque Nacional Arrecife Alacranes es parte del sistema arrecifal de la Sonda de Campeche, Golfo de México. Se ubica a una distancia de 130 km al norte del Puerto de Progreso, Yucatán. Se trata de un bajo localizado en la ruta de navegación entre Cuba y Nueva España, y entre los puertos novohispanos de Veracruz, Campeche y Sisal. A lo largo de los siglos, fue escenario de diversos accidentes navales debidos a fenómenos hidrometeorológicos,

cartografía imprecisa y la poca experiencia en navegación en la zona.

En este escenario, la Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH, México, tiene registrados 39 contextos arqueológicos sumergidos, vinculados con naufragios y otros restos asociados a la navegación. Debido a las condiciones naturales de formación, parte de los yacimientos pueden definirse como

palimpsestos, situación que se complejiza a la vez por la propia diversidad que presentaban los materiales asociados a cada barco. En este trabajo, se aborda el estudio de dos casos: los pecios Ancla Macuca y *HMS Forth* (1849), cuyos restos yacen sobrepuestos en la rompiente de barlovento (oriente), entre 1 y 7 m de profundidad, dentro de un área de ca. 3200 m² formada por corales y canales con fondo arenoso (figura 1).

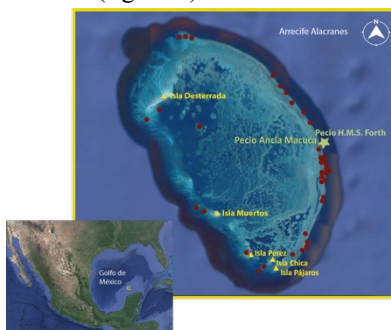


Fig. 15 – Ubicación del arrecife Alacranes y localización de los pecios Ancla Macuca y *R.M.S. Forth* (1849). Los puntos en color rojo corresponden a la ubicación de yacimientos registrados por la SAS-INAH-México.

En el presente trabajo discutimos el modo de abordar el estudio de dos o más accidentes navales ubicados en un mismo contexto espacial. La metodología comprende el estudio espacial detallado de los restos materiales y el análisis de cada objeto diagnóstico, en razón del aporte de información relativa a su cronología y filiación cultural. Este análisis requiere de la mirada de múltiples especialidades. Así, los aspectos técnicos generales vinculados con la

construcción naval, el equipamiento náutico, los elementos asociados al cargamento y la tripulación, se combinan con los datos de la caracterización de los materiales a través del análisis arqueométricos. Además, es necesario considerar que los barcos pueden presentar rasgos de diferente tiempo y lugar, debido a su propia historia de vida y, en este caso, a que se enmarcan dentro de un periodo de experimentación e intensos cambios (Ciarlo 2018). En este sentido, el manejo crítico y combinado de las diferentes fuentes de información resulta crucial para delimitar las fronteras de cada naufragio.



Fig. 2 – Vestigios del *HMS Forth* (1849), entre los que se aprecian los restos de una rueda de paletas. Fotografía: Helena Barba.

El primer pecio, Ancla Macuca, fue una embarcación probablemente de origen español. Considerando los materiales que formaban parte del cargamento, podría tratarse de un barco mercante de la segunda mitad del siglo XVIII, procedente de Tierra Firme y con rumbo a La Habana, en tornaviage a España. Entre los elementos diagnósticos se recuperaron 409 joyas, hechas de oro de alta ley, 74

esmeraldas sueltas y engarzadas, 5 diamantes, una amatista y un molusco rojo, así como 30 monedas macuquinas de plata americana, algunos fragmentos de láminas de revestimiento de forro, elementos de sujeción de cobre y seis cañones de hierro (Arano Recio, et. al. 2019; Barba-Meinecke, et. al. 2020; Barba-Meinecke, et. al. 2021).

Respecto al pecio *HMS Forth* (1849), en el lecho marino se encuentran los restos del sistema de propulsión a vapor: la caldera, restos de las ruedas de paleta, un balancín y seis columnas de hierro. La investigación documental indica que formaba parte de una flota de 14 buques de vapor perteneciente a la compañía de correos *Royal Mail Steam Packet Company* del Reino Unido, que hacía la ruta de correo transoceánico. El casco del barco era de madera de roble y teca, con un arqueo de 1939 Tn, 74 m de eslora y tres mástiles, construido en 1841 en el astillero de *Robert Menzies & Co.* de Leith, en Reino Unido. La propulsión era por medio de una máquina de vapor simple con palanca lateral de 450 HP, de la empresa de *John Caird & Co.*, Greenok, Escocia (Barba-Meinecke y Pizá Chávez 2019).

El estudio llevado a cabo permitió discutir diferentes aristas de la problemática del palimpsesto en naufragios de época moderna y contemporánea, contribuir a la identificación de los restos

materiales asociados a los dos pecios referidos y proponer una hoja de ruta que derive en el establecimiento de una metodología aplicable a casos similares de la zona.

Agradecimientos.

A Salvador Domínguez Bella, Josefa Martí Solano, Marcelo Gabaldón Rodenas y Dalila Aldama Aranda, por sus contribuciones en la investigación. Los autores también agradecen la financiación brindada por los proyectos en México PIPY-SAS-INAH y CONACYT - LANCIC LN314886. Asimismo, al Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades, a la Agencia Estatal de Investigación y a la Unión Europea, a través del Proyecto EQC2018-004947-P.

Bibliografía.

- Arano Recio, D., González Sánchez, J., Bethencourt Núñez, M., Ciarlo, N.C., Carrasco González, G., y Barba-Meinecke, H., (2019) “Metalurgia de revestimientos y sistemas de sujeción en embarcaciones de madera y propulsión a vela. El caso de tres naufragios localizados en la Sonda de Campeche, México”. Poster presentado en el *XIII Congreso Ibérico de Arqueometría*, Portugal.
- Barba-Meinecke, H. y Pizá Chávez, A., (2019) “Los pecios R.M.S Tweed y R.M.S Forth. Historia y análisis arqueológico de dos naufragios identificados en el Parque Nacional Arrecife Alacranes, Yucatán”, *Glifos*, 6, 22, pp. 12-23.

- Barba-Meinecke, H., Junco Sánchez, R., y Reyes Trujeque, J., (2020) "El tesoro de Alacranes. Estudio multidisciplinario del pecio Ancla Macuca, Yucatán", *Arqueología Mexicana*, 164, 58-63.
- Barba-Meinecke, H., Junco Sánchez, R., Reyes Trujeque, J., Arbeteta Mira, L., Pizá Chávez, A., Silva León, I., Espinoza Morales, Y., Domínguez-Bella, S., Arano Recio, D., Martí Solano, J., Gabaldón Rodenas, M., Guzmán Torres, J. y Aldana Aranda, D., (2021) "Primeros acercamientos al tesoro de Alacranes: estudio multidisciplinario del naufragio Ancla Macuca, Yucatán, Golfo de México", en Dolores Elkin y Christophe Delaere, Eds. *Entre la Tierra y el Agua. El Patrimonio Costero y Subacuático en América Latina*, University Press of Florida, Estados Unidos, Cap. 18.
- Ciarlo, N.C., (2018) "Las innovaciones en la tecnología naval europea, ca. 1750-1815: un abordaje desde la Arqueometalurgia", *Estudios de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires*, 126, pp. 8-83.

