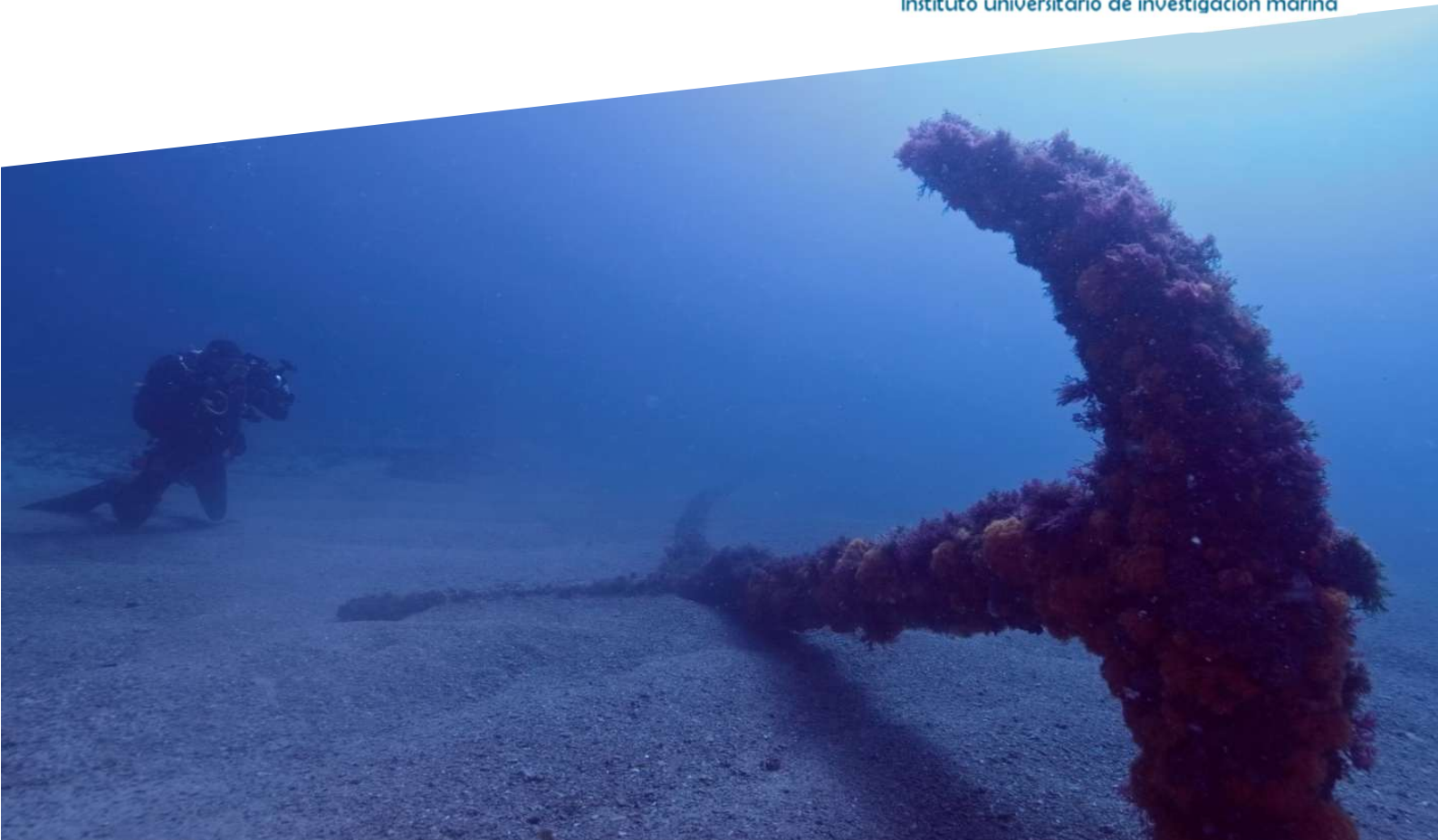




ÍNDICE

1. EL LEC-PH	3
2. MOTIVACIÓN DE LA MEMORIA	3
3. PERSONAL	3
4. ACTIVIDADES	4
4.1. INVESTIGACIÓN	5
4.1.1. Participación en Proyectos de I+D+I solicitados por grupos del PAIDI	5
4.1.2. Participación en publicaciones (Anexo I)	7
4.1.3. Participación en congresos (Anexo II)	5
4.1.4. Membresía a sociedades internacionales	9
4.2. TRANSFERENCIA	11
4.2.1. Contratos con el exterior (art. 86 LOSU)	11
4.3. DIVULGACIÓN	11
4.3.1. Organización de Congresos	11
4.3.2. Vídeo del LEC-PH	12
4.3.3. Video Documental 'NAVIS ROMANA (Episodio I)'	12
4.3.4. Finalista Premio Nacional de Arqueología PALARQ	13
4.4. FORMACIÓN	13
4.4.1. De alumnado de Doctorado y Máster	13
4.4.2. Cursos de especialización para profesionales	15

ANEXO I. Productividad: Participación en publicaciones

ANEXO II. Productividad: Participación en congresos

ANEXO III. Algunas imágenes

1. EL LEC-PH

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, Servicio Periférico de Instituto de Investigación Marina (INMAR), 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 las **memorias de actividades anuales**, en esta ocasión la del año 2025, 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.

Estas memorias son accesibles a través de la página web de LEC-PH (<https://lec-ph.uca.es/>).

3. PERSONAL

Durante 2025 el LEC-PH contó con tres profesionales, uno de plantilla y dos contratados por distintos programas:

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 y miembro del grupo del PAIDI TEP-231. Contrato: funcionario de carrera. Contacto: manuel.bethencourt@uca.es.

Nicolás C. Ciarlo. Investigador del LEC-PH. Es investigador contratado Ramón y Cajal del Departamento de Historia, Geografía y Filosofía y miembro del grupo del PAIDI HUM-1126. Contrato: laboral. Contacto: nicolas.ciarlo@uca.es.

Marina Goñalons Lapiedra. Contratada a cargo de la convocatoria de Personal Técnico de Apoyo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Graduada en Conservación y Restauración de Bienes Culturales (UPV-EHU). Máster en Arqueología Náutica y Subacuática (UCA). Contrato UCA: laboral, desde el 01/10/25 hasta el 30/09/28. Contrato: laboral. 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 2025 han sido colaboradores externos del laboratorio:

Elisa Fernández Tutela, responsable del Área de Conservación del Centro de Arqueología Subacuática de Andalucía, es doctoranda del programa Historia y Arqueología Marítima, desarrollando su investigación en el LEC-PH. Contacto: elisa.fernandez.tudela@juntadeandalucia.es.

Diana Arano Robles, conservadora-restauradora del Instituto Nacional de Antropología e Historia, sede Mérida (México). Realizó su tesis doctoral en el LEC-PH. Contacto: diana_arano@inah.gob.mx.

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. El laboratorio ha dado servicio a los siguientes grupos:

HUM-240 Patrimonio histórico de Andalucía en la antigüedad.

HUM509 PHOENIX mediterránea. Investigación, difusión y transferencia del patrimonio histórico-arqueológico y cultural de Andalucía Occidental

HUM-1126 Arqueología y patrimonio cultural. Del estrecho de Gibraltar al ámbito atlántico-mediterráneo.

HUM-1127 THALASSA. Megalitismo y sociedades litorales de la prehistoria reciente en el sur peninsular

HUM1130 Sociedades cazadoras-recolectoras paleolíticas explotadoras de recursos marinos en la región geohistórica del Estrecho de Gibraltar. Tecnología y manifestaciones gráficas

TEP-231 Corrosión y protección.

RMN-205 Oceanografía física: dinámica

El LEC-PH también se compromete con la puesta en valor, la importancia de la formación, la 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 2025.

4.1. INVESTIGACIÓN

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

- Participación en proyectos de arqueología

La Piedra que Revienta: Investigación interdisciplinar de sus recursos culturales con aplicación de nuevas tecnologías (UCA). Proyecto arqueológico centrado en el estudio de los restos arqueológicos asociados al bajo rocoso de La Piedra que Revienta, ubicado a poco más de tres millas al oeste de la costa de Conil de la Frontera, en la provincia de Cádiz. 14/10/2025 a 13/10/2027. Responsable: Nicolás C. Ciarlo (HUM-1126).

Arqueomallornauta (UCA). Este proyecto de colaboración entre la Universidad de Barcelona, Universidad de Cádiz, Universidad de les Illes Balears y el Consell de Mallorca tiene como objetivo analizar el tráfico marítimo en Mallorca en la Antigüedad Tardía a través de los hallazgos subacuáticos. En 2025 las instalaciones del LEC-PH han acogido los tratamientos finales, digitalización y adecuación del almacenamiento de la colección (Figuras 1 y 2, Anexo III). Investigador Responsable: Darío Bernal (grupo HUM-1126).

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. Durante 2025 se ha revisado la colección de proyectiles que se pretenden intervenir en los próximos meses y se han llevado a cabo tareas de difusión de resultados. Investigador Responsable: Felipe Cerezo (HUM-1126).

Aplicación de investigación no invasiva en el asentamiento de Guardias Viejas (El Ejido, Almería): un caso innovador en el potencial Portus Murgitanus (CEI-JD-07), en el marco de la Convocatoria de Ayudas a Proyectos de Investigación para Jóvenes CEI-MAR 2023. Investigador Responsable: Isabel Rondan (HUM-240). El proyecto emplea métodos no destructivos para estudiar este importante yacimiento arqueológico, revelando estructuras subterráneas y ampliando nuestro conocimiento de este antiguo puerto romano en la zona de la antigua Baria/Murgi.

Patrimonio Cultural Subacuático en espacios portuarios de Andalucía. Hacia la investigación, protección y gestión inteligente y sostenible en el marco de la economía azul (Port-SUB). Plan Complementario de Ciencias Marinas. Plan Andaluz de Investigación. 23/01/2023 a 31/12/ 2025. El objetivo principal de este proyecto es investigar y documentar el Patrimonio Cultural Subacuático mediante la aplicación de nuevas tecnologías, utilizando métodos no intrusivos, geofísicos y virtuales, así como vehículos marinos no tripulados, para una planificación integrada que aborde de forma estratégica y sostenible el desarrollo de los espacios portuarios según sus tipologías. Investigador Responsable: Felipe Cerezo (grupo HUM-1126).

Arqueología e historia marítimas de la Guerra del Brasil: estudio de pecios y un campamento de naufragos en Norpatagonia, Argentina, 1827. Fundación PALARQ: Paleontología y Arqueología, España. Duración: 11/2025 – 3/2026. Investigador Responsable: Nicolás C. Ciarlo (HUM-1126).

Investigación arqueológica y puesta en valor de las actividades marítimas históricas en Norpatagonia. Proyecto de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT), Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (PICT n.º 2020-02117), Argentina. Duración: 8/07/2022 – 8/01/2025. Investigador Responsable: Nicolás C. Ciarlo (HUM-1126).

The New Spain Fleets: delving into three centuries of socioeconomic colonial history through Artificial Intelligence. Economic and Social Research Council (ESRC), UK Research and Innovation (ES/XO13774/1), Reino Unido. Duración: 1/3/2024 – 28/2/2029. Investigadores Responsables: Patricia Murrieta-Flores (Universidad de Lancaster, Reino Unido) y Mariana Favila Vázquez (Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México). Rol: asesoramiento científico por parte de Nicolás C. Ciarlo (HUM-1126).

Arqueología marítima de la bahía de Maldonado: hacia la consolidación de un modelo de investigación y conservación del patrimonio cultural subacuático en Uruguay. Proyecto de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), a través del Fondo Clemente Estable – Modalidad II (ANII FCE_3_2024_1_181149), República Oriental del Uruguay. Duración: 11/2024 – 10/2026. Investigador Responsable: Matías Dourteau Cardozo (UdelaR). Rol: investigador Nicolás C. Ciarlo (HUM-1126).

Gemelo digital Isla del Trocadero: Digitalización 3D para la monitorización y preservación del patrimonio marítimo en el marco de la economía azul y el turismo cultural. Convocatoria de ayudas a proyectos de I+D+I, en régimen de concurrencia competitiva, en el marco del Plan Complementario de Ciencias Marinas y del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PCM_00036), España. Duración: 23/1/2024 – 30/9/2025. Investigador Responsable: Lázaro Gabriel Lagóstena Barrios (HUM-240).

Estudio de viabilidad de intervención del conjunto monetario de Isla del Fraile (Murcia). Campañas 2020-2025. Este estudio ha permitido proponer un plan de intervención para un conjunto de monedas que presentaban distintos estados de conservación (Figura 3, Anexo III). (Investigador Responsable: Alicia Arévalo (HUM-1126).

Arqueología del colonialismo en la ría Deseado y área de influencia litoral (provincia de Santa Cruz, República Argentina). Una evaluación de su potencial arqueológico. Proyecto de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT), Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (PICT n.º 2022-04-00072), Argentina. Duración: XX/2024 – XX/2026. Investigador Responsable: Silvana Buscaglia (CONICET). Rol: miembro del grupo colaborador Nicolás C. Ciarlo (HUM-1126).

Núcleo Milenio: Océano, Patrimonio y Cultura. Proyecto del Concurso de Núcleos Científicos del Programa Iniciativa Científica Milenio 2021 de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (NCS2021_040), Chile. Duración: 12/2021 – 8/2025. Investigadores Responsables: Isabel Cartajena (UCh) y Diego Carabias (Asociación ARQMAR). Rol: investigador adjunto Nicolás C. Ciarlo (HUM-1126).

- Proyectos de arqueometría

Vulnerability of Littoral Cultural Heritage to environmental agents: impact of Climate Change (VOLICHE). Plan Estatal, Retos, 01/01/2021-31/08/2025. 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).

The archaeology of ships: a study of technological change in early modern European watercraft and its overseas impact. Ayuda adicional de Atracción de Talento, en el marco del programa Ramón y Cajal de la Agencia Estatal de Investigación, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, España, para desarrollar investigación en la Universidad de Cádiz (RYC2023-043938-I). Periodo: 01/04/2025 – 31/03/2030. Investigador Responsable: Nicolás C. Ciarlo.

4.1.2. Participación en publicaciones (Anexo I)

M. Bethencourt, N.C. Ciarlo. (2025) Arqueología subacuática. Casos de estudio. En: *Caracterización y Diagnóstico del Patrimonio Cultural, Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía* (Eds. Mª Pilar Ortiz Calderón y Adolfo Miras Ruiz), SEM, Madrid, ISSN 256-9872, N°16, enero, pp. 5-11.

D. Arano, N.C. Ciarlo, G. Carrasco-González, B. Barba-Meniecke, M. Bethencourt. Copper-based sheathing and fastenings for wooden ships: An archeometallurgical study of the Carron, Ancla Macuca, RMS Forth, and El Pesquero wreck sites located in the gulf of Mexico (Late 18th to Mid-19th Century). *Metallography, Microstructure, and Analysis*, Vol. 14, 612–623.

N.C. Ciarlo, D. Carabias, F. Cerezo Andreo, R. González Gallero, A. Cieslinski (2025). Fuerzas navales sutiles de tradición constructiva hispana entre fines del siglo XVIII y principios del siglo XIX: vínculos de ultramar y potencial del estudio arqueológico de lanchas cañoneras. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada* (En prensa)

N.C. Ciarlo, A. Castelli, J. Rodríguez Saumell, C. G. Landa, L. Dam, D. Carabias Amor, A. Brooks, L. V. J. Coll, R. Torres (2025). Estudio preliminar e identificación de un campamento de naufragos en el contexto de la Guerra del Brasil (1825-1828), Partido de Patagones, Buenos Aires. *Latin American Antiquity* 36 (1): 202-221.

N.C. Ciarlo, F. Rivera (2025). Industrial times in South American archaeology. En: M. Aldenderfer, M. Sepulveda y E. Neves (eds.), *The Oxford Handbook of South American Archaeology*. Oxford University Press, EE.UU. (En prensa)

N.C. Ciarlo, J. Rodríguez Saumell, D. Salgado (2025). Estudio de sellos de plomo del Imperio del Brasil asociadas a un campamento de naufragos en Norpatagonia, Argentina: implicaciones arqueológicas y sigilográficas. *Documenta et Instrumenta* (En prensa)

E. Fernández-Tudela, R. Zarzuela Sánchez, M. Goñalons Lapiedra, A. Gil, D. Bernal-Casasola, M.Á. Cau-Ontiveros, E. García Ríaza, J. Cardell Perelló, M. Bethencourt Núñez (2025). Assessment of consolidants for the preservation of *Tituli Picti* on amphorae from the Ses Fontanelles Late Roman shipwreck (Mallorca, Spain): An analytical approach, *Journal of Cultural Heritage*, 73, 367-276.

C. Ferrero-Martin, A. Izquierdo, M. Bethencourt, T. Fernandez-Montblanc. A Risk Assessment of Underwater Cultural Heritage for Wave-Induced Hazards: The Impact of Climate Change on Cadiz Bay. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13, 136, 1-23.

A. Zuccolotto Villalobos, N.C. Ciarlo, F. Malamud, L. Carrillo Márquez, M. Piña Cetina (2025). Identificación de las patentes de Muntz por medio de técnicas de rayos X: caracterización del revestimiento de latón de dos pecios del siglo XIX localizados en México. *Revista del Museo de Antropología* 18(1): 95-110.

V. Moya Sordo, L. R. Carrillo Márquez, N.C. Ciarlo (2025). Shipwrecks in Northern Triangles (Chinchorro Bank): Traces of Timber Trade from British Honduras (mid-18th Century to mid-19th Century). *Historical Archaeology* 60 (1) (En prensa)

G. Zubeldía Pérez, S.J. López Martín, J.C. Arroyo Lázaro y M. Goñalons Lapiedra (2025). Estudio y análisis del pecio “Almiranta”: Identificación, estado de conservación y evaluación preliminar de un galeón del siglo XVII en la Bahía de Santoña (Cantabria). *Noticiario de Arqueología Náutica y Subacuática (NANS)*, 3 (4), 3-17.

4.1.3. Participación en congresos (Anexo II)

N.C. Ciarlo, A. V. López-Arenas, R. Guimarey-Duarte, La Artillería de la Fragata Santa María Magdalena (1773-1810): un análisis histórico y arqueológico. III Congreso Internacional Guerra y Sociedad en la Monarquía Hispánica, 23-25/4/25, Madrid (España). *Libro de resúmenes (E. García Hernán y D. Maffi, eds.), p. 39. Digital.CSIC, Madrid. Tipo de comunicación: oral.

C. del Cairo Hurtado, N.C. Ciarlo, V. Báez Santos, J. Aldana Mendoza, S. Vallejo Quintero, M. Moreno Calderón, G. Hernández Zárate, H. León Rincón, Aproximación interdisciplinaria al contexto arqueológico del naufragio Salmedina II en Cartagena de Indias (Caribe colombiano). IX Simposio Internacional de Historia y Arqueología Marítimas: ciudades, nodos y conexiones marítimas, 16-19/9/25, Santa Marta (Colombia). Tipo de comunicación: oral.

P. Picca, N.C. Ciarlo, A. Castelli, Primera caracterización arqueobotánica de naufragios del siglo XIX en Patagones, Argentina. XL Jornadas Argentinas de Botánica, 23-27/9/25, Mar del Plata (Argentina). **Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 60 (Suplemento), pp. 49-50. Tipo de comunicación: póster.

E. Fernández-Tudela, M. Bethencourt, Carlos Moreno, Condiciones experimentales para la aplicación en arqueometría de la espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X. XVIII Reunión del Grupo Regional Andaluz de la Sociedad Española de Química Analítica (GRASEQA 2025), 2-3/10/2025, Cádiz (España). Tipo de comunicación: oral.

M. Goñalons Lapiedra, F. Cerezo Conservation during the archaeological works of the Herakles Project. Methodology and best practices. IKUWA 8, Costende (Belgium), 13-17/10/2025. Tipo de comunicación: póster.

E. Fernández Tudela, C. Moreno, L.C. Zambrano Valdivia, M. Bethencourt. El uso de equipos portátiles de Fluorescencia de Rayos X para la investigación de cepos de plomo de época antigua. Criterios metodológicos. IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: oral.

M. Goñalons Lapiedra, El uso de la Inteligencia Artificial para la conservación y restauración del patrimonio arqueológico metálico. ¿Nuevo reto o herramienta?. IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: oral.

M. Goñalons Lapiedra, A. Arévalo González, Estudio comparativo de los factores de alteración en monedas halladas en la Bética en función del tipo de sedimento. IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: oral.

I. Bartolomé Ortúñez, **N.C. Ciarlo**, **M. Goñalons Lapiedra**, F. Cerezo, S. López, **M. Bethencourt**. Análisis y estabilización de un calibre de artillero del sitio La Ballenera I (s. XVI-XVII), ensenada de Getares, Algeciras. IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: oral.

N.C. Ciarlo, L.N. García, A. Castelli, D. Carabias, A. Zuccolotto, L. Carrillo, N. Lira, R.E. Bolmaro. Arqueometría y datación relativa de metales navales del Siglo XIX: casos de estudio de Argentina, Chile y México. IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: oral.

Sébastien Berthaut-Clarac, **N.C. Ciarlo**, **M. Bethencourt**. Cobres para la *marine de l'Empire*: análisis SEM-EDX e ICP-MS de los elementos de sujeción y revestimiento de forro de los navíos Lion (1804-1809) y Robuste (1806-1809). IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: oral.

I. Vitiello, C. Ferrero, A. Izquierdo, **N.C. Ciarlo**, F. Cerezo, **E. Fernández Tudela**, T. Fernández-Montblanc, **M. Bethencourt**. Impacto del cambio climático en los procesos de deterioro de artefactos metálicos de procedencia subacuática: los pecios de la bahía de Algeciras, España. IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: oral.

J. Herrera, P. Jiménez, **N.C. Ciarlo**, L.M. Urbina Leonor, A. Argüeso. Del taller metalúrgico al naufragio: procesos de manufactura en elementos de sujeción y revestimiento metálico del bergantín USS Somers (1842-1846) IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: oral.

I. Vitiello, C. Moreno, E.J. Toboso Suarez, **M. Bethencourt**. Utilización de analizadores portátiles de Fluorescencia de Rayos X en estudios de patrimonio histórico subacuático. Criterios de selección de las condiciones de medida y aplicación a objetos de cobre y peltre procedentes de Ceuta y de la bahía de Cádiz. IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: póster.

E. Fernández Tudela, M. Goñalons Lapiedra, D. Bernal Casasola, M.A. Cau Ontiveros, E. García Ríaza, J. Cardell Perelló, M. Bethencourt. Análisis e intervención de conservación de los objetos metálicos del pecio tardorromano de Ses Fontanelles (Palma, Mallorca). IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: póster.

J A.M. San Fulgencio, N.C. Ciarlo, M. Bethencourt, Estudio arqueométrico de artillería de procedencia subacuática: el caso de dos bombardetas recuperadas del Río Sado, Portugal. IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, MetalEspaña 2025, Cádiz (España), 23-25/10/2025. Tipo de comunicación: poster.

M. Bethencourt, J. Callejo Gómez, Empleo de vehículos autónomos de superficie en la prospección del patrimonio cultural subacuático, Congreso Internacional GEOFISIC-ARQ II, Cádiz (España), 28-29/10/2025. Tipo de comunicación: oral.

N.C. Ciarlo, La vida después del naufragio: arqueología de la crisis y supervivencia en la Patagonia. IX Jornadas de Historia y Arqueología Marítima, Viveiro (España), 24-27/11/25. Tipo de comunicación: oral.

4.1.4. Membresía a sociedades internacionales

Desde 2025, Nicolás C. Ciarlo fue elegido miembro del ASM Archaeometallurgy Committee, perteneciente a la ASM International, EE. UU. Además, es integrante desde hace más de una década de la Historical Metallurgy Society (Reino Unido) y la Society for Archaeological Sciences (EE.UU.).

4.2. TRANSFERENCIA

4.2.1. Contratos con el exterior (art. 86 LOSU)

Limpieza y conservación de material arqueológico subacuático procedente de la bahía de Cádiz y Ceuta (OT2025/043). Financiado por: Gerión Arqueología, S.L. 01/04/2025 a 31/06/2025. Cuantía: 1.640 €. Responsable: M. Bethencourt.

4.3. DIVULGACIÓN

4.3.1. Organización de Congresos.

El LEC-PH organizó, por primera vez fuera de la Comunidad Autónoma de Madrid, el **IV Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico – MetalEspaña 2025** (Figuras 4 y 5, Anexo III). El congreso, celebrado entre el 23 y 25 de octubre, seleccionó como sede la capital gaditana con el fin de visibilizar el trabajo destacado que la UCA desarrolla en torno al patrimonio cultural, en particular en el ámbito subacuático. En este congreso se inauguró una nueva sesión dedicada al **patrimonio arqueológico subacuático**, que a partir de las próximas ediciones formará parte de las ya 5 sesiones temáticas.



Jornada de inauguración del Congreso MetalEspaña 2025, el 23 de octubre de 2025, en el Aula Magna de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. De izquierda a derecha: Joaquín Barrio, Director del SECYR-UAM, Casimiro Mantell, Excmo. Sr. Rector de la Universidad de Cádiz, Milagrosa Jiménez, jefa del Área de Investigación e Intervención del Centro de Arqueología Náutica y Subacuática del IAPH y Manuel Bethencourt, Coordinador del LEC-PH.

El número de inscritos fue de 215, un centenar presencial y el resto en *streaming*. Se presentaron 98 trabajos, el doble de los presentados en la anterior llamada. De estos, 13 son trabajos vinculados al LEC-PH.

4.3.2. Vídeo del LEC-PH.

El 23 de octubre, y aprovechando el acto de inauguración del Congreso MetalEspaña 2025 se presentó el vídeo Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico, que se encuentra colgado en la web del laboratorio (<https://lec-ph.uca.es/>), del congreso MetalEspaña 2025 (<https://eventos.uam.es/128242/videos/iv-congreso-de-conservacion-y-restauracion-del-patrimonio-metalico-metalespana2025.html>), y en el canal YouTube (https://www.youtube.com/watch?v=XUU1_6O6mXg).

4.3.3. Documental 'NAVIS ROMANA (Episodio I)'

El 8 de noviembre se estrenó en la televisión autonómica de las Islas Baleares (IB3 Televisió) el documental 'NAVIS ROMANA (Episodio I)' (<https://totib3.org/play/tv/navisromana/e1>), y en la plataforma de *streaming* de CaixaForum). En este documental se narra el proyecto de investigación "Arqueomallornauta" y en él aparece el LEC-PH, donde se entrevista a la técnica Marina Goñalons para explicar las intervenciones realizadas en este proyecto.

4.3.4. Finalista Premio Nacional de Arqueología PALARQ (Fundación Palarq).

Arqueología y Arqueometría de naufragios de la Antigüedad Tardía en Mallorca (ARQUEOMALLORNAUTA 2021-2028): Este proyecto estudia el pecio de Ses Fontanelles (Mallorca), un barco del siglo IV d.C. excepcionalmente conservado con más de 320 ánforas que transportaban aceite, vino y salsa de pescado desde la costa de Hispania. Destacan sus casi 100 *tituli picti* —el mayor conjunto conocido en un solo naufragio— y tapones con símbolos cristianos, que aportan datos inéditos sobre las redes comerciales y el papel temprano de la Iglesia.



Fotografía del pecio y la superficie donde se observa la proximidad a la línea de costa; (Der.) Arqueólogo sobre la madera de la embarcación de Ses Fontanelles (Créditos: Equipo ARQUEOMALLORNAUTA, José Antonio Moya).

4.4. FORMACIÓN

4.4.1. De alumnado de Doctorado y Máster

Durante el año se ha defendido la siguiente **Tesis Doctoral**:

- **Muntz Metal:** el desarrollo empresarial de la familia Muntz en Inglaterra y sus relaciones transoceánicas desde una perspectiva histórica-arqueológica, 1832-1921. Alumno: Andrés Zuccolotto Villalobos, Programa de Doctorado en Historia, Colegio de San Luis, México. Directores: Moisés Gámez (El Colegio de San Luis, A.C.), N.C. Ciarlo. Fecha de defensa: 4/2/25.

Durante el año 2025 han continuado los trabajos de investigación de las siguientes **Tesis Doctorales**:

- 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. Estado: depositada e informada positivamente por los expertos externos.
 - Análisis de los sistemas de protección de barcos de madera europeos de los siglos XVI-XIX. Alumna: Habana Sánchez Muñoz, Programa de Doctorado en Historia y Arqueología Marítimas. Directores: **N.C. Ciarlo**, J. Bettencourt (Universidad de Lisboa). Estado: en curso (desde 2023/2024).
 - Matriculación de nuevos alumnos/as de doctorado: Ilaria Vitiello (27-11-2025; Director: **M. Bethencourt**); Mariana Piña Cetina (27-11-2025; Director: **N.C. Ciarlo**) y Marina Goñalons Lapiedra (27-11-2025; Directores: **N.C. Ciarlo**, M. Buendía).
 - Durante el año 2025 han continuado los trabajos de investigación de los siguientes **Trabajos Fin de Máster** del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática. Se han defendido los siguientes:
 - 1) Procesos de intervención en material mixto. Restauración de un saquete de metralla del siglo XVIII. Septiembre de 2025. Alumna: Sara Ventura Acosta. Tutor: **M. Bethencourt**, **E. Fernández Tudela**.
 - 2) La protección del patrimonio arqueológico subacuático en el Mediterráneo: un enfoque preliminar a la pesca de arrastre. Septiembre de 2025. Alumna: Sara Franceshin. Tutores: **M. Bethencourt**.
 - 3) El pecio de La Ballenera II: análisis del contexto material con énfasis en la artillería del siglo XVI. Septiembre de 2025. Alumno: Alberto Suárez Meana. Tutores: R. González Gallero, **N.C. Ciarlo**.
- y se ha continuado con las labores de investigación (pendientes de defensa):
- 4) Análisis arqueométrico y contextual de un calibre de artillero del siglo XVI-XVII de procedencia subacuática. Alumna: Iris Bartolomé Ortúñez. Tutores: **M. Bethencourt**, **N.C. Ciarlo**.
 - 5) La visualización 3D de modelos de Lanchas Cañoneras de finales del siglo XVIII para la difusión cultural. El caso del pecio "Puente Mayorga IV" de la Bahía de Algeciras. Alumno: Ferdinand Kleyhons. Tutores: F. Cerezo, **N.C. Ciarlo**.

- Tutorización de nuevos alumnos/as del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática: Arnau Pi Villalón (tutores: **M. Bethencourt**, F. Cerezo), María del Carmen López Martínez (tutor: **M. Bethencourt**), Lucas Lisbonis (tutores: **M. Bethencourt**, **N.C. Ciarlo**), Valentina Barrera (tutor: **N.C. Ciarlo**), Carlos Candía Silva (tutores: **N.C. Ciarlo**, F. Cerezo), Aurora De Castro Sierra (tutores: **N.C. Ciarlo**, E. Fernández Tudela), Alejandro González Sacristán (tutores: **N.C. Ciarlo**, C. Martín), Alicia Murillo Higuero (tutores: **N.C. Ciarlo**, F. Cerezo).

4.4.2. Cursos de especialización para profesionales

Curso “La conservación de hierro y aleaciones de cobre arqueológico de procedencia subacuática”, dentro del Programa de Formación del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico 2025. Duración: 20 horas. Coordinación: **E. Fernández Tudela**. Docencia por personal de LEC-PH (**M. Bethencourt**): La alteración del hierro arqueológico en medio subacuático (2 h); Introducción a los métodos electrolíticos (2 h) Práctica electrólisis I (3 h).

ANEXO I

Productividad

Participación en publicaciones

Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía

16



XLI Reunión científica de la Sociedad Española de Mineralogía (SEM) y XXVII Reunión científica de la Sociedad Española de Arcillas (SEA)

Seminario de Caracterización y Diagnóstico del Patrimonio Cultural



Sevilla, 15 de enero de 2025

Editores: M^a Pilar Ortiz Calderón
Adolfo Miras Ruiz



Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía

Volumen 16

“Caracterización y Diagnóstico del Patrimonio Cultural”

Seminario celebrado en Sevilla,
15 de enero de 2025

Editores: M^a Pilar Ortiz Calderón y Adolfo Miras Ruiz



Foto de portada

Paño de representación de Sevilla en la Plaza de España. Se muestra la **Feria de Abril** en la década de los años veinte. Aparece la faceta más ganadera de la celebración, con una serie de personajes vestidos a la manera tradicional, rodeados del ganado y con la catedral y la Giralda de fondo.



Seminarios de la Sociedad Española
de mineralogía

© Sociedad Española de Mineralogía
Museo Geominero del Instituto Geológico
y Minero de España
Ríos Rosas, 23
28003 Madrid

Editores

M^a Pilar Ortiz Calderón y Adolfo Miras Ruiz

Diseño y maquetación

Adolfo Miras Ruiz

ISSN

2659-9872

2025

- 05** **Arqueología subacuática. Casos de estudio**
Manuel Bethencourt Núñez y Nicolás C. Ciarlo
- 12** **Termografía de Infrarrojos en el estudio del Patrimonio Cultural**
Miguel Gómez Heras
- 17** **Técnicas aplicadas al estudio de azulejos del siglo XVI. Ejemplos de España y Portugal**
João Manuel Mimoso
- 27** **Los pigmentos en la Historia: de la vida cotidiana a los grandes maestros**
Josefina Pérez-Arantegui
- 33** **Caracterización de vidrios prerromanos: yacimiento vacceo de Pintia**
Ángel Carmelo Prieto, Suset Barroso-Solares, Elvira Rodríguez-Gutiérrez, Carlos Sanz-Mínguez y Javier Pinto
- 44** **Degradación de materiales pétreos: procesos naturales o inducidos**
Màrius Vendrell Sanz

Arqueología subacuática: casos de estudio

Manuel Bethencourt Núñez (1), Nicolás C. Ciarlo (2)

(1) Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica. Universidad de Cádiz. Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico. Ed. CASEM, Campus de Puerto Real, 11510, Puerto Real (España)

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Instituto de Arqueología, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires. 25 de Mayo 221, 3^{er} piso (C1002ABE), Ciudad Autónoma de Buenos Aires (Argentina)

Abstract

This article summarizes a selection of the works of characterization, diagnosis and safeguarding of underwater cultural heritage (UCH) of metallic nature in which the University of Cadiz, through the Laboratory of Studies and Conservation of Historical Heritage (LEC-PH), has participated. This activity has been divided into three lines of action: the characterization of metallic materials belonging to the UCH, the proposal of stabilization measures against corrosion processes, and the implementation of in situ conservation actions following the UNESCO's guidelines. The cases presented are the result of the collaboration between the University of Cadiz and other research centers and companies, with the university leading the work in some cases and participating in it in others. These cases are among those that will be presented at the seminar on the Characterization and Diagnosis of Cultural Heritage in SEM-SEA 2025.

Resumen

En este artículo se resume una selección de los trabajos de caracterización, diagnóstico y salvaguarda del patrimonio cultural sumergido (PCS) de naturaleza metálica en los que la Universidad de Cádiz, a través de Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH), ha participado. Esta actividad se ha dividido en tres líneas de actuación: la caracterización de materiales metálicos pertenecientes al PCS, la propuesta de medidas para su estabilización frente a los procesos de corrosión, y la implementación de acciones de conservación *in situ* siguiendo las recomendaciones de la UNESCO. Los casos presentados son el resultado de la colaboración de la Universidad de Cádiz con otros centros de investigación y empresas, en algunos casos liderando el trabajo y en otros participando en los mismos. Estos forman parte de algunos de los ejemplos que se presentarán en el seminario Caracterización y Diagnóstico del Patrimonio Cultural del SEM-SEA 2025.

Palabras clave: patrimonio cultural sumergido, caracterización, diagnóstico, salvaguarda, metales.

1. Introducción

El litoral de la provincia de Cádiz, con más de 280 km de extensión y bañado por dos mares, cuenta en sus fondos con un patrimonio cultural sumergido (PCS) de excepcional valor. Pecios, puertos, fondeaderos, etc., son testimonios materiales de las relaciones históricas mantenidas con y por el mar por las sociedades establecidas en el entorno del Estrecho de Gibraltar a lo largo de milenios.

La comprensión y conservación de este PCS es crucial, por tratarse de un bien inmaterial que aporta respuestas de nuestro pasado y posee un destacado valor desde el punto de vista histórico, estético y antropológico. Por otra parte, el PCS debe desempeñar un papel clave en el desarrollo sostenible como motor económico, tal y como ha sido reconocido por la Unión Europea (UE), la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) o el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS). En este sentido, entre los objetivos estratégicos de los programas económicos, el turismo, el ocio y otras actividades culturales han sido identificados como una de las grandes prioridades y oportunidades para España y Europa.