Estudio comparativo de productos de moldeo en conservación arqueológica subacuática.

Comparative study of molding products in underwater archaeology conservation.

Sofía de León Verdasco^a, Luis Carlos Zambrano Valdivia^b y Manuel Bethencourt^c

^a CENIEH, Burgos (España), sofia.deleon@cenieh.es, sofiaadlv1@gmail.com; ^b Museo de Cádiz, Cádiz (España), luisc.zambrano@juntadeandalucia.es; ^c Universidad de Cádiz, Cádiz (España), manuel.bethencourt@uca.es

Palabras Clave: Conservación, *in situ*, metodología, moldeo subacuático, siliconas *RTV*.

Resumen de comunicación.

El moldeo subacuático es una técnica auxiliar de conservación *in situ* del Patrimonio Cultural Subacuático (PCS), usada en aquellas situaciones en las que se encuentra muy fragilizado, o cuya extracción no es posible debido a sus características. Asimismo, sirve para registrar objetos y/o superficies que presenten dichas circunstancias. La realización de moldes se ha ido desarrollando acorde las necesidades de conservación, protección y excavación de cada yacimiento desde los años 80 del siglo XX, pasando por el uso de moldes de polisulfuro con carcasa de yeso para estructuras navales de madera, siliconas y resinas para registro de inscripciones en piedra, siliconas con carcasas de yeso para material orgánico, resinas epoxídicas para material metálico,

siliconas *RTV* y resinas de poliéster para registro de material orgánico o fibra de vidrio combinada con masilla de yeso en materiales de pequeño tamaño (Murdock *et al.*, 1981; Davidde *et al.*, 2014; Zambrano, 2016; Zambrano *et al.* 2001; Empereur, 2000). Se generaliza el uso de determinados materiales por ser inalterables en sí mismos y con el PCS, principalmente los cauchos y siliconas (Rodgers, 2004; Davidde, 2014; Zambrano, 2000, 2001, 2003, 2016). Las siliconas permiten realizar moldes de forma rápida y con un elevado grado en la calidad de registro, por lo que su aplicación está muy extendida en el moldeo de piezas arqueológicas (Raymond, 2012). Son productos altamente versátiles e inertes, cuyas propiedades dependen de la

organización de su cadena polimérica. Las siliconas de tipo *RTV* (*Room Temperature Vulcanization*), son mezclas bicomponentes, formadas por la silicona y el compuesto catalizador que al mezclarse a temperatura ambiente genera un material homogéneo, gomoso y elástico, el elastómero (Macmillan, 2009; Zambrano, 2016). A este esquema deben añadirse tanto el aceite de silicona no-polimerizable como el aditivo tixotropante que modifican viscosidad del producto. La proporción en la que se mezclen estos componentes afecta a la calidad del molde que se establece a partir del parámetro denominado *Índice de Eficacia de Cubrición* (IEC%). Dicho índice proporciona los porcentajes de la superficie cubierta en cada molde (Zambrano, 2016). El segundo factor determinante en la calidad del moldeo subacuático es la resistencia a la deformación del objeto moldeado que es directamente proporcional al nivel de degradación. La valoración de ambos factores, eficacia de cubrición y nivel de degradación, es la clave en la aplicación del método de moldeo subacuático con elastómeros de silicona (Zambrano, 2016). Los ensayos de moldeo con formulaciones de distinta viscosidad sobre muestras no-deformables (Zambrano, 2016) permiten profundizar en aspectos colaterales del método como la facilidad de aplicación o las interacciones de la

columna de agua. El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio comparativo de ambos factores, tanto en ambiente de laboratorio como en ambiente submarino (Figura 1).



Fig. 1 - Elaboración de muestras *in situ* (imagen cedida por el Dr. M. Bethencourt).

En este estudio, se busca analizar las causas que afectan tanto a la metodología de aplicación, como a la capacidad de cubrición en el medio de ensayo. Para ello, se realizaron los moldes en cada uno de los medios establecidos y después se digitalizaron las superficies de registro para obtener el *Índice de Eficacia de Cubrición* (IEC%), transformando los datos visuales en datos cuantificables. La metodología parte de la elección de dos siliconas con propiedades opuestas, una fluida y poco viscosa (*Silical 120 CTS*) y otra poco fluida, muy viscosa y maleable (*Silical 110 CTS*). Dentro de la fluida se aplica el aceite de silicona en proporciones 1% y 5%, buscando diferencias en la facilidad de aplicación y la capacidad de registro. Los ambientes en los que se realizaron las muestras son: el laboratorio (1 atmósfera) y el medio marino (a 10 metros de profundidad,

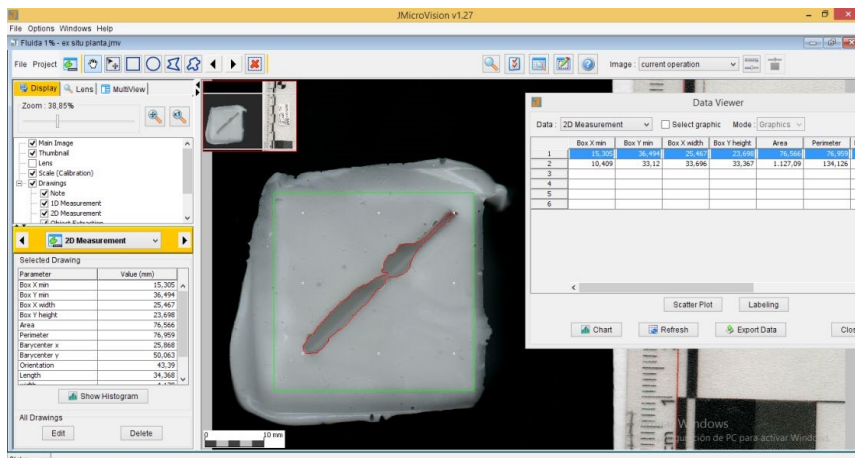


Fig. 2 - Obtención de resultados: medición y cálculo de áreas con el software *JMicrovision 1.2.7* (Creación propia, 2018).

2 atmósferas). Las muestras no-deformables son cilindros de metacrilato recreando un fragmento de material orgánico, a modo de cordel. Para poder evaluar la calidad de las superficies registradas, se digitalizaron los moldes de silicona y mediante el calibrado y la toma de medidas en 2D sobre las imágenes, con el software *JMicrovision 1.2.7*, se delimitaron las zonas de superficie cubierta por la silicona (Figura 2).