En este escenario, el Grupo del Plan Andaluz de I+D+I “Corrosión y Protección- TEP-231” de la Universidad de Cádiz (UCA), inició en el año 2004 una línea de investigación en arqueometalurgia, con el objetivo de estudiar materiales arqueológicos subacuáticos de origen metálico y proponer tratamientos de conservación y análisis de los mismos. Con el transcurso de los años y gracias a la experiencia acumulada, esta línea se transformó en el Laboratorio

de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico de la UCA, cuya misión es ofrecer a los investigadores y profesionales pertenecientes a esta universidad y a 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. De este modo, ha contribuido a consolidar el área de especialización de “El Valor Cultural del Mar” del Campus de Excelencia Internacional del Mar (CEIMAR).

En este documento se resume una selección de los trabajos realizados y publicados a lo largo de estos años, y, si se dio el caso, relacionarlos con las “Normas relativas a las actividades dirigidas al patrimonio cultural subacuático”, recogidas en el Anexo de la Convención sobre la Protección del Patrimonio Cultural Subacuático de la UNESCO, firmado en París el 2 de noviembre de 2001 y ratificado por España en 2005. Estos trabajos se encuentran debidamente citados para su posterior consulta por aquellos lectores que puedan estar interesados.

2. La conservación in situ como principio básico

El Anexo de la referida convención de la UNESCO (2001) inicia su andadura en la **Norma 1**, indicando que “La conservación in situ será considerada la opción prioritaria para proteger el patrimonio cultural subacuático”. Y en el caso de que sea necesario intervenir, la **Norma 3** expresa que “las actividades dirigidas al patrimonio cultural subacuático no deberán perjudicar más de lo necesario para los objetivos del proyecto”. Sobre esta idea se incide en la **Norma 4** que indica que “las actividades dirigidas al patrimonio cultural subacuático deberán servirse de técnicas y métodos de exploración no destructivos, que deberán preferirse a la recuperación de objetos”.

Esta nueva estrategia de protección del PCS obliga necesariamente a entender cómo afectan los distintos agentes, físicos, químicos y biológicos, a la preservación de los restos en el medio acuático (sobre todo, marino) y, en su caso, proponer medidas que ralenticen el deterioro de los mismos. En la **Norma 15** de este mismo anexo se indica que la evaluación preliminar de la importancia de un determinado patrimonio cultural subacuático, del entorno que lo rodea y de su vulnerabilidad “incluirá además estudios previos de los datos históricos y arqueológicos disponibles, las características arqueológicas y ambientales del sitio y las consecuencias de cualquier posible intrusión en la estabilidad a largo plazo del patrimonio cultural subacuático objeto de las actividades”.

Siguiendo estos preceptos, investigadores de la UCA (Bethencourt et al., 2018) estudiaron la artillería de dos pecios vinculados a la Batalla de Trafalgar (1805), en el marco del proyecto ARQUEOMONITOR (2010) aplicando un enfoque holístico e interdisciplinar basado en el desarrollo de estas cuatro de las treinta y seis normas de la referida Convención. Por un lado, se desarrolló una técnica de prospección no destructiva para obtener información de los cañones y anclas dispersos en el fondo marino sin alterar su estado (**Norma 4**). Se trataba de un sistema combinado de desconcreción, documentación y control de la corrosión como alternativa para una documentación «suficiente» in situ y con una mínima alteración del objeto (**Norma 3**). Este sistema se basa en los trabajos descritos por MacLeod (1995, 2002) y Gregory (1995), y patentado en Bethencourt et al. (2005), tal como se aprecia en la **Figura 1**.

Tras el acceso a las zonas de interés documental, eliminando de forma selectiva la concreción, se procedía al registro del sector expuestos de la pieza. Para reposicionar el hierro en la zona de pasividad en el diagrama de Pourbaix empleamos un recubrimiento que aísla el metal del medio agresivo. Este mecanismo, denominado efecto barrera, se basa en la protección del objeto mediante el aislamiento eléctrico que se produce al interponer una película sólida y continua entre el metal y el medio corrosivo, en este caso una resina epoxi de dos componentes.

Los trabajos realizados proporcionaron información sobre las marcas de fábrica, que a su vez brindaron indicios sobre ambos pecios, el Fougueux y el Bucentaure, dos navíos de línea de la Marina de Guerra francesa. Asimismo, mediante el procedimiento aplicado fue posible caracterizar el estado de conservación pieza sin poner en peligro su futura preservación en el medio marino. Además, las mediciones de las principales variables físicas, químicas y biológicas que interaccionan con las piezas permitieron correlacionar el estado de conservación en cada sitio con las condiciones del medio marino (**Norma 15**). Así, mediante la técnica propuesta fue posible obtener información sobre las capas de concreción en cañones de hierro (de las que hablaremos con más detalle en el siguiente apartado) localizados en ambos yacimientos, y relacionar algunas diferencias en su estado de conservación con la situación que ocupaban en el lecho marino (sustrato arenoso-rocoso, grado de enterramiento, etc).

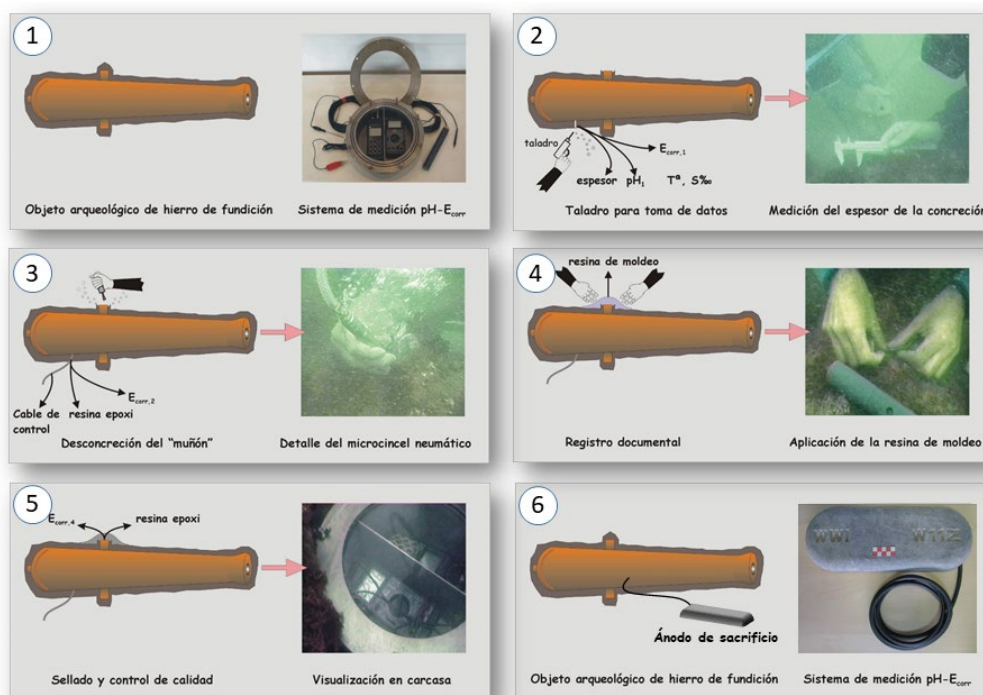


Fig. 1. Etapa 1 a 5: pasos seguidos en la desconcreción parcial controlada y posterior protección de zonas de interés documental en un cañón. Etapa 6: protección mediante ánodo de sacrificio (adaptado de Bethencourt et al., 2005).

A pesar de la proximidad espacial de los dos yacimientos, que son de la misma época, existen diferencias en el estado de conservación de los restos asociados. Se ha observado que las concreciones biológicas asociadas a los 18 cañones estudiados en el *Fougneux* son diferentes a las de los 16 examinados en el *Bucentaure*. Frente a la capa de concreción calcárea de los cañones de *Fougneux*, uniforme y delgada (de unos 5 mm de espesor medio), los cañones del *Bucentaure* presentan una capa de concreción más gruesa, de hasta 30 mm de espesor. Además, se midió el pH en el interior de las concreciones y el potencial de corrosión (E_{corr}) asociado a cada uno de los cañones estudiados. Con estos datos se pudieron establecer las ecuaciones de velocidades de corrosión para cada yacimiento siguiendo la propuesta de MacLeod (1995):

$$\text{Log}(V_{corr}) = M \cdot E_{corr} + C \quad (\text{Ecuación 1})$$

Así, en el pecio de *Fougneux*, pudo determinarse que los grandes objetos de hierro se están corroyendo a un ritmo más elevado (entre 0,180 y 0,246 mmpy) debido a la elevada removilización y transporte de sedimentos inducidos por el oleaje, causando daños por efecto mecánico directo sobre el material metálico y por la eliminación de la capa de productos de corrosión desarrollada sobre los artefactos. Por otro lado, la artillería del *Bucentaure*, cubierta por gruesas capas de concreción biológica, está bien conservada, con índices de corrosión más bajos (de 0,073 a 0,126 mmpy). Por último, se evaluó la eficacia de la protección catódica como medida temporal de conservación *in situ* (**Norma 1**) en un cañón del *Bucentaure*. Finalmente, el empleo de un ánodo de sacrificio (Figura 1.6) durante 9 meses redujo la velocidad media de corrosión de uno de los cañones de 0,103 a 0,064 mmpy, y el porcentaje de velocidad de corrosión en un 37,9%.

3. Cuando hay que extraer

La Convención de la UNESCO reconoce que la opción prioritaria (conservación *in situ*) no es siempre la preferible y, en ciertas circunstancias la propia **Norma 1** indica que la extracción de los objetos “podrá autorizarse cuando constituyan una contribución significativa a la protección, el conocimiento o el realce de este patrimonio”. Así, en 2005 la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía autorizó la extracción de dos piezas de artillería del *Bucentaure* para su estudio, conservación y posterior musealización. Para plantear el tratamiento más óptimo se llevó a cabo una experiencia previa con una bala de cañón descontextualizada (Gil et al., 2003).

Estas piezas de fundición, bala y cañones, estaban recubiertas por gruesas concreciones de naturaleza calcárea proveniente de material esquelético de organismos marinos, que interacciona con especies metálicas en difusión Fe^{2+} y Fe^{3+} procedentes del metal subyacente, que producen modificaciones químicas en su composición. El resultado es una envoltura mineral compacta adaptada a la superficie del objeto. En el interior de la concreción, el objeto sufre un proceso de corrosión que transforma el hierro en compuestos químicos distribuidos en fases uniformes desde el núcleo metálico remanente hasta la zona exterior grafitizada, compuesta por H_2O , $\text{FeO}(\text{OH})$, SiO_2 , Fe_3C , cloruros de hierro y grafito. En función del tiempo de inmersión y de las condiciones físico-químicas del entorno, en el núcleo del metal estarán presentes ferrita y perlita no corroídas o parcialmente corroídas, en secciones contiguas a la zona grafitizada. En ambientes con un exceso de iones cloro libres, estos se incorporan en la primera monocapa de algunos productos de corrosión.

Debido a las condiciones anteriores, si el objeto arqueológico se seca parcialmente al aire, los componentes del cloruro de hierro se descomponen para formar Fe_2O_3 , FeCl_3 , HCl y $\text{FeO}(\text{OH})$, que proporcionan unas condiciones ideales para la corrosión. El proceso de degradación total está determinado en gran medida por dichos iones Cl^- que están presentes en la zona grafitizada en concentraciones de entre el 6-12 % en peso. La alta concentración de Cl^- presente en estos objetos procedentes del medio marino, es directamente responsable de su deterioro mediante un proceso local de acidificación conocido como corrosión activa, y el fin de todo tratamiento de conservación de hierro arqueológico debe ser su eliminación. En este trabajo se eligió la electrólisis, aplicando intensidades bajas de corriente que minimizasen la evolución de hidrógeno en el cátodo y aumentasen la velocidad de extracción de los Cl^- , al incrementar el área disponible para su difusión.

Un examen de diferentes técnicas de limpieza de cloruros, ha mostrado que el paso limitante en la liberación de los mismos, es su difusión desde los productos de corrosión. El aumento de la velocidad de difusión de los Cl^- en los productos de corrosión se consigue transformando los compuestos de hierro en otros más densos mediante su reducción. Dicha reducción se puede llevar a cabo por varios medios, siendo la electrólisis uno de los más eficaces. Adicionalmente, el empleo de intensidades de corriente bajas permite conseguir la consolidación de la zona grafitizada debido a la reducción de los oxihidróxidos de hierro que la componen, principalmente akaganeita $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})(\text{Cl}_x)$, que se transforma inicialmente en goethita a $\text{FeO}(\text{OH})$ y posteriormente en magnetita Fe_3O o $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$. Este compuesto, más denso, favorece la difusión de los iones cloruros desde el interior de la pieza y consolida la parte metálica externa evitando posteriores oxidaciones.

A diferencia de otros estudios, los productos de corrosión del hierro fueron analizados desde un punto de vista estructural y mineralógico, lo que permitió utilizar el análisis de los patrones de difracción de rayos X para comprobar la eficacia del tratamiento electrolítico en la extracción de cloruros. El análisis de estos patrones se llevó a cabo mediante el método Rietveld, superando el inconveniente que tiene el uso de tales perfiles en el análisis primario de los productos de corrosión de hierro, debido al solapamiento de picos de difracción que presentan los diferentes óxidos y oxihidróxidos. La composición interna del objeto correspondía a α -Fe, cementita y cuarzo, compuestos minerales de los principales elementos presentes (Fe, Si, C) que tienen su origen en el proceso de fundición. Esta composición permaneció inalterada tras el tratamiento. El análisis de Rietveld de los patrones XRD de la superficie corroída antes del tratamiento, permitió la identificación de akaganeita, por deconvolución del pico de mayor intensidad, con una estequiometría $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})(\text{Cl}_{0,19})$. La presencia de este compuesto se confirmó mediante SEM y análisis elemental del espectro EDX correspondiente. Tras el tratamiento de electrólisis, las fases minerales presentes en la superficie que contenían hierro fueron goethita a $\text{FeO}(\text{OH})$ y magnetita Fe_3O o $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, que no presentan Cl^- (Figura 2).

De este hecho, se dedujo que la electrólisis produjo la extracción de los cloruros de la pieza, dato que confirmó el espectro EDX, induciendo la inestabilidad estructural de akaganeita y su desaparición. Por tanto, el análisis de Rietveld de los espectros XRD, se muestra como una herramienta muy útil que permite monitorizar el tratamiento electrolítico, controlando la presencia de akaganeita en la muestra. Una vez comprobada la eficiencia del tratamiento en la bala, se procedió al tratamiento de los dos cañones extraídos del *Bucentaure*. Este mismo método fue empleado para la estabilización a mayor escala de 17 cañones en 2009, procedentes de la Batería del Caballero Zuazo, San Fernando (Cádiz) (Sánchez Pedreño et al., 2022).

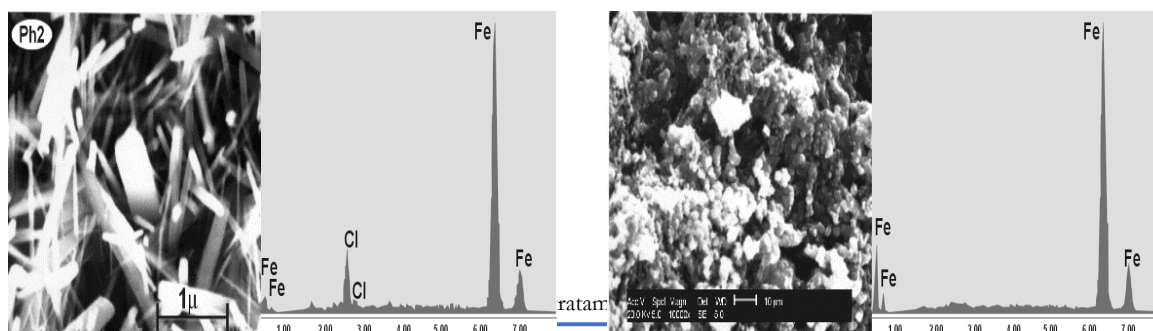


Fig. 2. Imágenes SEM y espectros EDX de: Izquierda: la muestra sin tratar, mostrando estructuras de akaganeita y presencia de Cl. Derecha: la muestra tratada, mostrando estructuras de goethita y ausencia de Cl (adaptado de Gil et al., 2003).

4. La información contenida

Una de las líneas de trabajo del LEC-PH es el análisis de los restos de procedencia subacuática, principalmente de pecios, con el objetivo de profundizar el conocimiento sobre la tecnología náutica y metalúrgica. Desde una perspectiva integral, documental, arqueológica y arqueométrica, se han estudiado evidencias arqueológicas de numerosos sitios de época antigua y moderna. En particular, destacan los trabajos realizados sobre elementos vinculados al casco, equipamiento, artillería y cargamentos de diferentes embarcaciones de madera. En su mayoría, los estudios han sido realizados sobre restos de naturaleza metálica: materiales ferrosos y no ferrosos, y entre estos últimos, principalmente de cobre y sus aleaciones (bronces y latones).

Dentro de este contexto, la aplicación de técnicas instrumentales analíticas para la caracterización físico-química de objetos metálicos de procedencia arqueológica permite obtener nuevos datos para discutir aspectos vinculados a los materiales y procesos utilizados para su fabricación. La selección de los medios empleados se realiza en función de los interrogantes de investigación, siendo habitual la combinación de más de una técnica. La interpretación de los datos obtenidos, según el caso, se lleva a cabo utilizando bases de datos de referencia, herramientas estadísticas, información histórica y paralelos arqueológicos. En este sentido, estudios a nivel comparado (al interior de cada sitio y entre diferentes pecios) permiten superar los límites propios del objeto y discutir aspectos más generales acerca de los conocimientos y prácticas de la época, e incluso procesos a mayor escala, como el cambio tecnológico.

Entre los casos de estudio, mencionamos como ejemplo la caracterización de un conjunto de cañones de bronce y subproductos de fundición transportados como chatarra a bordo de un barco mercante neerlandés que se hundió en el puerto de Cádiz hacia el tercer cuarto del siglo XVII (Ciarlo et al., 2023). Los cañones fueron identificados a través de su diseño, decoración y marcas, rasgos que se asocian a un renombrado taller de fundidores de campanas y cañones que estableció Matthias Benningk en Lübeck, norte de Alemania, que tuvo una importante trayectoria a lo largo del siglo XVII (Figura 3). Por comparación con piezas de museos asociadas a esta familia, es probable que los cañones estudiados hayan sido fundidos hacia el segundo o tercer cuarto de aquella centuria. Entre los restos recuperados, uno exhibe una variante del escudo de armas de Hamburgo, lo que sugiere que la pieza fue hecha por encargo para esta ciudad. Cabe destacar que los productos defectuosos y subproductos de fundición solían reciclarse (refundirse), al igual que sucedía con los cañones deteriorados por el uso, de allí que semejantes materiales no suelen preservarse en contextos arqueológicos. El caso bajo estudio, por ende, constituye una fuente de singular interés para conocer los pormenores del proceso de fundición de cañones.

El análisis de las piezas fue realizado a nivel macroscópico, microestructural y de composición química. Una inspección visual permitió, en el caso de los fragmentos de cañones, reconocer el diseño, decoración y marcas de fábrica de las piezas, así como diferentes evidencias vinculadas a la fallida producción. Esta última se analizó de forma más exhaustiva por medio de metalografía, utilizando microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. En relación con lo anterior, los elementos mayoritarios y minoritarios de la aleación se determinaron por medio de EDX. Los datos recabados, evaluados a la luz de tratados de metalurgia y fundición de la época, permitieron discutir aspectos sobre la calidad y manufactura de los cañones y las dificultades técnicas asociadas a este laborioso y costoso arte. En particular, se analizaron los defectos asociados a errores cometidos en las diferentes etapas de la producción: preparación del patrón y molde del cañón; encendido del horno y fundición de la materia prima; y proceso de colada y enfriamiento. Así, con base en una aproximación interdisciplinaria, se aportó nueva evidencia sobre los conocimientos y práctica cotidiana de una familia de fundidores renacentistas del norte de Europa.

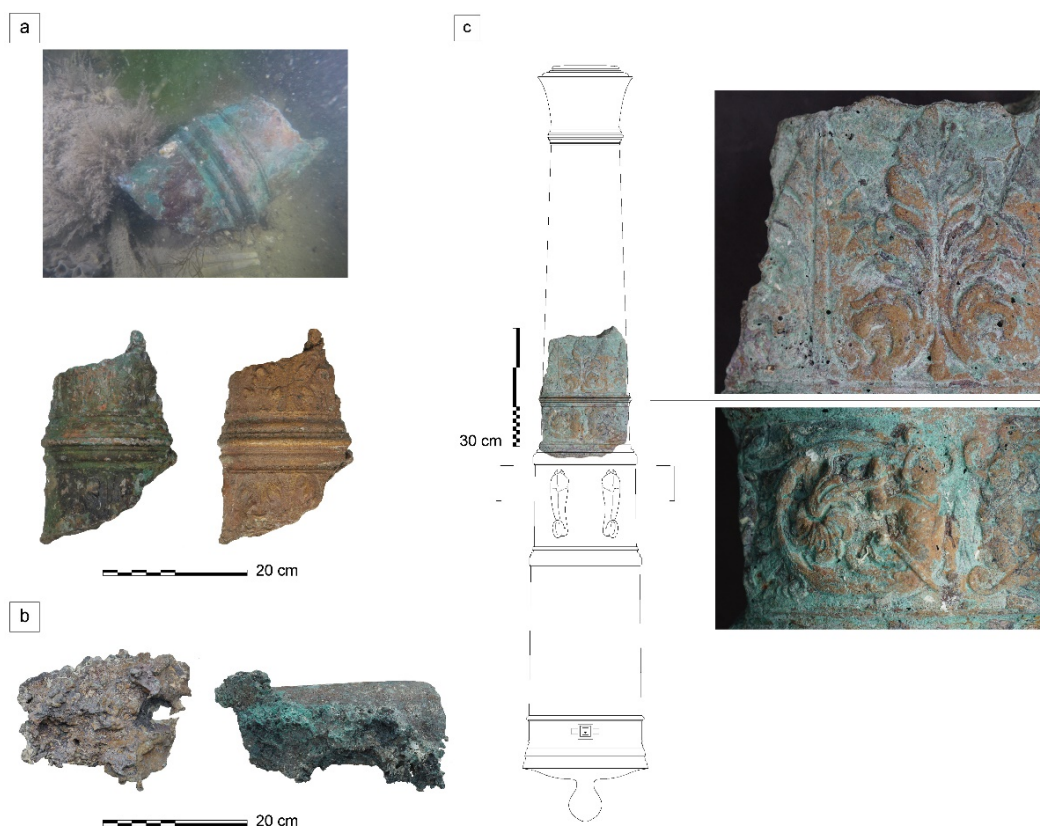


Fig. 3. Restos de cañones de bronce recuperados del pecio Delta I: a) imágenes de un fragmento in situ y una vez extraído, previo y posterior a su conservación; b. subproductos de fundición, amorfos y adheridos a partes del cuerpo de las piezas; y c) trozo de cañón, decorado con hojas de acanto y motivos figurativos (extraído de Ciarlo et al., 2023: fig. 1).

5. Palabras de cierre

El patrimonio cultural sumergido debe ser protegido y estudiado, a través de estrategias y acciones en línea con los principios de la Convención de la UNESCO (2001) y dando preferencia a la preservación *in situ*. Una forma de contribuir con lo anterior, además de las medidas de salvaguarda necesarias, es a través de su diagnóstico y caracterización. La información derivada de la investigación de los restos de pecios y otros sitios arqueológicos que se encuentran en contextos sumergidos ha contribuido no solamente a comprender nuestro pasado y arrojar luz sobre aspectos poco conocidos, además, resulta fundamental para definir y aplicar mecanismos adecuados de puesta en valor dentro de las comunidades. En la actualidad, existen numerosos recursos que permiten potenciar esta línea de trabajo. Dentro del LEC-PH de la UCA, se ha promovido un espacio que nuclea a especialistas de la arqueología y otros campos del conocimiento, en colaboración con centros de gestión e investigación del patrimonio. Allí, con base en una perspectiva interdisciplinar e intersectorial, desde su creación se han desarrollado y aplicado diferentes herramientas para el estudio y protección de diferentes sitios, con énfasis en los metales asociados a restos de naufragios.

Referencias

- ARQUEOMONITOR (2010): Estudio de las condiciones físicas, químicas y biológicas en el deterioro y salvaguarda del patrimonio cultural subacuático, Ministerio de Economía y Competitividad, Proyecto CTM2010-16363.
- Bethencourt, M., Fernández-Montblanc, T., Izquierdo, A., González-Duarte, M.M., Muñoz-Mas, C. (2018): Study of the influence of physical, chemical and biological conditions that influence the deterioration and protection of Underwater Cultural Heritage. *Science of the Total Environment*, 613–614, 98–114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.007>

- Bethencourt, M., Botana, F.J., Marcos, M. (2005): Sistema combinado para el registro y la conservación arqueológica subacuática in situ. Patente: 2-221-525, España. Registro: 24/05/2002. Publicada: 08/09/2005.
- Ciarlo, N.C., Martí Solano, J., Bethencourt, M., Fernández Tudela, E., Toboso Suárez, E.J., González Gallero, R. y Zuccolotto Villalobos, A. (2023): New remarks on the mid-17th-century gun founding in Northern Europe: archaeometric analysis of scrap bronze ordnance recovered from a Dutch merchant vessel lost off Cadiz, Spain. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 15, 136. <https://doi.org/10.1007/s12520-023-01835-z>
- 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. *Analytica Chimica Acta*, 494, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2003.08.012>
- Gregory, D. (1995): Experiments into the deterioration characteristics of materials on the Duart Point wreck site: an interim report. *Int. J. Naut. Archaeol.* 24 (1), 61–65. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1995.tb00712.x>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – UNESCO (2001): Convención sobre la Protección del Patrimonio Cultural Subacuático. París. <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001246/124687s.pdf#page=59>, acceso 20 de septiembre de 2024.
- MacLeod, I.D. (1995): In situ corrosion studies on the Duart Point wreck. *Int. J. Naut. Archaeol.* 24, 53–59. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1995.tb00711.x>
- MacLeod, I.D. (2002): In situ corrosion measurements and management of shipwreck sites. In: Ruppé, C.V., Barstad, J.F. (Eds.), *International Handbook of Underwater Archaeology*. Kluwer Academic/Plenum, New York, pp. 697–714. https://doi-org/10.1007/978-1-4615-0535-8_41
- Sánchez Pedreño, I., Salas I., García Amado, J.F., García Trigo, S., Bethencourt, M. (2022): Tratamiento de conservación a gran escala de piezas de artillería pesada de hierro fundido y procedencia subacuática. *Procedimientos metodológicos. Ge-conservación*, 21, 16–28. <https://doi.org/10.37558/gec.v21i1.970>

por una geometría constructiva que facilite la retención y acumulación de agua y por la presencia de iones de gran tamaño disueltos en el agua (SO_4^{2-} , NO_x , etc.), con lo que fácilmente puede entrar en sinergia con otros procesos y alcanzar velocidades de degradación significativas.

4.2. Procesos físicos

Se quiere dar a entender por este tipo de procesos aquellos vinculados exclusivamente a mecanismos físicos, sin que tenga lugar alteración alguna de la composición química del conjunto o de alguno de los componentes del mismo. Por lo tanto, se limitarán a unos pocos procesos que se describen a continuación.

- Gelifracción: es un proceso bien conocido, sobre todo en climas con inviernos fríos, causado por la dilatación del agua al congelarse. La lluvia o el rocío dan lugar a la entrada de agua en las fisuras y los poros de la piedra y al helarse crea tensiones que ocasionan la rotura del elemento afectado. La presión ejercida es enorme y el proceso produce importantes pérdidas de sección, dependiendo de la textura del material. Por ejemplo, rocas con poros de gran tamaño, como el travertino, apenas se ven afectadas por gelifracción porque el agua no llega a llenar totalmente cada poro y aunque las paredes de los mismos estén mojadas, hay espacio para la dilatación sin que se produzcan tensiones entre los componentes; sin embargo, en piedras con poros de pequeño tamaño, estos se llenan totalmente de agua, que al dilatar fractura la pieza afectada.

- Dilatación térmica: la mayoría de los materiales dilatan al aumentar la temperatura y contraen cuando esta disminuye. Este fenómeno se compensa en la construcción mediante la formación de juntas de dilatación que absorban el incremento de longitud causado en momentos de fuerte calor, así como la presencia de juntas de mortero que absorben la dilatación de los sillares sin afectación evidente. La ausencia o mal diseño de la construcción puede generar la rotura en los materiales a causa de las tensiones creadas con la dilatación.

En realidad, las rocas dilatan porque lo hacen los granos de los minerales formadores de las mismas, los cuales, a su vez, suelen tener un comportamiento térmico anisótropo y no dilatan lo mismo en todas las direcciones. En algunos casos, como la calcita, la anisotropía es tan acusada que, al aumentar la temperatura, en una dirección dilata, mientras que en otra contrae. En mármoles de tamaño de cristal grande este fenómeno facilita el desprendimiento de los granos superficiales y la consecuente pérdida de sección, es el proceso que en Italia se conoce expresivamente como *marmocotto*.

- Dilatación hídrica: se trata de un proceso asociado a la presencia de arcillas en roca. Si la piedra las contiene, al mojarse su zona superficial, estas adsorben agua y expanden, creando tensiones respecto de la zona interior seca, que pueden dar lugar a la formación de un sistema de fisuras paralelas a la superficie o a la disgregación de los granos que forman la piedra. La intensidad de este proceso depende del tipo de arcilla y de su cristalinidad. Las fisuras generadas facilitan el desprendimiento de escamas paralelas a la superficie exterior, sea cual sea la forma de esta, fenómeno frecuente en algunas rocas sedimentarias, normalmente blandas debido a su contenido en arcillas.

- Oxidación de hierros empotrados: no es un proceso intrínsecamente asociado a la propia piedra, sino a elementos metálicos (especialmente de hierro) alojados para el anclaje de otros materiales. Es bien conocida la expansión del hierro al oxidarse debido al incremento de volumen que implica la reacción. La capacidad expansiva de un hierro depende mucho de su proceso de fabricación, así la forja tiene un buen comportamiento al exterior, mientras que los perfiles laminados en caliente (hierro pudelado) expanden extraordinariamente y rompen la piedra en la que están empotrados. Existe una amplia variedad de tipos de hierro que soportan distintamente condiciones ambientales, entre ellos la gama de aceros inoxidable, cuya resistencia a ambientes agresivos es muy superior a los aceros convencionales.

- Deformación bajo presión: imaginemos un elemento de piedra de aplacado de ciertas dimensiones y relativamente delgado. Bajo la tensión creada por su propio peso es posible su deformación sin llegar a la rotura. Este es un proceso que ocurre a escala microscópica debido al deslizamiento de unos granos respecto de los vecinos a través de los contactos entre bordes de grano (que en realidad son superficies de inestabilidad a escala atómica). Bajo estas condiciones, la lámina de piedra puede tener cierto comportamiento deformable, ocasionalmente con la aparición de microfisuras (muchas veces invisibles a simple vista) que facilitan la deformación.

4.3. Actividad biológica

La superficie de las piedras es susceptible de ser colonizada por microorganismos de distintos grupos, especialmente bacterias, hongos, algas unicelulares y líquenes. Que estos puedan adaptarse mejor o peor a la superficie de una piedra depende de las condiciones ambientales regionales (clima), las microambientales (la zona donde está el elemento, orientación geográfica, relación con el edificio –zona de sombra o insolación –, posición respecto la vertical, etc.), así como de la bioreceptividad de la propia piedra. Esta, a su vez, está fuertemente condicionada por el sistema poroso (capacidad de absorción y retención de agua), por la composición de la piedra (mayor o menor contenido en arcillas capaces de adsorber agua), de la rugosidad superficial (acabado del elemento), etc.

De modo genérico, es posible afirmar que una piedra porosa, especialmente con poros pequeños capaces de retener agua, será más bioreceptiva que una sin apenas poros o con poros de gran tamaño. A su vez, la rugosidad superficial incrementa la capacidad de retención de agua y, a la vez, la de instalación de colonias de organismos, que necesitan el agua (aun en pequeñísimas cantidades para vivir). Por idéntica razón, una posición cercana a la horizontal estará mucho más colonizada que una vertical, y una zona soleada, menos que una de sombra, al menos en climas áridos o semiáridos. Muy frecuentemente, las orientaciones norte y sur en un mismo edificio presentan aspectos bien diferenciados debido a la presencia selectiva de distintos ecosistemas de microorganismos.

Hay que considerar que algunos microorganismos precisan muy poca cantidad de agua para su desarrollo. Piedras en climas desérticos son colonizadas por bacterias adaptadas a este ambiente, dando lugar al llamado barniz del desierto. Además, algunos hongos pueden desarrollar estrategias de supervivencia consistentes en adoptar una morfología resistente a condiciones poco favorables a la espera que estas cambien lo suficiente como para el desarrollo metabólico de la totalidad del organismo. Hongos negros del grupo *Dematiaceae* forman colonias que penetran algunas micras en la superficie de la piedra excavando sus propios nichos ecológicos, donde se ubican sin actividad metabólica perceptible; es, sin duda, una estrategia de supervivencia.

La presencia de colonias de microorganismos afecta algo más que la simple estética que implica el cambio de color. La estrategia de supervivencia de muchos de estos consiste en perforar la piedra hasta, en ocasiones, algunos milímetros de profundidad, alterando la porosidad de la zona más superficial y facilitando un nivel de agresividad mayor del que presentaría la superficie sin colonizar. Esta penetración facilita el mantenimiento de los organismos adheridos a la piedra, así como la búsqueda de mejores condiciones, algo alejadas de la insolación superficial.

En zonas de elevada pluviosidad es posible que la hidrólisis de los componentes de la piedra produzca una cantidad suficiente de arcillas para la instalación de musgos, cuyo desarrollo precisa de un micro-suelo vegetal, aunque sea a escala milimétrica sobre superficies planas, fisuras o recovecos que facilitan la acumulación de arcillas producidas por la hidrólisis de los componentes de la piedra o aportadas por el aire (gran parte del particulado atmosférico son arcillas). Si la acumulación es suficientemente grande, es posible observar el desarrollo de plantas superiores, con hojas y raíces, cuyo crecimiento ocasiona problemas importantes debido a la presión que ejercen en la zona de crecimiento.

Los microorganismos que colonizan las rocas formando un biofilm (continuo o no) pueden erosionar la piedra, como se ha mencionado antes. Pero asociada a su capacidad erosiva, tienen la de formar minerales, dando lugar al crecimiento de cristales que, en ocasiones, pueden llegar a formar una costra de espesor significativo. Prácticamente minerales de todos los grupos (carbonatos, sulfatos, silicatos, fosfatos, óxidos, etc.) se han citado como productos de la actividad metabólica de microorganismos.

4.4. Cristalización de sales

Las sales que se disuelven en agua pueden circular en solución siguiendo los desplazamientos de esta y donde evapora, cristalizan. Cuando esto ocurre en interior del sistema poroso, según el tamaño de los poros, se ejerce una presión sobre sus paredes (presión de cristalización) que puede acarrear la disgregación de los granos de la piedra. El origen de las sales puede ser diverso y complejo, desde mal funcionamiento del sistema de evacuación de aguas residuales, que suele dar lugar a nitratos alcalinos, hasta el escurrimiento de agua de lluvia que lixivia algunos materiales (por ejemplo, cemento) para ocasionar el desarrollo de sulfatos alcalinos, por no citar explícitamente la sal marina. El problema suele ser complejo y requiere un análisis de la naturaleza de las sales, de la cinética del agua en el interior de los materiales de construcción y de los posibles orígenes de esta, sean del subsuelo, de los propios materiales de construcción o del spray marino en casos muy cercanos a la costa.

Por su parte, el grado de afectación de una piedra depende, en gran manera, de la configuración de su sistema poroso. Poros muy grandes no suelen dar otros problemas que los meramente estéticos, mientras que piedras con menos poros, pero más pequeños, pueden disgregarse debido a que la presión ejercida sobre las paredes de los poros puede ser importante. Además, obviamente, la propia naturaleza de la piedra ejerce, a su vez, cierto control sobre su comportamiento ante este tipo de problema.

5. A modo de corolario

Los materiales pétreos de construcción (naturales –rocas- o artificiales) están sometidos a procesos erosivos, como ocurre en los afloramientos de la Naturaleza, eventualmente acelerados por las condiciones particulares a las que se pueden ver sometidos. Si esta erosión es perceptible a la escala histórica del tiempo (el siglo como unidad temporal), la denominamos degradación, alteración o cualquiera de los posibles sinónimos del término. En este texto se ha tratado de resumir los mecanismos que dan lugar a los procesos de alteración, así como la cinética de los mismos, que en definitiva redundan en una pérdida más o menos rápida del patrimonio histórico.