Los resultados de este estudio permiten comprobar: que, a mayor fluidez del producto, se obtiene un mayor *IEC*, que por lo tanto produce una mayor calidad de registro. Por otra parte, la fluidez también favorece la aplicación del producto y el control de la cubrición. Se ha logrado determinar que las siliconas *RTV* fluidas (mezclas de *Silical 120* al 1% y al 5%) son productos aptos para el moldeo subacuático, siendo la mezcla más

fluida (*Silical 120* al 1%) la idónea para este ensayo. Igualmente se ha descartado la silicona plasmable (*Silical 110*) como válida para este estudio. Por otro lado, las condiciones del medio acuoso favorecen la calidad del registro, gracias a la presión ejercida por la columna de agua. Como conclusión, se puede exponer que la silicona muy fluida (*Silical 120* al 1%) funcionaría en superficies con un buen estado de conservación, que no supongan áreas de enganche a la hora de desmoldear. Por otro lado, la silicona fluida (*Silical 120* al 5%) se recomienda para su uso en muestras cuya superficie no exija un control excesivo del vertido del producto, y en cuanto a silicona plasmable (*Silical 110*) serviría en superficies que soporten mayor presión de moldeo que la aplicada en este ensayo. En resumen, se demostró que los principales factores que afectan al moldeo son la viscosidad,

la presión de la columna de agua; que la presión de la columna de agua, -en el medio subacuático-, afecta a la calidad del registro debido a que las burbujas de aire escapan hacia arriba, la parte de no registro de los moldes.

Bibliografía:

- Davidde, B., et al., (2014), "Recovery of Fragile Objects from Underwater Archaeological Excavations: New Materials and Techniques by SASMAP Project". En: *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. 5th International Conference*, Euromed, Limassol, November 3-8, 625-634.
- Empereur, J., (2000), "Alexandrie (Égypte)", *Bulletin de Correspondance Hellénique*, 124 (2), 595-619.
- Macmillan, J., (2009), *Formulating Silicone Adhesives Gels and Sealants*. United Chemical Technologies inc.
- Murdock, L., et al., (1981), "Polysulfide rubber and its application for recording archaeological ship features in a marine environment", *The International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration*, 10(4), 337-342.
- Raymond, P., (2012), "Le moulage en archéologie préventive", *Les nouvelles de l'archéologie*, 130, 38-43.
- Rodgers, B., (2004), *The Archaeologist's Manual for Conservation, A Guide to Non-Toxic, Minimal Intervention Artifact Stabilization*, Greenville, North Carolina: Program in Maritime Studies, East Carolina University.
- Zambrano, L. C., et al., (2001), "Conservación y registro arqueológico en el yacimiento submarino Bucentaure II de La Caleta, Cádiz", *Boletín del Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico*, 36, 83-90.
- Zambrano, L. C., (2000), "Moldeo subacuático de objetos arqueológicos", en: *Boletín del Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico*, Cádiz, 32, pp. 175-182.
- Zambrano, L. C., (2003), "Moldeados y reproducciones. Problemática Bajo El Agua.", *Monte Buceiro. La conservación del material arqueológico subacuático*, 9, 353-370.
- Zambrano, L. C., (2016), *Desarrollo de técnicas de moldeo in situ con polímeros sintéticos aplicados en la conservación del patrimonio arqueológico subacuático.*, Tesis de Doctorado, Universidad de Cádiz.
- Zambrano, L. C., (2014), "Estabilización de un obús de bronce del siglo XVIII de procedencia submarina mediante polarización catódica de baja intensidad". En: *Arqueología subacuática española*. Vol.2, Cádiz, 425-430.

La conservación de la cerámica del Pecio de la Ballenera (Algeciras) en el Laboratorio de Arqueología y Prehistoria (LABAP, Universidad de Cádiz).

The conservation treatments of the Ballenera shipwreck ceramics in the Laboratory of Archaeology and Prehistory (LABAP, University of Cadiz).

Elisa Fernández-Tudela

Universidad de Cádiz, España, elisa.fernandez.tudela@gmail.com

Palabras Clave: Cerámica vidriada, La Ballenera, Conservación, Alteraciones, Arqueología.

Resumen de comunicación.

El presente estudio recoge las intervenciones de conservación y restauración llevadas a cabo en la colección de cerámicas procedente del yacimiento de La Ballenera (Algeciras, Cádiz). Los trabajos se han llevado a cabo en el Laboratorio de Arqueología y Prehistoria (LABAP) de la Universidad de Cádiz. El conjunto cerámico objeto de este estudio fue recuperado durante las campañas de excavación del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática de 2017 y 2018 (Universidad de Cádiz). Este se suma al ya recuperado de este mismo yacimiento durante la campaña de excavación parcial realizada por Manuel Martín Bueno en 1984. Estas cerámicas fueron sometidas a tratamientos de conservación preventiva en la década de los 90 y posteriormente intervenidas de nuevo entre los años

2001-2003 por parte del IAPH-CAS (Guerrero y Bouzas, 2004).

El conjunto está formado por cerámica de diferentes tipologías, en su mayoría con decoración vidriada (Martí, 2004). El estado de conservación es muy diverso, presentando en general un alto grado de fragmentación. Las alteraciones presentes se corresponden con cerámica alterada en ambientes marinos con presencia de concreciones calcáreas y restos orgánicos en la superficie; erosión y descohesión de la pasta cerámica; exfoliación superficial del vidriado, desprendimiento de la capa decorativa, manchas de transferencia con otros materiales del yacimiento (orgánico y/o metálico), etc. (Fig. 1).

La presencia de sales, tanto solubles como insolubles, supone uno de los principales factores de

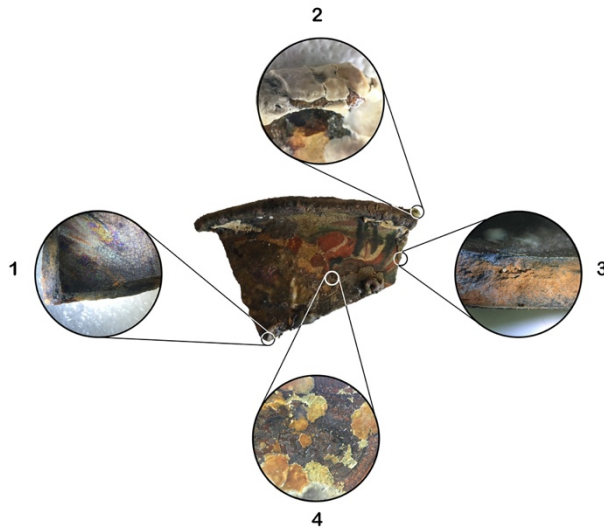


Fig. 1 – Detalles de las alteraciones de un fragmento de cerámica marmorizada: 1) Alteración cromática del vidriado; 2) Concreciones calcáreas; 3) Alteraciones cromáticas de la pasta cerámica y 4) Craqueladura y desprendimiento del vidriado.

alteración a corto y largo plazo de los materiales cerámicos de procedencia subacuática.

El objetivo principal de los tratamientos de conservación de este conjunto cerámico ha sido la estabilización mediante la eliminación de sales solubles e insolubles. Para ello se ha llevado a cabo una metodología de intervención que ha incluido los tratamientos de desalación/estabilización mediante baños acuosos con control periódico; limpieza mecánica y físico-química de las concreciones calcáreas y manchas de origen orgánico e inorgánico; secado controlado y consolidación puntual del material cerámico y la superficie vidriada. Todo el proceso se ha registrado mediante fichas de

intervención y documentación fotográfica.

No se ha optado por la reintegración volumétrica de los materiales, pero puntualmente se ha realizado una reintegración virtual de una de las piezas que a pesar de contar con un buen estado de conservación estaba incompleta. Esta se ha basado en la reconstrucción 3D a partir del modelo fotogramétrico. Posteriormente se ha empleado un programa de modelado 3D (Blender) para reconstruir la parte faltante y poder observar la pieza en su conjunto.