Y aunque el concepto de “patrimonio histórico” es relativamente reciente, no va mucho más allá del siglo XIX, la voluntad de preservar, conservar, alargar la vida útil y estética de los edificios (patrimoniales o no) es ancestral y a lo largo de la historia el hombre ha aplicado técnicas de protección y mantenimiento de los edificios, algunos porque eran su casa, otros porque tenían una especial representación o valoración social. Y con la excepción de algunas construcciones especialmente relevantes, a lo largo de la historia se ha construido con el material local, con las rocas cercanas, fueran estas buenas, malas o regulares. Y por esto, la tradición vernácula de cada zona ha desarrollado en cada momento estrategias de protección y embellecimiento de los edificios, muchas de las cuales se han perdido, abandonado o simplemente, olvidado en nombre de una estética no siempre basada en el rigor histórico.

En los últimos decenios se ha argumentado la aceleración de la degradación de los materiales pétreos ocurrida en los últimos 150 años relacionada con la polución urbana e industrial como consecuencia de la revolución industrial iniciada a finales del siglo XVIII, según la región que se considere. El análisis de la interacción roca-atmósfera en diversos ambientes no parece dar un soporte sólido a esta afirmación que, por menos, podría ser cuestionable. ¿Y si resulta que se han abandonado las acciones de protección de la edificación histórica y ahí radica la innegable aceleración de la degradación patrimonial? Quizás, colectivamente, no estemos haciendo las cosas lo suficientemente bien...

Bibliografía

- Ashurst, J., & Ashurst, N. (1988). *Practical Building Conservation: Stone Masonry*. English Heritage.
- Blázquez, F.; Calvet, F. and Vendrell-Saz, M. (1995), Lichenic alteration and mineralization in calcareous monument of NE Spain, *Geomicrobiology Journal*, Vol. 13, pp. 223-247.
- Doehne, E., & Price, C. A. (2010). *Stone Conservation: An Updated Overview*. GettyConservationInstitute.
- Fitzner, B., & Heinrichs, K. (2002). "Damage diagnosis on stone monuments—weathering forms, damage categories and damage indices." *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 8(5), 507-532.
- Krumbein, W. E.; Urzì, C.; Vendrell-Saz, M. (1997), From the quarry to the Museum Atmospheric saecular organic pollution influencing the cultural heritage, *European Cultural Heritage News Letters (ECHNLR)*, Vol. 10 , pp 62-66
- Price, C. A. (1996). *Stone Conservation: An Overview of Current Research*. Getty Conservation Institute.
- Rodríguez-Navarro, C.& Doehne, E. (1999). "Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern." *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(3), 191-209.
- Siegesmund, S., & Snethlage, R. (Eds.) (2014). "Stone in Architecture: Properties, Durability." *Earth Sciences Series*. Springer.
- Smith, B. J., & Gomez-Heras, M. (2006). *Weathering and Durability of Stones in Built Environments*. Geological Society of London.
- Török A., Licha T., Simon K., Siegesmund, S. (2011), Urban and rural limestone weathering; the contribution of dust to black crust formation, *Environ Earth Sci* 63:675–693
- Turkington, A. V., & Paradise, T. R. (2005). "Sandstone weathering: A century of research and innovation." *Geomorphology*, 67(1-2), 229-253.
- Urzì C., García-Valles M., Vendrell M. and Pernice A. (1999). Biomineralization processes on rock and monument surfaces observed in field and laboratory conditions. *Geomicrobiology J* 16:39–54.
- Winkler, E. M. (1994). *Stone in Architecture: Properties, Durability*. Springer.



Sociedad Española de Mineralogía

Museo Geominero del Instituto Geológico y
Minero de España
Ríos Rosas, 23
28003 Madrid

Patrocinadores





Copper-Based Sheathing and Fastenings for Wooden Ships: An Archeometallurgical Study of the Carron, Ancla Macuca, RMS *Forth*, and El Pesquero Wreck Sites Located in the Gulf of Mexico (Late 18th to Mid-19th Century)

D. Arano¹ · N. C. Ciarlo² · G. Carrasco-González³ · H. Barba-Meinecke⁴ · M. Bethencourt⁵

Received: 15 November 2024 / Revised: 13 January 2025 / Accepted: 10 February 2025
© The Author(s) 2025

Abstract

One challenge in maritime archeology is correlating historical records, archeological findings, and material analysis data to accurately date and establish the provenance of shipwrecks. In the late 18th and early 19th centuries, European naval construction emphasized improvements to the durability of wooden ships, especially for tropical waters. The introduction of metal sheathing was a significant innovation to safeguard ship hulls against wood-boring organisms. Archeometallurgical analysis of copper-based sheathing and fastenings provides crucial insights into shipwreck technology and construction context. This study examines copper sheathing and fastenings on wooden ships from the late 18th to mid-19th century, focusing on wrecks in the Gulf of Mexico. Artifact analysis from these sites sheds light on evolving shipbuilding practices during the early industrial period. Additionally, archeometallurgical analysis has provided chronological references that assist in identifying these wrecks, particularly given the absence of ship hulls, which have degraded under tropical marine conditions.

Keywords Archeometallurgy · Nautical technology · 18th and 19th Century · Shipwrecks

Introduction

During the late 18th and early 19th centuries, maritime activities in the Gulf of Mexico, the Antilles, and the Caribbean were diverse, driven by commerce, resource exploitation, and military conflicts. Evidence of these activities can be found in historical records and archeological remains, particularly shipwrecks, which offer valuable insights into the region's nautical activities. European vessels played a crucial role in this maritime pursuit. During this period, wooden vessels underwent

This invited article is part of a special topical issue of the journal Metallography, Microstructure, and Analysis on Archaeometallurgy. The issue was organized by Dr. Patricia Carrizo, National Technological University -Mendoza Regional, Dr. Omid Oudbashi, Art University of Isfahan and The Metropolitan Museum of Art, Mr. Joseph Paul Mitchell, Avedis Zildjian Company, and Prof. Joshua Mueller, Michigan Technological University, on behalf of the ASM International Archaeometallurgy Committee.

✉ D. Arano
diana_arano@inah.gob.mx

¹ Sección de Conservación y Restauración, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Yucatán, México

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Institute of Archaeology, Faculty of Philosophy and Letters, University of Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

³ Departamento de Historia Moderna, Universidad de Cádiz, Cádiz, España

⁴ Oficina Península de Yucatán, Subdirección de Arqueología Subacuática, Instituto Nacional de Antropología e Historia, San Francisco de Campeche, Campeche, México

⁵ Departamento 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, Cádiz, España

significant improvements, with copper sheathing technology standing out as a key advancement. Initially implemented to protect wooden hulls from damage by marine organisms, copper sheathing notably enhanced both the speed and durability of vessels. However, its introduction presented challenges, particularly the accelerated corrosion of iron fastenings due to galvanic reactions with the copper sheathing. The British Royal Navy addressed this issue by experimenting with copper alloys and eventually adopted “hardened” copper bolts for use below the waterline, a practice later adopted by other European navies.

The transfer of copper sheathing technology from Great Britain to France, Spain, and beyond was a result of both industrial espionage and technological exchange. This technology spread further, extending to merchant vessels, particularly through the British East India Company. By the mid-19th century, advancements in copper alloys, such as Muntz metal, enhanced the efficiency and cost-effectiveness of sheathing and fastenings for vessels (1–8).

Brief Overview of Selected Archeological Sites

Carron Site, Cayo Nuevo

This wreck site is located northeast of Cayo Nuevo Reef on a limestone bed at a depth ranging from 5 to 7.9 m (Fig. 1). Scattered metallic sheets, concentrated primarily on the southern end, are found alongside other diagnostic remains, including 43 iron guns, 5 anchors, musket balls, lead fragments, and iron rudder hinges. Notably, one gun is inscribed with the foundry name (*CARRON*) and the manufacture date (1775) on its trunnion face (9). The use of copper-alloy sheathing, bolts, and sheathing tacks suggests a *terminus post quem* for the wreck events of about the early 19th century (10–13).

Moreover, two 16th-century artifacts—a bronze demi-culverin (dated 1552) and an anchor—were discovered nearby (9, 10, 12). The broad time range of the identified objects suggests a palimpsest, indicating that the remains of at least two wrecks are likely presented. Analysis of copper-alloy fastenings may provide insights for the contextual assessment of sites.



Fig. 1 Map depicting the locations of the Ancla Macuca, RMS *Forth* (1849), Carron, and El Pesquero shipwrecks. Also shown are the position of Campeche Sound in the southeastern region of Mexico,

along with the locations of PNAA, Cayo Nuevo, and the Campeche Coast. ©SAS-YUC Archive, INAH (2023). Credit: Ma. Fernanda Ramírez Islas

Ancla Macuca and RMS *Forth* (1849) Sites, National Park Alacranes Reef

Natural site formation processes have resulted in an overlap of these shipwreck remains, creating a palimpsest (13) (Fig. 1). Materials associated with both vessels, including copper-based sheets and fastenings, present technical similarities, complicating their identification and association with a particular vessel. The Ancla Macuca site, likely a merchant vessel from the late 18th century, yielded a remarkable assemblage of artifacts, including 236 gold jewels (23-carat), emeralds, diamonds, silver macuquina coins (1620–1650), and six iron guns (13–15).

The wreck of RMS *Forth* (1849) revealed structural remains, including the steam propulsion system. Historical records indicate that it belonged to a fleet of 14 steamers from the Royal Mail Steam Packet Company, which was regularly engaged in a transoceanic mail route. Built in 1841, the ship's hull was constructed of oak and teak and equipped with a 450 HP side-lever single steam engine (10, 13, 16).

El Pesquero Site, Champotón

This site covers approximately 900 m², with remains embedded in a coral formation measuring about 14 m in length and oriented east–west (Fig. 1). Due to the tropical marine environment, only limited portions of the wooden hull have survived. The assemblage includes an iron stove, bricks (likely from the ship's kitchen), six guns ranging from 3 to 9 pounds, round shot, pig iron, and shingle ballast. Sheathing tacks, a spike, and fragments of lead were also recovered. A highly corroded sheet containing tacks was discovered positioned parallel to the area with the greatest concentration of archeological remains (Fig. 6).

Eighty meters north of the main assemblage, an anchor was located, though its association with the site remains undetermined. These materials, particularly the copper-alloy fastenings, could offer insights into the ship's construction and potential trade networks (12, 17, 18).

Methodology

A historiographic review of the production cycle of copper sheathing and fastenings used in shipbuilding was conducted and compared with the archeological data gathered from the selected sites. In addition, characterization studies were performed on samples of sheeting, sheathing tacks, nails, and bolts samples from these sites (11). (Samples were labeled with an acronym of the archeological site and a number (e.g., SASY, AM, PI).) Photogrammetry and 3D modeling

were employed to record the shape and dimensions of the objects. X-ray imaging was employed to analyze metallic remains in severely deteriorated sheathing.

The metallographic examination of copper-based samples to determine microstructural features was conducted using light microscopy (LM) and scanning electron microscopy (SEM). Additionally, semi-quantitative elemental composition analysis was performed through energy-dispersive x-ray spectroscopy (EDX) and x-ray fluorescence (XRF). The samples were embedded in thermoplastic resin, then ground and polished to achieve a specular surface. To reveal the microstructure, a hydroalcoholic solution of ferric chloride was applied. For brass samples, the areas unaffected by selective corrosion (dezincification) were selected.

Vickers microhardness testing was conducted on polished sections of the samples to evaluate their mechanical properties (Hardness, 1999). A load of HV 0.2 was applied to each sample for 10 seconds. This measurement was performed using a Duramin-40 microhardness tester from Struers®. These data provided insights into the manufacturing techniques employed, such as cold working and annealing.

Results and Discussion. Metallurgical Analysis and Findings

Carron

At the Carron wreck site, two types of brass bolts were identified, both shared a similar composition but exhibited differences in shape and microstructure (Fig. 2). Bolt SASY016 is characterized by a partially recrystallized structure with grains displaying a high level of corrosion (Figure 2a, b, c). Elongated metallic inclusions in the longitudinal direction suggest that the bolt was manufactured through plastic deformation, likely by hot (or possibly cold) forging, followed by annealing. Slip bands near the surface suggest slight cold working. The alloy composition is 65% Cu and 35% Zn, with trace amounts of Pb and Fe. In contrast, bolts SASY015 feature a wedge-shaped tip and display a Widmanstätten-type grain structure, likely a result of rapid cooling after the hot deformation process (Figure 2d, e, f).

According to the Cu–Zn phase diagram, the α phase precipitates from the single-phase β during cooling, forming α laminations within a β matrix (19). (For duplex brasses, the α phase is a solid solution of Zn in Cu, crystallizing in a face-centered cubic (FCC) structure and readily deformable in cold working. The β phase is an intermetallic compound with an approximate 1:1 composition ratio. The β phase forms once the α phase reaches saturation and crystallizes in a body-centered cubic (BCC) structure (19).) The different microstructures of the bolts suggest at least these two possibilities: a) they were manufactured for different purposes,

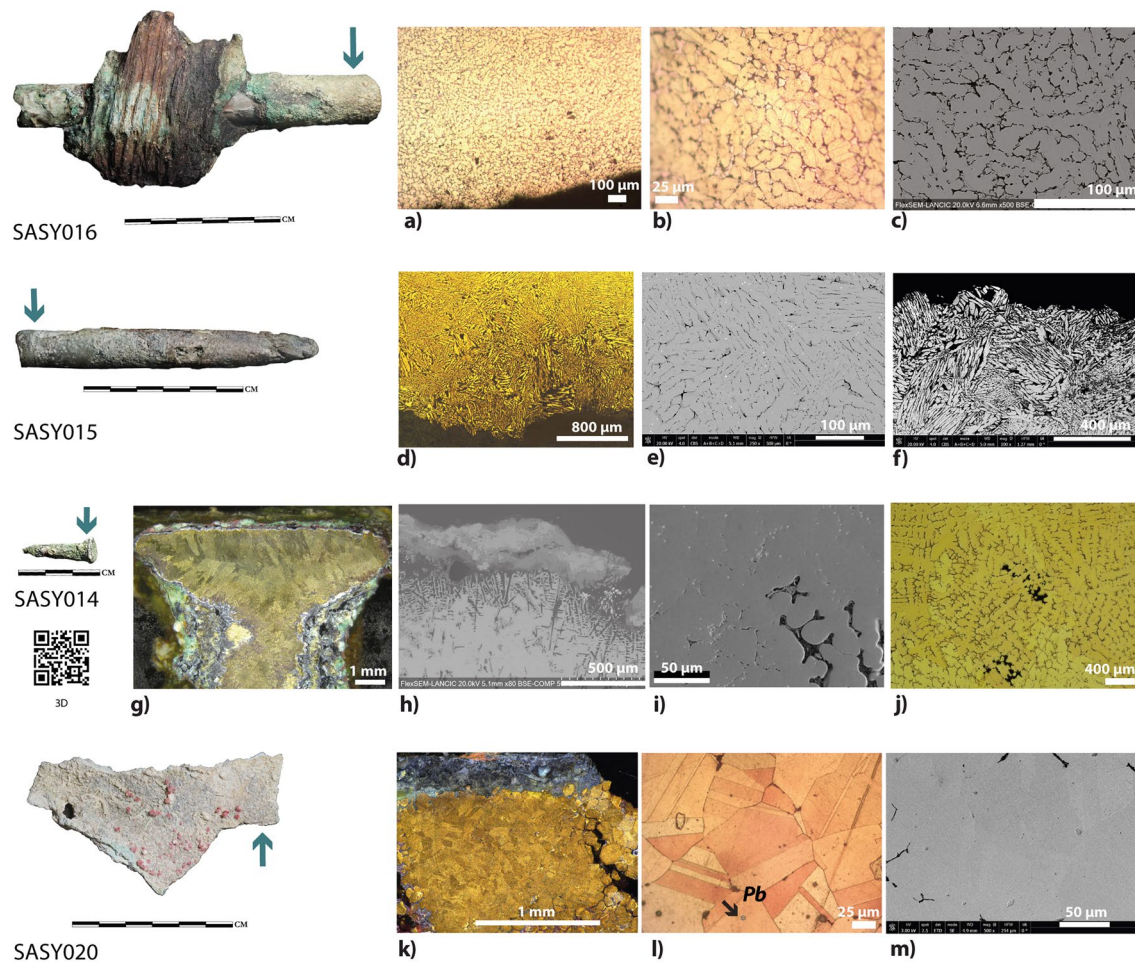


Fig. 2 Carron site. The image shows bolts SASY015 and SASY016, sheathing tack SASY014, and sheet SASY020, along with the photomicrographs displaying their microstructure (LM and SEM). The arrow indicates the sample area. **a–c** Cross sections: **a** Partially recrystallized structure with a high degree of dezincification, etched; **b, c** Higher magnification views. **d, e, f** Cross section and edge portion (LM without etching and SEM), showing a Widmanstätten-type

grain structure. **g–j** Cross section of the head: **g, j** LM, showing α and β phases in the dendritic microstructure, etched; **g** arrows indicates the presence of two phases; **h, i** SEM, with **i** showing a higher magnification of the interdendritic space. **k–m** Equiaxed grains with recrystallization twins: **k, l** LM, Etching: hydroalcoholic ferric chloride; **m** SEM

such as securing distinct parts of the hull, and b) they were produced in different workshops using different methods. Similar microstructural variations in brass have also been documented by Bram and colleagues in the Akko Tower wreck (20, 21).

Sheathing tack SASY014 exhibits a dendritic microstructure, with larger grains concentrated at the head where solidification was slower (Figure 2g, h, i, j). These characteristics are typical of casting and solidification without subsequent thermomechanical treatment. The alloy consists primarily of Cu (65.9%) and Zn (33.7%), with minor Pb content (0.2%) precipitating in the interdendritic regions.

The microstructure of sheet SASY020 displays equiaxed grains of various sizes (20–200 μm) with recrystallization twins, indicating that the sheet was manufactured by rolling,

either hot or cold, followed by annealing (Fig. 2k, l, m). The sheet is made of brass and features elongated Pb inclusions in the direction of hammering or rolling. The brass alloys documented at the site resemble the composition of Muntz metal (about 60% Cu – 40% Zn), patented in 1832 (8, 22–26).

Ancla Macuca and RMS Forth (1849)

At Alacranes Reef, the correlation between historical records and archeological remains enabled the identification of one shipwreck—the RMS *Forth*, a steamship that sank in 1849. In contrast, the archeological remains of the Ancla Macuca wreck suggest that this second vessel might date to the second half of the eighteenth century.

Analysis of copper-based fastenings and sheets at this location revealed two distinct compositional groups: one of unalloyed copper (Fig. 3) and the other consisting of brass and bronze alloys (Fig. 4-5).

The use of brass in shipbuilding began in the early nineteenth century, with applications including bolts, nails, and sheathing (1, 8, 25, 26). Consequently, the brass remains were associated with the RMS *Forth* (1849). In contrast, the unalloyed copper elements, introduced into the European shipbuilding practices in the last third of the eighteenth century, may correspond to the Ancla Macuca wreck. However, this does not exclude the possibility that some components of unalloyed copper might also belong to the British steamship, as a single vessel could incorporate materials from different periods and origins (10). Additionally, the prolonged use of unalloyed copper in certain naval contexts must be considered.

From the Ancla Macuca site, bolt AM063 exhibits a microstructure of equiaxed grains of unalloyed copper of variable grain sizes (10–100 μm) and recrystallization twins (Fig. 3a, b, c). In the longitudinal section, the grains are elongated (Fig. 3a). This bolt was likely produced by plastic deformation, probably through hot forging. The presence of deformation lines and elongated grains at one end of the bolt

suggests hammering, possibly occurring during the vessel's construction.

Sheathing sheet PI07 is also composed of unalloyed copper (Fig. 3d-h). Its microstructure displays equiaxed grains, recrystallization twins, and metallic inclusions (Pb, As, Bi), elongated along the manufacturing direction (Fig. 3f, g). This evidence indicates that the sheet was produced by rolling, potentially either hot or cold, followed by annealing. They, while somewhat aligned, vary in thickness and length. This feature suggests that the sheet may have been further shaped by hammering. If the vessel is of Spanish origin, as suggested by contextual evidence, historical information raises several considerations (14, 15). Copper sheathing was first introduced in Spain in 1782, but no rolling mill was established there until 1790 (10, 27). Therefore, it is plausible that the vessel was sheathed in the late eighteenth century. However, given the presence of clandestine activities in the Gulf of Mexico, it is also conceivable that the vessel was of English origin, operating in the Campeche Sound. If so, it may date to an earlier period, as the British merchant fleet began adopting copper sheathing for hulls in the last third of the eighteenth century (28, 29).

At the RMS *Forth* (1849) site, sheet AM084 is composed of brass with 62–66% Cu and 38–34% Zn. Its microstructure

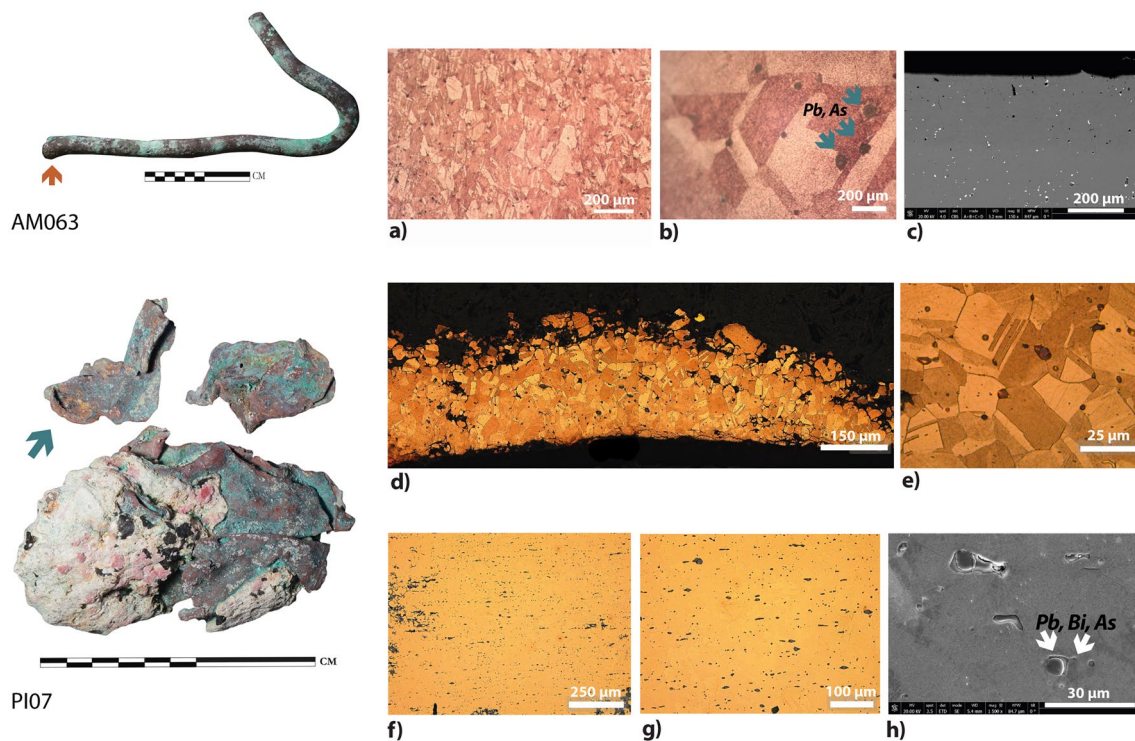


Fig. 3 Ancla Macuca site. Equiaxed grains of unalloyed copper of bolt AM063: **a** Longitudinal section (LS), viewed under LM, etched; **b** Cross sections (CS), viewed under LM, etched; **c** CS, SEM. Unalloyed sheathing sheet PI07: **d**, **e** CS under LM, etched. **f**, **g** Metallic

inclusion (Pb, As, Bi) elongated following the manufacturing direction, longitudinal section (LS), non-etched. **h** SEM view. Etching: hydroalcoholic ferric chloride. The arrow indicates the sample area.

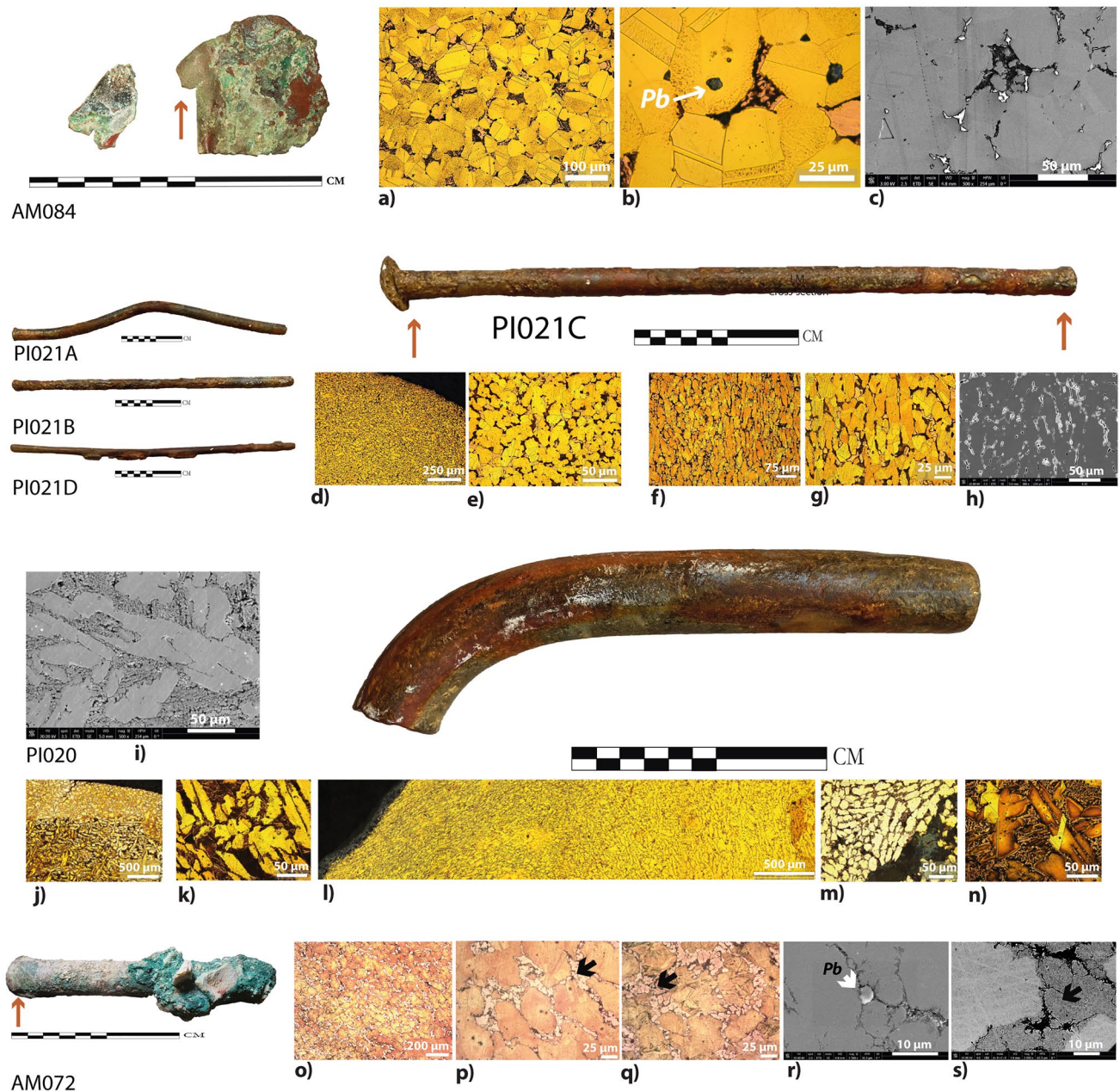


Fig. 4 RMS Forth (1849) site. Equiaxed grains of brass in sheathing sheet AM084: **a, b** Cross sections (CS) under LM, etched; **c** SEM image. Brass bolt PI021C: **d, e** CS under LM, etched; **f, g, h** Longitudinal section (LS) showing elongated grains; **f, g** LM, etched; **h** SEM, non-etched. Brass bolt PI020: **i** CS, SEM view; **j, k** CS, LM, etched; **l, m, n** LS, LM, etched. Brass bolt AM072 (black arrow indicates

dezincification area): **o** LS, LM, etched, showing elongated grains; **p** higher magnification center; **q** same magnification border; **r** SEM showing Pb inclusions at grain boundaries; **s** SEM showing higher magnification of the dezincification process. Etching: hydroalcoholic ferric chloride. The arrow indicates the sample area

consists of equiaxed grains of various sizes (40–300 μm) and recrystallization twins (Fig. 4a, b, c). The sheet also contains metallic inclusions of Pb with minor amounts of Bi, As, and Fe and non-metallic of S. These data, along with the alignment of the inclusions, suggest that the sheet was manufactured by rolling—either hot or cold, with annealing in the latter case (Fig. 4a, b, c).

For the bolts, the composition is consistent with Muntz brass. Bolts PI021 A, B, C, and d show an average composition of Cu 64%, and Zn 35%, with traces of Pb, Mn, and Fe. Brass bolts AM072 (63–65% Cu – 37–35% Zn), PI021C (66% Cu – 34% Zn, with traces of Fe), and PI020 (67% Cu – 33% Zn) share similar compositions (Fig. 4). In cross section, bolts PI021C (Fig. 4d, e) and PI020 (Fig. 4i, j, k)

exhibit a microstructure of equiaxed grains of varying sizes and recrystallization bands, indicative of plastic deformation in the manufacturing process. Slip bands along the surface likely resulted from cold working in the final production stage. In the cross section of bolt PI020, a peripheral zone with smaller grains indicates intense deformation and partial recrystallization during the final production stage (Fig. 4j). In the longitudinal section, the grains are elongated, likely due to plastic deformation in the manufacturing process (Fig. 4l, m). This bolt also displays significant dezincification, resulting from selective Zn dissolution in the marine environment (Fig. 4n). (Zinc dissolution occurred along the grain boundaries of the brass microstructure, in some instances penetrating to the core of the metal (Fig. 4m).)

The square-bodied nails, like the bolts and sheets, can be grouped based on composition. Of the four square-bodied nails (PI016 A, B, E and PI022A) (Fig. 5), PI016A and B exhibit similar dendritic microstructures and ternary bronze compositions (85–89% Cu, 6–7% Zn, and 3–4% Sn, with traces of Fe), and numerous pores in the matrix (Fig. 5a–f). Nail PI016E shows advanced intergranular corrosion, with marine environment minerals filling its pores (Fig. 5k–m). Its originally dendritic microstructure is partially recrystallized, and its composition (82% Cu, 6% Zn, 6.8% Sn, and 3.3% Pb) differs slightly from the others. The microstructural characteristics suggest potential heat exposure, either during manufacturing (e.g., annealing) or as a result of the vessel's sinking. The fourth square-bodied nail (PI022A) is in an advanced state of corrosion, yet still retains a visible dendritic with a slightly different composition (62–66% Cu, 30–33% Zn, 1–3% Sn, and traces of Pb) (Fig. 5g–j).

At this site, three sheathing tacks (PI016C, PI016D and AM052) were analyzed, displaying a composition consistent with quaternary bronze. The average composition of these tacks is 77–87% Cu, 6–11% Zn, 4–7% Sn, and 3–6% Pb, with traces of Fe (Fig. 5n–w).

The dendrites within the tacks have an approximate composition of 82% Cu, 10% Zn, 5% Sn, and 2% As. In the interdendritic regions, the Sn percentage increases to 23% (Fig. 5m, p). Below 320°C, copper and tin exhibit limited mutual solubility, leading to precipitation in these areas. The elevated Sn concentration is attributed to segregation during solidification (Fig. 5r). Lead inclusions, mostly containing traces of As, Ni, and Fe, are observed; as Pb is practically insoluble in copper alloys, it segregates and precipitates within shrinkage voids during solidification (19) (Fig. 5s, u, v).

Pb concentration increases from the tip to the head of the nail, correlating with the cooling pattern of the alloy, as the head is oriented upward in the mold. Micro-shrinkage occurs due to the contraction of the metal across the nail head during cooling (Fig. 5t, w). Elemental mapping using EDX confirmed that areas with Pb also contain S and As

(Fig. 5m, p). SEM imaging revealed a dark phase in the form of angular particles in the peripheral areas of the Pb inclusions or scattered within the alloy's microstructure (Fig. 5u). These particles primarily consist of Zn (62%), S (23%), Cu (14%), and Sn (1%). The presence of As impurities likely reflects the ore source and limitations in refining technology of the period (30).

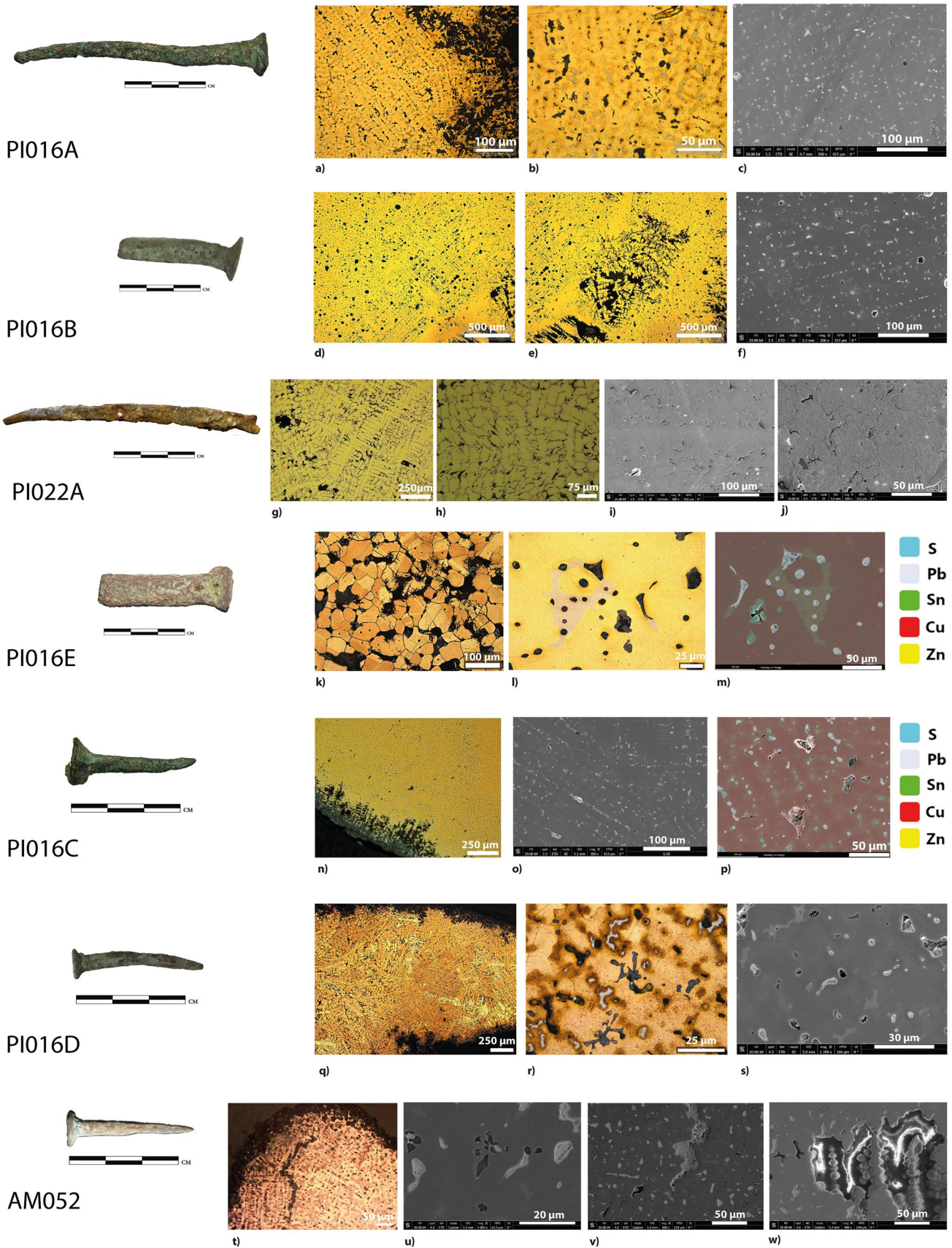
El Pesquero

At El Pesquero site, a thin and highly deteriorated sheet—containing three nails embedded within the corrosion products—was recovered (PQ060) (Fig. 6). X-ray analysis revealed a retained metallic matrix within a concretion, which was carefully removed (PQ060D) (Fig. 6a, b). SEM-EDS and metallographic studies determined that the sheet's composition is predominantly copper (99–100%), with localized inclusions of Bi and As. Its microstructure displays equiaxed grains with deformation twins (Fig. 6a, b).

Three sheathing tacks, PQ060 A, B, and C, attached to the corroded sheet PQ060, were made of a quaternary brass (88–90.5% Cu, 3–4% Zn, Sn 1–4.5% Sn, and 2.5–3.5% Pb, with traces of Fe and As) and exhibit a dendritic and biphasic microstructure, indicative of a casting process (Fig. 6c–n). Micro-shrinkages formed during solidification are evident in the head area, and carbon particles were detected in two of the tacks (Fig. 6e). As expected, Pb precipitated within the interdendritic spaces (Fig. 6f, i, m, r).

An additional sheathing tack, PQ020, was found isolated approximately five meters apart from the main concentration of archeological remains. It is composed of a quaternary bronze, similar to the other artifacts (91–92% Cu, 4–5% Sn, 2–5% Zn, and 1% Pb), but lacks traces of Fe or As (Fig. 6o–r). The slight compositional differences are likely attributable to the inherent heterogeneity of such artifacts, exacerbated by alterations induced by corrosion processes. This tack also displayed dendritic microstructure as cast. All sheathing tacks displayed segregation of a Zn-rich phase within the interdendritic spaces, with a compositional gradient correlated with variations in hardness. The PQ020 tack exhibited slip bands, more pronounced at the tip than in the body and head, likely due to cold working. Whether this feature results from manufacturing or subsequent use is difficult to determine. During the vessel's sinking, fastenings in the ship's structure might have experienced differential stresses depending on their location and hull integrity.

The square-bodied nail PQ044 is composed of a quaternary bronze, primarily Cu (89–91%), with smaller percentages of Zn (3–4%), Sn (3–4%), Pb (1–3%), and traces of Fe. It displays a dendritic microstructure indicative of a casting process (Fig. 6s, t, u). The nail's composition closely aligns with that of the analyzed sheathing tacks. The compositional analysis of the sheets, sheathing tacks, and nails, and their



◀**Fig. 5** RMS *Forth* (1849) site. Nails (PI016 A, B, E, PI022A) and sheathing tack (PI016 C, D, AM052). PI016A: **a, b** Cross sections (CS) viewed under LM, etched; **c** CS under SEM, non-etched. PI016B: **d, e** CS under LM, etched; **f** CS under SEM, non-etched. PI022A: **g** CS under LM, non-etched; **h** Longitudinal section (LS) under LM, non-etched; **i** LS under SEM, non-etched; **j** CS under SEM, non-etched. Partially recrystallized grains of nail PI016E: **k, l** CS under LM; **k** etched; **l** higher magnification, non-etched; **m** SEM, non-etched, same area as (l), EDS map. PI016C: **(n)** CS under LM, non-etched; **o** CS under SEM, non-etched; **p** CS, higher magnification under SEM, EDS map. PI016D: **q** CS under LM, etched; **r** CS under LM, etched, higher magnification; **s** CS under SEM, non-etched. AM052: **t** CS under LM, etched; **u** CS under SEM, non-etched; **v** CS under SEM, non-etched, micro-shrinkage filled with Pb; **w** CS under SEM, non-etched, dendrites in micro-shrinkage space. Etching: hydroalcoholic ferric chloride

correlation with other site remains, suggest that this vessel dates from the late 18th to early 19th century.

Influence of Metallurgical Processes on Microhardness

The microhardness of the studied alloys varies notably based on both metallurgical processing and alloy composition, offering insights into the behavior and durability of the artifacts. In brass bolts, for instance, the differences in microstructure between SASY015 (Longitudinal hardness (LH): 110.17 HV – Transverse hardness (TH): 126.58 HV) and SASY016 (LH: 144.27 HV – TH: 148.4 HV) illustrate the impact of distinct manufacturing processes on hardness. These variations are critical for understanding the functionality of these bolts within shipbuilding, where hardness influences the durability and mechanical strength of fasteners.

Similarly, the dendritic microstructure of sheathing tacks and nails, such as SASY014 (LH: 132 HV – TH: 172.5 HV) and PQ060A (LH: 143.5 HV – TH: 118.4 HV), indicates that the solidification without subsequent thermomechanical treatments results in heterogeneous microhardness. In particular, the segregation of Pb in interdendritic spaces and the precipitation of Zn-rich phases create localized areas of lower hardness, which could adversely affect the structural strength of these components.

Cold working, as observed in brass sheets and bolts [SASY-020 (LH: 103.5 HV – TH: 123.3 HV), PI-020 (LH: 140 HV – TH: 149 HV)], increases hardness by inducing slip bands, which enhance material strength. Recrystallization, conversely, restores ductility in cold-worked bronze, although it decreases hardness compared to material worked without annealing.

In summary, the microhardness of the studied materials is directly related to the metallurgical techniques employed, such as casting, forging, and rolling. Copper and its alloys

show variabilities in hardness due to elemental segregation as well as cold or hot working processes.

Conclusions

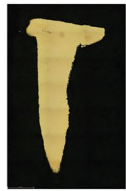
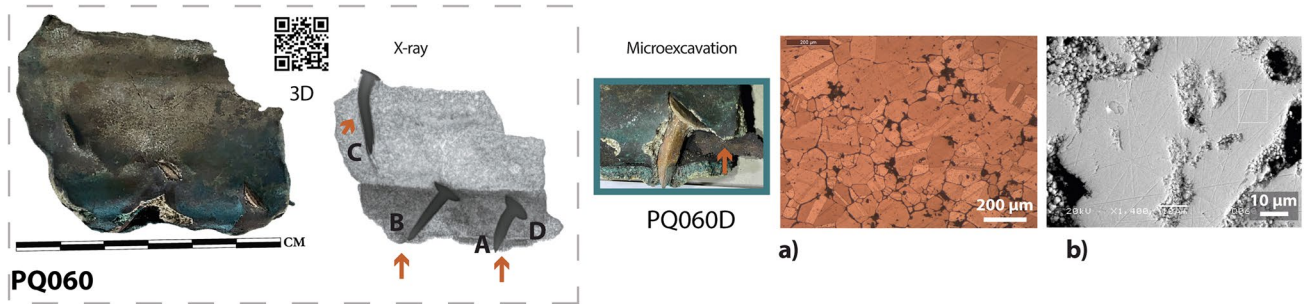
This research contributes on two levels: first, by providing specific microstructural and compositional data for the sheathing and fastenings used in different vessels, and second, by offering broader insights into the formation processes and identification of the wreck sites.

The archeometallurgical analysis of copper and copper-alloy sheathing, sheathing tacks, nails, and bolts from shipwrecks located in the Campeche Bank has revealed several key technological features: a) composition, b) manufacture, c) use, and d) deterioration processes. These findings contribute to a more nuanced understanding of the materials used for shipbuilding during the late 18th to mid-19th centuries.

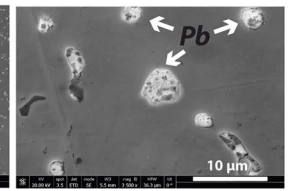
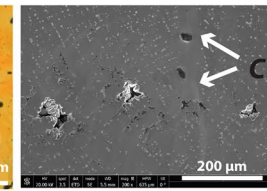
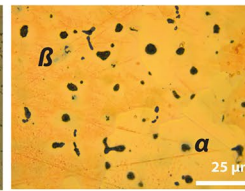
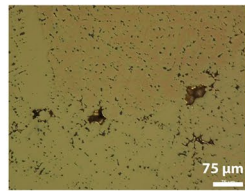
The development and adoption of copper sheathing varied across European nations during the last third of the 18th century. Our findings are significant for maritime archeology in the Gulf of Mexico, particularly for assessing unidentified wreck sites. However, to address the origin or nationality of the vessels, additional historical research and further analysis of archeological remains are required.

This research also enabled a detailed examination of the palimpsest formed by the wrecks of the *Ancla Macuca* (ca. late 18th century) and RMS *Forth* (1849). The metallurgical analyses provided valuable data for correlating the composition of the fastenings and sheathing remains with a specific period, serving as a reference frame for the metals used in shipbuilding. Another example of palimpsest is the Carron site, which contains archeological evidence ranging from the 16th-century bronze demi-culverin to 18th-century iron guns (one, dated from 1775) and a brass sheathing and fastenings. This suggests that the site may represent at least two different shipwrecks occupying the same area. An alternative interpretation considers that the site could correspond to a 19th-century vessel transporting earlier materials, similar to the Spanish frigate *Nuestra Señora de las Mercedes*, built in 1788 and sunk in 1804, whose cargo included bronze guns from the late 16th and early 17th centuries (31). Both general and specific aspects of the methodology employed in this study could be applied to other shipwrecks from the same period.

In summary, this study underscores the value of integrating metallurgical analysis with historical and archeological evidence from shipwrecks to study metals used in wooden shipbuilding. This integrated approach not only enhances our understanding of the materials and techniques employed but also highlights the broader historical context in which these innovations were applied.



PQ060A

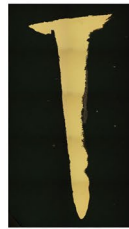


c)

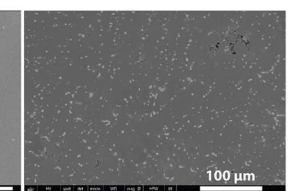
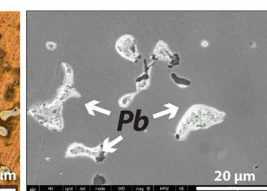
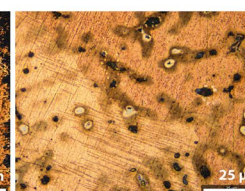
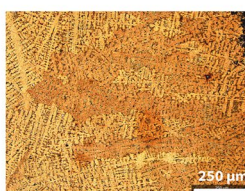
d)

e)

f)



PQ060B



g)

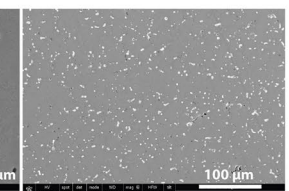
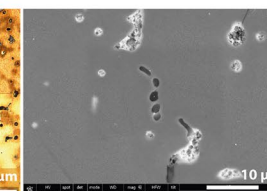
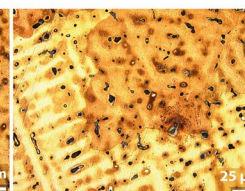
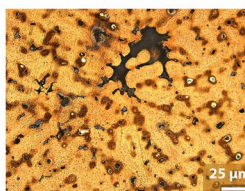
h)

i)

j)



PQ060C



k)

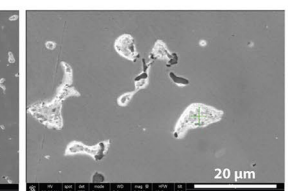
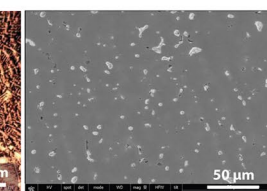
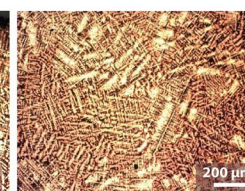
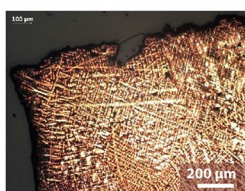
l)

m)

n)



PQ020



o)

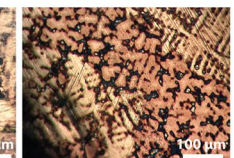
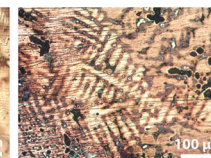
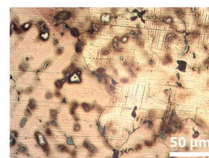
p)

q)

r)



PQ044



s)

t)

u)

Fig. 6 El Pesquero site. Unalloyed copper sheathing sheet PQ060D: **a** Cross sections (CS) viewed under LM, etched; **b** CS under SEM, non-etched. Tacks composed of quaternary bronze exhibit a dendritic microstructure: PQ060A, B, C, and PQ020. PQ060A: **c**, **d** CS under LM, non-etched; **e**, **f** CS under SEM, non-etched, showing non-metallic and metallic inclusions. PQ060B: **g**, **h** CS under LM, etched; **i**, **j** CS under SEM, non-etched, showing Pb segregates. PQ060C: **k**, **l** CS under LM, etched; **m**, **n** CS under SEM, non-etched, showing non-metallic and metallic segregates. PQ020: **o**, **p** CS under LM, etched; **q**, **r** CS under SEM, non-etched, showing non-metallic and metallic segregates. Square nail of quaternary bronze PQ044: **s**, **t**, **u** CS under LM, etched. Etching: hydroalcoholic ferric chloride

The tropical conditions and specific contexts of the studied wreck sites have led to significant corrosion of the fastenings and sheathing; in brasses, dezincification in the marine environment was a major factor. In this work, the microstructure and composition of samples were examined in areas unaffected by corrosion to identify the manufacturing processes and material characteristics. Given the advanced state of degradation of the archeological remains, this research highlights the importance of developing a detailed record and analysis of samples. Such documentation is essential for assessing the wreck sites comprehensively, alongside other findings such as guns, hull elements, cargo, and other material cultural carried on board. This is especially crucial in contexts where wooden hulls have been almost destroyed by the action of wood-boring organisms.

This research demonstrates the value of integrating historical, archeological, and archeometric data to reconstruct the technologies used in modern naval shipbuilding. Such an interdisciplinary approach enriches our understanding of both the materials and techniques used for copper-based artifacts applied to wooden shipbuilding. To advance this research, further historical review is needed to identify three of the four wrecks and establish the nationality of the vessels. Moreover, analyzing other types of archeological remains, such as the wood species used in shipbuilding, could greatly enhance our current understanding of the sites and can also offer a more comprehensive insight into the construction and navigation practices of the period.

Acknowledgments The authors are very grateful for the funding provided by the projects PIPY-SAS-INAH and CONACYT - LANCIC LN315853 and LN314846, and the CICORR research center of the Autonomous University of Campeche, in Mexico. We also extend our gratitude to the Spanish State Research Agency, Ministry of Science, Innovation and Universities (State Plan I+D+i 2017-2020, EQC2018-004947-P). We are grateful to the Historical Metallurgy Society for supporting the presentation of this research. Finally, we thank our collaborators Rodrigo Ortiz for the photogrammetry of the El Pesquero site, and Abiud Piza Chávez, Gabriel Quetz León and Ma. Fernanda Ramírez Islas for their contributions to the historical research and archeological record.

Funding Funding for open access publishing: Universidad de Cádiz/CBUA.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

1. N. Ciarlo, Experimentación, transparencia tecnológica y conservadurismo: notas sobre la introducción del aforro de cobre en los barcos de madera del siglo XVIII. *Teoría y Práctica de la Arqueología Histórica Latinoamericana*. 6, 9–27 (2017). <https://doi.org/10.35305/tpahl.vi.48>
2. McCarthy M. *Ships' Fastenings: From Sewn Boat to Steamship*. Texas A&M University Press; 2005. 229 p.
3. Thompson L. *Copper on the Northwest Coast: A Material Investigation of Cultural Entanglements Experienced During the Fur Trade and Colonial Periods*. [PhD Dissertation]. Sheffield, UK: University of Sheffield; 2019.
4. R.J.B. Knight, The introduction of copper sheathing into the royal navy, 1779–1786. *Mariner's Mirror* [Internet]. **59**(3), 299–309 (2020)
5. P.M. Solar, K. Rönnbäck, Copper sheathing and the British slave trade. *Econ History Rev*. **68**(3), 806–829 (2015)
6. J.R. Harris, Copper and shipping in the eighteenth century. *Econ History Rev* [Internet]. **19**(3), 550–68 (1966)
7. Harris JR. *Industrial Espionage and Technology Transfer: Britain and France in the Eighteenth Century*. New York, NY: Routledge, Taylor & Francis Group; 1998. Available from: https://www.google.com.mx/books/edition/Industrial_Espionage_and_Technology_Tran/6zorDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=0
8. N. Ciarlo, Industrialization, Warfare, and Science: An archaeological-historical insight into technological changes of mid-18th to early 19th-century European naval ships. *Int J Naut. Archaeol*. **52**(2), 384–417 (2023)
9. H. Barba-Meinecke, *Nafragios en el Seno Mexicano: El pecio Ancla Macuca, Yucatán, Golfo de México [Master's Thesis]* (Universidad de Cádiz, EIDEMAR, CEIMAR, Cádiz, España, 2019)
10. Arano Recio DE. *Historia y metalurgia de los revestimientos metálicos en embarcaciones de propulsión a vela de la España peninsular y americana circa 1780-1820* [Internet] [PhD Dissertation]. Cádiz, España: Universidad de Cádiz; 2023 [cited 2024 Apr 6]. Available from: <https://rocin.uca.es/handle/10498/31641>
11. Arano Recio D, González-Sánchez J, Bethencourt M, Ciarlo N. 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. In: XIII Congreso Ibérico de Arqueometría; 2019.
12. Arano Recio D, Barba-Meinecke H, Bethencourt Núñez M, Ciarlo N, Carrasco González G. 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). In: 43rd International Symposium on Archaeometry; 2022. Lisboa, Portugal.

13. D. Arano Recio, H. Barba-Meinecke, M. Bethencourt Núñez, N. Ciarlo, G.G. Carrasco, Un acercamiento a la problemática del palimpsesto en naufragios: estudio de dos contextos arqueológicos subacuáticos en el arrecife Alacranes, México, in *I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática (CIANYS 2021)*. ed. by F. Cerezo Andreo, C. Pérez-Reverte Mañas (Universidad de Cádiz, Campus de Excelencia Internacional del Mar, Cádiz, España, 2022), pp.330–333
14. H. Barba-Meinecke, R. Junco, J.R. Trujeque, El tesoro de Alacranes: estudio multidisciplinario del precio Ancla Macuca. Yucatán. *Arqueología Mexicana*. **28**(164), 58–63 (2020)
15. Barba-Meinecke H, Junco Sánchez R, Reyes Trujeque J, Silva León I, Espinosa Morales Y, Domínguez-Bella S, et al. El tesoro de Alacranes. Estudio multidisciplinario del naufragio Ancla Macuca, Yucatán, Golfo de México. Primeros acercamientos. In: Elkin D, Delaere C, editors. Entre a tierra y el agua: El patrimonio subacuático costero en América Latina. Gainesville, FL: University Press of Florida; 2023.
16. H. Barba-Meinecke, A.P. Chávez, Los pecios RMS Tweed y RMS *forth*: historia y análisis arqueológico de dos naufragios identificados en el Parque Nacional Arrecife Alacranes. Yucatán. *Glifos*. **22**, 12–23 (2019)
17. Barba-Meinecke H. Arqueología Subacuática en la costa de Campeche. El caso del pecio “El Pesquero, Champotón” Primeros acercamientos en torno a su investigación. In: XVII Encuentro Los Investigadores de la Cultura Maya; 2007. Campeche, México: Universidad Autónoma de Campeche.
18. Barba-Meinecke H. Arqueología subacuática en la costa de Campeche: Pecio El Pesquero. Primeros acercamientos en torno a su investigación. In: XVI Simposio Román Piña Chán; 2011, Museo Nacional de Antropología, INAH. CDMX, México.
19. D.A. Scott, *Metallography and Microstructure in Ancient and Historic Metals* (Getty Publications, Los Ángeles, CA, 1992)
20. M. Bram, N. Iddan, D. Ashkenazi, D. Cvikel, The nineteenth-century Molyneux’s boat: archaeometallurgical perspective of its metal fastenings. *Metall, Microstruct Anal*. **9**(5), 721–743 (2020)
21. M. Cohen, D. Ashkenazi, Y. Kahanov, A. Stern, S. Klein, D. Cvikel, The brass nails of the Akko Tower wreck (Israel): archaeometallurgical analyses. *Metall, Microstr Anal*. **4**(3), 188–206 (2015)
22. Ashkenazi D, Cvikel D, Stern A, Klein S, Kahanov Y. Metallurgical Characterization of Brass Objects from the Akko 1 Shipwreck, Israel. *Materials Characterization* [Internet]. 2014 Jun 1 [cited 2020 Sep 27];92:49–63. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580314000667>
23. Ashkenazi D, Cvikel D, Iddan N, Mentovich E, Kahanov Y, Levinshtein M. Archaeometallurgical Study of the Brass Cases from the Akko 1 Shipwreck. *Journal of Archaeological Science* [Internet]. 2011 Sep 1 [cited 2020 Sep 27];38(9):2410–9. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305440311001579>
24. D. Ashkenazi, A. Inberg, D. Cvikel, Analysis of naturally etched surface of brass sheathing from a nineteenth-century shipwreck. *J Min Metall, Sect B: Metall*. **54**(1), 101–110 (2018)
25. J.M. Bingeman, Copper and muntz metal sheathing: a global update. *Int. J. Naut. Archaeol*. **47**(2), 460–471 (2018)
26. Zuccolotto Villalobos AR. *Las Láminas de Muntz del Pecio “El Ángel”: Un Caso de Navegación Comercial en el Caribe Durante el Siglo XIX*, [MA Dissertation]. Michoacán, México: El Colegio de Michoacan; 2020.
27. Quintero González J. La Introducción de los Forros de Cobre en el Sur. In: La Economía Marítima en España y las Indias: 16 Estudios. San Fernando, Cádiz, España; 2015. p. 255–80.
28. G. Rees, Copper sheathing: an example of technological diffusion in the english merchant fleet. *J Trans History* [Internet]. **2**, 85–94 (1972)
29. M. Staniforth, The introduction and use of copper sheathing: a history. *Bull Australian Inst Marit Archaeol*. **9**(1/2), 21 (1985)
30. Viduka A, Ness S. Analysis of Some Copper-Alloy Items from HMAV *Bounty* Wrecked at Pitcairn Island in 1790. In: Proceedings of Metal 2004, National Museum of Australia Canberra ACT. Canberra, Australia: National Museum of Australia; 2004 [cited 2020 Sep 30]. p. 160–72. Available from: www.nma.gov.au
31. J.J. Oliver Laso, P.A. Ramírez, “Bernardino de texeda me fecit”: artillería virreinal del Perú a finales del siglo XVI. *Gladius*. **20**(41), 153–176 (2021)

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

ARTICLE

Estudio preliminar e identificación de un campamento de náufragos en el contexto de la Guerra del Brasil (1825-1828), Partido de Patagones, Buenos Aires

Nicolás C. Ciarlo¹ , Ana Castelli², Joaquín Rodríguez Saumell¹, Carlos G. Landa¹, Leonardo Dam³, Diego Carabias Amor⁴, Alasdair Brooks⁵, Luis V. J. Coll⁶ y Rodrigo Torres⁷

¹CONICET, Instituto de Arqueología, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, ²CONICET, Instituto Multidisciplinario de Historia y Ciencias Humanas, Buenos Aires, Argentina, ³Museo Histórico Regional “Emma Nozzi”, Banco Provincia de Buenos Aires, Carmen de Patagones, Provincia de Buenos Aires, Argentina, ⁴Núcleo Milenio Océano, Patrimonio y Cultura, y Centro de Investigación en Arqueología Marítima del Pacífico Sur Oriental, Valparaíso, Chile, ⁵Re-Form Heritage, Middleport Pottery, Port Street, Burslem, Stoke-on-Trent, Reino Unido, ⁶CONICET, Instituto de las Culturas, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina y ⁷Centro de Investigaciones del Patrimonio Costero, Centro Universitario Regional del Este, Universidad de la República, Maldonado, Uruguay

Autor de contacto: Nicolás C. Ciarlo; Email: nciarlo@conicet.gov.ar

(Received 29 July 2023; revised 12 October 2023; accepted 6 December 2023)

Resumen

La navegación, la tecnología naval, la vida a bordo y las actividades llevadas a cabo en barcos de época moderna y contemporánea han sido temas ampliamente estudiados dentro de la arqueología marítima y náutica. Sin embargo, el devenir de los náufragos sobrevivientes de accidentes y las correspondientes evidencias materiales en la costa, no fueron abordados en grado semejante. Las investigaciones muestran un desarrollo dispar, destacando los trabajos realizados en el Pacífico occidental. En Latinoamérica, esta problemática se encuentra aún apenas esbozada. El estudio arqueológico de campamentos de náufragos puede aportar información novedosa para conocer las relaciones humanas, interpersonales e intergrupales, en situaciones de crisis. En este artículo, presentamos los primeros resultados del análisis arqueológico-histórico de la materialidad asociada al sitio Faro Segunda Barranca 4, localizado en el Partido de Patagones, Provincia de Buenos Aires, Argentina. A partir de una discusión de las diferentes líneas de evidencia, identificamos los restos como un campamento de náufragos en el marco de la Guerra del Brasil o Guerra de Cisplatina (1825-1828).

Abstract

Maritime and nautical archaeologists have focused on sailing, naval technology, life on board, and activities performed on modern and contemporary vessels. However, the fate of shipwreck survivors and the corresponding material evidence on the coast have not been addressed to a similar extent. Research has developed unevenly; work carried out in the Western Pacific stands out. In Latin America, however, this topic is still barely outlined. The archaeological study of castaway camps can provide novel information to understand human, interpersonal, and intergroup relationships in crisis scenarios. This article presents the initial results of the archaeological-historical analysis of the Faro Segunda Barranca 4 site in Patagones, province of Buenos Aires, Argentina. Based on a discussion of different lines of evidence, we identify the remains as a shipwreck survivor camp occupied during the war with the Brazilian Empire, or the Cisplatine War (1825–1828).

Palabras clave: arqueología náutica; campamento de náufragos; barcos de guerra; siglo diecinueve; Patagonia

Keywords: nautical archaeology; survivors' camp; naval vessels; nineteenth century; Patagonia

Navegación y crisis: Los campamentos de náufragos

Los cuerpos de agua han sido los medios de comunicación por excelencia, y las embarcaciones, los principales vehículos que hicieron posible la circulación de personas, objetos e ideas. Los restos

náufragos (i.e., los pecios) son materia de estudio de la arqueología marítima y náutica, especialidad que ha contribuido extensamente al conocimiento de la navegación, la tecnología naval, la vida a bordo y las actividades realizadas en diferentes entornos acuáticos. En las últimas décadas, surgió la necesidad de adoptar una perspectiva interdisciplinaria, multiescalar y comparativa, analizando las evidencias de barcos y sitios en tierra, e integrando otras fuentes de información.

Los sitios asociados a ocupaciones por parte de náufragos pueden clasificarse en la categoría de campamentos costeros que marinos de diferentes nacionalidades han utilizado con fines diversos (e.g., expediciones militares y explotación de recursos). No obstante, presentan ciertas particularidades. Al ser resultado de un accidente, por ende, no intencionales, solían ocurrir en sitios remotos. Esta situación suponía una modificación de las características y del devenir habitual de una embarcación y su tripulación. Los barcos, entendidos como un sistema técnico, funcional y social particular, adquirirían un nuevo estatus, mientras que la comunidad asociada debía afrontar un entorno extraño y bajo circunstancias ambientales-humanas adversas. De allí el interés que estos asentamientos temporales tienen para estudiar aspectos del comportamiento humano que están menos representados en las fuentes documentales u otro tipo de sitios.

A nivel internacional, destacan los trabajos realizados desde la década de 1960 en el Pacífico occidental (e.g., Clark y de Biran 2010; Nash 2005; véase Gibbs 2003, y las referencias allí citadas). Los sitios están mayormente asociados a naufragios de barcos neerlandeses y británicos ocurridos entre los siglos diecisiete y diecinueve. Las ocupaciones cubren desde semanas hasta varios meses, incluso años, como es el caso del establecimiento de los amotinados del *HMAV Bounty* en la isla Pitcairn (Erskine 2004). A partir de los sitios trabajados en Australia, Gibbs desarrolló un marco de referencia para el estudio e interpretación de este tipo de contextos (Gibbs 2003). El autor destacó su importancia para conocer las estrategias de subsistencia y analizar las relaciones humanas, interpersonales e intergrupales bajo situaciones de crisis. La materialidad asociada a los sitios de acampe y naufragio, que suelen localizarse en proximidad uno del otro, puede asimismo contribuir a evaluar las motivaciones, decisiones y acciones tomadas por las personas antes, durante y después de un accidente (véase Gibbs y Duncan 2016).

En América del Sur existe amplia documentación relativa a supervivientes de naufragios que encontraron refugio en la costa. En ocasiones estos fueron rescatados o lograron seguir adelante por cuenta propia, por ejemplo, a través de naves construidas con restos del naufragio. Esta fue la experiencia del Comandante Luis Piedra Buena y su tripulación en la isla de los Estados, que entre marzo y mayo de 1873 construyeron el cúter *Luisito* con los restos de la goleta *Espora* (Centro Naval 1933:307-314). A nivel arqueológico, sin embargo, las evidencias halladas y analizadas son relativamente escasas. En Argentina destaca el caso de la fragata española *Purísima Concepción* (1765), en Tierra del Fuego. Los trabajos realizados en Caleta Falsa permitieron identificar una serie de objetos de metal y cerámica bajo el agua y en zona intermareal que podrían estar vinculados al referido barco. Asimismo, restos hallados en estratigrafía en una explanada natural y sector de bosque de la caleta fueron atribuidos al campamento de los náufragos, donde permanecieron tres meses y construyeron una nueva embarcación con la que regresaron al Río de la Plata (Elkin et al. 2023). Otros casos de interés son los campamentos de náufragos de la corbeta británica *Swift* (1770) en Puerto Deseado (Acevedo y Grosso 2000) y de la corbeta francesa *Uranie* (1820). Este último asentamiento fue localizado y estudiado en la Bahía de la Anunciación/Berkeley Sound, Islas Malvinas/Falkland Islands (Bigourdan 2013).

En este artículo realizamos una primera aproximación a las evidencias halladas en un sitio costero al norte del Faro Segunda Barranca, en el partido de Patagones, provincia de Buenos Aires. Este sitio, bajo estudio desde el 2021, reviste especial interés para el conocimiento de la navegación, eventos de naufragio y supervivencia en contextos de relativo aislamiento, así como de las posibles interacciones con poblaciones indígenas. A continuación, exponemos brevemente el marco general de la investigación; seguidamente, presentamos el sitio y los resultados preliminares de la materialidad estudiada; finalmente, con base en la información recabada y el análisis de fuentes documentales, exponemos una propuesta para su identificación.

El proyecto Patagones

Esta investigación se enmarca dentro del proyecto “Investigación arqueológica y puesta en valor de las actividades marítimas en Norpatagonia, 1779-1879” (en adelante, proyecto Patagones), radicado en el Instituto de Arqueología de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires. El proyecto Patagones tiene como objetivo principal el estudio del patrimonio cultural marítimo ubicado en el litoral atlántico y entornos ribereños al sur de la provincia de Buenos Aires, entre los ríos Colorado y Negro. Incluye las localidades de Carmen de Patagones y Bahía San Blas, una región que presenta una extensa trayectoria en materia de navegación histórica.

Los trabajos arqueológicos, iniciados en 2018, buscaron sistematizar la información documental y la memoria oral sobre accidentes navales; prospectar los sectores intermareal y supramareal del continente, islas y bancos, así como submareal, mediante equipos de sensoramiento remoto; registrar, excavar y analizar restos estructurales de barcos de madera; localizar y estudiar asentamientos estables y temporales ubicados en la costa (e.g., casa del práctico del Río Negro); y examinar e inventariar colecciones públicas y privadas de carácter arqueológico y documental. Estas labores han aportado al conocimiento sobre la tecnología náutica, la navegación y las actividades fluvio-marítimas desarrolladas en la zona durante el período colonial tardío e independiente (Castelli y Ciarlo 2022; Ciarlo et al. 2023).

Se localizaron varios pecios de madera entre Punta Rasa y Bahía San Blas (Figura 1a). Con base en la metodología aplicada previamente en otros contextos de Patagonia (e.g., Grosso et al. 2015), se estudiaron las características constructivas y materiales que permitieron evaluar el tipo, dimensiones y período en que operaron las naves. Las evidencias sugieren que eran embarcaciones mercantes destinadas a la navegación oceánica que operaron durante el siglo diecinueve. Teniendo en cuenta el auge que experimentó la navegación en la zona a raíz del curso desarrollado durante la Guerra del Brasil (*Guerra da Cisplatina*, en portugués; Haller y Vezub 2018:24),¹ uno de los objetivos del proyecto es analizar la posible relación entre los pecios y este conflicto internacional. La guerra enfrentó a las Provincias Unidas del Río de la Plata con el Imperio del Brasil entre 1825 y 1828 y tuvo consecuencias

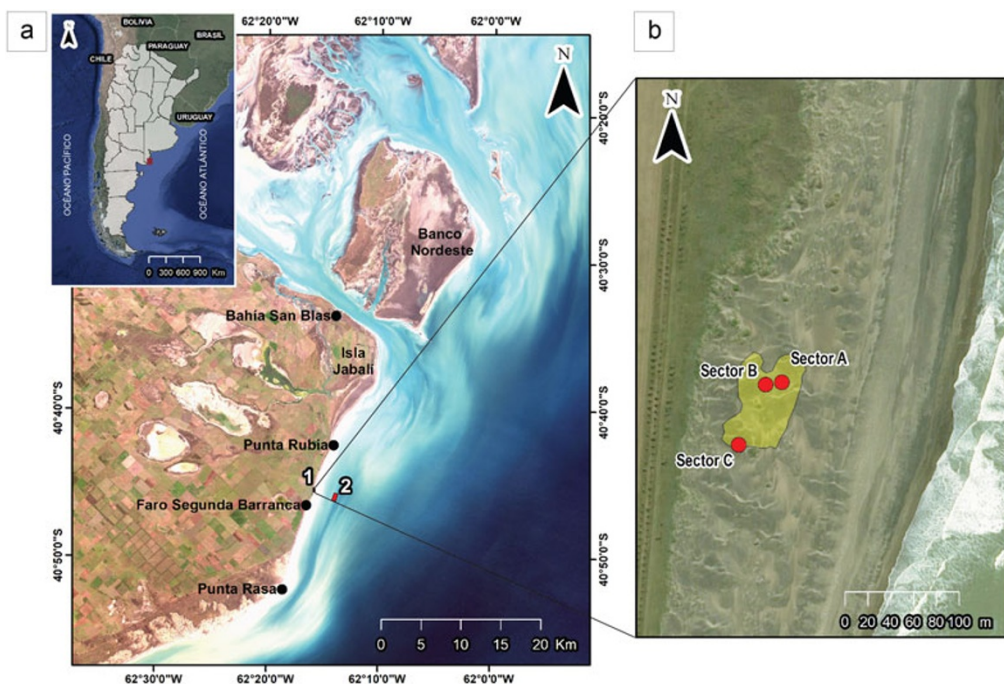


Figura 1. Mapa de ubicación: (a) área de estudio del proyecto Patagones, donde se indica (1) el área del sitio FSB-4 y (2) el polígono correspondiente a la zona potencial de hundimiento de los barcos del Brasil; (b) detalle de la barranca costera donde se referencian los límites del sitio FSB-4 (en amarillo) y los sectores con mayor concentración de materiales en superficie. Fotos de Luis Coll 2023. (Color en la versión electrónica)

significativas, como el reconocimiento de la independencia de la República Oriental del Uruguay (antes Banda Oriental, anexada al Brasil bajo el nombre de Provincia Cisplatina). Relatos contemporáneos apuntan a una alta ocurrencia de accidentes navales, al intentar los corsarios conducir sus presas a la Bahía San Blas o al Río Negro (d'Orbigny 1945 [1844]:656; Fitz Roy 1839:297-298).

Dentro del proyecto Patagones, también se han estudiado los sucesos en tierra vinculados a la primera campaña naval del Brasil a Patagones (1827), desde una perspectiva arqueológica local y regional (Landa et al. 2021; Rodríguez Saumell 2022). Sin embargo, los trabajos realizados con anterioridad no permitieron localizar evidencias in situ del conflicto. Hasta esta presentación, los únicos materiales vinculados a las acciones brasileñas en la zona eran los restos de la corbeta de guerra *Itaparica* (renombrada *Ituzaingó* tras ser capturada por las fuerzas republicanas), cuyos restos se encuentran en el lecho del Río Negro, frente a la ciudad de Viedma;² los dos pabellones que se conservan de las presas brasileñas del combate del 7 de marzo de 1827 (Biedma 1905:554), expuestos en la Parroquia Nuestra Señora del Carmen; y objetos descontextualizados que fueron recuperados de forma fortuita por pobladores locales, entre los que destaca una empuñadura de sable de marina (Figura 2).³

El sitio presentado en este artículo brinda por primera vez la posibilidad de estudiar restos materiales en contextos vinculados con los eventos navales de la Guerra del Brasil en Patagones.

El sitio Faro Segunda Barranca 4

Delimitación espacial

El sitio Faro Segunda Barranca 4 (en adelante, FSB-4) fue localizado gracias a una informante local en abril de 2021 (Castelli y Ciarlo 2022:14-15). Está ubicado en la costa, entre el Faro Segunda Barranca y Punta Rubia (véase Figura 1a). Las evidencias registradas se distribuyen sobre una barranca, con orientación norte-sur, dentro del contexto geomorfológico que se extiende entre el Arroyo del Guanaco y Punta Rasa. Este ámbito fue caracterizado como una barrera medanosa muy angosta (70-250 m) y dinámica, con dunas emplazadas sobre una barranca de 9 m snm (Cortizo e Isla 2012:52-53). Aunque se encuentra a menos de 50 m de la línea de costa, dada la altura en que se emplaza, el sitio no está afectado por las mareas en ningún momento del año.