A pesar de que la cerámica se suele considerar uno de los materiales arqueológicos de procedencia subacuática que presenta menor problemática en

cuanto a los procesos de conservación y restauración debido a sus características físico-químicas (Pearson, 1987), en el caso de la cerámica objeto de este estudio nos encontramos con una problemática añadida, la decoración mediante vidriado, que como se ha podido observar cuenta con unas alteraciones específicas.

Una de estas alteraciones características que se han observado en algunos fragmentos es la variación cromática que presenta la superficie vidriada de algunas de las tipologías cerámicas (Fig. 1), resultado probablemente de la alteración química de los componentes que forman este material y su interacción con el medio (Garófano, 2015).

Las alteraciones en cerámica vidriada alterada en ambientes subacuáticos han sido escasamente investigadas, al igual que los tratamientos de conservación de estos materiales, incompatibles en algunos casos con los tratamientos convencionales de limpieza y desconcreción (Wang et al., 2018), de ahí que el conjunto cerámico de La Ballenera cuente con un potencial único de estudio e investigación desde el punto de vista de la conservación.

Bibliografía:

Garófano, I., (2015), “Caracterización físico-química de morteros de revestimiento y pinturas murales, de época romana e islámica de la excavación arqueológica del Patio

de Banderas, y cerámicas vidriadas de los siglos XI-XV, del Real Alcázar de Sevilla” (Tesis doctoral), Universidad de Sevilla, Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, CSIC.

Guerrero, C. y Bouzas, A., (2004), “Proceso de restauración de las cerámicas de La Ballenera”. En: Junta de Andalucía. *La restauración de la cerámica de la Ballenera (Algeciras, Cádiz)*, Cádiz, 47-63.

Martí, J., (2004), “Los materiales del pecio de la Ballenera”. En: Junta de Andalucía. *La restauración de la cerámica de la Ballenera (Algeciras, Cádiz)*, Cádiz, 19-42.

Pearson, C., (1987), “Deterioration of ceramics, glass and stone”. En: Butterworth-Heinemann (Ed.), *Conservation of Marine Archaeological Objects*, 99-104.

Wang, Y., Zhu, T., Yang, G., Tan, X., Ye, D. Y Chen, H., (2018), “The method to soften the concretions of ceramics in the “Nanhai I” Shipwreck of China Southern Song Dynasty (1127–1279AD)”, *Heritage Science*, 6, 4.

Tratamientos de conservación de material orgánico subacuático procedente de Tarifa (Cádiz). El uso de PEG y colofonia como consolidantes.

Conservation treatments of waterlogged organic artefacts from Tarifa (Cadiz).
The use of PEG and colophony for the consolidation treatments.

Elisa Fernández-Tudela^a y Ernesto Toboso Suárez^b

^a Universidad de Cádiz, España, elisa.fernandez.tudela@gmail.com; ^b Gerión Arqueología, Cádiz, España, ejtoboso@gerionarqueologia.es

Palabras Clave: Conservación, consolidación, material orgánico, método acetona-colofonia, PEG 400.

Resumen de comunicación.

Los tratamientos de conservación de material orgánico de procedencia subacuática siguen siendo un reto a pesar de las numerosas investigaciones realizadas en las últimas décadas (Karsten, A. *et al*, 2018).

En esta investigación se han llevado a cabo los tratamientos de conservación (estabilización, limpieza, consolidación, protección y embalaje) de diferentes materiales orgánicos hallados durante las actividades de prospección, sondeos y control de movimiento de tierras del proyecto “In-shore para el sistema submarino de Telecomunicaciones entre Ceuta y Cádiz”.

Entre los materiales recuperados en este proyecto, destacan el conjunto de objetos de naturaleza orgánica formado por un

fragmento de madera asociado a un ánfora romana tipo Lamboglia 2 (siglo I a.C.) y diversos fragmentos de hojas y otros restos vegetales asociadas al posible sistema de sellado de un ánfora tipo Dressel 1, de la que también ha conservado restos de paleocontenido (ictiofauna).

Los fragmentos de madera presentaban un estado de conservación muy deficiente, con abundante presencia de alteraciones causadas por la acción diversos organismos colonizadores, en especial el *teredo navalis*. Los fragmentos presentaban un alto grado de pérdida material, presencia de fracturas y desprendimientos en diferentes zonas, así como una baja resistencia mecánica en todo el conjunto, resultado de los procesos físico-químicos propios de la

alteración de este tipo de material en medios subacuáticos (Fig. 1). El resto de fragmentos de restos orgánicos, presentaban igualmente una baja resistencia mecánica, con pérdida material, en especial las hojas vegetales. (Fig. 2)

Entre los tratamientos necesarios en este tipo de intervenciones destaca el proceso de consolidación, siendo el más importante de cara a la conservación de los objetos de procedencia subacuática y en especial del material orgánico.

etc.) que no siempre hace de su empleo el método más adecuado.

Durante esta investigación se han empleado y evaluado dos métodos consolidación:

1) PEG 400 para la consolidación de pequeño material vegetal (hojas y restos vegetales asociados a un tapón de ánfora). (Piqué i Huerta *et al.*, 2014).

2) El método acetona-colofonia para la consolidación de madera. (MacKerrell *et al.*, 1972) (Giachi, G. *et al.*, 2011).



Fig. 1. Estado de conservación de los fragmentos de madera antes del tratamiento.

Actualmente uno de los productos más ampliamente aceptados para la consolidación de estos materiales es el polietilenglicol (PEG). Sin embargo, tiene ciertos inconvenientes (duración del tratamiento, infraestructuras, coste,

Los resultados obtenidos han sido los esperados. Se ha conseguido estabilizar los materiales para su conservación a corto y largo plazo, eliminando los mecanismos de alteración presentes. En el caso de las hojas vegetales los tratamientos de consolidación

mediante laminación, propios de la conservación de documentos gráficos, han permitido estabilizar un material muy frágil, facilitando su posterior manipulación.

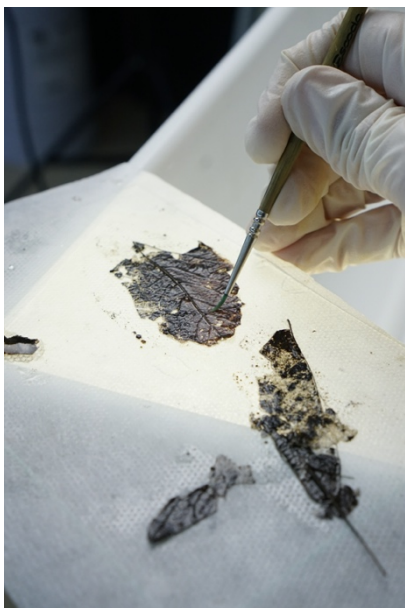


Fig. 2. Tratamiento de conservación y restauración de hojas vegetales.