Una parte del sitio yace expuesta sobre la superficie arenosa de la barranca; otra parte probablemente permanece cubierta por las pequeñas dunas vegetadas que se distribuyen dentro de sus límites, e incluso bajo la línea de médanos más prominentes que lo flanquean por el oeste (Figura 3a). Al este, el sitio finaliza frente a una playa angosta de arena (Figura 3b). El área máxima de distribución de materiales arqueológicos y el entorno adyacente, en su mayoría libre de dunas, comprenden una superficie de aproximadamente 4.000 m² (véase Figura 1b). Dentro de este contexto, se definieron tentativamente tres sectores (A, B y C) en función de las principales concentraciones de restos, posiblemente relacionados con espacios de actividad específicos.

Las observaciones realizadas en los otoños de 2021 y 2023, muestran cierta estabilidad a nivel sedimentario y un aumento de la vegetación. Pese a la actividad rural en los campos aledaños, el entorno de la barranca no presenta indicios de impacto antrópico. El sitio tampoco parece haber sufrido expolio en los últimos años y, a excepción de escasa munición de caza dispersa en la zona, no se halló basura reciente. Lo anterior, junto a la sedimentación del sistema dunar, son factores que han obrado en favor de la preservación de este contexto.

Recolección de superficie y sondeos estratigráficos

En 2021, tras delimitar el sitio, se recuperó una muestra representativa de la variabilidad de materiales distribuidos en superficie (Figuras 4a-4d). Las evidencias, en su totalidad de origen europeo-criollo, comprenden dos grandes categorías: (1) elementos de índole náutica, asociados a la estructura y carga de un barco de madera; y (2) enseres de diverso tipo vinculados con la vida cotidiana (véase más abajo). En la superficie de la barranca también se observaron lascas, núcleos y desechos líticos y una lente de valvas marinas, asociados a la presencia indígena en la zona.⁴

Una primera interpretación del contexto y la materialidad asociada permitió proponer que se trata de los restos de una ocupación temporal, o bien de un grupo de náufragos, o bien de pobladores

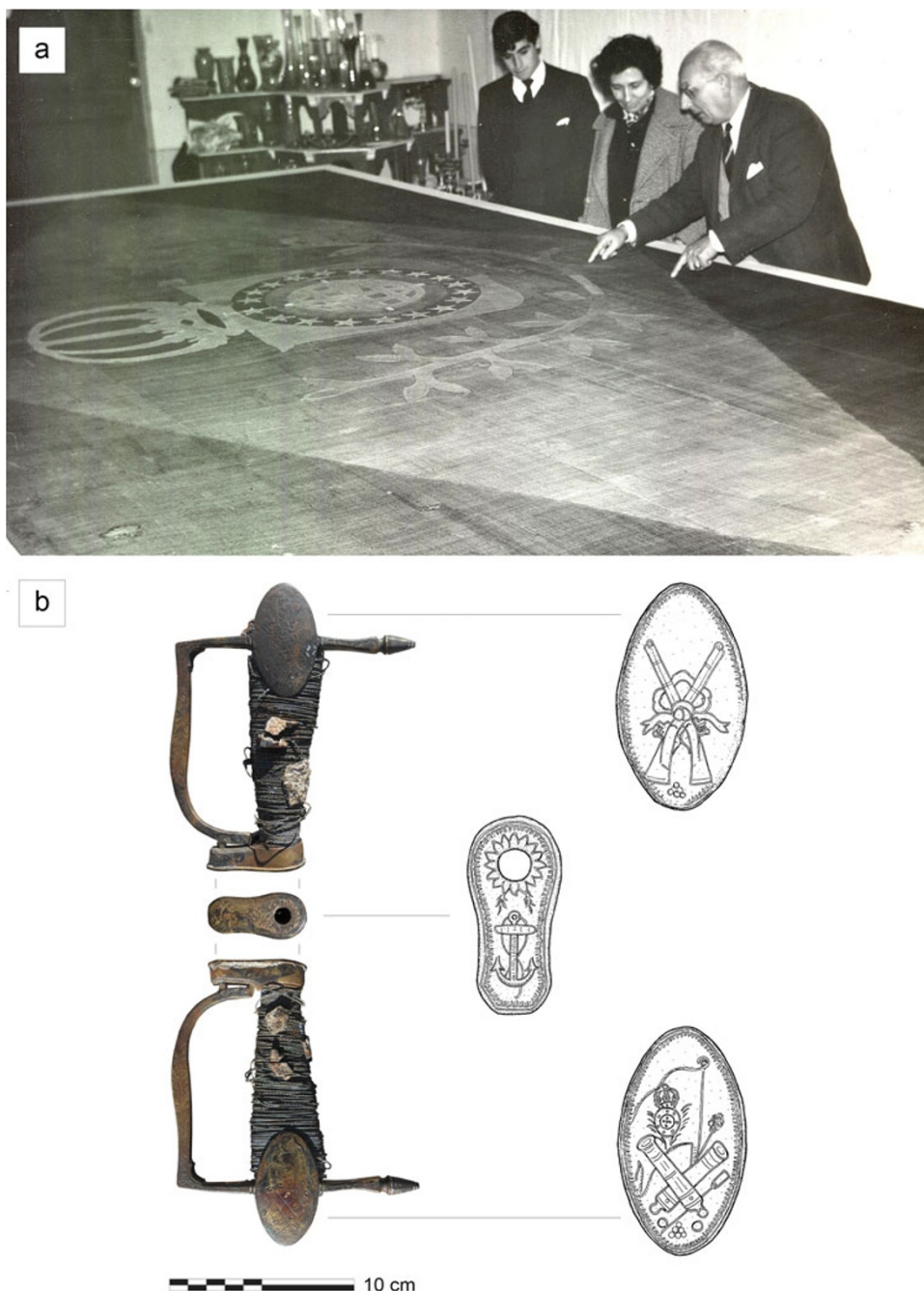


Figura 2. Evidencias materiales vinculadas con la Guerra del Brasil, localizadas en Patagones: (a) foto histórica (1965) de uno de los pabellones navales con el escudo de armas de Pedro I; (b) empuñadura de sable de marina e ilustración de los rasgos iconográficos del pomo (ancla con cepo de madera coronada por un sol) y los escudetes (en uno, dos cañones cruzados con balas de cañón y un atacante, junto al pabellón del Imperio de Brasil; y en el otro, dos fusiles cruzados con un arreglo de cintas). Los dibujos de estos están escalados al 200%. Foto (a) Museo Histórico Regional “Emma Nozzi”; (b) dibujos de Ana Castelli y foto por Nicolás Ciarlo. (Color en la versión electrónica)

locales. Durante este breve asentamiento se habrían recuperado y aprovechado parte de los restos de un barco de madera, naufragado hacia la primera mitad del siglo diecinueve. Los estudios arqueológicos e históricos posteriores permitirían contrastar esta hipótesis y precisar las características del sitio y sus ocupantes.



Figura 3. Contexto general del sitio en 2023: (a) vista desde la línea de médanos (la camioneta marca el límite de la barranca); (b) sector de playa, en dirección al sur; el sitio se localiza sobre la barranca observable a la derecha. Fotos de Ana Castelli. (Color en la versión electrónica)

A fin de conocer la forma, contenido y estructuración del sitio, en 2023 se realizó un total de cinco sondeos de 1×1 m en las áreas de mayor densidad de artefactos en superficie. Estos permitieron evaluar la potencia y distribución en estratigrafía de los hallazgos (Figuras 4e-4g). Se avanzó por niveles artificiales de 5 cm hasta 15 cm de profundidad, considerado estéril. Toda la fracción excavada fue revisada en zaranda. En líneas generales, los restos se concentran en la superficie y el primer nivel. De

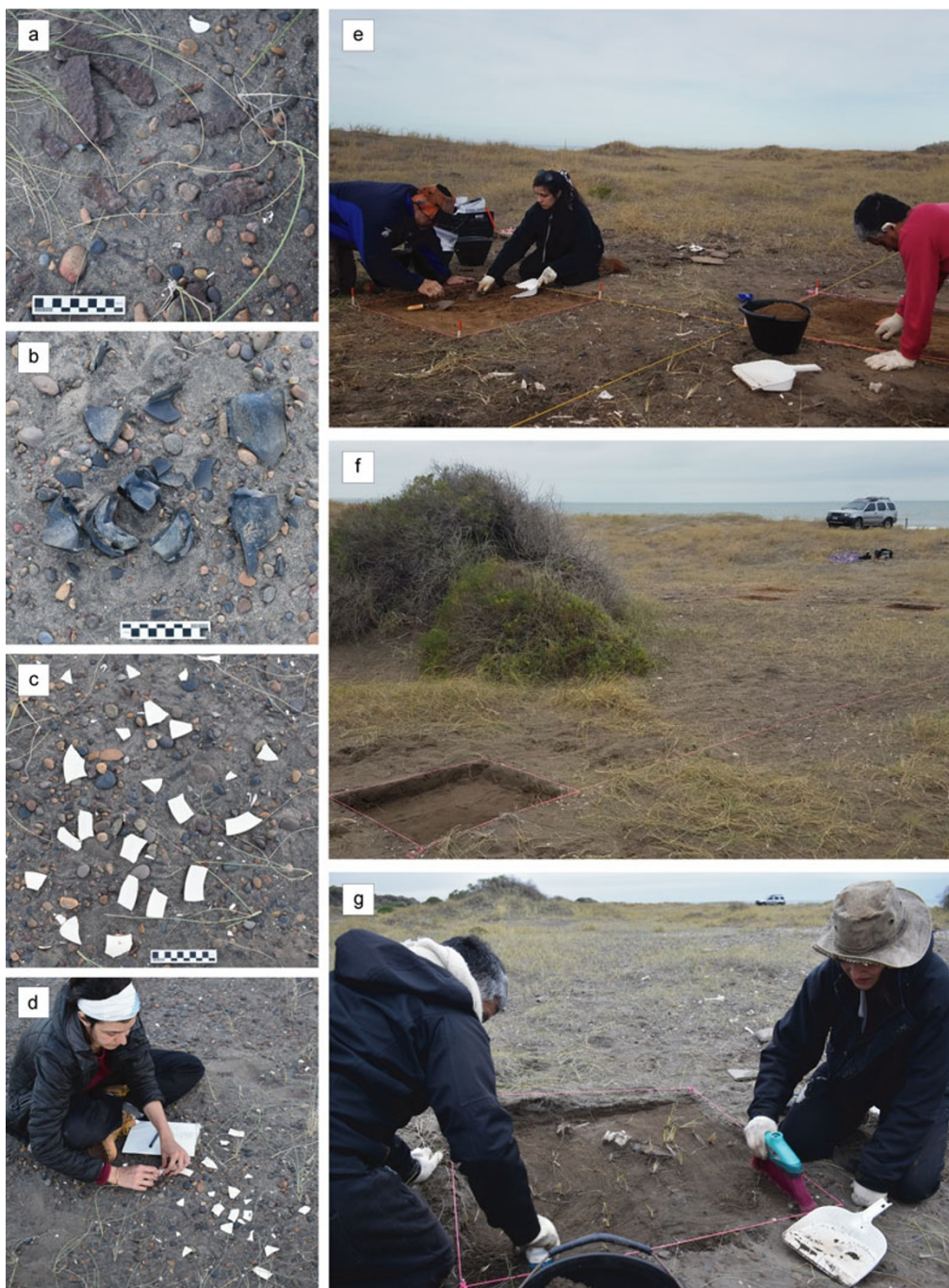


Figura 4. Evidencias materiales y labores arqueológicas en el sitio FSB-4: (a-d) fragmentos de metal, vidrio y cerámica localizados en superficie en 2021; (e-g) sondeos estratigráficos realizados en 2023. Fotos de Carlos Landa y Nicolás Ciarlo. (Color en la versión electrónica)

forma complementaria, se realizaron dos sondeos de $30 \times 30 \times 50$ cm para examinar la matriz sedimentaria. En las áreas libres de médanos, se registraron dos tipos de sustrato: uno principalmente arenoso; y otro, formado por una fina capa de arena (donde se concentran los materiales estudiados) seguida de una capa más arcillosa y compacta de color rojizo.

La distribución de los restos presenta un elevado grado de resolución al interior de sitio. Los objetos de cerámica y vidrio (e.g., platos y botellas) están fragmentados, aunque varios ejemplares exhiben notable coherencia en superficie al remontar sus partes. En términos de preservación, existe una diversidad de situaciones, en parte resultante de la relación entre las propiedades fisicoquímicas de los materiales y las variables imperantes en un ambiente costero. Los elementos de hierro, por caso, se encuentran entre los más afectados a nivel estructural. Todos los materiales recuperados se encuentran actualmente en proceso de conservación y análisis.

A continuación, se exponen los primeros resultados del estudio tecno-tipológico de una selección de los elementos clasificados en los dos grupos antes mencionados.

Estudio preliminar de las evidencias materiales

Enseres de uso cotidiano

Este conjunto comprende los materiales vinculados con la alimentación, indumentaria, armas, adorno personal y otras pertenencias (Figuras 5-7).

Durante la inspección superficial se ubicaron múltiples fragmentos cerámicos pertenecientes a vajilla de loza (*refined earthenwares*, en inglés) y, en menor medida, a contenedores de alfarería. Por un lado, se registraron fragmentos de platos y presumiblemente al menos un plato ovalado de loza blanca, de vidriado claro, sin decoración ni marcas de fabricante (Figura 5a). Este tipo, denominado *whiteware*, fue resultante de una reducción gradual de los tintes azules empleados en el vidriado



Figura 5. Utillaje de cerámica: (a) loza blanca, de vidriado claro y sin decoración (plato ovalado); (b) fragmento de loza, con decoración policroma pintada con motivos florales (tapa); (c) fragmento de vasija alfarera torneada de pasta roja, con vidriado interior y exterior. Fotos de Ana Castelli.



Figura 6. Contenedores y otros elementos de vidrio: (a) cuello y terminación de botella de sección circular; (b) base (vista superior) del mismo tipo de botella; (c) base (vista lateral) de botella de sección cuadrada; (d) cuello y hombro (vista superior y lateral) del mismo tipo de botella; (e) vidrio plano; (f) tapón de botella. Fotos de Ana Castelli.

de los tipos de loza producida en forma masiva industrial ya existentes, *creamware* y *pearlware*; este producto dominó el mercado británico e internacional tras el período de transición 1820-1830 (Brooks 2005:35). Por otro lado, destaca una tapa de loza, que exhibe decoración policroma pintada con motivos florales y una banda perimetral (Figura 5b). La decoración pintada, una técnica aplicada a mano antes de la cocción de la pieza se volvió más recurrente en lozas del tipo *creamware* y *pearlware* después de 1772, cuando la tecnología para refinar el cobalto necesario para las pinturas azules se introdujo en Staffordshire, Inglaterra (Miller 1991:7). Hacia 1795 varios otros colores que podían resistir las altas temperaturas del proceso de cocción comenzaron a ser utilizados (Hume 1982:129). Estos



Figura 7. Armas, indumentaria y objetos personales: (a) piedra de chispa de fusil; (b) anverso y reverso de botón circular plano, liso; (c) anverso y reverso de botón circular ligeramente convexo, con el busto de la diosa Minerva; (d) vistas de una cuenta tubular y facetada de vidrio azul; y (e) anverso y reverso de sello de plomo con el escudo del Imperio del Brasil. Los dibujos de las piezas (c) y (e) están escalados al 200%. Fotos y dibujos de Ana Castelli.

colores incluían el marrón, amarillo mostaza y verde oliva, los que continuaron siendo comunes durante la década de 1820 y con frecuencia se emplearon para la decoración de motivos florales en servicios de té (Miller 1991:8).⁵ Por último, se registraron fragmentos de una vasija alfarera torneada de pasta roja con aplicación de vidriado interior y exterior. Los ejemplares de tradición alfarera hispana denominados genéricamente botijas u *olive jars*, fabricados en España y América, han sido objeto de extensa investigación arqueológica. A partir de los trabajos de Goggin (1960), se construyeron

tipologías que abarcan desde el siglo dieciséis hasta tiempos republicanos tempranos. Por su parte, el material cerámico alfarero de Gran Bretaña y los Estados Unidos con posterioridad a 1760 aproximadamente se denomina genéricamente *redware*, período donde deja de ser el tipo cerámico dominante debido a la introducción de la loza (Brooks 2005:32). El material alfarero recuperado del sitio resulta limitado y no permite por ahora mayores inferencias.

Por otro lado, se localizaron botellas de vidrio color verde oscuro y opaco (o vidrio “negro”), muy fragmentadas. La muestra comprende cuellos, hombros, cuerpos y bases, de sección circular y cuadrangular (Figuras 6a-6d). Ninguna presenta inscripciones. En el caso de las tubulares, su coloración y morfología son consistentes con la clase 1, tipo 3 (botellas de bebidas alcohólicas, e.g., cerveza y brandy) de la tipología usada por Switzer para estudiar la colección del vapor *Bertrand*, 1864 (Switzer 1974:16-18). A nivel tecnológico, siguiendo a Jones y colaboradores (1989), los cuellos son abultados y con una terminación (pico o gollete, aplicado sobre el cuello) doble, formada por un labio y un anillo con perfil en V; las bases, acampanadas, tienen marca de pontil. Aunque no se registraron otras marcas, la morfología general de las piezas sugiere que fueron sopladas en molde, abierto o de inmersión (*dip mold*, en inglés) o de bisagras (*hinged mold*, en inglés), en particular de dos o tres partes. El de dos mitades fue usado a partir de la segunda mitad del siglo dieciocho y durante parte importante del siglo diecinueve, mientras que el de tres piezas fue patentado por Henry Ricketts en 1821. Este último, o similares, fueron los preferidos para botellas circulares (Dungworth 2012:39-40, figura 1; Jones et al. 1989:24-30; Lorrain 1968:37-38). También se hallaron fragmentos de botellas cuadriláteras, con hombros chatos y un cuello corto (Figuras 6c-6d). Corresponden al tipo popularmente conocido como *case bottle* (en inglés), utilizadas para diferentes licores (e.g., ginebra, whisky, brandy; Jones y Smith 1985:14-15; Jones et al. 1989:72, figura 66). La forma del cuerpo y marcas de la base indican que fueron sopladas en un molde de inmersión y que se usó un pontil para dar forma al pico, de tipo rudimentario (clasificación II-a, c, según Moreno 1997:11). Entre los objetos de vidrio incoloro, destaca la presencia de varios fragmentos planos y delgados que podrían pertenecer a un farol prismático de vela (Figura 6e); y un pequeño tapón con remate redondeado (Figura 6f), asociado a partes de contenedores de similar composición, posiblemente de perfumería/medicina.

A la fecha, la única evidencia de armas de fuego localizada en el sitio consiste en un fragmento de piedra de chispa, de la que se conserva el borde activo y parte de la plataforma (Figura 7a). Las piedras de chispa eran un insumo esencial del mecanismo de ignición de fusiles y otras armas personales de avancarga y ánima lisa utilizadas a lo largo del siglo dieciocho⁶ y parte del siglo diecinueve. A partir de la década de 1820, este sistema fue sustituido de forma paulatina por el de percusión mediante cápsula de fulminante, aunque su aplicación regular dentro del ámbito militar no ocurrió hasta 1840-1850 (Fehr 2021:53-55; Scott 2020:2-3). Al respecto, cabe señalar que este tipo de armas siguió en uso hasta la segunda mitad de la centuria, sobre todo en contextos de frontera, incluso junto a rifles de retrocarga (Landa et al. 2009; Leoni 2014). Los principales productores de piedras de chispa fueron Francia e Inglaterra, destacando la producción a gran escala de este último país a partir de las dos últimas décadas del siglo dieciocho. Normalmente se utilizaron sílices de alta calidad para la talla, que presentaban diferencias de coloración según su procedencia (véase Austin 2011). En el caso de Inglaterra, predominaron tonos que varían entre el negro traslúcido y el gris opaco (Kenmotsu 1990:95). Las características de la pieza del sitio FSB-4 son consistentes con el tipo de materia prima y la forma (prismática o de plataforma) características de esta procedencia, fabricadas luego de 1775 (de Lotbiniere 1984:206-207). Ejemplares importados desde Europa han sido registrados en varios sitios arqueológicos de Pampa-Patagonia (véase Buscaglia et al. 2016).

Con relación a la indumentaria, se hallaron dos botones circulares de base cobre. Uno es plano y tiene la presilla, de un material similar y soldada a la base, junto a remanentes del hilo utilizado para fijarlo a la prenda (Figura 7b). La superficie, parcialmente concrecionada, a simple vista no presenta motivos decorativos. La pieza guarda semejanzas con una variante de botones fundidos, con marcas concéntricas de torneado en su parte posterior. Estos botones de uso civil y militar fueron catalogados por Olsen como tipo D, alrededor de 1760-1785 (Olsen 1963:552-553, figura 1d) y por Hinks, como 2B2, con una cronología previa a 1830 (Hinks 1988:86, 119-121). El otro ejemplar del sitio

FSB-4, en cambio, es ligeramente convexo y probablemente tenía una presilla tipo “alfa” soldada a la base, de la que sólo se preserva el punto de unión. Los botones realizados a partir de un disco de cobre y con esta clase de anilla fueron usados durante 1770-1800 aproximadamente; podían lucir diseños grabados (o estampados, los más tardíos) y estaban usualmente dorados o estañados (Hinks 1988:59-60; Olsen 1963:552-553, figura 1g). En particular, dada su morfología, puede identificarse con el tipo 6A2, alrededor de 1770-1810 (Hinks 1988:88, 127). La pieza, además, exhibe en su cara frontal el busto de Minerva (diosa romana de la guerra y la navegación, entre otras artes), circunvalada por la leyenda partida *MIN* y *ERVA* (Figura 7c). Es probable que este último perteneciera a una prenda de uniforme militar.

Entre los elementos de adorno, se hallaron dos cuentas tubulares y facetadas de vidrio azul (Figura 7d), pertenecientes a las denominadas cuentas de intercambio (*trade beads*) y conocidas popularmente como cuentas rusas. Estas últimas, en particular, podían ser monocromas o policromas (Sprague y Bowers 1985:91). Siguiendo la clasificación desarrollada por Kidd y Kidd (2012), los ejemplares hallados corresponden al tipo policromo y a la Clase IIIf2: cuentas tubulares compuestas, de color ultramarino (exterior) y turquesa suave (interior), con las caras facetadas (Kidd y Kidd 2012:42, figura 3). Karklins clasifica a estas cuentas (hexagonales, heptagonales u octogonales) en la categoría IIIf; y a las variantes policromas, sin esquinas y hexagonales, como IIIf*a (Karklins 2012:65). Cuentas de similar diseño y materia prima fueron halladas en numerosos sitios de América y África (Koleini et al. 2019:figura 2). Por ejemplo, a raíz de un hallazgo realizado en una cabaña de esclavos en la Isla Cumberland, en los Estados Unidos, estos adornos se han vinculado al tráfico de esclavos desde África o al comercio entre grupos nativo-americanos y euroamericanos a comienzos del siglo diecinueve (Ascher y Fairbanks 1971:8). El referido ejemplar, similar a las cuentas del sitio FSB-4, fue catalogado hacia el período 1790-1850 aproximadamente (Cornell University Library 2012-2013). Venecia fue un importante centro productor de este tipo de cuentas, que más tarde fueron copiadas con ligeras diferencias por los fabricantes de Bohemia. Estas copias, más tardías, son de un color azul más profundo y poseen un mayor tamaño (Francis 1979:10-11).

Por su relevancia para la interpretación del sitio, destaca el hallazgo de un pequeño disco metálico monetiforme, posiblemente de plomo (Figura 7e). La pieza no está completa y tiene un peso de 2,08 g. En el anverso, se distingue una inscripción en el centro del campo que podría corresponder a un dígito o letra, mientras que parte del perímetro luce una serie de elementos romboideos formando un arco de círculo. En el reverso, lleva impreso el escudo de armas del Imperio del Brasil, similar al que se utilizó en Bahía y Río de Janeiro para la acuñación monetaria a partir del reinado de Pedro I, 1822-1831 (Amato et al. 2008), que también lucen los dos pabellones navales mencionados más arriba. En particular, puede apreciarse parte del escudo, con el orbe central rodeado por un anillo de estrellas, y la corona por encima de este. Debido al deterioro perimetral, apenas se vislumbran las ramas de café y tabaco que lo adornan a diestra y siniestra, respectivamente. No obstante, en ninguna de sus caras presenta evidencia de los rasgos típicos de una moneda: gráfila, leyenda, fecha de emisión y letra monetaria (ceca). Dadas sus características, es probable que la pieza corresponda a un tipo particular de sello de plomo (*selo de chumbo*, en portugués), concretamente utilizado como marcador de documentos o mercancías del estado (véase de Sousa 2016).

La materialidad estudiada permitió circunscribir temporalmente el conjunto hacia la tercera o cuarta década del siglo diecinueve. Los objetos habrían sido empleados por los ocupantes del sitio en diferentes actividades. La concentración que presentan algunos de los materiales, como el conjunto de cuchillos descrito más abajo, sugiere que pudieron encontrarse intencionalmente agrupados (por ejemplo, almacenados) al momento en que se abandonó el campamento.

Elementos náuticos

Dentro de esta categoría, concentrados en su mayoría en un área específica del sitio (sector A; véase Figura 1b), se localizaron numerosos elementos de hierro y aleación de cobre aislados, identificados preliminarmente como parte de la estructura y carga de un barco de madera (Figura 8). Destaca la presencia de pernería de hierro, en particular un perno con cáncamo (McCarthy 2005:182; Figura 8a). También se registraron numerosos clavos medianos y pequeños de hierro (Figura 8b) y

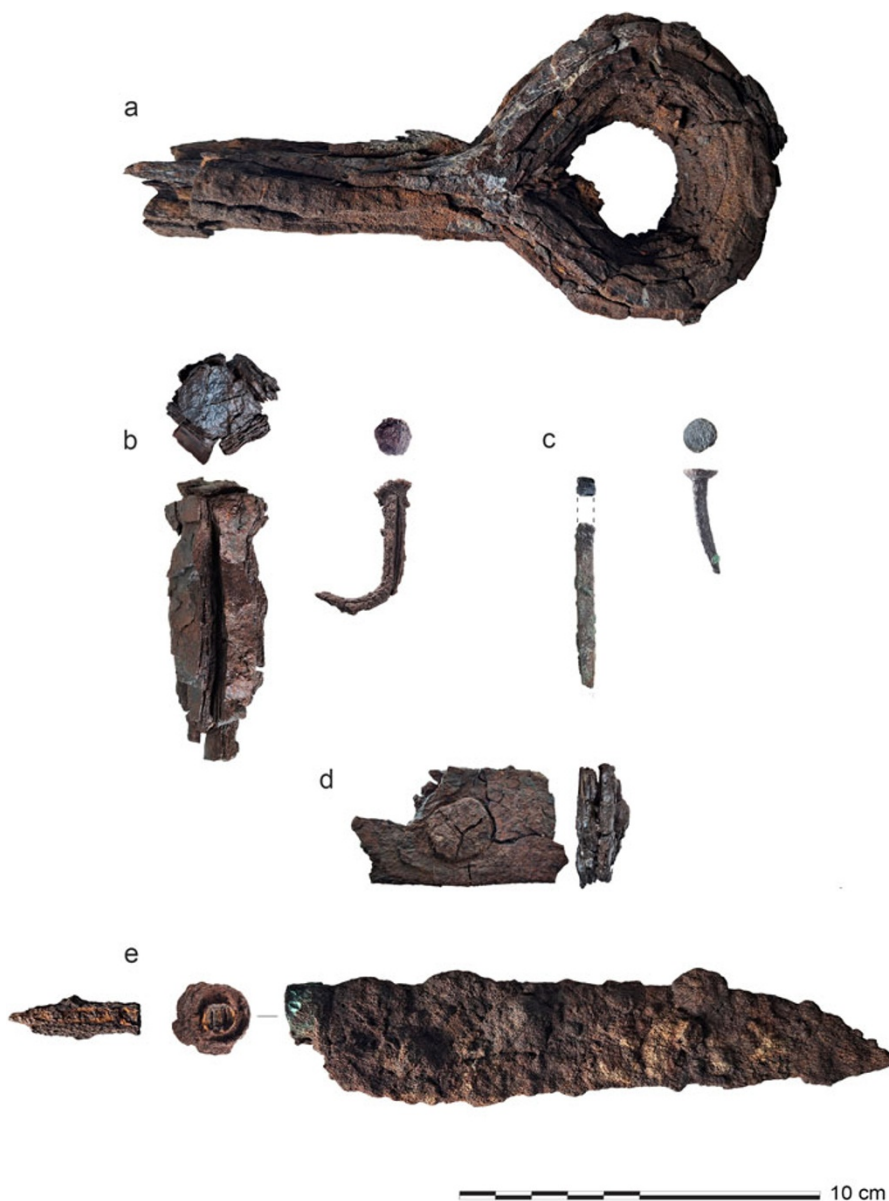


Figura 8. Objetos metálicos de uso naval: (a) perno con cáncamo, de hierro; (b) clavos de hierro, mediano y pequeño; (c) clavos pequeños (fragmento del astil) y tachuela de aleación de cobre; (d) fragmento de zuncho de hierro; y (e) hoja de cuchillo con botón circular y espiga (quebrada) tipo cola de ratón. Fotos de Ana Castelli.

pequeños clavos y tachuelas de aleación de cobre, relativamente en mejor estado de preservación (Figura 8c).

La pernería y clavazón de base cobre se introdujo en los barcos de madera de las armadas europeas y, tiempo después, en las marinas mercantes, hacia el último tercio del siglo dieciocho. Estos elementos se usaron para fijar las piezas estructurales del casco, por debajo de la línea de flotación, de aquellas naves que estaban revestidas con cobre (o aleación de cobre). Las tachuelas, por su parte, servían para sujetar las planchas de este sistema de protección. Por otro lado, las piezas de hierro continuaron utilizándose en la obra muerta y en aquellos sectores que no estaban en contacto con el forro de cobre (véase Ciarlo 2017, 2023, entre otros).⁷

En el mismo sector, sobre la superficie, yace dispersa una amplia cantidad de fragmentos de flejes de hierro (Figura 8d). Aunque el deterioro de estos también es significativo, es probable que se trate de restos de zunchos de toneles. Desde época moderna temprana, este tipo de recipientes se utilizaron en diferentes tipos y tamaños para transportar diversidad de productos a bordo, entre los que se cuenta la provisión de víveres, municiones y otros pertrechos para el viaje (Twede 2005:256-257).

Por otro lado, en el sector C se hallaron varios cuchillos (Figura 8e). Al igual que otros objetos, pese a su estado fragmentado, aparecen formando una concentración discreta (véase Figura 4a). Los restos corresponden a las hojas, muy concrecionadas; parte de la espiga y el botón, este último redondo y hecho con una lámina de base cobre. El tipo de botón y la espiga, del tipo cola de rata, indican que iban engastadas en un mango sencillo, posiblemente de madera, que no se conservó. En función de estas características, se definió un número mínimo de cuchillos ($n = 7$). Las hojas tienen una extensión de aproximadamente 15 cm (aproximadamente 19 cm, si se considera la espiga). Su forma presenta un filo recto y un lomo que hacia el centímetro 11 comienza a curvarse hacia el filo, conformando una punta no aguzada. Dicha morfología guarda parecido con los tipos denominados pie de oveja (*sheepfoot*, en inglés) o punta de acantilado (*Wharncliffe*; Domenech 2003:255, 276-277). Esta clase de hojas se caracteriza por su óptima maniobrabilidad para cortar, desbastar o tallar, y poseen una guarda inferior que impedía el deslizamiento de los dedos sobre el filo. Semejantes cualidades eran muy útiles a bordo de las embarcaciones para diferentes tareas, como el laboreo en cubierta y con la jarcia (Luce 1868:lámina 24, figura 204). Además, al carecer de punta aguda y contrafilo en su lomo, evitarían lesiones accidentales o intencionales de gravedad (Smith 1990:18-20). La uniformidad que presenta el conjunto sugiere que puede tratarse de un lote de piezas para el uso común por parte de la marinería.

Teniendo en cuenta el contexto de hallazgo, es probable que los materiales asociados a la arquitectura naval hayan sido recuperados de un pecio localizado en cercanías del lugar, por ejemplo, recolectando los despojos arrastrados a la playa por el propio mar. En cuanto a los barriles y cuchillos, es probable que estos y otros enseres hayan sido parte de los pertrechos llevados a la playa durante las habituales maniobras de rescate en situaciones de encalladura.

Una propuesta para la identificación del Sitio FSB-4

Desde un punto de vista arqueológico, la identificación del sitio FSB-4 se llevó a cabo con base en el análisis de los siguientes aspectos:

1. Ubicación: al sur de la entrada a Bahía San Blas, en un área de navegación riesgosa y frente a la playa, en lo alto de una planicie que en el período histórico ha permanecido exenta de la acción de las mareas.
2. Tipo de materialidad: elementos vinculados a la alimentación, indumentaria, armas, adorno personal y otras pertenencias, junto a restos pertenecientes a la estructura y carga de un barco de madera.
3. Distribución y estratigrafía: concentraciones discretas de materiales, que se localizan en un suelo arenoso principalmente a nivel de superficie y se extienden hasta 5 cm de profundidad.

Considerando lo anterior, la hipótesis planteada es que el conjunto corresponde a un campamento de naufragos de corta duración, donde predominan materiales de origen europeo-criollo adscritos en su mayoría a un período entre finales del siglo dieciocho y el primer tercio del siglo diecinueve. En estos momentos el establecimiento permanente más cercano era Carmen de Patagones, sito a unos 60 km en línea recta.⁸

Del conjunto analizado, objetos tales como el sello con el escudo de armas del Imperio del Brasil, el botón con el busto de Minerva y los cuchillos marineros son indicadores de singular importancia para evaluar la filiación sociocultural y funcional del campamento, habida cuenta de las actividades bélicas y corsarias desarrolladas en Patagones en el marco de la Guerra del Brasil.

Esta guerra tuvo dos teatros de operaciones, uno terrestre y otro fluvio-marítimo. El bloqueo de los puertos, el de Buenos Aires principalmente, buscó impedir el acceso de los barcos de comercio de

bandera nacional y extranjeros (Carranza 1962a; Piccirilli 1967; Ratto 1945, entre otros). No obstante, las actividades desarrolladas en Carmen de Patagones y la Bahía San Blas socavaron los intereses del imperio. En estos puertos, como ya se anticipó (véase la sección arriba, “El proyecto Patagones”), recalaban los corsarios que operaban a lo largo de la costa septentrional del Brasil y se llevaba a cabo el tráfico comercial internacional (Baldrich 1905:302; véase Caillet-Bois [1935] para más información sobre el impacto del corso). Este escenario condujo a las fuerzas brasileñas a emprender dos expediciones navales a Patagones.

Tras una primera campaña naval fallida, entre febrero y marzo de 1827 (véase Carranza 1962a:425-434; García Enciso 1977; González Lonzieme 1988, entre otros), la armada del Brasil llevó adelante una segunda expedición en octubre del mismo año, con una escuadra que partió desde Montevideo por órdenes del Almirante Pinto Guedes y bajo el mando del Capitán de Fragata Guillermo Eyre. En esta segunda ocasión, la corbeta *Masías* (*Maceió*, en portugués) y el bergantín *Independencia o Muerte* (*Independência ou Morte*, en portugués),⁹ encallaron el 21 de aquel mes al intentar ingresar a la Bahía San Blas. Ambas embarcaciones terminaron destrozadas por el fuerte oleaje y viento del sudeste, con la pérdida de alrededor de 50 hombres. Anoticiados de este nuevo avance enemigo, un contingente de Patagones se acercó a la zona y apresó a un grupo de sobrevivientes (véase más abajo). Sólo una de las naves brasileñas, el bergantín *Caboclo*, logró regresar a Montevideo, llevando parte de las tripulaciones de los otros dos barcos (Baldrich 1905:306-307; Barroso 1938:181; Benencia 1979:89; Carranza 1962b:311; González Lonzieme 1988:397).

A la fecha, se desconoce el lugar preciso donde naufragaron estas naves. Algunas fuentes documentales e historiográficas refieren de forma vaga a “la Boca de San Blas” (Benencia 1979:89, 91); “frente a la Bahía de San Blas” (Benencia 1979:97); o “la entrada de la Bahía de San Blas” (Carranza 1962b:311). Otras mencionan la pérdida “en el banco del infierno” (de Alzogaray 1934:145); o “en uno de los numerosos bancos que forman el canal de ingreso al puerto” (González Lonzieme 1988:397). Protagonistas del evento también aportaron información sobre las circunstancias de hundimiento. El propio comandante de la expedición informó la secuencia de los hechos y maniobras realizadas; destacó que se salvaron 83 personas, que el bergantín *Independencia o Muerte* se hizo pedazos a las 21 horas del día 21, y que la corbeta *Masías* se partió en dos mitades la noche del 22 (Boiteux 1921:296). Sin embargo, Eyre no brindó mayor detalle acerca de la ubicación.

La referencia más cabal sobre el sitio del accidente fue suministrada por el comandante del bergantín *Independencia o Muerte*, el Capitán-Teniente Francisco Cleare (Clarck o Clark). Así lo relata en una nota oficial con fecha 28 de octubre de 1827, reproducida de forma parcial en el *Diario* de Álvaro de Alzogaray (1934:166-167; énfasis nuestro):

Haviendome separado, de los otros buques, me encontré con ellos el 19, un poco al Sur de S.ⁿ Blas: la Corbeta Masaió había echado al agua 12 cañones durante los últimos temporales. . . . El 21, a las 2 de la mañana hicimos otra tentativa p.^a entrar; fondeamos en 5 brazas . . . los buques iban procediendo en el sig.^{te} orden. —Independencia, Masaió y Caboclo. A las 4 de la m.^a, los 2 primeros buques vararon en 2 1/2 brazas. El Caboclo observando esto se retiró. Los buq.^s varados estaban como *a media legua de la playa mas cercana, Punta Rubia demoraba al N. cerca de 4 millas, y Punta Rasa al S.E. tres leguas*. . . . Se hicieron esfuerzos p.^a safar los buques, p.^{ro} en vano, y en 10 minutos alg.^s de las tablas del Independencia estaban flotando a su costado. A las 5 de la man.^a el Cap.ⁿ Eyre vino á bordo del Independencia, y ordenó que se destruyese. No pudimos conseguir el hacerlo, pues el berg.ⁿ se fue á pique inmediatamente. . . . Viento fuerte del S.E. Fui á bordo de la Masaió, y se hizo todo lo posible p.^a salvarla, p.^{ro} sin efecto.

A partir de las distancias referidas por Cleare con referencia a puntos geográficos conocidos de la costa¹⁰ y de la profundidad aproximada a la que encallaron los barcos, fue posible acotar un polígono tentativo (véase Figura 1a). Una discusión pormenorizada sobre la posible ubicación actual de los pecios será motivo de otro estudio. En este punto, cabe destacar que el sitio FSB-4 yace frente al área en cuestión.

Entre las medidas adoptadas por los naufragos, la búsqueda de refugio en tierra fue primordial. En las fuentes primarias y secundarias consultadas, no consta la instalación de un campamento previo al

encuentro con las tropas de Patagones, el día 22 de octubre al amanecer. Pese a ello, lo anterior se puede suponer de las siguientes referencias sobre el destino de los sobrevivientes: “Quedan prisioneros 2 jefes, 4 oficiales y 78 individuos de tripulación y artilleros. Se han ahogado según informes de los mismos prisioneros, cerca de cincuenta hombres” (relato de Ramón Rodríguez, comandante de Patagones, reproducido por de Alzogaray 1934:146); y “más de 50 hombres se ahogaron, unos 80 escaparon a tierra, y el resto logró refugiarse en el bergantín *Caboclo*” (memorias del Almirante Guillermo Brown, publicadas por Bosch 1955:134). Las fuentes historiográficas reproducen un panorama similar: “ochenta se entregaron en tierra a los mismos defensores de Patagones” (Caillet-Bois 1935:26); y “como ochenta se refugiaron en tierra” (Carranza 1962b:311).

Teniendo en consideración el lugar aproximado donde naufragaron las naves, así como las evidencias del sitio FSB-4, es posible afirmar que este último correspondería al lugar en el que los marinos brasileños encontraron refugio antes de ser apresados. Asimismo, las evidencias registradas son consistentes con la materialidad que cabe esperar en una situación de abandono repentino como la que experimentaron los marinos brasileños. Aunque las expectativas arqueológicas de una ocupación tan efímera (1-2 días) son bajas, como ha ocurrido en otros casos de campamentos de corta duración (e.g., Acevedo y Grosso 2000), las particulares condiciones naturales del entorno y el escaso impacto antrópico posibilitaron la preservación de los restos vinculados a este evento.

Conclusiones y perspectivas

Las evidencias materiales y documentales analizadas en este trabajo permitieron interpretar el sitio FSB-4 como los restos de un campamento de naufragos asociado a las acciones navales desarrolladas en la zona de Carmen de Patagones y Bahía San Blas en el marco de la Guerra contra el Imperio del Brasil. Este sitio, debido a su exclusividad y potencial, reviste especial interés tanto para la historia local y regional como para las investigaciones en arqueología marítima y náutica de América del Sur.

Partiendo de los resultados alcanzados, en una etapa subsiguiente de trabajo en el sitio se profundizará el análisis del contexto y de los restos asociados a través de un muestreo sistemático de superficie, sondeos y excavaciones en extensión de los sectores con mayor concentración de materiales. ¿Qué eligieron salvar durante el naufragio?, ¿qué pudieron rescatar con posterioridad?, ¿qué utilizaron y para qué?, ¿por qué eligieron este espacio?, ¿cómo se organizaron y qué consumieron?, ¿qué relaciones entablaron entre sí y con otros actores?, son algunas de las preguntas que surgen y que podrán ser evaluadas.

Por otro lado, considerando las investigaciones arqueológicas realizadas en sitios de la misma costa con presencia de cazadores-recolectores (véase la nota 4), un análisis integral de las evidencias materiales del sitio permitirá evaluar si el campamento fue instalado en un sector habitado por grupos locales con anterioridad. Incluso, aunque por el momento no se han hallado registros documentales que lo sugieran, podrá discutirse la posible vinculación entre los restos europeo-criollos reportados y un asentamiento de población indígena (toldería) instalado allí con posterioridad.

Finalmente, a la luz de la información documental y tomando como eje la ubicación del sitio FSB-4, se prevé realizar prospecciones en el frente marítimo, utilizando equipamiento geofísico y técnicas de buceo, con el fin de localizar y estudiar restos naufragos que se encuentren en la franja submareal. Lo anterior permitiría confirmar si el denominado campamento de naufragos está asociado a los sobrevivientes de la corbeta *Masías* y el bergantín *Independencia o Muerte*, u a otra nave presa del corso que se perdió en inmediaciones del lugar durante la guerra.

Agradecimientos. El estudio del sitio FSB-4 contó con el permiso de la Dirección Provincial de Museos y Preservación Patrimonial de la Provincia de Buenos Aires (No. 2020-3-A-203-1). Los autores reconocen a los demás integrantes y colaboradores del proyecto Patagones, así como a todas aquellas personas que han hecho posible este trabajo. Agradecen a Diego Sberna y Sebastián Ávila, por su inestimable asistencia durante los trabajos de campo; a Daniel Rochetti, por el apoyo e información brindada; y a Jesús Martínez, por facilitar el acceso a la empuñadura de sable. A Verónica Aldazabal, Jorge Funes y Laura Staropoli, por su asesoramiento y contribución bibliográfica. A Paula Moura Aranha y Damían R. Salgado, por su asesoría numismática. Un especial agradecimiento a Jorge Mansilla, Karina Pereyra y Bautista Castelo, quienes nos abrieron las puertas para investigar el sitio. Finalmente, a lo/as tres evaluadore/as del manuscrito, por sus valiosos aportes.

Declaración de financiamiento. El estudio del sitio FSB-4 fue financiado por el Institute of Nautical Archaeology (INA) de la Universidad de Texas A&M (INA Discovery Fund, 1/2021 al 12/2022) y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT; PICT no. 2020-02117; 8/07/22-08/07/24). Además, contó con el apoyo del Museo Histórico Regional “Emma Nozzi” del Banco Provincia de Buenos Aires y su Asociación de Amigos; del Departamento de Balizamiento del Servicio de Hidrografía Naval de la Armada Argentina (Faro Segunda Barranca); y de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), por medio del programa Iniciativa Científica Milenio (NCS2021_040).

Declaración de disponibilidad de datos. Toda la información suministrada en este artículo está disponible en el Instituto de Arqueología de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires.

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declaran que no hay ningún conflicto de intereses.

Notas

1. La intensidad de la navegación en la zona también experimentó un alza gracias a las expediciones hidrográficas del almirantazgo británico para cartografiar las costas meridionales de Sudamérica (1826-1836).
2. El Museo Histórico Regional “Emma Nozzi” del Banco Provincia de Buenos Aires y el Museo Carmen de Patagones de la Prefectura Naval Argentina resguardan varios elementos pertenecientes a la estructura y equipamiento del barco.
3. La pieza muestra indicios de haber permanecido en un medio acuático salobre. La empuñadura está decorada en el pomo, guardamano, gavlán y escudetes; estos motivos sugieren que la pieza corresponde a un sable de oficial de marina brasileño.
4. A nivel arqueológico, entre el Faro Segunda Barranca y Punta Rubia se han reportado varios sitios de grupos cazadores-recolectores previos a la presencia europeo-criolla en la región, evidencia de la extensión de las ocupaciones en la costa (véase Aldazabal et al. 2011). Cabe citar los concheros con restos de talla lítica al norte y sur del sitio FSB-4, e.g., sitios Las Olas 5 y Castelo 1, respectivamente (Eugenio y Aldazabal 2004:692-693; Sanguinetti de Bórmida et al. 2000:329-330).
5. Debido a que el conjunto data del período transicional 1820-1830, con frecuencia la decoración resulta más relevante en términos diagnósticos que el tipo específico de loza.
6. El uso más temprano de esta tecnología se remonta a mediados del siglo dieciséis (de Lotbiniere 1984:207).
7. Procedentes de este sitio, aunque fuera de contexto, también se registraron dos clavos de aleación de cobre del tipo *spyke* (McCarthy 2005:176). Estos fueron muy utilizados en los barcos con revestimiento de base cobre, para fijar las tablas del forro externo a las cuadernas bajo la línea de flotación.
8. Hasta la construcción y puesta en servicio del faro, en 1914, en la zona sólo se registran balizas y señalizaciones, y asentamientos rurales, establecidos en Isla Jabalí y la costa atlántica durante el siglo diecinueve.
9. La corbeta *Masías* también aparece referida, por ejemplo, como *Masaís*, *Massias* o *Masayé*. El artillado de esta última y el bergantín *Independencia* o *Muerte* al momento de la expedición era, según las fuentes: 22 y 18 cañones (de Alzogaray 1934:120, 143, 146) o 18 y 14 piezas (Boiteux 1921:28, 293), respectivamente.
10. Dadas las distancias referidas entre un punto y otro de la costa, entendemos por Punta Rubia a la punta al sur de la Isla Jabalí, que se ilustra en el mapa realizado con base en los levantamientos de Fitz Roy en 1833 (Fitz Roy 1914). En otros mapas del período (e.g., Arrowsmith 1834), este accidente figura como falsa Punta Rubia, mientras que Punta o Cabeza Rubia se ubica unos 14,5 km más al norte, sobre la entrada a Bahía San Blas.

Referencias citadas

- Acevedo, Gerardo L. y Mónica Grosso. 2000. Informe de las prospecciones realizadas en la costa de Puerto Deseado en relación al campamento de los naufragos de la sloop Swift (1770): Postulado de probables modelos de uso del espacio. En *Desde el país de los gigantes: Perspectivas arqueológicas en Patagonia*, editado por Juan B. Belardi, Flavia Carballo Marina y Silvana Espinosa, Vol. 2, pp. 673–682. Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Río Gallegos, Argentina.
- Aldazabal, Verónica, Emilio Eugenio y Mario Silveira. 2011. Arqueología del sector costero al sur de Bahía de San Blas: Sitio las Olas 11. *Revista de Estudios Marítimos y Sociales* 4:9–19.
- Amato, Claudio, Irlei S. Neves y Arnaldo Russo. 2008. *Livro das Moedas do Brasil, 1643 até o presente*. 12a. ed. Artgraph Serviços Gráficos Ltda, São Paulo.
- Arrowsmith, John. 1834. *Map of the United Provinces of La Plata, the Banda Oriental, and Chile*. J. Arrowsmith, Londres. Documento electrónico, <https://www.davidrumsey.com/luna/servlet/detail/RUMSEY~8~1~33898~1170050:United-Provinces-of-La-Plata,-Banda>, accedido el 6 de julio de 2023.
- Ascher, Robert y Charles H. Fairbanks. 1971. Excavation of a Slave Cabin: Georgia, U.S.A. *Historical Archaeology* 5(1):3–17.
- Austin, Robert J. 2011. Gunflints from Fort Brooke: A Study and Some Hypotheses Regarding Gunflint Procurement. *Florida Anthropologist* 64(2):85–105.
- Baldrich, J. Amadeo. 1905. *Historia de la Guerra del Brasil*. Imprenta La Harlem, Buenos Aires.
- Barroso, Gustavo. 1938. *História militar do Brasil*. Biblioteca pedagógica brasileira, ser. 5: Brasileira 49. 2da ed. Companhia Editora Nacional, São Paulo.
- Benencia, Julio A. 1979. *La guerra contra el Imperio del Brasil*, Vol. 2. Departamento de Estudios Históricos Navales, Serie E, Documentos 1. Dirección de Abastecimientos Navales, Buenos Aires.
- Biedma, José J. 1905. *Crónica histórica del Río Negro de Patagones, 1774-1834*. Juan Canter, Buenos Aires.
- Bigourdan, Nicolas. 2013. *Uranie* (1820) Shipwreck and Survivor Camp Sites: Assessment of Cultural Significance. Informe 306 del Departamento de Arqueología Marítima, Western Australia Museum, Perth, Australia. Documento electrónico,

- https://museum.wa.gov.au/maritime-archaeology-db/sites/default/files/no_306_uranie_sites_assessment_of_cultural_significance_0.pdf, accedido el 6 de julio de 2023.
- Boiteux, Henrique. 1921. *Os Nossos Almirantes*, Vol. 4. Imprensa Naval, Río de Janeiro.
- Bosch, Felipe. 1955. *Memorias del almirante Guillermo Brown*. S.n., Buenos Aires.
- Brooks, Alasdair. 2005. *An Archaeological Guide to British Ceramics in Australia, 1788–1901*. Australasian Society for Historical Archaeology y La Trobe University Archaeology Program, Sydney y Melbourne, Australia.
- Buscaglia, Silvana, Jimena Alberti y Myrian R. Álvarez. 2016. Techno-Morphological and Use-Wear Analyses of Gunflints from Two Spanish Colonial Sites (Patagonia, Argentina). *Archaeometry* 58 (special online issue S1):230–245.
- Caillet-Bois, Teodoro. 1935. Los corsarios durante la guerra con el Brasil. *Boletín del Instituto de Investigaciones Históricas* 19:3–65.
- Carranza, Ángel J. 1962a. *Campañas navales de la República Argentina. Vol. IV: Guerra contra el Brasil, 1825–1828*, Vol. 2. Historia naval argentina, Serie B, No. 2. Departamento de Estudios Históricos Navales, Buenos Aires.
- Carranza, Ángel J. 1962b. *Campañas navales de la República Argentina. Vol. IV: Notas complementarias*, Vols. 3 y 4. Historia Naval Argentina, Serie B, No. 2. Departamento de Estudios Históricos Navales, Buenos Aires.
- Castelli, Ana y Nicolás C. Ciarlo. 2022. Tidal Wrecks in Patagones, Argentina: Nineteenth-Century Beached Vessels. *INA Quarterly* 49(1/2):10–15.
- Ciarlo, Nicolás C. 2017. Experimentación, transferencia tecnológica y conservadurismo: Notas sobre la introducción del aforro de cobre en los barcos de madera del siglo XVIII. *Revista Teoría y Práctica de la Arqueología Histórica Latinoamericana* 6(1):9–27.
- Ciarlo, Nicolás C. 2023. Industrialisation, Warfare, and Science: An Archaeological-Historical Insight into Technological Changes of Mid-Eighteenth to Early Nineteenth-Century European Naval Ships. *International Journal of Nautical Archaeology* 52(2):384–417.
- Ciarlo, Nicolás C., Amaru Argüeso, Ana Castelli, Luis Coll y Rodrigo Torres. 2023. Maritime Archaeology in Northern Patagonia: Historical Shipwrecks Located between Bahía San Blas and Carmen de Patagones, Province of Buenos Aires, Argentina. En *Underwater and Coastal Archaeology in Latin America*, editado por Dolores Elkin y Christophe Delaere, pp. 329–340. University Press of Florida, Gainesville.
- Clark, Geoffrey y Antoine de Biran. 2010. Geophysical and Archaeological Investigation of the Survivor-Camp of the *Antelope* (1783) in the Palau Islands, Western Pacific. *International Journal of Nautical Archaeology* 39(2):345–356.
- Cornell University Library. 2012–2013. Blue Glass Trade Bead. Anthropology Collections, Cornell University Library, Ithaca. Documento electrónico, <https://digital.library.cornell.edu/catalog/ss:3235804>, accedido el 6 de julio de 2023.
- Cortizo, Luis C. y Federico I. Isla. 2012. Dinámica de la barrera medanosa e islas de Barrera de Patagones (Buenos Aires, Argentina). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 19(1):47–63.
- De Alzogaray, Álvaro. 1934. *Diario de operaciones de la escuadra republicana: Campaña del Brasil (1826–1828)*. Archivo General de la Nación, Montevideo.
- De Lotbiniere, S. 1984. Gunflint Recognition. *International Journal of Nautical Archaeology* 13(3):206–209.
- De Sousa, José. 2016. *Os Selos de Chumbo*. Associação Projecto IPSIIS. Documento electrónico, https://www.academia.edu/28665863/Os_Selos_de_Chumbo, accedido el 6 de julio de 2023.
- Domenech, Abel. 2003. *Del Facón al Bowie*. Distal, Buenos Aires.
- D'Orbigny, Alcide. 1945 [1844]. *Viaje a la América Meridional, realizado de 1826 a 1833*, Vol. 2. Editorial Futuro, Buenos Aires.
- Dungworth, David. 2012. Three and a Half Centuries of Bottle Manufacture. *Industrial Archaeology Review* 34(1):37–50.
- Elkin, Dolores, Martín Vázquez, Michael Krivor, Michael D. Glascock, Catherine E. Klesner y Brandi L. MacDonald. 2023. The *Purísima Concepción* Archaeological Project (Tierra del Fuego, Argentina): An Interdisciplinary Approach. *International Journal of Nautical Archaeology* 52(2):353–367.
- Erskine, Nigel. 2004. The Historical Archaeology of Settlement at Pitcairn Island, 1790–1856. Tesis doctoral, School of Anthropology, Archaeology and Sociology, James Cook University, North Queensland, Australia. Documento electrónico, <https://researchonline.jcu.edu.au/1259/>, accedido el 6 de julio de 2023.
- Eugenio, Emilio y Verónica Aldazabal. 2004. Los cazadores recolectores del litoral marítimo del área de Bahía de San Blas, provincia de Buenos Aires. En *Contra viento y marea: Arqueología de Patagonia*, compilado por María T. Civalero, Pablo M. Fernández y Ana G. Guráieb, pp. 687–700. Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano, Buenos Aires.
- Fehr, Spencer G. 2021. Primed to Fire: An Archaeological Study of the Percussion Caps at Historic Fort Snelling (21HE99). *Culminating Projects in Cultural Resource Management* 41. Documento electrónico, https://repository.stcloudstate.edu/crm_etds/41, accedido el 6 de julio de 2023.
- Fitz Roy, Robert. 1839. *Narrative of the Surveying Voyages of His Majesty's Ships Adventure and Beagle. Vol. 2: Proceedings of the Second Expedition, 1831–1836*. Henry Colburn, Londres.
- Fitz Roy, Robert. 1914. *South America: East Coast, Sheet IV, Rio de la Plata to Cape Dos Bahias*. Admiralty chart 1324. Hydrographic Office, Londres. Documento electrónico, <https://collections.lib.uwm.edu/digital/collection/agdm/id/10742/>, accedido el 6 de julio de 2023.
- Francis, Peter, Jr. 1979. *The Czech Bead Story*. World of Beads Monograph Series 2. Lapis Route Books, Nueva York.
- García Enciso, Isaías J. 1977. *La gesta de Patagones*. Eudeba, Buenos Aires.
- Gibbs, Martin. 2003. The Archaeology of Crisis: Shipwreck Survivor Camps in Australasia. *Historical Archaeology* 37(1):128–145.
- Gibbs, Martin y Brad Duncan. 2016. Cultural Site Formation Processes Affecting Shipwrecks and Shipping Mishap Sites. En *Site Formation Processes of Submerged Shipwrecks*, editado por Matthew E. Keith, pp. 179–207. University Press of Florida, Gainesville.

- Goggin, John M. 1960. *The Spanish Olive Jar: An Introductory Study*. Yale University Publications in Anthropology 62. Department of Anthropology, Yale University Press, New Haven, Connecticut.
- González Lonzieme, Enrique. 1988. Intento brasileño de invasión al territorio argentino. En *Historia marítima argentina*. Vol. 4: *La guerra contra el Imperio del Brasil (1825-1828)*, dirigido por Laurio H. Destefani, pp. 379–399. Departamento de Estudios Históricos Navales, Buenos Aires.
- Grosso, Mónica, Dolores Elkin, Cristian Murray y María A. Castro. 2015. Evidencia arqueológica de naufragios en zonas costeras: El caso del Parque Nacional Monte León (Provincia de Santa Cruz). *Magallania* 43(2):93–118.
- Haller, Sofía y Julio E. Vezub. 2018. Conexiones interoceánicas de la costa patagónica en el siglo XIX: Antecedentes de historia marítima. *Anuario IEHS* 33(1):15–38.
- Hinks, Stephen. 1988. A Structural and Functional Analysis of Eighteenth-Century Buttons. Tesis de maestría, Department of Anthropology, College of William and Mary, Williamsburg, Virginia. Documento electrónico, <https://core.ac.uk/download/pdf/235408006.pdf>, accedido el 6 de julio de 2023.
- Hume, Ivor Noël. 1982. *A Guide to the Artifacts of Colonial America*. Alfred A. Knopf, Nueva York.
- Jones, Olive y E. Anne Smith. 1985. *Glass of the British Military, ca. 1755–1820*. Studies in Archaeology, Architecture and History. National Historic Parks and Sites Branch, Parks Canada, Ottawa.
- Jones, Olive, Catherine Sullivan, George L. Miller, E. Ann Smith, Jane E. Harris y Kevin Lunn. 1989. *The Parks Canada Glass Glossary*. Studies in Archaeology, Architecture and History. National Historic Parks and Sites, Canadian Parks Service, Ottawa.
- Karklins, Karlis. 2012. Guide to the Description and Classification of Glass Beads Found in the Americas. *BEADS: Journal of the Society of Bead Researchers* 24:62–90.
- Kenmotsu, Nancy. 1990. Gunflints: A Study. *Historical Archaeology* 24(2):92–124.
- Kidd, Kenneth E. y Martha A. Kidd. 2012. A Classification System for Glass Beads for the Use of Field Archaeologists. *BEADS: Journal of the Society of Bead Researchers* 24:39–61.
- Koleini, Farahnaz, Philippe Colomban, Innocent Pikirayi y Linda C. Prinsloo. 2019. Glass Beads, Markers of Ancient Trade in Sub-Saharan Africa: Methodology, State of the Art and Perspectives. *Heritage* 2(3):2343–2369.
- Landa, Carlos G., Emanuel Montanari, Facundo Gómez Romero, Horacio De Rosa, Nicolás C. Ciarlo e Ignacio Clemente Conte. 2009. Not All Were Spears and Facones: Firearms from Otamendi Fortlet (1858–1869), Buenos Aires Province, Argentina. *Journal of Conflict Archaeology* 5(1):183–200.
- Landa, Carlos G., Joaquín Rodríguez Saumell, Nicolás C. Ciarlo, Luis Coll, Emanuel Montanari, Ana Castelli, Alejandra Raies, et al. 2021. Una mirada arqueológica sobre la Guerra del Brasil en el centro-sur bonaerense hacia 1827-1828: La batalla de Carmen de Patagones y construcción del Fuerte Cruz de Guerra. En *Estudios históricos inter y transdisciplinarios*, coordinado por Angélica María Medrano Enriquez y Francisco Montoya Mar, pp. 261–284. Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas”, Zacatecas, México.
- Leoni, Juan B. 2014. Obsolete Muskets, Lethal Remingtons: Heterogeneity and Firepower in Weapons of the Frontier War, Argentina, 1869–1877. *Journal of Conflict Archaeology* 9(2):93–115.
- Lorrain, Dessamae. 1968. An Archaeologist's Guide to Nineteenth-Century American Glass. *Historical Archaeology* 2:35–44.
- Luce, Stephen B. 1868. *Seamanship*. 4ta ed. D. Van Nostrand, Nueva York.
- McCarthy, Michael. 2005. *Ships' Fastenings. From Sewn Boat to Steamship*. Texas A&M University Press, College Station.
- Miller, George L. 1991. A Revised Set of CC Index Values for Classification and Economic Scaling of English Ceramics from 1787 to 1880. *Historical Archaeology* 25(1):1–25.
- Moreno, Paula. 1997. *Botellas cuadradas de ginebra*. S.n., Buenos Aires. Documento electrónico, <https://www.iaa.fadu.uba.ar/cau/?p=2583>, accedido el 26 de enero de 2024.
- Nash, Michael. 2005. Investigation of a Survivor Camp from the Sydney Cove Shipwreck. *Bulletin of the Australasian Institute for Maritime Archaeology* 29:9–24.
- Centro Naval. 1933. *El capitán Luis Piedra Buena: Su centenario*. Biblioteca del Oficial de Marina 18. Centro Naval, Buenos Aires.
- Olsen, Stanley J. 1963. Dating Early Plain Buttons by their Form. *American Antiquity* 28(4):551–554.
- Piccirilli, Ricardo. 1967. Acciones navales contra el Imperio del Brasil. En *Lecciones de historia naval argentina*, pp. 199–236. Historia naval argentina, Serie B, No. 7. Departamento de Estudios Históricos Navales, Buenos Aires.
- Ratto, Héctor R. 1945. Guerra con el Brasil. En *Hombres de mar en la Argentina*, pp. 197–287. Escuela Naval Militar, Río Santiago, Argentina.
- Rodríguez Saumell, Joaquín. 2022. La batalla de Carmen de Patagones (1827): Propuesta metodológica para el estudio arqueológico-histórico de enfrentamientos armados de corta duración y baja intensidad en ambientes dinámicos y antropizados. Tesis de licenciatura, Departamento de Antropología, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Sanguinetti de Bórmida, Amalia C., Nilda Weiler, Verónica Aldazabal, Damiana E. Curzio, Hugo G. Nami, Mario J. Silveira y Emilio O. Eugenio. 2000. Arqueología de la costa atlántica septentrional: Nuevas perspectivas. En *Tercer Congreso Argentino de Americanistas: año 1999*, Vol. 3, pp. 317–350. Sociedad Argentina de Americanistas, Buenos Aires.
- Scott, Douglas D. 2020. Percussion Caps for the Archaeologist: Analytical Methods for their Study. Applied Anthropology and Geography Program, Colorado Mesa University, Grand Junction. Documento electrónico, https://www.academia.edu/43327646/Percussion_Caps_for_the_Archaeologist_Analytical_Methods_for_Their_Study, accedido el 6 de julio de 2023.
- Smith, Hervey G. 1990. *The Arts of the Sailor: Knotting, Splicing and Ropework*. Dover Publications, Nueva York.
- Sprague, Roderick y Alfred W. Bowers. 1985. Glass Trade Beads: A Progress Report. *Historical Archaeology* 19(2):87–105.

- Switzer, Ronald R. 1974. *The Bertrand Bottles: A Study of Nineteenth-Century Glass and Ceramic Containers*. National Park Service, Washington, DC.
- Twede, Diana. 2005. The Cask Age: The Technology and History of Wooden Barrels. *Packaging Technology and Science* 18(5):253–264.

Cite this article: Ciarlo, Nicolás C., Ana Castelli, Joaquín Rodríguez Saumell, Carlos G. Landa, Leonardo Dam, Diego Carabias Amor, Alasdair Brooks, Luis V. J. Coll y Rodrigo Torres. 2025. Estudio preliminar e identificación de un campamento de náufragos en el contexto de la Guerra del Brasil (1825-1828), Partido de Patagones, Buenos Aires. *Latin American Antiquity* 36(1): 202–221. <https://doi.org/10.1017/laq.2023.73>.



Original article

Assessment of consolidants for the preservation of *Tituli Picti* on amphorae from the *Ses Fontanelles* late Roman shipwreck (Mallorca, Spain): An analytical approach

Elisa Fernández-Tudela^{a,*}, Rafael Zarzuela Sánchez^{b,1}, Marina Goñalons Lapiedra^{b,2}, Almoraima Gil^{b,3}, Darío Bernal Casasola^{b,4}, Miguel Ángel Cau-Ontiveros^{c,5}, Enrique García Riaza^{d,6}, Jaume Cardell Perelló^{e,7}, Manuel Bethencourt Núñez^{b,8}

^a Andalusian Institute of Historical Heritage (IAPH), Center of Underwater Archaeology (CAS), Spain

^b University of Cadiz, Spain

^c ICREA and ERAAUB-IAUB of the University of Barcelona (UB), Spain

^d University of Balearic Islands, Spain

^e Council of Mallorca, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 November 2024

Accepted 2 April 2025

Keywords:

Roman pottery

Tituli Picti

Consolidant

Acrylic resin

Nano silica

Underwater archaeology

ABSTRACT

The ceramic materials from the *Ses Fontanelles* wreck are an exceptional find due to the large number of amphorae with preserved inscriptions and their state of preservation. The presence of *Tituli Picti* is uncommon, and even less so in ceramics altered in an underwater environment. The bibliography on the conservation of these elements is scarce. This manuscript presents the results of a comparative study of two consolidation products: one based on nanoparticles (Nano Estel 1:1) and the other on an acrylic resin based on organic solvents (Paraloid B72 3 % in acetone). This preliminary study aims to establish a methodology for the treatment of the inscriptions painted on Roman amphorae from the *Ses Fontanelles* wreck (Mallorca), 4th century AD. A suite of analytical techniques was employed, encompassing surface analysis via Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX), X-Ray Diffraction (XRD) for the identification of crystalline phases, hardness and micro-indentation testing, peeling test, and measurements of aesthetic alterations using a spectrophotometer and glossmeter. The results obtained from these analyses were found to be highly congruent, underscoring the effectiveness of a long-standing acrylic resin and the potential of the silica nanoparticle-based product, which has seen a surge in utilization. This study also paves the way for further research in this area, as it opens up new avenues for exploration and the potential discovery of additional findings.

© 20XX

Introduction

The preservation of painted inscription or *Tituli Picti* on amphorae is exceptionally rare, even though this type of marking, made with atramentum (black ink) and calamus or paintbrush type tools, was commonly applied to such recipients in antiquity. It believed that in antiquity most—if not all—amphorae were marked, with at least the majority within each shipment bearing some form of identification [1]. This scarcity poses a significant challenge when attempting to implement established conservation methodologies, particularly for a unique assemblage such as that from *Ses Fontanelles* shipwreck, where 82 amphorae bearing *Tituli Picti* of different characteristics have been identified.

This paucity poses a significant challenge when attempting to implement established conservation methodologies, particularly for a unique assemblage such as that from the *Ses Fontanelles* shipwreck, where 82 amphorae bearing *Tituli Picti* of different characteristics have been identified.

The search for established methods for the consolidation and preservation of *Tituli Picti* has yielded limited results, with only a few documented cases existing in which *Tituli Picti* have been identified on ceramics recovered from underwater contexts or other terrestrial environments. The *Ses Fontanelles* wreck is the third such wreck in the Iberian Peninsula, following the Gandolfo wreck (Almería) [2–3] and the Albufereta (Alicante) [4]. In the majority of these cases, the conservation processes remain unmentioned. These studies include archaeometry analyses of inks [5,6]. With the exception of the study of the *Tituli Picti* from the Gandolfo shipwreck (Almería, Spain), which addresses both the conservation and the archaeometry analysis of the *Tituli* recovered during the excavation, the extant literature focuses primarily on the conservation of materials such as stones and mortars, all of which are from terrestrial environments [7–8].

Ceramics that have been exposed to an underwater environment for an extended period are susceptible to alterations and contaminations

* Corresponding author at: Center of Underwater Archaeology (CAS), Andalusian Institute of Historical Heritage (IAPH), Duque de Najera, 3, 11002, Cadiz, Spain.

E-mail addresses: Elisa.fernandez.tudela@juntadeandalucia.es (E. Fernández-Tudela), rafael.zarzuela@uca.es (R.Z. Sánchez), marina.gonalons@uca.es (M.G. Lapiedra), almoraima.gil@uca.es (A. Gil), dario.bernal@uca.es (D.B. Casasola), macau@ub.edu (M.Á. Cau-Ontiveros), manuel.bethencourt@uca.es (M.B. Núñez).

¹ Rafael Zarzuela, TEP-243 Nanomaterials Group, Department of Physical-Chemistry, Faculty of Sciences, University of Cadiz (UCA), Campus Universitario Puerto Real s/n, 11510, Puerto Real, Spain.

² Marina Goñalons Lapiedra, Marine Research Institute (INMAR) of the University of Cadiz (UCA), Campus Universitario Puerto Real s/n, 11510, Puerto Real, Spain.

³ Almoraima M.L. Gil Montero, TEP-243 Nanomaterials Group, Department of Physical-Chemistry, Faculty of Sciences, University of Cadiz (UCA), Campus

Universitario Puerto Real s/n, 11510, Puerto Real, Spain.

⁴ Darío Bernal-Casasola, HUM-440 Research Group, Archaeology Area of the Department of History, Geography and Philosophy, University of Cadiz (UCA), Dr. Gomez Ulla, 1, 11003, Cadiz, Spain.

⁵ Miguel Ángel Cau-Ontiveros, Archaeological and Archaeometric Research Team of the University of Barcelona (ERAAUB), Institute of Archaeology of the University of Barcelona (IAUB), University of Barcelona (UB), Montalegre, 6–8, Barcelona, Spain.

⁶ Enrique García Ríaza, «Civitas (Balius)» Research Group, University of the Balearic Islands (UIB), Valldemossa Km. 7.5, Palma, Spain

⁷ Jaume Cardell Perelló, Consell de Mallorca, Palma, Plaça Hospital 4, 07012, Spain; «Civitas (Balius)» Research Group, University of the Balearic Islands (UIB), Valldemossa Km. 7.5, Palma, Spain

⁸ Manuel Bethencourt Núñez, Department of Materials Science, Metallurgical Engineering and Inorganic Chemistry, Institute of Marine Science (INMAR), University of Cadiz (UCA), Campus Universitario Puerto Real s/n, 11510, Puerto Real, Spain.

<https://doi.org/10.1016/j.culher.2025.04.002>

1296-2074/© 20XX

Note: Low-resolution images were used to create this PDF. The original images will be used in the final composition.

that can impact their chemical and mineralogical composition. Research studies have identified the formation of non-original minerals and the presence of elements such as Ca, F, and S, which are associated with contamination caused by colonizing marine organisms. The occurrence of these post-depositional alterations can be attributed to a combination of intrinsic agents associated with the materials and extrinsic agents influenced by the marine environment [9–11].

Notwithstanding the mechanisms of alteration to which underwater archaeological heritage is exposed, the case of the Ses Fontanelles wreck is exceptional due to the extraordinary state of preservation of its materials. The site has remained virtually intact for centuries, buried in fine sands composed primarily of bioclastic sediments and carbonate lithoclasts [12].

A substantial number of fragments and complete amphorae of at least four types have been recovered, including the Almagro 51c type, the Ses Fontanelles I type, and the flat-bottomed amphorae, as well as the Keay XIX type. The Almagro 51c type is the most abundant, followed by the Ses Fontanelles I type. The classification of these typologies has been previously determined through studies that utilized petrographic analysis, categorizing them as Group 1. These studies have revealed a ceramic assemblage exhibiting similarities in content, with a range of primary inclusions, particularly micas (mostly muscovite), monocrystalline and polycrystalline quartz/quartzite, and fragments of metamorphic rocks likely derived from mica schist, along with other components in smaller quantities [13–15].

The bibliographic search for possible consolidants was initially driven by the need for a product that could be applied from the earliest stages of object treatment (i.e., desalination through progressive baths from saltwater to demineralized water). This requirement arose from observations made during the 2019 excavation campaign, where it was observed that the intensity of the *Tituli Picti* diminished during the post-extraction conservation treatments.

The primary objective of the study was to identify a water-based consolidant that could be introduced during the early stages of treatment, while salts were still being extracted from within the ceramic. The selected product was required to achieve both the consolidation of the ceramic and the stabilization of the *Tituli* without hindering the migration of chlorides to the surface. These stringent requirements substantially narrowed the range of viable options. The existing literature on the subject relied on examples of ceramics that had already undergone prior treatments, such as demineralization, making it challenging to evaluate the potential incompatibilities of these salts with the treatment process. This could lead to undesirable outcomes, such as efflorescence, color changes, or the loss of effectiveness. The utilization of barrier products to safeguard the *Tituli* during desalination was considered but ultimately dismissed due to the contribution of residual substances resulting from post-treatment processes [16].