Hay que destacar la eficacia del método de acetona-colofonia de cara al tratamiento de materiales orgánicos de pequeño formato, acortando el tiempo de intervención y evitando la necesidad de equipamiento técnico específico. Este método, que consiste en reemplazar el agua de la estructura de la madera por una resina natural, ha sido escasamente desarrollado, por lo que no existen apenas ejemplos publicados. La evaluación del proceso mediante el empleo de diferentes técnicas de análisis (colorimetría, microscopía, análisis

químicos, etc.) permitiría conocer mejor la efectividad, así como el desarrollo de una metodología más específica en función de las características físico-químicas de cada objeto.

Bibliografía:

- Giachi, G., et al. (2011), "New trials in the consolidation of waterlogged archaeological wood with different acetone-carried products", *Journal of Archaeological Science*, 38, 2957-2967.
- MacKerrell, P., Roger, E., Varsanyi, A., (1972), "The acetone/rosin method for conservation of waterlogged wood", *Studies in Conservation*, 17, 3, 111-125.
- Piqué i Huerta, R. et al. (2014), "Registro, análisis y conservación de los objetos de madera del yacimiento neolítico de La Draga (Banyoles, Catalunya)". En: Nieto Prieto, M.; Bethencourt Núñez, M. Eds. *Arqueología subacuática Española*. Vol.2, Cádiz, 385-394.
- Karsten, A., Graham, K. and Mould, Q. (2018), *Waterlogged Organic Artefacts: Guidelines on Their Recovery, Analysis and Conservation*, (Ed.) Historic England, Swindon

PROGRAMA PROVISIONAL METALESPAÑA 2020/21

Si hubiera algún error en la adscripción de comunicaciones y pósteres se corregirá en el programa definitivo

Jueves 22 de abril de 2021

9:30-10:00 ACTO DE INAUGURACIÓN

Bienvenida por parte de los representantes de las Instituciones organizadoras.

- Rafael Fera y Pérez (Director del Museo Casa de la Moneda)
- José Manuel González Sancho (Vicerrector de Investigación UAM)
- Carmen Jiménez Sanz (Subdirectora General de Museos Estatales)
- Milagros Buendía Ortuño (Coordinadora MetalEspaña. Restauradora Museo Nacional de Arqueología Subacuática ARQVA)
- Joaquín Barrio Martín (Coordinador MetalEspaña. Director SECYR-UAM)

10:00-10:30 CONFERENCIA INAUGURAL

Antonio Doménech Carbó (Catedrático de la Universidad de Valencia)

Técnicas electroquímicas para la datación de P. Metálico

10:45-13:45 SESIÓN I: CIENCIA Y TECNOLOGÍAS DE INVESTIGACIÓN DEL PATRIMONIO METÁLICO

L. Matas, M. Bethencourt, R. Morón, L. C. Zambrano, F. Cerezo

Caracterización, diagnóstico y conservación de los lingotes de cobre del Pecio Arapal, s. I d.C. (Sancti Petri, Cádiz)

M^a T. Molina, B. Ramírez, I. Díaz, E. Cano

Estrategias innovadoras para la conservación preventiva de los objetos metálicos en colecciones de museos

T. Pérez, A. Doménech, M. Lastras

Estudio de la efectividad del ácido tánico sobre piezas de hierro arqueológico

11:30-12:00 DESCANSO

I. Donate, M. Bueso, E. Rodríguez, S. Celestino

Estudio radiográfico de los metales arqueológicos de Casas del Turuñuelo (Guareña, Badajoz)

J. Bermejo

Extrapolación de técnicas no habituales en la reproducción de elementos metálicos asociados al Patrimonio Documental.

C. Álvarez, M^a T. Doménech, A. Doménech, M. Buendía, T. Pasies, C. Mai

Aportación de la técnica FIB-FESEM-EDX al estudio del patrimonio en metal

S. Marín

Nuevas metodologías para la eliminación de la corrosión en patrimonio metálico arqueológico: buffers, quelantes, geles y emulsiones

M^a A. Peiró, A. Doménech, J. Vives, G.S. Duffó, S. Farina

Sábado 24 de abril de 2021

9:30-12:15 SESIÓN V: PATRIMONIO METÁLICO CIENTÍFICO, TECNOLÓGICO, INDUSTRIAL Y URBANO

M^a I. Angulo, M. M^a Blanco, M. Torres

Acciones para la documentación, conservación y restauración de una fuente escultórica de fundición: La diosa Fortuna de Daimiel (Ciudad Real)

E. Fernández, L. C. Zambrano, M. Bethencourt

Diagnóstico del estado de conservación de un conjunto de cepos de plomo de procedencia subacuática: uso de geles rígidos de agar-agar para su intervención

M. J. Grueso

Estudio, caracterización y diagnóstico de una fuente de peltre de procedencia subacuática depositada en el Museo de Cádiz

I. Sánchez, I. Salas, J. F. García, S. García, M. Bethencourt

Extracción simultánea de iones cloruro mediante electrolisis a 17 cañones y dos balas de hierro fundido de procedencia subacuática: metodología y desarrollo de herramientas

J. L. Sierra

La conservación de las culebrinas recuperadas de la fragata Nuestra Señora de las Mercedes

M^a P. Valenzuela

La Estación Central de Santiago de Chile. Arquitectura metálica y vanguardia decimonónica

11:00-11:30 DESCANSO

J. Bermejo

Las jardineras tipo Monier en las Galerías Punta Begoña. Degradaciones y proceso de conservación

S. Díaz, S. López

Los inicios de la industria del hierro en Madrid en el siglo XIX: cerramientos de edificios reseñables

P. Griñena, S. Martínez, M. Perales

Restauración del patrimonio metálico urbano: la escultura de la Flama Rotaria de la ciudad de Valencia

12:15-12:30 PREGUNTAS CHAT

12:30-13:00 VISITA VIRTUAL A LOS LABORATORIOS DEL MUSEO NACIONAL DE ARQUEOLOGÍA SUBACUÁTICA DE CARTAGENA - ARQVA

13:15-13:45 CONFERENCIA INVITADA

Emilio Cano Díaz (Representante del nodo español de la red E-RIHS, la Red Europea de Ciencia en Patrimonio)

Servicios e instrumentos de la Infraestructura Europea de Investigación en Ciencia del Patrimonio (E-RIHS) para la conservación del patrimonio metálico

14:00 FIN DEL CONGRESO

Conclusiones y Acto de Clausura del Congreso

Caracterización, diagnóstico y conservación de los lingotes de cobre del Pecio Arapal, s. I d.C (Sancti Petri, Cádiz)

L. Matas, M. Bethencourt, R. Morón, L.C. Zambrano, F. Cerezo

Se presenta el estudio arqueométrico y los tratamientos de conservación curativa y restauración realizados sobre 70 lingotes de cobre extraídos en el entorno del islote de Sancti Petri.

La tipología de las piezas es discoidal troncocónica, con un lado plano y otro ligeramente convexo. En función de su peso y dimensiones se han dividido en: Tipo 1, con peso de $26 \pm 1,2$ Kg y diámetro de $38 \pm 0,7$ cm, y Tipo 2 con peso de 20 ± 3 Kg y diámetro de 32 ± 15 cm.

El estudio epigráfico de las inscripciones presentes en algunas piezas, con numerales romanos y letras en mayúscula, así como la forma de los sellos, permiten circunscribirlos a la época Romano Imperial.