However, at the outset of the desalination treatment of the materials recovered during the second excavation phase (2021–2022), it was observed that the *Tituli Picti* responded well in static water baths. Nevertheless, after a prolonged exposure and as the baths changed from tap water to deionized water, a gradual loss of intensity in the *Tituli* was noted. Consequently, the ceramics were extracted from the baths following an initial air-drying evaluation, and a resolution was reached to undertake a dry consolidation and fixation process employing either water-based or organic solvent-based consolidants.

This study explores two selected consolidation products, each with a documented history of extensive use on pottery and similar materials [17–24] and compares the results through various analytical techniques. The objective of this research is to evaluate the effectiveness of these treatments in comparable contexts. In summary, the study seeks to explore a methodological framework for assessing conservation approaches for underwater archaeological pottery, particularly those with preserved *Tituli Picti*.

Following the conclusion of the archaeological excavation of the Ses Fontanelles shipwreck's cargo (2021–2022) [13], the amphorae assemblage—both with and without *Tituli Picti*—was divided into two groups. The first group consisted of complete amphorae, some still sealed and containing remnants of their original contents, while the second group comprised small to medium-sized fragments with preserved *Tituli Picti*. The latter group was transferred to the laboratories of the University of Cádiz for further study and conservation.

The present research focuses on the development of an initial methodology applied to these fragments, which can later be extrapolated to the complete amphorae currently undergoing preventive conservation at the Council of Mallorca's facilities.

Research aims

This study addresses the rare preservation of painted inscriptions, or *tituli picti*, on amphorae, which were commonly marked in antiquity but are seldom found intact today. This paper aims to investigate two consolidation products for the conservation of archaeological pottery and *tituli picti*, focusing on their effectiveness in comparable contexts, particularly from the Ses Fontanelles wreck. The main objective is to establish a methodological framework for assessing conservation approaches for underwater archaeological pottery, especially those with preserved *tituli picti*. This study aims to advance the application of consolidation products for underwater materials, recognizing that their conservation challenges differ from those of terrestrial finds.

Material and methods

Preparation of pottery samples

A total of 24 samples were extracted from three fragments that were recovered during excavation in areas close to the site. According to the typological classification carried out by the archaeologists, the samples correspond to the two typologies that retain *Tituli*: Almagro 51c (samples A and C) and Ses Fontanelles 1 (sample B). Both feature *Tituli Picti* and exhibit similar petrographic characteristics (classified within petrographic group 1). Their macroscopic features demonstrate a degree of homogeneity, exhibiting relatively fine matrices. Variations in color and texture across some ceramics, even within different areas of the same specimen, suggest potential depositional processes associated with subaqueous environments [13]. However, none of the three fragments used preserved *Tituli*, nor do they coincide with the original fragments treated in the laboratory with *Tituli*. In this study, only one fragment with visible *Tituli* (DSF-469) was utilized for the examination of its microscopic surface characteristics. The fragments were designated as A, B, and C, and the samples were numbered in consecutive order while maintaining the initial letter of the fragment from which they were extracted (Fig. 1). Fourteen samples were utilized in the present study, while the remaining ten were reserved for future investigations.

The extraction process involved the use of a Bosch grinder and a Dremel cutter, both equipped with diamond discs. The dimensions of the samples were adjusted according to the specific requirements of each test (Table 1).

Consolidate products and application method

A comprehensive review of the extant literature was conducted to identify two products that are frequently utilized in the conservation of archaeological materials. Paraloid B-72, a copolymer of ethyl methacrylate and methyl acrylate soluble in organic solvents, which remains the most widely used consolidant for various types of archaeological materials. Resins, however, are not without their drawbacks. These include sensitivity to ultraviolet radiation, which can lead to discoloration and cracking. Resins also exhibit low permeability and lim-

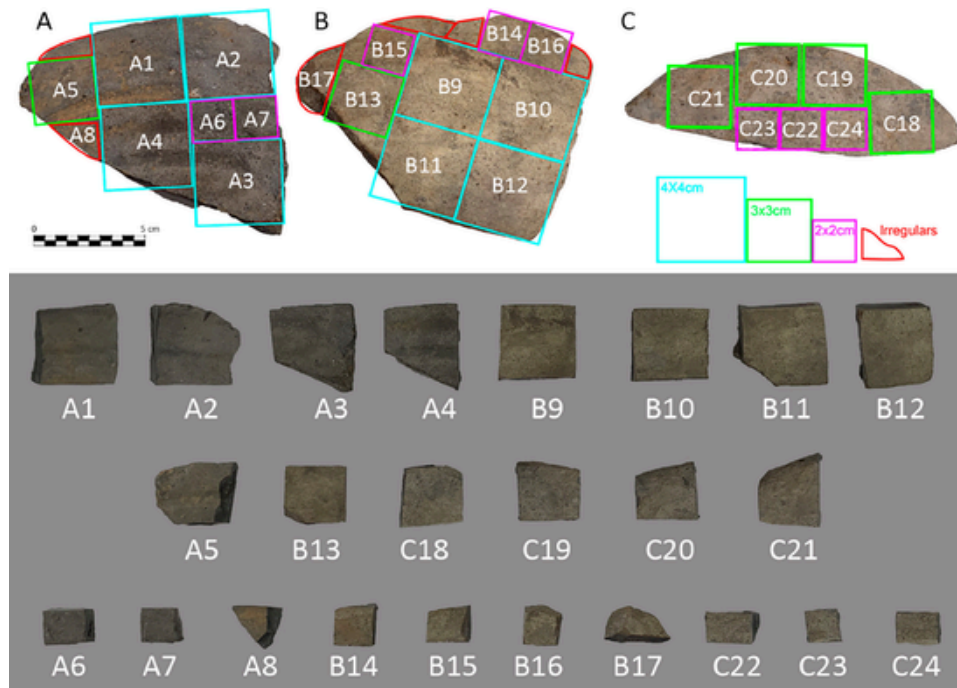


Fig. 1. Image of the samples.

Table 1
Summary of sample size and tests performed.

Treatment Applied	Paraloid B-72	Nano Estel	Untreated	Sample dimensions (cm)
Control Samples	A1	B9	–	4 × 4
Mineralogical and Petrological characterization (XRD)	A2, B11	A3, B12	A4, B10	Powder
Chemical Analysis (SEM-EDX)	A2, B11	A3, B12	A4, B10, DSF-469*	Fragment
Physical and Mechanical Analysis				
Colorimetry	A2, B11	A3, B12	A1, B9	4 × 4
Brightness	A2, B11	A3, B12	A1, B9	4 × 4
Water behavior	A2, B11	A3, B12	A1, B9	4 × 4
Drilling resistance (DRMS)	B11	B12	A4, B10	4 × 4
Indentation	A2, B11	A3, B12	A4, B10	4 × 4
Microhardness				
Peeling Test	B15, C23	B16, C24	B13, C18	3 × 3

* Untreated sample with *Tituli Picti*.

ited chemical interaction with mineral substrates [25–26]. However, these limitations are particularly pronounced when materials are exposed to outdoor conditions or in aggressive environments. Paraloid B-72 remains a prominent consolidant, underscoring the necessity for a comprehensive evaluation of its effectiveness and compatibility with archaeological materials.

The second product is Nano Estel, a newer consolidant based on aqueous colloidal silica dispersion of 10–20 nm nanoparticles, with 30 % solid content and stabilized with NaOH at pH 9.8–10.4. Despite certain drawbacks, the selection of a water-based consolidant is predicated on the material's inherent characteristics (i.e., its submerged origin) and the prospective feasibility of treating fragments in a moist state without the necessity of a prior dehydration process, a prerequisite for solvent-based consolidants. This product has shown promising results in the treatment of ceramics and other archaeological materials [7].

The selected application method was a drip technique, which minimizes surface disruption by avoiding the application of pressure or fric-

tion. Paraloid B-72 was applied at a rate of 3 % in acetone and Nano Estel in a 1:1 ratio of deionized water. Each sample was subjected to two surface applications of consolidant, allowing 72 h of drying time between each application at room temperature. All samples were left to dry for one month at controlled room temperature before testing.

Methodology for the evaluation of pottery samples

A digital microscope Leica DV6, with a magnification range of 46x to 675x, was utilized to examine and evaluate the pottery samples prior to treatment. This microscope was equipped with Leica Application Suite X (LAS X) software, which facilitated the analysis.

The mineralogical composition was determined semi-quantitatively using randomly oriented powder samples from treated and untreated fragments. The analysis was performed using a Bruker D8 Advance Diffractometer, equipped with a secondary monochromator and Cu K α radiation. The instrument scanned a range of 10° to 75° 2 θ at a rate of 0.020° 2 θ every 0.19 s. Two specimens from each sample were prepared, and the resulting XRD patterns were compared using EVA software.

Morphological surface analysis was conducted using a Nova NanoSEM 450 Scanning Electron Microscope (FEI) and a Dual Beam Scios2 (Thermo Fisher Scientific), operating at an acceleration voltage of 20 kV and coupled with Energy-Dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The Scios2 system was also equipped with a focused ion beam (FIB) using a gallium ion source. Prior to observation, the samples were sputtered with thin layers of platinum and graphite, and a thin platinum coating was deposited around the area of interest for a smooth cross-section via FIB. Seven samples were examined for each group: untreated (A4, B10), treated with B72 (A2, B11), treated with Nano Estel (A3, B12), and DSF-469 (untreated with *Tituli Picti*). Images were observed at magnifications of 65x, 250x, 500x, 1200x, 2000x, 4000x, and 6000x in secondary electron (SE) and backscattered electrons (BSE) modes.

The determination of the physical and mechanical properties was conducted using a variety of instruments. The mechanical resistance of

the untreated and treated samples was evaluated through the implementation of the Drilling Resistance Measurement System (DRMS) from SINT Technology [27,28]. The experimental setup incorporated a rotation speed of 600 rpm, drill bits with a diameter of 4.8 mm, and a penetration depth rate of 10 mm/min.

The mechanical response of the samples was examined through a series of tests using a Struers Duramin-40 A1 nanoindenter. The Vickers (HV) method was employed, with a force range of 10 kg (kgf) being applied. To ensure accuracy in measurement, DuraminTM software and a Leica Digital microscope DV6 were utilized to analyze the indentation shape.

The cohesion of the material on the surface was evaluated using the non-destructive Scotch Type test, with five repetitions following the procedure described in Drdáký et al. (2015) [29]. The samples were untreated (C18 and B13), treated with B72 (C23 and B15), and treated with Nano Estel (C24 and B16). The double-sided 3 M Scotch tape, measuring 40 mm in width, was employed as the adhesive agent. Following a 90-second application period, the tape was removed at a 90° angle.

A ColorFlex solid reflection spectrophotometer (HunterLab) was utilized to evaluate the potential color alterations induced by the treatments. The total color difference (ΔE^*ab) was determined in the CIE $L^*a^*b^*$ color space, adhering to the UNE-EN 15,886:2011 protocol [30], under the stipulated conditions: illuminant D65, CIE 10° observer (CIE 1964 standard).

$$\Delta E^*ab = [\Delta L^*^2 + \Delta a^*^2 + \Delta b^*^2]^{1/2}$$

Gloss measurements were performed in duplicate on the same samples using a PCE-GM 60 Plus glossmeter, an instrument that determines the specular reflection of light from the surface at a specific angle, following the ISO 2813:2014 procedure [31].

For the water absorption test, the samples were weighed before and after being immersed in ultrapure water for 24 h. A balance with an accuracy of 0.00010 g was used to ensure precise measurement of the samples' weight before and after the immersion process.

The water absorption coefficient was then calculated using the following equation:

$$\text{water absorption ratio} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100\%$$

W_t is the weight of the sample after 24 h of immersion and W_0 is the original weight of the sample.

The contact angle test was also performed to provide complementary insights into the hydrophilicity of the surface. Other analyses, such as accelerated aging analysis or water contact angle measurements, have not been deemed necessary, given that these objects are intended to be exposed and conserved in controlled museum environments with stable conditions.

Results and discussion

Mineralogical composition: XDR

The X-ray diffraction results indicate that the six samples evaluated (A2–4 and B10–12) are predominantly composed of muscovite ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$), quartz (SiO_2), gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), and pyrite (FeS_2) (Fig. 2). These findings are consistent with the conclusions of previous petrographic analyses, which identified two petrographic groups with highly homogeneous clay compositions. The samples utilized in this study are classified as Petrographic Group 1, which is distinguished by muscovite-rich fabrics, containing metamorphic rock fragments such as quartzite, phyllites, and schists [13].

The presence of gypsum and pyrite is typically indicative of alterations in the raw material and environmental burial conditions. In marine environments, gypsum has been associated with pyrite formation

or calcite dissolution and reaction with sulfates in acidic conditions. Both of these phenomena can occur in a buried deposit with a low oxygen environment and abundant decomposing organic matter, along with other elements that acidify the environment, such as iron objects.

In a similar vein, the presence of gypsum has been linked to sulfate precipitation from seawater [10]. The presence of pyrite indicates the decomposition of iron oxides, which are reduced and subsequently dissolved through two primary mechanisms: hematite hydroxylation to goethite and the subsequent dissolution of goethite by bacterial reduction or reaction with hydrogen sulfide in water solution [11].

Superficial characterization and elemental analyses: digital microscope and SEM-EDX

The initial macroscopic documentation of the pottery surface was provided by the digital microscope. Two ceramic types depicted in Fig. 3 (A–B) exhibited substantial deterioration in their untreated states, with the use of *Tituli Picti* (DSF-469) serving solely as a means to assess the state of conservation. The samples displayed areas where ink preservation was minimal. At higher magnifications, it becomes evident that in specific regions, the material forming the lines is barely visible, penetrating surface imperfections (Fig. 3–C).

SEM micrographs of secondary electrons (Fig. 4) reveal the surface morphology of untreated (A4 and B10) and treated samples with B72 (A2 and B11) and Nano Estel (A3 and B12) at magnifications of 500x and 2000x. Previous studies have demonstrated that B72 forms a uniform and dense film on pottery surfaces, reducing porosity. This effect is barely visible in Fig. 4 (C, D), likely due to the low percentage of B72. No clear film details were observed in the micro cross-section analysis FIB (Fig. 5).

The samples treated with Nano Estel exhibited two different states, as illustrated in Figs. 4 (E and F). The product formed a homogeneous surface coating in some areas while concentrating in specific spots in others, resulting in an incomplete coverage of the entire surface. This phenomenon of microcracking has been documented in the literature as a consequence of the capillary pressure generated during the solvent drying process [32]. It is noteworthy that, despite the SiO_2 nanoparticles being smaller than the typical pore size in pottery, the formation of larger aggregates and solvent evaporation impede their penetration into the material. The cross-section of the sample treated with Nano Estel reveals an irregular product layer, measuring 1–2 μm in thickness, exhibiting apparent cohesion deficiency in specific areas (Fig. 5).

The EDX analysis indicates an elemental distribution consistent with the clays and mineral phases identified in the XDR analysis, including Si, Al, K, Ca, S, and Fe. Furthermore, trace elements such as Mg, Mn, Na, and Ti were detected, likely originating from clay impurities or depositional alteration and/or contamination.

EDX analysis of both the surface and cross-section was conducted. No detectable elements associated with the ink were found, likely due to the organic nature of the pigment. It is possible that the ink originated from combustion products such as plant matter or bones, rather than from iron-based ink [5,6,33].

Colour alteration measurement and gloss variation

The visual alterations induced by the treatments are imperative for the assessment of their compatibility with archaeological objects. The total color difference values (ΔE^*ab) documented prior to and following treatment (Table 2) are consistent with the acceptable range for conservation treatments in cultural heritage ($\Delta E^*ab < 5$). According to the criteria established by Delgado Rodríguez and Grossi [34], the measured ΔE^*ab values indicate changes that are either imperceptible or minor, with the exception of sample B11 (treated with B72), which exhibited a significant color shift ($\Delta E^*ab = 7.14$).

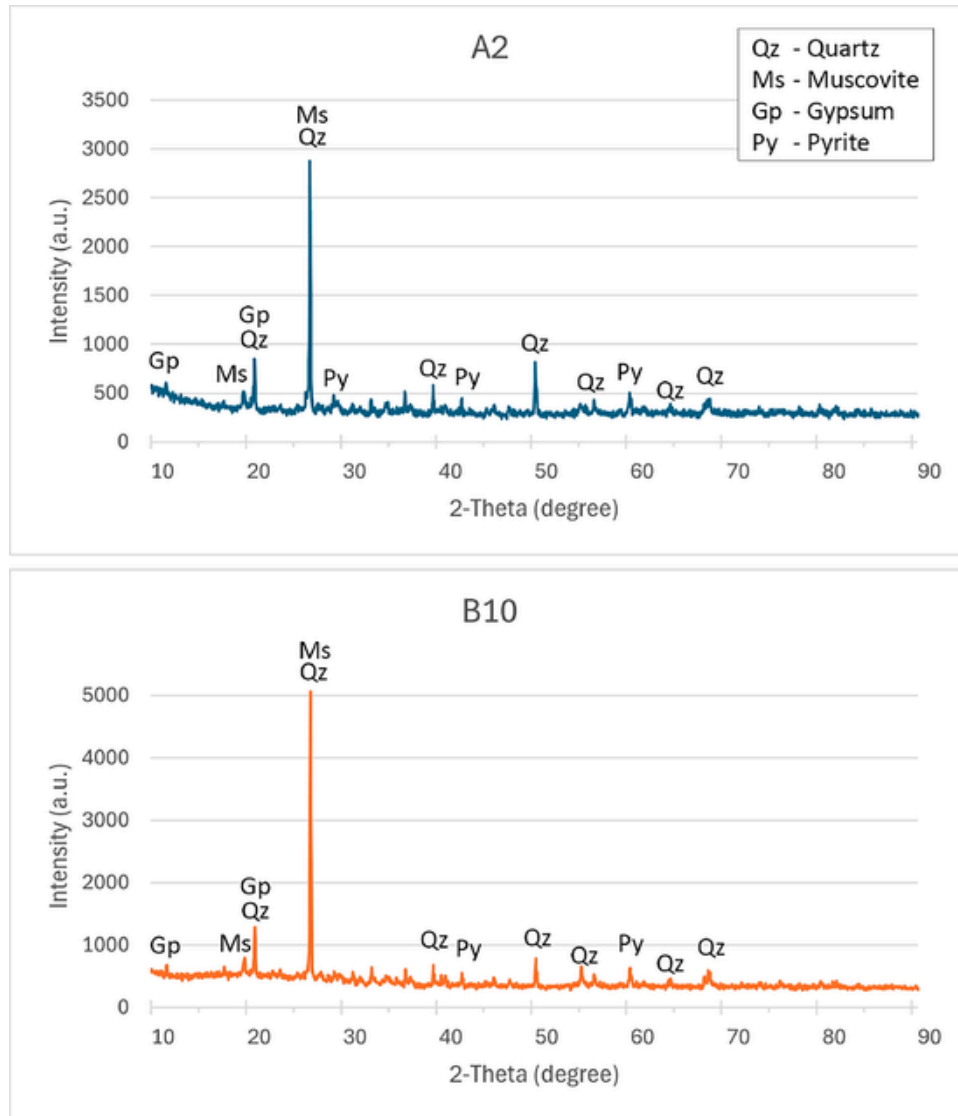


Fig. 2. Example of similar XRD analysis results of two of the samples (A2 and B10).

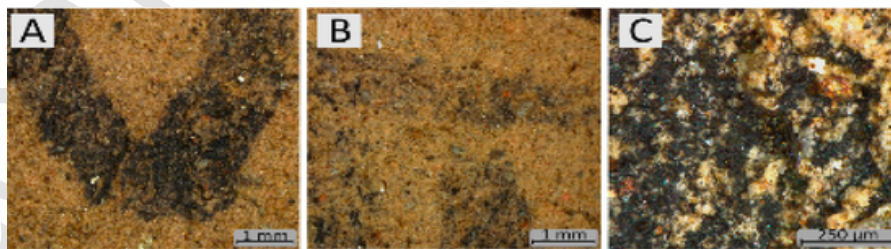


Fig. 3. Different preservation states of the markings on the ceramic surface of untreated sample (DSF-469).

As illustrated in Fig. 1, sample B11 exhibits a lighter coloration compared to A2. The predominant factor contributing to this variation is a reduction in the L^* coordinate. A prevalent phenomenon associated with resin treatments is that the surface of the material tends to resemble the appearance of the underlying material (which is darker in hue). This effect is more pronounced in light-colored samples, as evidenced by the L^* coordinates of both samples prior to treatment, which indicate this tendency. However, it is imperative to exercise caution when

interpreting these results, as another B72-treated sample (A2) exhibited an acceptable value ($\Delta E^*_{ab} = 2.45$).

The results of the study demonstrate that the treatments resulted in slight but acceptable color alterations. It is imperative to consider these changes in conjunction with gloss variations.

Gloss measurements, obtained from two angles to account for the low sheen of the pottery, demonstrate minor increases in gloss for both treatments (Table 3). However, sample B11 (treated with B72) exhib-

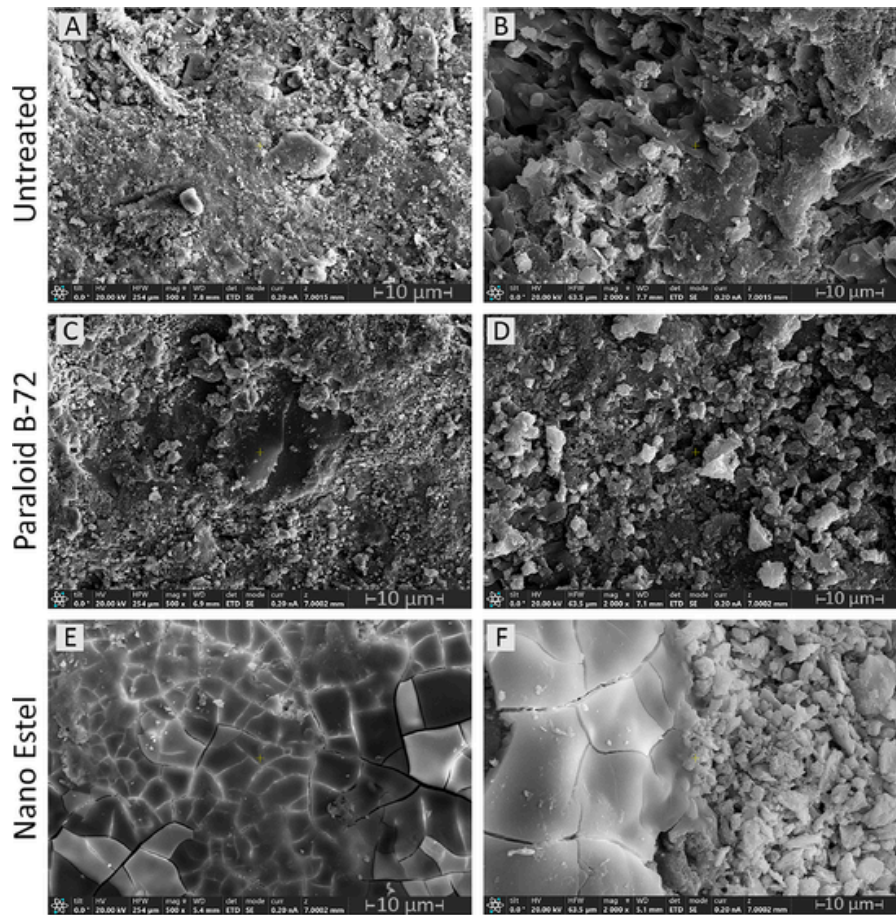


Fig. 4. Untreated sample A4 (A) and B10 (B) at different magnifications; treated with Paraloid B72 sample A2 (C) and B11 (D) and treated sample with Nano Estel A3 (E) and B12 (F).

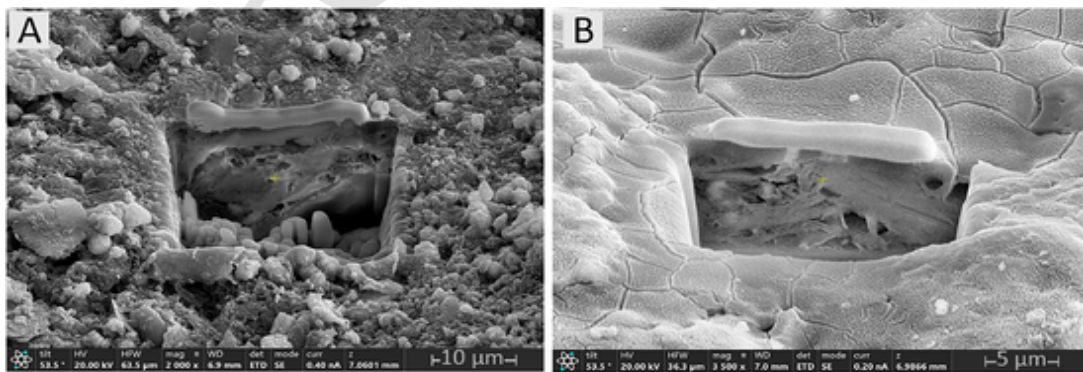


Fig. 5. Cross-section details of A2 treated with Paraloid B72 (A) and A3 treated with Nano Estel (B).

ited an unexpected gloss reduction, which is consistent with its substantial color change. Samples treated with Nano Estel (A3 and B12) exhibited a slight increase in gloss at 60° compared to those treated with B72 (A2).

In the context of color alteration, the a^* and b^* coordinates exhibited minimal contribution to the observed changes, with the L^* coordinate demonstrating greater relevance. This suggests that the alterations are not indicative of hue, such as the yellowing of resin, but rather of lightness, resulting in a darker coloration. In the case of Paraloid, this change can be attributed to the resin making the material more similar

in color to wet material (this occurs because the refractive index of resins is different from that of air). However, this effect was only noticeable in the lighter colored sample [35].

With regard to gloss, the untreated material itself exhibits low gloss values initially. As such, it is designated a matte surface, and the measurement to be utilized according to the standard (ISO 2813) is 85°. Subsequent to the application of the treatment, there is negligible change in the values, thereby confirming that the gloss does not increase significantly. Consequently, a surface is designated as "semi-glossy" when the gloss index at 60° falls between 10 and 70 [36].

Table 2
Total Colour Difference (ΔE^*ab) values.

Sample	Before treatment			After treatment			ΔE^*ab
	L	a	b	L	a	b	
A1 (Un)	50.97	1.81	10.32	–	–	–	–
B9 (Un)	58.98	2.39	15.72	–	–	–	–
A2 (B72)	52.19	0.99	7.58	50.13	1.79	8.43	2.45
B11 (B72)	60.82	1.82	15.27	53.96	2.92	16.9	7.14
A3 (NE)	49.81	1.22	8.08	47.15	2.11	9.99	2.45
B12 (NE)	59.84	2.21	14.18	57.9	2.54	15.02	2.24

Table 3
Gloss measurement results.

Sample	Before treatment		After treatment		Increase	
	60°	85°	60°	85°	60°	85°
A1 (Un)	0.9	0.1	–	–	–	–
B9 (Un)	0.9	0.1	–	–	–	–
A2 (B72)	0.8	0.1	1	0.5	0.2	0.4
B11 (B72)	1.1	0.2	0.9	0.4	–0.2	0.2
A3 (NE)	0.9	0.2	1.6	0.6	0.7	0.4
B12 (NE)	0.9	0.2	1	0.3	0.1	0.1

While there are no discernible disparities in brightness, it is imperative to deliberate on the factors that influence the brightness of treatments such as those utilized in this study. A higher refractive index has been shown to be associated with an enhancement in brightness. This phenomenon underlies the common occurrence of glossy appearances in resin treatments, as they result in the formation of a transparent film with a refractive index (typical values of ~ 1.5) that exceeds that of air (1.0003). However, the SEM images do not provide evidence of the formation of such a film by the Paraloid, as it has been appropriately di-

luted. In the case of the Nano Estel, while the silica has a similar refractive index (~ 1.4 , as confirmed through research) and the SEM images do show the formation of a 1–2 μm film, the brightness does not increase noticeably either. It is crucial to acknowledge that the film's relative thinness and irregularity, coupled with the roughness of the surface evident at the micron scale (as observed in the SEM), contributes to the observed nano-roughness. This, in turn, is known to be associated with a decrease in brightness, which likely compensates for the potential effect of the refractory index.

Water behavior of samples

The findings of the study demonstrated that there was no decline in absorption observed in the treated samples in comparison to the untreated samples (Fig. 6). The objective of this evaluation was to ascertain whether alterations in water absorption would emerge as a compatibility criterion [17].

A comparative analysis of static contact angle measurements revealed only moderate differences between untreated and treated samples. Furthermore, the study found that none of the treatments rendered the surface hydrophobic. However, it was observed that both consolidants increased the hydrophobic grade (Fig. 6).

It has been demonstrated that certain consolidants possess the capacity to render the material hydrophobic, a consequence of their chemical composition or incomplete reaction. In certain applications, this phenomenon can give rise to complications, manifesting as disparate water absorption properties between the treated and untreated zones. Illustrative scenarios include materials exposed to soluble salts or volume differences arising from water absorption, which can lead to distinct zones with varied properties. In certain applications where protection from water is imperative, the exposure of ceramic pieces to the elements is to be avoided.

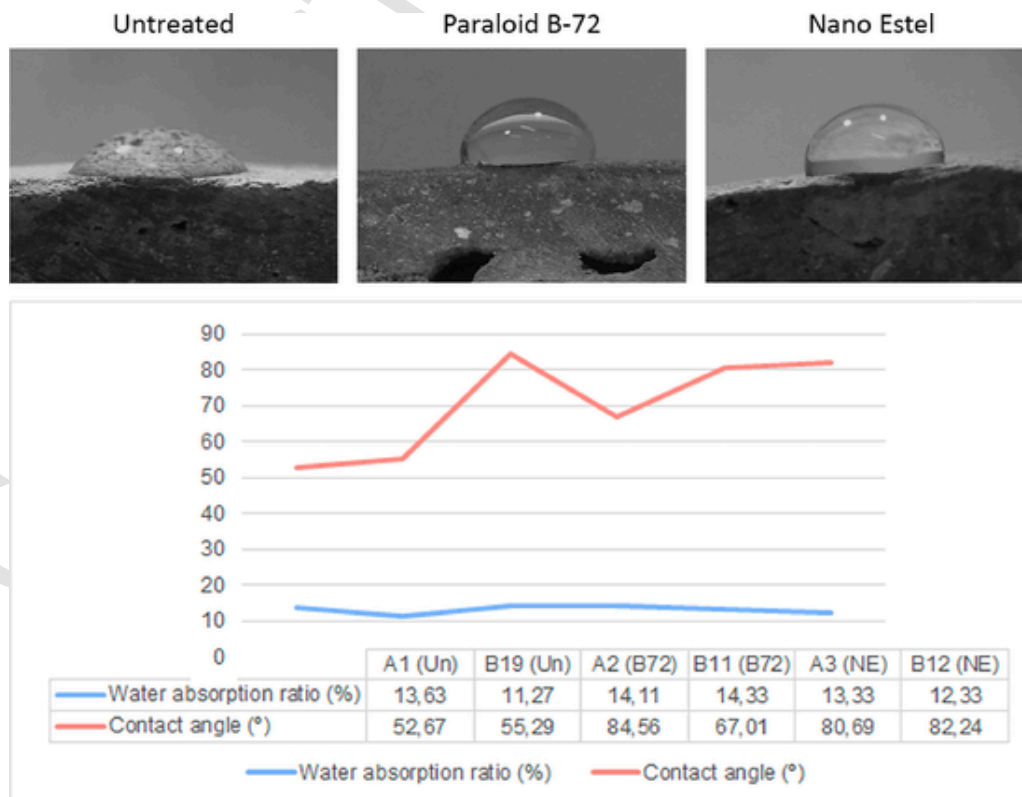


Fig. 6. Water absorption and contact angle results.

In the case of the consolidants utilized, both exhibit hydrophilic properties due to their chemical composition. Specifically, Nano Estel is amorphous SiO₂, and Paraloid B-72 is an acrylic resin, both of which possess hydrophilic characteristics. Despite the observed discrepancies between the untreated samples, these samples do not undergo a transition to a hydrophobic state, provided that the contact angle is greater than 90° [34].

Evaluation of strength and surface hardness

In order to assess the enhancement of cohesion, a total of four drilling resistance measurements were obtained for each specimen. Owing to the inherent heterogeneity in the material's strength, samples of the same ceramic fragment were utilized. The treated samples exhibited augmented resistance to the surface (0–1 mm), which persisted until approximately 4 mm, at which point the resistance commenced a decline (Fig. 7). In contrast, the untreated samples demonstrated more uniform drilling resistance across their entire depth.

The results of the study indicate that the treated samples appear to increase at the surface, presumably due to the penetration of the consolidants. At greater depth, certain areas exhibited higher resistance; however, the differences were subtle, likely attributable to material inconsistencies.

The micro-indentation test revealed higher surface hardness in samples treated with Nano Estel, whereas the samples treated with B72 tended to lose surface hardness (Fig. 7). This phenomenon can be attributed to the unique surface layers formed by each consolidant. B72 forms a relatively soft acrylic resin layer, while Nano Estel creates a harder layer composed of silica nanoparticles. Notably, B72-treated samples exhibited more uniform hardness across the entire surface, suggesting a potential advantage in terms of consistency and predictability in hardness distribution.

The findings of the peeling test demonstrate that the Paraloid B72-treated samples exhibited enhanced surface cohesion in comparison to the untreated samples. Conversely, the Nano Estel-treated samples exhibited reduced peeling resistance compared to the B72-treated samples. This phenomenon may be attributed to the increased cohesion of the surface layers induced by each of the consolidants. Notably, despite demonstrating superior surface resistance in the indentation test, the Nano Estel-treated samples exhibited a higher degree of mass loss following peeling. This phenomenon may be attributed to several factors. Firstly, the samples exhibited an increased propensity for detachment when subjected to the peeling test. Secondly, the presence of microfractures within the coating could have exacerbated the detachment process. This hypothesis is further substantiated by the SEM images (Figs. 4–5). Additionally, the heterogeneity of the coating, character-

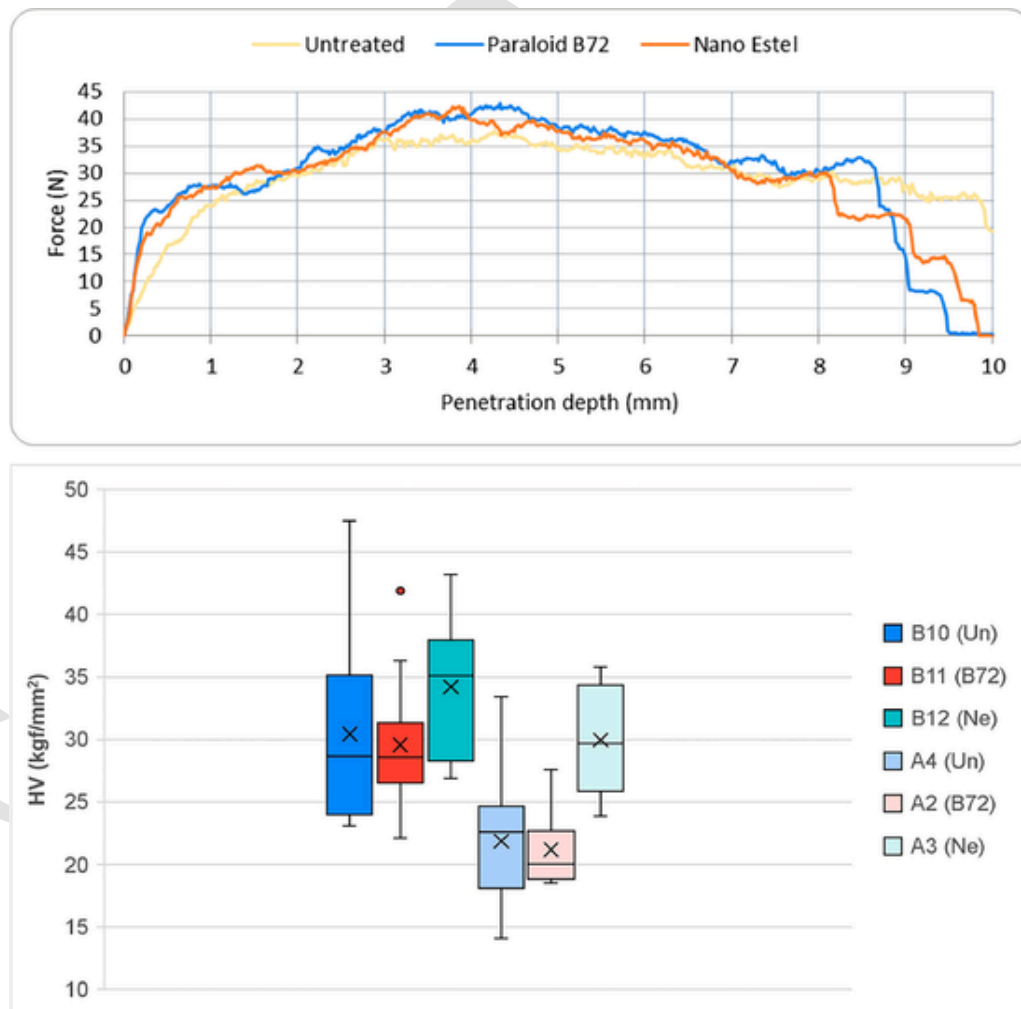


Fig. 7. Strength and surface hardness results. Top, drilling resistance profiles for untreated and treated samples; bottom, box plots of microhardness results from ten tests per sample.

ized by the presence of uncoated areas, may contribute to a reduction in peeling resistance.