El estudio metalográfico revela una estructura propia de la fabricación por fundición, con huecos en la matriz por la desgasificación producida durante la fusión y posterior enfriamiento del metal, así como la dispersión de inclusiones de óxido de cobre y ausencia de dendritas. Se ha distinguido una pequeña secuencia estratigráfica compuesta por cuprita y carbonatos de cobre.

El análisis elemental, realizado con FRX, IPC-MS y OES, desvela una aleación de Cu al 99,8%, con Sb, Ag y As como elementos mayoritarios, mostrando coincidencias con lingotes analizados por otros autores y con posible origen en la Península Ibérica.

Las alteraciones presentes han dependido de las condiciones en las que cada lingote ha permanecido en el medio. Algunos lingotes estuvieron sometidos a un medio anaeróbico desarrollando de sulfuros de cobre (covellita CuS y calcosita Cu₂S). Otros estuvieron expuestos a un medio aerobio, con formación de cuprita Cu₂O, tenorita CuO, cloruros de cobre (nantoquita CuCl, atacamita Cu₂(OH)₃Cl y paratacamita Cu₂(OH)₂Cl), carbonatos básicos de cobre (malaquita CuCO₃Cu(OH)₂ y azurita Cu₃(CO₃)₂(OH)₂) y desarrollo de capas de concreción mineral y biológica.

Establecidas las alteraciones presentes se han realizado una serie de trabajos encaminados a la conservación y restauración de las piezas, consistentes en sucesivos baños de sesquicarbonato de sodio y limpieza mecánica.

Diagnóstico del estado de conservación de un conjunto de cepos de plomo de procedencia subacuática: uso de geles rígidos de agar-agar para su intervención.

E. Fernández, L.C. Zambrano, M. Bethencourt

Los objetos de plomo de procedencia subacuática han sido elementos de escaso interés desde el punto de vista de la conservación comparados con otros materiales. Esto se debe principalmente a sus características físico-químicas que lo hacen un material muy resistente a la corrosión, por lo que se les atribuye generalmente un buen estado de conservación.

Sin embargo, en ocasiones la ausencia de tratamientos de conservación preventiva ha dado lugar a medio y largo plazo a problemas derivados de las alteraciones no tratadas.

Esta investigación se centra en analizar las alteraciones presentes en un conjunto de cepos de plomo pertenecientes al Museo de Cádiz. Desde el punto de vista de la conservación, la problemática común es la presencia de diferentes productos de corrosión que cubren de manera heterogénea la superficie dúctil de la mayoría de cepos. Estos cepos presentan en muchas ocasiones huellas documentales de gran interés como marcas de uso y de fabricación o elementos decorativos.

Partiendo del estudio integral realizado en un cepo de plomo cuyas alteraciones fueron analizadas mediante diferentes técnicas de análisis (DRX, SEM-EDX, microscopia óptica), se llevó a cabo una eliminación selectiva de estos productos mediante gel de agar-agar y EDTA disódico al 10% con el apoyo de herramientas blandas para evitar dañar la superficie. Los resultados obtenidos han sido positivos.

Extracción simultánea de iones cloruro mediante electrolisis a 17 cañones y dos balas de hierro fundido de procedencia subacuática: metodología y desarrollo de herramientas específicas.

I. Sánchez, I. Salas, J. F. García, S. García, M. Bethencourt

Esta comunicación describe la metodología aplicada para la extracción simultánea de iones cloruro (Cl^-) mediante electrolisis a 17 cañones y 2 balas de hierro fundido del siglo XVIII. Las piezas, fruto de un hallazgo casual durante las excavaciones de una obra de naturaleza civil, fueron halladas sumergidas en fango en el entramado defensivo relacionado con la Batería del Caballero Zuazo en San Fernando (Cádiz) en el año 2009.

Para dicho tratamiento, se desarrollaron herramientas ad hoc: cubas de bajo coste para electrolisis, una barrena de alta precisión para la limpieza del ánima de los cañones y dos bases de trabajo giratorias para su limpieza física y se ensayó una nueva técnica para la estabilización de piezas metálicas de gran calibre. De igual modo, se efectuó un ensayo previo que mostró la mayor eficiencia del uso de una densidad de corriente de $50 \mu\text{Acm}^{-2}$ frente a $1000 \mu\text{Acm}^{-2}$ en la extracción de Cl^- .

La gran envergadura del trabajo realizado supone una valiosa información para el abordaje de futuras actuaciones en materia de conservación de Patrimonio Arqueológico Subacuático (PCS).

Participación en organización de congresos

MetalEspaña 2020/2021

III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico

Joaquín Barrio Martín
Milagros Buendía Ortuño (eds.)

SECYR >>
Servicio de Conservación, Restauración y
Estudios Científicos del Patrimonio Arqueológico



ARQVA Museo Nacional
de Arqueología Subacuática



UAM Universidad Autónoma
de Madrid

Anejos nº 6 | 2022

Departamento de Prehistoria y Arqueología
Facultad de Filosofía y Letras,
Vicerrectorado de Investigación
Universidad Autónoma de Madrid

**Cuadernos
de Prehistoria
y Arqueología**
de la Universidad Autónoma de Madrid

Consejo evaluador Anejo 6 2022 / Reviewers Board Anejo 6 2022

Carmen Dávila Buitrón	Escuela Superior de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Madrid
Margarita Arroyo Macarro	Museo Arqueológico Nacional
Evaluación remitida: 13-01-2022. Aceptado: 18-03-2022	

Comités del Congreso

Coordinación

Joaquín Barrio Martín	Universidad Autónoma de Madrid
Milagros Buendía Ortuño	Museo Nacional de Arqueología Subacuática. ARQVA. Cartagena

Secretaría del Congreso

María Cruz Medina Sánchez	Universidad Autónoma de Madrid
---------------------------	--------------------------------

Organización

Ana Isabel Pardo Naranjo	Universidad Autónoma de Madrid
Cristina Cabello Briones	Universidad Autónoma de Madrid
Manuel María Blanco Domínguez	Universidad Autónoma de Madrid
Bárbara Martín Gómez	Universidad Autónoma de Madrid
Patricia de la Calle Ruiz	Universidad Autónoma de Madrid

Comité científico

Alicia Arévalo González	Universidad de Cádiz
Margarita Arroyo Macarro	Museo Arqueológico Nacional
Joaquín Barrio Martín	Universidad Autónoma de Madrid
Manuel Bethencourt Núñez	Universidad de Cádiz
Milagros Buendía Ortuño	Museo Nacional de Arqueología Subacuática. ARQVA. Cartagena
Emilio Cano Díaz	Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CSIC
Alberto Canto García	Universidad Autónoma de Madrid
Soledad Díaz Martínez	Instituto del Patrimonio Cultural de España
Antonio Doménech Carbó	Universidad de Valencia
Rafael Feria y Pérez	Real Casa de la Moneda, FNMT
Isidro Ibarra Berrocal	Universidad Politécnica de Cartagena

CYANIS 2021

**I CONGRESO IBEROAMERICANO DE ARQUEOLOGÍA
NÁUTICA Y SUBACUÁTICA**



CIANYYS 2021

LIBRO DE RESÚMENES



Primera edición, Julio 2021.

© Los autores.

ORGANIZACIÓN CIANYS 2021.

Organizado por:

Línea de Arqueología Náutica de la Universidad de Cádiz.

Comité de Honor:

Xavier Nieto Prieto, Manuel Martín-Bueno, Pilar Luna Echegarria.

Comité Organizador:

Coordinación Científica: Felipe Cerezo Andreo.

Coordinación Técnica: Carlota Pérez-Reverte.

Equipo Técnico:

Elisa Fernández Tudela, Raúl González Gallero, Celia González Sánchez, Sergio José López Martín, Natalia López Sánchez, Julián Moyano Di Carlo.

Comité Científico: Milagros Alzaga García (Esp), Alicia Arévalo González (Esp), Mariano Aznar Gómez (Esp), Helena Barba Meineke (Mex), Darío Bernal Casasola (Esp), Manuel Bethencourt Núñez (Esp), José Bettencourt (Por), Milagros Buendía Ortuño (Esp), Carlos del Cairo Hurtado (Col), Diego Carabias Amor (Chl), Guadalupe Carrasco González (Esp), Felipe Castro (Por), Felipe Cerezo Andreo (Esp), Nicolás C. Ciarlo (Arg), Ana Crespo Solana (Esp), Dolores Elkin (Arg), Carmen García Rivera (Esp), Rut Geli Mauri (Esp), Alberto Gullón Abao (Esp), Jorge Manuel Herrera Tovar (Mex), Carlos de Juan Fuentes (Esp), Roberto Junco Sánchez (Mex), José Antonio Moya (Esp), Ivan Negueruela (Esp), Rodrigo de Oliveira Torres (Uru), Marcel Pujol i Hamelink (Esp), Arturo Rey da Silva (Esp), Carlos Rios (Bra), Juan José Sánchez Baena (Esp), Flor Trejo (Mex), Gustau Vivar Lombarte (Esp), Luis Carlos Zambrano Valdivia (Esp)

ANEXO IV

Imágenes



Figura 1. Consolidación de pileta de salazón en la calle San Nicolás de Algeciras. Fuente: J.L. Portillo.



Figura 2. Extracción del estrato de la pileta de salazón de la calle San Nicolás de Algeciras para su musealización. Fuente: J.L. Portillo.



Figura 3. Limpieza de ictiofauna para su posterior extracción en bloque en la fábrica de salazón de la calle San Nicolás de Algeciras. Fuente: J.L. Portillo.



Figura 4. Protección de ictiofauna para su posterior extracción en bloque, en la fábrica de salazón de la Calle San Nicolás de Algeciras. Fuente: J.L. Portillo.



Figura 5. Asesoramiento *in situ* en la excavación del tholos de Peñarroyo.
Fuente: Elaboración propia.

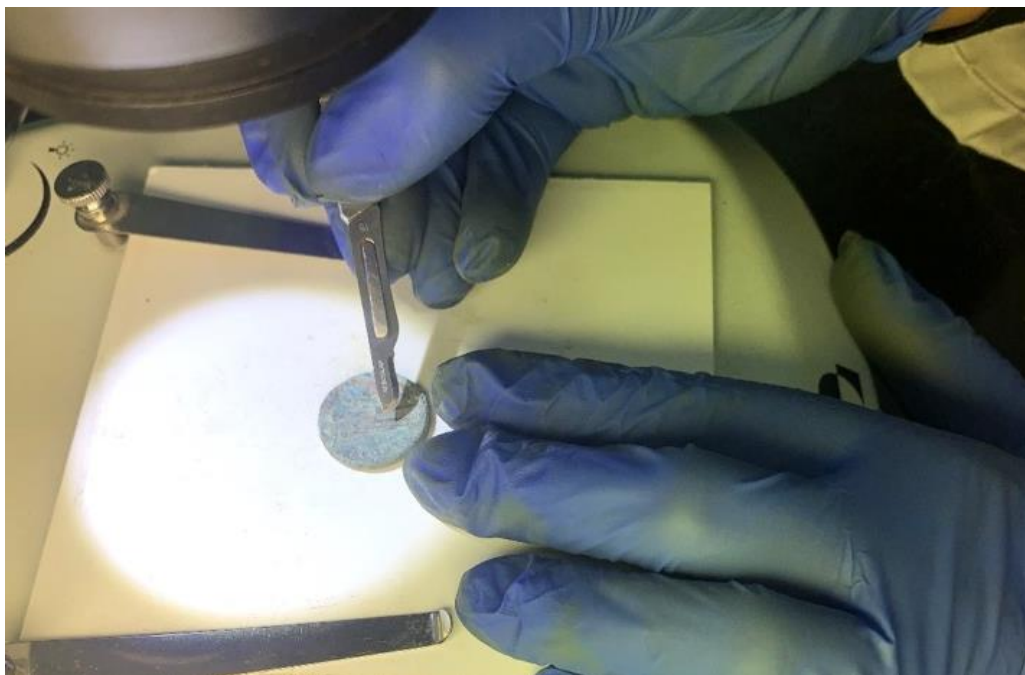


Figura 6. Limpieza mecánica de la colección numismática de San Nicolás
(Algeciras). Fuente: Elaboración propia.

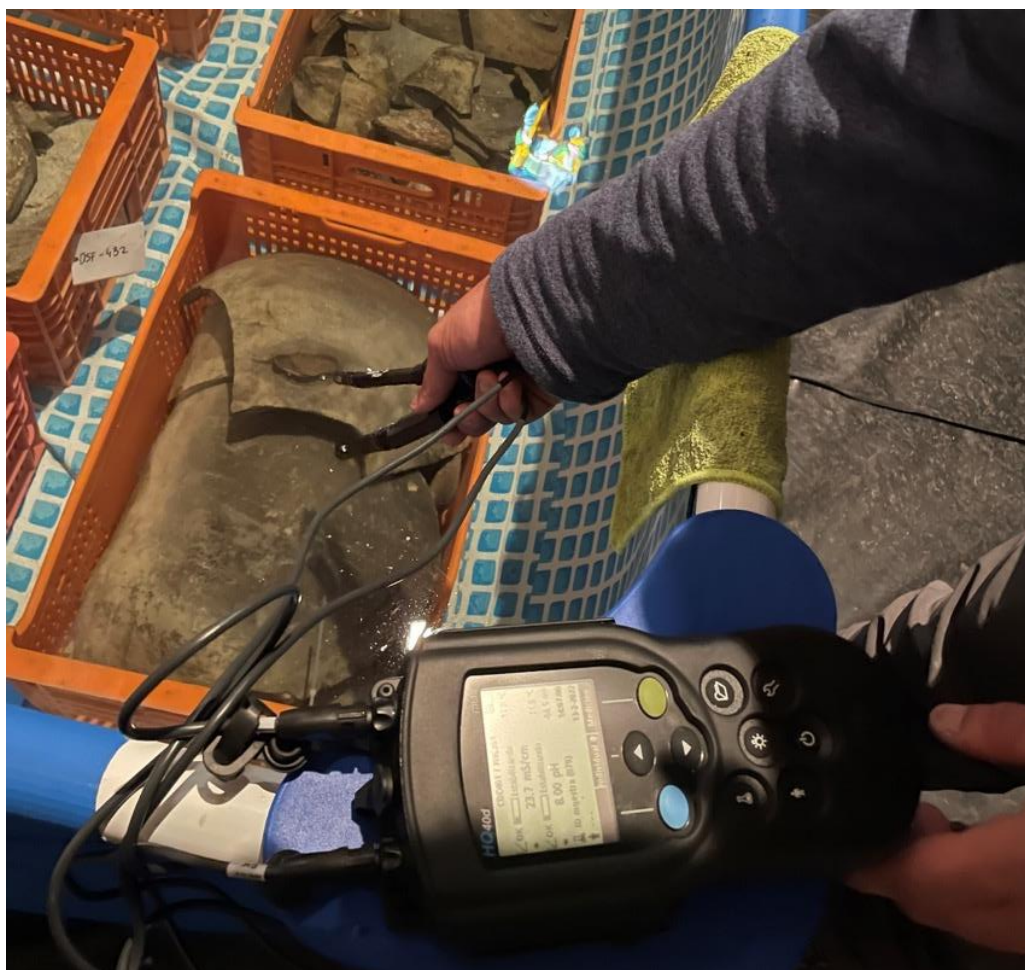


Figura 7. Control de baños de desalación *in situ* de la cerámica del proyecto Ses Fontanelles. Fuente: Elaboración propia.

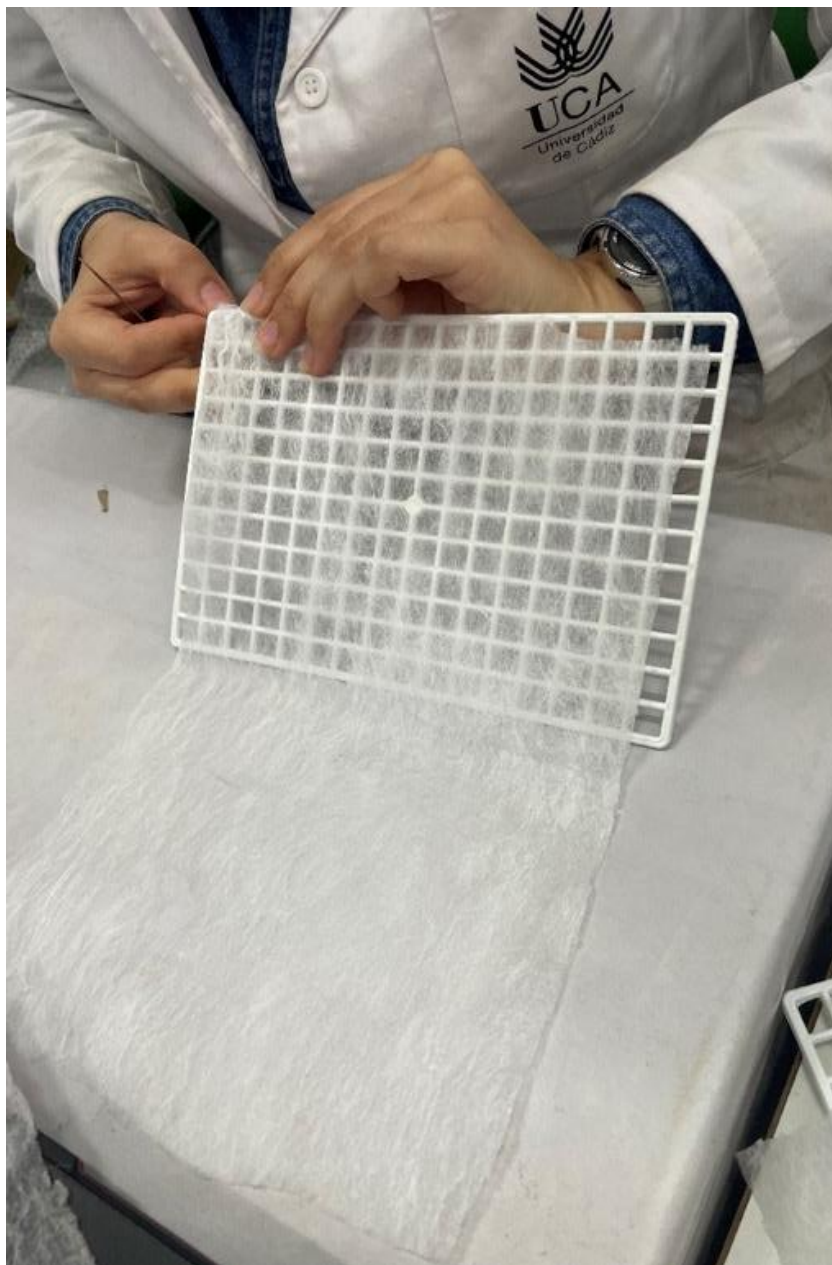


Figura 8. Preparación de embalajes para material orgánico superfrágil del pecio de Ses Fontanelles. Fuente: Elaboración propia.



Figura 9. Microexcavación en laboratorio de material orgánico superfrágil extraído en bloque. Fuente: elaboración propia.



Figura 9. Protección de muñón de cañón tras su desconcreción para documentación *in situ*. Fuente: Proyecto Herakles.



Figura 10. Adhesión de desprendimientos de pieza cerámica proveniente de un pecio del Proyecto Herakles. Fuente: Elaboración propia.



Figura 11. Desconcreción mecánica de proyectil proveniente del pecio de La Ballenera. Fuente: elaboración propia.



Figura 12. Vista por lupa de desconcreción de fragmento de cerámica del pecio de La Ballenera. Fuente: Elaboración propia.

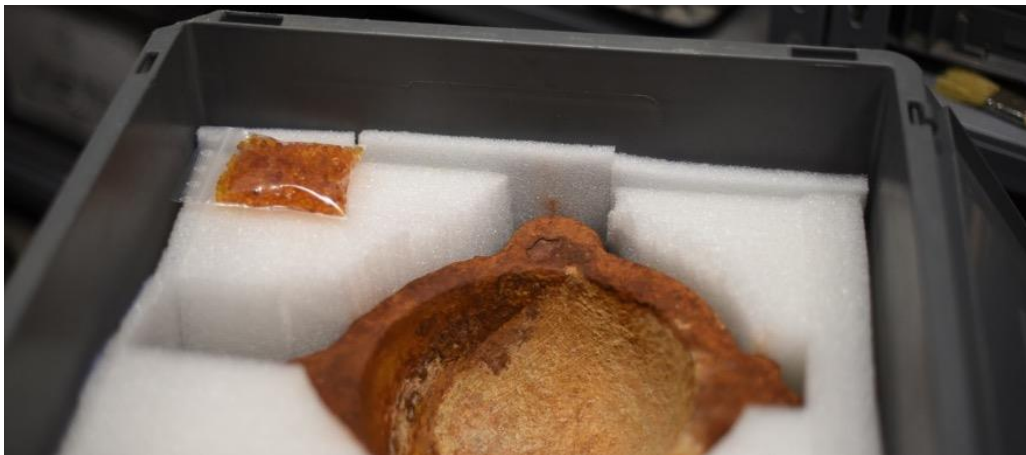


Figura 13. Ejemplo de acondicionamiento de material arqueológico proveniente de La Ballenera para su almacenaje. Fuente: elaboración propia.