Conclusions

The result of this comparative study between two widely used consolidants for archaeological ceramics — Paraloid B72 and Nano Estel — demonstrates that both products have good consolidating and protective properties for the ceramic surfaces. SEM-EDX analysis reveals that Paraloid B72 forms a thin, uniform, and compact layer, while Nano Estel creates a homogeneous layer with microfractures in some areas, though it does not consistently cover the entire surface.

The observed variations in color and gloss are negligible and comparable for both products. While there is a slight color change and an increase in gloss, the changes fall within the acceptable range for conservation treatments of cultural heritage. Notably, the gloss on surfaces treated with Nano Estel is marginally higher than that of surfaces treated with Paraloid B-72. Nonetheless, these changes are not visually disruptive and remain within limits that are considered compatible with conservation standards.

The drilling resistance results indicate that both consolidants enhance surface resistance and penetrate sufficiently into the ceramic structure to provide internal reinforcement. However, Paraloid B72 demonstrates slightly better performance. This phenomenon can be attributed to Paraloid B72's organic solvent-based composition, which facilitates deeper penetration compared to Nano Estel's water-based formulation. A notable distinction between the two consolidants was observed in the microhardness tests. Treatment with Paraloid B72 resulted in a decline in surface hardness, likely attributable to the formation of a softer acrylic resin layer on the surface. Conversely, the samples treated with Nano Estel exhibited a slight increase in surface hardness compared to untreated samples, which may be attributed to the silica nanoparticle composition of the consolidant. In the peeling test, Paraloid B72-treated samples exhibited superior cohesion and significantly reduced surface drag compared to those treated with Nano Estel. This disparity may be attributed to the enhanced surface adhesion of Nano Estel, which, despite its superior hardness, exhibits a higher propensity for detachment under mechanical stress.

A comparison of the two products reveals that they exhibit similar consolidating characteristics, rendering them suitable candidates for the conservation of ceramics from the Ses Fontanelles shipwreck, including the protection of its *Tituli Picti*. However, the decision regarding the utilization of either product should take into account several factors: Paraloid B72 has a well-documented history of long-term behavior, whereas Nano Estel is a more recent formulation and requires further long-term evaluation; Nano Estel may offer better compatibility with ceramic substrates, especially given its inorganic nature; Paraloid B72 Furthermore, at a 3 % concentration, Paraloid B72 has been observed to penetrate deeper than Nano Estel at a 1:1 ratio, potentially offering enhanced structural reinforcement. In addition, Paraloid B72 has been associated with higher toxicity risks and the presence of surface residues, while Nano Estel has been deemed less toxic and has been shown to leave minimal residues.

Treatments based on nanoparticles have potential disadvantages, as indicated in the discussion, but there is also evidence indicating their effectiveness. The other type of treatments that are more common are alkoxysilanes (e.g., ESTEL1000, Wacker OH100), which were indeed raised as an option. However, the number of samples was limited, and a selection of two types of consolidant was made. Alkoxysilanes have demonstrated superior penetration and chemical interaction with the substrate; however, they are also associated with potential issues such as slow reaction times (resulting in hydrophobic behavior or color changes), cracking during drying, and their effectiveness being contingent on the humidity conditions during the curing process.

These considerations underscore the intricacy inherent in the selection of a consolidant for conservation purposes, wherein the particularities of each case must serve as the guiding principle in the decision-making process. This study offers invaluable data that can serve as a valuable foundation for future research and contribute to the ongoing refinement of conservation practices for archaeological ceramics.

There is a paucity of research on the protection of inscriptions on ceramic material of underwater origin. Although the two products studied yield optimal results, both present disadvantages. This study represents a significant step forward in the application of consolidating products to materials of underwater provenance, pottery with inscriptions, as the alteration mechanisms and the resulting state of conservation of these materials differ considerably from those of terrestrial deposits.

In the subsequent research, two lines of investigation are proposed. First, the effectiveness of other formulas will be studied. This will be achieved by either varying the characteristics of the tests or by trying new consolidating products. Conversely, there is a need to prioritize the investigation of products with an aqueous base that can consolidate and protect both inscriptions and ceramics during the initial phase of desalination treatment. This is crucial to prevent the loss of inscriptions caused by prolonged exposure to aqueous baths. In this regard, the products utilized must be compatible with chlorides, or alternatively, facilitate the migration of salts to the exterior of the material without compromising its conservation.

Acknowledgments

This work has been supported by the ARQUEOMALLORNAUTA project, together with the Universitat de Barcelona, Universidad de Cadiz & Universitat de les Illes Balears. This study was undertaken within the framework of the Laboratory of Historical Heritage Studies and Conservation (LEC-PH, INMAR) and the Nanomaterials Group (TEP-243) of the University of Cadiz. Projects GARVM IV (PID2022-138814OB-I00/MCIN/AEI) and MEDUSA (PCM_00031) have also been involved.

References

- [1] A.Font Jaume Soler, P. Berni, E. García Ríaza, D. Bernal-Casasola, M.Á.Cau Ontiveros, J. Cardell, S. Munar Llabrés, El singular conjunto de *Tituli Picti* del pecio de Ses Fontanelles (Mallorca, islas Baleares) y su contribución a la epigrafía anfórica tardorromana hispánica, *CuPAUAM* 47 (2021) 287–317, <https://doi.org/10.15366/cupauam2021.47.1.010>.
- [2] B. Liou, E.Rodríguez Almeida, *Les Inscriptions Peintes Des Amphores Du Pecio Gandolfo* (Almería), *Mélanges de l'école Française de Rome*, 2000, pp. 7–25.
- [3] R. Pascual i Guasch, *El Pecio Gandolfo* (Almería), *Pyrenae*, 1968, pp. 141–155.
- [4] A. Fernández Izquierdo, P. Berni Millet, A. Aguilera Martín, *El pecio romano Albufereta I (siglo I d.C.): el cargamento*, in: R. Azuar, O. Inglese (Eds.), *El pecio romano Albufereta I (siglo I d.C.): el cargamento*, *Carta Arqueológica Subacuática De Alicante I* (2017) 99–114.
- [5] J. Martínez, Una inscripción inédita de Pecio Gandolfo. El complejo análisis delos *Tituli Picti* en ánforas salarias y el comercio de salsamenta. *Cetariae 2005: Salsas y Salazones De Pescado En Occidente Durante La Antigüedad ; Actas Del Congreso Internacional (Cádiz, 7 - 9 Noviembre De 2005)*, Universidad de Cádiz, Cádiz, 2007, pp. 391–400.
- [6] J. Martínez, J.L. Ferrero, C. Roldán, J. Álamo, *Los Tituli Picti, estudio sobre el atramentum y su composición, Conservas, Aceite y No De La Bética En El Imperio Romano* (1998) 1221–1229.
- [7] S.A. Ruffolo, N. Rovella, A. Arcudi, V. Crupi, D. Majolino, M. Osanna, R. Pace, A. Pantuso, L. Randazzo, M. Ricca, N. Ruggieri, V. Venuti, M.F. La Russa, New insights to assess the consolidation of stone materials used in built heritage: the case study of ancient graffiti (*Tituli Picti*) in the archaeological site of Pompeii, *Herit. Sci.* 8 (2020) 49, <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00393-0>.
- [8] M.C. Galván, A. Quevedo, *Protocolo de conservación-restauración en un ánfora africana tardía con dipinti (isla del Fraile, Águilas)*. *Actas Del VI Congreso Internacional de La SECAH (Zaragoza, 2022)*, *Monografías EX OFFICINA HISPANA*, Zaragoza, 2024, pp. 593–601.
- [9] C.M. Belfiore, M.F. Russa, L. Randazzo, G. Montana, A. Pezzino, S.A. Ruffolo, P. Aloise, Laboratory tests addressed to realize customized restoration procedures of underwater archaeological ceramic finds, *Appl. Phys. A* 114 (2014) 741–752, <https://doi.org/10.1007/s00339-013-7878-x>.
- [10] U. Sanchez-Garmendia, J.G. Iñáñez, G. Arana, Alterations and contaminations in ceramics deposited in underwater environments: an experimental approach, *Minerals* 11 (2021) 766, <https://doi.org/10.3390/min11070766>.
- [11] M. Secco, L. Maritan, C. Mazzoli, G.I. Lampronti, F. Zorzi, L. Nodari, U. Russo, S.P. Mattioli, Alteration processes of pottery in lagoon-like environments,

- Archaeometry. 53 (2011) 809–829, <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2010.00571.x>.
- [12] C. Jaume, J.J. Fornós, Composició i textura dels sediments de platja del litoral mallorquí, *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears* (1992) 93–110.
- [13] D. Bernal-Casasola, M.Á. Cau Ontiveros, Estudio preliminar del cargamento del pecio tardorromano de Ses Fontanelles (Palma de Mallorca): inventario, catalogación y primeras analíticas, 2020.
- [14] D. Bernal-Casasola, M.Á. Cau-Ontivero, C.D. Juan Fuertes, S. Munar Llabres, J. Cardell Perelló, E. García Ríaza, J.A. Moya Montoya, J. Oviedo Callealta, J.L. Portillo-Sotelo, J.A. Retamosa Gámez, L. Fantuzzi, Repensando el comercio marítimo de Carthago Spartaria: acerca del pecio tardorromano de Ses Fontanelles (Mallorca): acerca del pecio tardorromano de Ses Fontanelles (Mallorca), *Drassana* 31 (2024) 156–185, <https://doi.org/10.51829/Drassana.31.713>.
- [15] M.A. Cau-Ontiveros, D. Bernal-Casasola, A. Pecci, L. Fantuzzi, L. Picornell Gelabert, A. Valenzuela, J. Retamosa, J. Portillo-Sotelo, J. Perelló, S. Llabrés, C. De Juan, E. Ríaza, Multianalytical approach to the exceptional late Roman shipwreck of Ses Fontanelles (Mallorca, Balearic Islands, Spain), *Archaeol. Anthropol. Sci.* 16 (2024), <https://doi.org/10.1007/s12520-024-01952-3>.
- [16] A. Dittus, R.E. Bisbing, R. Norton, Residues from cyclododecane consolidation following desalination. Subliming Surfaces: Volatile Binding Media in Heritage Conservation, University of Cambridge Museums, 2019, pp. 101–108, <https://doi.org/10.17863/cam.49280.Barberio>.
- [17] M. Barberio, S. Veltri, A. Imbrogno, F. Stranges, A. Bonanno, P. Antici, TiO₂ and SiO₂ nanoparticles film for cultural heritage: conservation and consolidation of ceramic artifacts, *Coat. Technol.* (2015).
- [18] G. Cultrone, F. Madkour, Evaluation of the effectiveness of treatment products in improving the quality of ceramics used in new and historical buildings, *J. Cult. Herit.* 14 (2013) 304–310, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.08.001>.
- [19] M.M. Ibrahim, W.S. Mohamed, H.M. Mohamed, Evaluation of the efficacy of traditional and nano paraloid B72 for pottery consolidation, *Int. J. Conserv. Sci.* 13 (2022) 15–30.
- [20] P. Manoudis, S. Papadopolou, I. Karapanagiotis, A. Tsakalof, I. Zuburtikudis, C. Panayiotou, Polymer-silica nanoparticles composite films as protective coatings for stone-based monuments, *J. Phys.: Conf. Series* 61 (2007) 1361, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/61/1/269>.
- [21] H.M. Mohamed, N.M. Ahmed, W.S. Mohamed, M.G. Mohamed, Advanced coatings for consolidation of pottery artifacts against deterioration, *J. Cult. Herit.* 64 (2023) 63–72, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.08.014>.
- [22] K. Elert, F. Jroundi, C. Benavides-Reyes, E. Correa Gómez, D. Gulotta, C. Rodríguez-Navarro, Consolidation of clay-rich earthen building materials: a comparative study at the Alhambra fortress (Spain), *J. Build. Eng.* 50 (2022) 104081, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104081>.
- [23] E.H. Mohamed, Z.M. Ahmed, M.L.A. El-Latif, Evaluation of the effectiveness of traditional and nano materials used in consolidation of sandstone used in Ramesses III Temple, Karnak, Egypt, *JMMCE* 13 (2025) 18–30, <https://doi.org/10.4236/jmmce.2025.131002>.
- [24] Y. Zhang, X. Li, J. Zhu, S. Wang, B. Wei, Hybrids of CNTs and acrylic emulsion for the consolidation of wall paintings, *Prog. Org. Coat.* 124 (2018) 185–192, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.08.016>.
- [25] J.A. Poulis, Y. Mosleh, E. Cansell, D. Cimino, R. Ploeger, E. René De La Rie, C.W. McGlinchey, K. Seymour, Mechanical and physical characterization of natural and synthetic consolidants, *Int. J. Adhesion Adhesives* 117 (2022) 103015, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103015>.
- [26] P. Kotlík, K. Doubravová, J. Horálek, L. Kubáč, J. Akrman, Acrylic copolymer coatings for protection against UV rays, *J. Cult. Herit.* 15 (2014) 44–48, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.01.002>.
- [27] P. Tiano, C. Filaretto, S. Ponticelli, M. Ferrari, E. Valentini, Drilling force measurement system, a new standardisable methodology to determine the “superficial hardness” of monument stones: prototype design and validation, *Int. J. Restorat. Build. Monuments* 6 (2000) 115–132.
- [28] E. Vasaneli, A. Calia, M. Masieri, G. Quarta, New insights into the use of drilling test for the characterization of soft lime mortars, *Constr. Build. Mater.* 316 (2022) 125894, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125894>.
- [29] M. Drdácý, J. Lesák, K. Niedoba, J. Valach, Peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of mortar and render surfaces, *Mater. Struct.* 48 (2015) 1947–1963, <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0285-8>.
- [30] UNE-EN 15886. Conservation of cultural property—test methods—colour measurement of surfaces. (2011).
- [31] ISO 2813:2014. Paints and varnishes—determination of gloss value at 20 degrees, 60 degrees and 85 degrees. (2014).
- [32] J.S. Pozo-Antonio, D. Noya, C. Montojo, Aesthetic effects on granite of adding nanoparticle TiO₂ to Si-based consolidants (Ethyl Silicate or Nano-Sized Silica), *Coatings* 10 (2020), <https://doi.org/10.3390/coatings10030215>.
- [33] E. Vassiou, D. Lazidou, E. Kampasakali, E. Pavlidou, J. Stratis, Iron gall ink from historical recipes on organic substrates and their study before and after accelerated ageing with μ -RAMAN spectroscopy and SEM-EDS, *J. Cult. Herit.* 66 (2024) 584–592, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.006>.
- [34] J.D. Rodrigues, A. Grossi, Indicators and ratings for the compatibility assessment of conservation actions, *J. Cult. Herit.* 8 (2007) 32–43, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.04.007>.
- [35] W.S. Mokrzycki, M. Tatol, Color difference ΔE : a survey, *Mach. Graph. Vision* 20 (2011) 383–411.
- [36] P.M. Carmona-Quiroga, S. Martínez-Ramírez, M.I.S.D. Rojas, M.T. Blanco-Varela, Surface water repellent-mediated change in lime mortar colour and gloss, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 2188–2193, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.039>.

Article

A Risk Assessment of Underwater Cultural Heritage for Wave-Induced Hazards: The Impact of Climate Change on Cadiz Bay

C. Ferrero-Martín ^{1,*} , A. Izquierdo ¹ , M. Bethencourt ²  and T. Fernández-Montblanc ^{3,*} ¹ Department of Applied Physics, University of Cadiz, INMAR, 11510 Cadiz, Spain; alfredo.izquierdo@uca.es² Department of Materials Science, Metallurgical Engineering and Inorganic Chemistry, University of Cadiz, INMAR, 11510 Cadiz, Spain; manuel.bethencourt@uca.es³ Earth Sciences Department, University of Cadiz, INMAR, 11510 Cadiz, Spain

* Correspondence: carmen.ferrero@uca.es (C.F.-M.); tomas.fernandez@uca.es (T.F.-M.)

Abstract: The combination of future changes in sea levels and wave climate in coastal areas represents one of the greatest threats to the preservation of underwater cultural heritage (UCH). This study presents a new methodology to assess climate change's impacts on UCH preservation in shallow waters, focusing on wave-induced hazards like decontextualization, scouring, and wear erosion. The approach uses hybrid downscaling of bias-corrected wave fields from the RCP4.5 and RCP8.5 CMIP5 scenarios. The methodology was applied in the Bay of Cadiz, where an overall reduction in wave energy flux was observed. However, local increases were detected in rocky outcrops and coastal areas with high UCH density. As a result, the shallow zones exhibited significant changes in decontextualization and scouring hazards. However, the most relevant risk changes were linked to wear erosion, particularly at sites on rocky outcrops near Cadiz. The methodology proposed in this study is essential for identifying areas with higher risk and for evaluating UCH preservation under future climate conditions. It offers an effective tool for discriminating sites at risk and for conducting a long-term assessment of these risks in coastal environments affected by climate change.



Academic Editor: Eugen Rusu

Received: 29 November 2024

Revised: 29 December 2024

Accepted: 30 December 2024

Published: 14 January 2025

Citation: Ferrero-Martín, C.; Izquierdo, A.; Bethencourt, M.; Fernández-Montblanc, T. A Risk Assessment of Underwater Cultural Heritage for Wave-Induced Hazards: The Impact of Climate Change on Cadiz Bay. *J. Mar. Sci. Eng.* **2025**, *13*, 136. <https://doi.org/10.3390/jmse13010136>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: underwater cultural heritage; climate change; hybrid downscaling; decontextualization risk; scouring risk; wear erosion risk; numerical modelling; ocean waves

1. Introduction

The alterations in wave climate attributable to global warming are of vital importance in coastal areas given the fundamental role of waves in shaping coastal dynamics and coastal hazards. These modifications have the potential to change coastal morphology [1] and significantly impact human activities. Assessing the impacts resulting from climate change (CC) in littoral areas is of great interest as these regions not only represent the most densely populated areas but also holds high value in terms of underwater cultural heritage (UCH).

The preservation of UCH is crucial for local communities, and it is necessary to recognize and properly appreciate its value [2] as its degradation not only implies a loss of cultural capital but also reductions in tourism and recreational, educational, and scientific activities, as well as a decline in local ecological knowledge [3]. In this regard, within the framework of the European Green Deal, it is anticipated that the preservation of cultural heritage will serve as a powerful driver of economic recovery [4]. Littoral UCH is continuously subjected to the impact of marine agents that accelerate its degradation. Among these, waves stand out as one of the main factors affecting the preservation and

evolution of UCH in shallow water areas exposed to wave action [5,6]. Wave energy is released on the coast, generating three fundamental hazards for submerged cultural heritage: decontextualization, scouring, and wear erosion [7].

The complex interaction among archeological sites, suspended sediment transport, and hydrodynamic processes has been recognized and extensively investigated in the context of the in situ preservation of underwater archeological sites [5,6,8–13]. Changes in sediment budgets can compromise the stability of shipwrecks, leading to the exposure and/or burial of valuable artifacts. Additionally, scouring influences chemical and biological processes affecting the composition of the benthic community. This has effects on metallic materials [14], the corrosion rates of metal [15], and the degradation of stone materials [16] and wood [17].

CC will affect atmospheric and marine conditions, thereby impacting the conservation of coastal and underwater archeological sites. However, despite the relevance and high density of UCH in coastal areas, studies analyzing wave-induced hazards [7,18] have not considered long-term changes in environmental conditions.

Long-term changes in large-scale atmospheric circulation and in local wind patterns, coupled with changes in the occurrence and characteristics of tropical and extra-tropical cyclones, indicate long-term changes in wind wave statistics [19]. Reguero et al. [20] indicated that upper-ocean warming is altering the global wave climate, suggesting that global wave energy has increased by 0.4% per year since 1948. Global-scale studies have assessed projected changes in wave climate under different CC scenarios [21–23], finding a robust increase in the annual mean significant wave height in the Southern Hemisphere, while a reduction has been observed in the Northern Hemisphere. In the case of the North Atlantic, a reduction in significant wave height is expected by the end of the century, with greater decreases under the RCP8.5 scenario (~10%) compared to RCP4.5 (~5%) [24]. Furthermore, the extreme wave height is also projected to decrease in the northeast Atlantic [25–27], with the largest decrease being more than 1 m (12%) occurring south of 45° N [28].

These potential changes in global wave climate, along with sea level rise, underscore the need for further studies to downscale global trends regionally, analyze changes in wave climate in coastal shallow waters, and to evaluate how these changes will affect UCH preservation. Therefore, this study aims to develop a methodology to assess UCH-related risk associated with wave-induced hazards in current and future climates under climate change conditions. This methodology is tested in the Bay of Cadiz, a region characterized by a large number of UCH sites with great diversity. To achieve this, an assessment of wave climate and changes in the main hazards affecting UCH is carried out for the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. To attain the spatial resolution demanded by coastal applications and to reduce the uncertainties inherent in using global models for local-scale studies, a hybrid downscaling approach is employed to propagate waves from deep to shallow waters.

The remainder of this paper is structured as follows: The next section introduces the study area; the Methods Section describes the methodology developed and the datasets used for validation; the Results Section presents the downscaled wave climate and the assessment of CC's impact on UCH risks and hazards; the Discussion Section analyzes the applicability, limitations, and potential of the methodology based on the results; and, finally, the main findings of this study are summarized.

Study Area

The Bay of Cadiz is located in the southwest of Spain, extending from Punta Candor to the Sancti Petri estuary (Figure 1A). The seabed mainly consists of unconsolidated sediments, with a mean grain size ranging from very fine quartz sand to very fine gravel. Exceptions to this general pattern are localized rocky outcrops in the study area. The

bay is a mesotidal shallow estuary with a maximum depth of 20 m at its seaward edge, and it is characterized by dominantly semidiurnal co-oscillating tides with amplitudes of ~1 m for the M2 component and ~0.4 m for the S2 component [29]. The typical waves in the Bay of Cadiz are wind waves with periods below 7 s and significant heights around 0.5 m in summer and 1.0 m in winter, increasing during storm events. The longer swell components of the wave spectrum have periods of 12–15 s and a height of about 1.5 m [30]. The predominant wave direction is from the west, while the most energetic waves (wave heights exceeding the 95th percentile) originate from the west-southwest (Figure 1B). Winds in the Bay of Cadiz show significant seasonality with dominant Atlantic winds from the W and WNW, and less frequent but more intense Mediterranean winds from the ESE. S-SSW winds reaching speeds of 10–20 m·s⁻¹ are associated with typical storm event conditions, occurring when low-pressure systems move along a SW-NE trajectory [6].

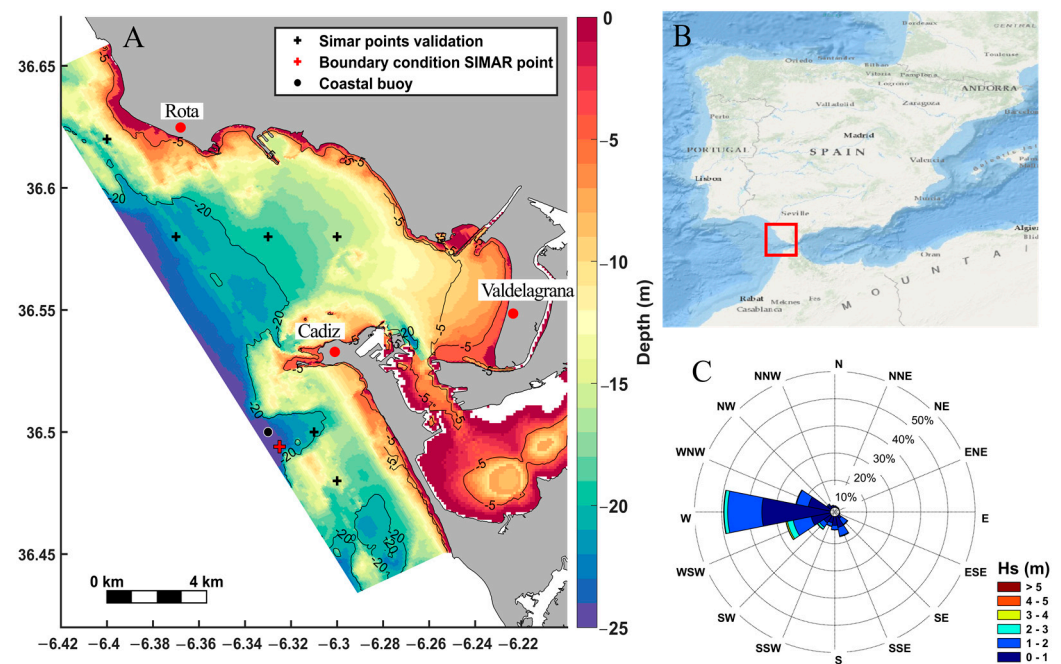


Figure 1. (A) Study area with overlaid bathymetry. (B) Location of the study area, Bay of Cadiz, Andalusia, Spain (C) A wave rose diagram of the significant wave height for a directional wave buoy.

The coastline stretching from the mouth of the Guadalquivir River to the Bay of Cadiz is one of the areas with the highest density of shipwrecks in the world owing to the presence of maritime trade routes since ancient times and the navigational hazards characteristic of this zone. The great archeological significance of Cadiz Bay drove their inclusion under the figure of maximum archeological protection of Andalusia in 2008 (BOJA n°48 of 03/10/2008, Resolution of 17 January 2008).

2. Methods

The proposed methodology for assessing the impact of climate change on the risk of UCH due to wave-induced hazards is structured into four phases (Figure 2). To better assess the temporal evolution of the risk, three time slices are considered: the baseline (1981–2005), the mid-century period (2036–2060), and the end-of-century (2075–2099) period. For each of these time slices, we create two climate change scenarios corresponding to the Representative Concentration Pathways (RCPs) defined in the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): RCP4.5 and RCP8.5. RCP4.5 represents a moderate emission mitigation scenario, while RCP8.5 reflects a high-end, business-as-usual scenario.

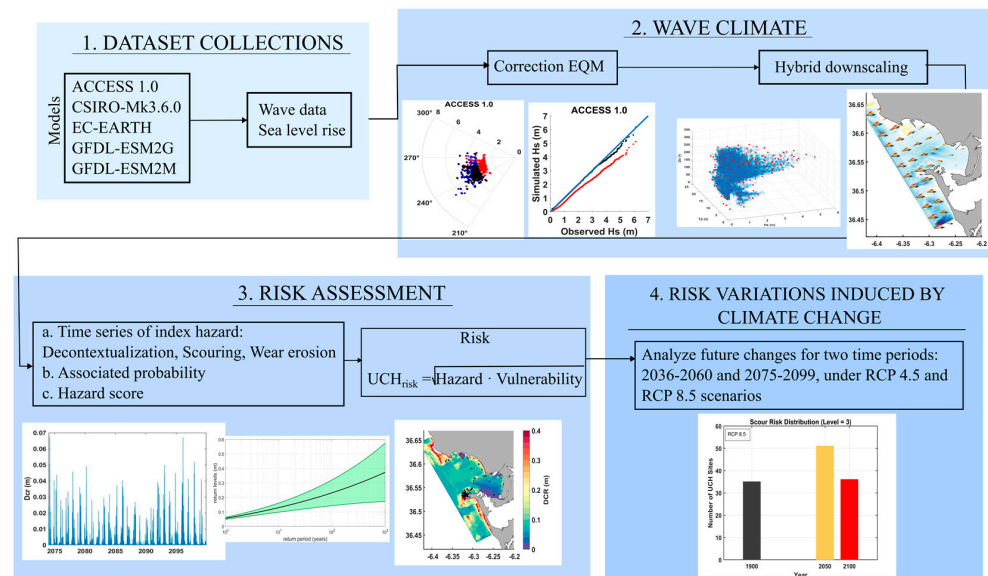


Figure 2. The workflow of the methodology developed to assess the impact of climate change on UCH risk due to wave-induced hazards.

In the first phase, time series of wave parameters and mean global sea level rise are extracted from the output of different global climate models corresponding to the historical runs and RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios [31]. The second phase involves the treatment of RCP4.5 and RCP8.5 wave projections. This includes applying bias correction procedure, followed by propagating the bias-corrected wave field into shallow coastal waters using the hybrid downscaling method while considering sea level perturbation (tide + SLR). In the third phase, a risk assessment is performed for each of the considered hazards: decontextualization, scouring, and wear erosion. Finally, an ensemble mean is calculated using the variables and indices obtained for each of the global climate models, and the impacts of climate change on the risk are analyzed.

2.1. Datasets Collection

Wave Data and Sea Level Rise Projections

The historical wave data used in this study are detailed in Table 1. Given the temporal limitation of available data at the coastal buoy of Cadiz (6.33° W, 36.50° N, 21 m water depth), the buoy data are used to correct the longer timeseries from Med-Wav reanalysis [32] (maintained and distributed by the Copernicus Marine Service). The corrected Med-Wav reanalysis is then utilized for bias adjustment of the global climate model wave projection data (Table 2).

Table 1. Summary of wave data.

Name of Product	Spatial Resolution	Temporal Resolution	Available Period	Obser-Model	Bias Adjust	Institution
Coastal buoy of Cadiz	-	3 h (1996–1997)/ 1 h (1998–2014)	Scalar data: 1996–2019; directional data: 2001–2014	Obser.	none	Puertos del Estado
SIMAR	2.8 km	1 h	From 13-12-2005 to the present	Model	none	Puertos del Estado
MEDSEA-Wav	~4.6 km ($1/24^\circ$)	1 h	1993–2016	Model	EQM by buoy	Copernicus Marine

Table 2. Wave and sea level rise projections. The table includes spatial and temporal atmospheric resolution, bias adjust applied, and affiliated institution.

Model	Atm. Spatial Resolution	Atm. Temporal Resolution	Bias Adjust	Institution
ACCESS 1.0	$1.25^\circ \times 1.9^\circ$, L38	3 h	EQM by MEDSEA-WAVE	CSIRO and Bureau of Meteorology
CSIRO-Mk3.6.0	$1.9^\circ \times 1.9^\circ$, L18	6 h	EQM by MEDSEA-WAVE	CSIRO, Industrial Research Organization & QCCCE
EC-EARTH	$1.1^\circ \times 1.1^\circ$, L62	3 h	EQM by MEDSEA-WAVE	EC-EARTH consortium
GFDL-ESM2G	$2^\circ \times 2.5^\circ$, L48	3 h	EQM by MEDSEA-WAVE	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFDL-ESM2M	$2^\circ \times 2.5^\circ$, L48	3 h	EQM by MEDSEA-WAVE	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

The SIMAR reanalysis dataset (provided by Puertos del Estado) is used to validate the wave propagation methodology to shallow waters (downscaling) in the study area. The SIMAR dataset was generated by concatenating two simulated datasets, SIMAR-44 and WANA. To model wave fields over time, two third-generation models, WAM and WaveWatch III, are used with a nested grid scheme. These models are fed with wind data obtained from the HARMONIE-AROME mesoscale model provided by the State Meteorological Agency (AEMET, Spain). First, SIMAR point data (315047108) are used to propagate the wave time series into the Bay of Cadiz. The propagated wave field is then validated using data from SIMAR points located in intermediate waters at eight different locations within the study area (see Figure 1A). The validation period from 13 December 2005 to 1 May 2003 was selected based on the availability of SIMAR data.

The global wave projection data used in this study (Table 2) were generated using the spectral wave model WaveWatch III (version 4.18, [33]) forced by 10 m wind extracted from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) models ACCESS 1.0 (CSIRO-BOM, Australia), CSIRO-Mk3.6.0 (CSIRO-QCCCE, Australia), EC-EARTH (EC-EARTH consortium), GFDL-ESM2G, and GFDL-ESM2M (NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA). These models attain a horizontal resolution of 0.5° and a temporal resolution of 6 h [23]. The selection of these models is based on their high performance in reproducing synoptic situations and inter-annual variability across Europe [34]. CMIP5 models have a typical resolution of around 1° , which means they do not resolve tropical cyclones and poorly represent midlatitude storms [35].

In our analysis, sea level perturbation considers both tides and mean sea level. In CMIP models, ocean dynamic sea level (DSL) is diagnosed as ZOS [36]. However, DSL simulations from global climate models (GCMs) do not include the effect of sea level pressure on sea level (inverted barometer effect). ZOS varies locally due to ocean circulation and horizontal gradients, with its global mean being zero at every time step. As a result, ZOS excludes global mean sea level rise (GMSLR). The mean sea level, due to thermal expansion, changes in salinity affecting density, and water flows from the atmosphere, land, and glaciers, while always maintaining a constant total volume, is represented by ZOSGA. For this reason, as an approximation to sea level, we use the “adjusted ZOS,” which is the sum of ZOS and ZOSGA. These variables were retrieved from the Earth System Grid (ESG) for the five global models previously mentioned. For the CSIRO-Mk360 model, ZOSTOGA (global mean thermosteric sea level rise; GMTSLR) is used instead of ZOSGA. Meanwhile, for the EC-EARTH model, only ZOS data are available. These are monthly data, so we interpolate them every 6 h and incorporate the tidal effect in order to later integrate them into the reconstruction of wave patterns within the bay. Furthermore, by using 3 h and 6 h wind fields to force wave models, much of the high-frequency nature of the wind climate is not

captured, which could lead to substantial errors when estimating the wave energy resource in a region [37].

2.2. Wave Climate Reconstruction

Global wave models are the most comprehensive tools available for simulating past and future wave climate on a global scale. However, they are unable to accurately simulate wave transformation processes in intermediate and shallow waters due to their limited spatial resolution. This limitation prevents the proper representation of bathymetric and coastal features, leading to systematic biases in the coastal zone.

2.2.1. Bias Adjustment of Global Wave Model

To mitigate these uncertainties, outputs from global wave models are corrected in two stages using wave buoy measurement and high-resolution wave reanalysis data (Med-WAV), involving both scalar and directional corrections. Since directional data from the buoy are limited and only available from 2001 onwards, we are unable to use directly observational data to correct the data from the global wave model, so the correction process is performed in two phases. First, the observational data (1983–2014) are used for the correction of the Med-WAV reanalysis at the location closest to the coastal buoy of Cadiz. Subsequently, in a second phase, the corrected Med-WAV model output (1993–2005) is used to adjust the bias in the global wave projections. The correction in both phases involves a scalar correction using the Empirical Quantile Mapping (EQM) method to address biases across different quantiles [38]. Subsequently, directional adjustment is carried out by dividing wave directions into 22.5° sectors. Within each sector, the difference between the mean directions of Med-WAV and global wave projections is calculated and applied as a correction [39]. The bias adjustment process is applied to the entire analysis period (baseline: 1981–2005; projections: 2006–2099), assuming that model biases and correction functions remain stationary over time.

2.2.2. Hybrid Downscaling

The adjusted global wave model time series are downscaled from deep water to shallow water using the hybrid downscaling methodology proposed by Camus et al. [40]. This approach combines a numerical wave model with statistical techniques and involves selecting a limited number of cases, within the range of 189 to 254 cases, based on the slide period and model. These cases ensure a proper representation of the possible sea states through bulk wave parameters (H_s , T_p , and Dir) and sea level (SL) in deep waters using a maximum dissimilarity selection algorithm. SL accounts for the tide and sea level rise associated with each period and model.

The selected sea states are propagated in the Bay of Cadiz using the third-generation wave model SWAN (“Simulating Waves Nearshore”; [41]). The spatial domain is discretized in a regular mesh with 37.5 m resolution. The mesh resolution is selected to balance the computational cost and the accurate representation of the bathymetric features (i.e., rocky outcrops, rocky shoals, and navigation channels) in the study area. We employ 36 directional bins ($\Delta\theta = 10^\circ$) and 24 frequencies, with logarithmic spacing from 0.05 to 1.00 Hz. The range of the frequency is representative of the wave condition measured in the study area provided by the wave buoy used for the correction of MEDSEA-WAV reanalysis (2001–2014), where most of the data exhibit peak periods shorter than 20 s (see Figure 1 and [7]). The Battjes and Janssen [42] formula represents the depth-limited wave breaking. Then, the time series of the parameters of the propagated sea states are reconstructed at each node of the grid using an interpolation technique based on radial basis functions [40].

The effectiveness and accuracy of the EQM correction procedure and the wave propagation method are evaluated according to the following statistical indicators for scalar quantities:

- The correlation coefficient $ro = \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(R_i - \bar{R}) / \sigma_S \sigma_R$, where N denotes the number of data, S_i and R_i are simulations and reference data, σ_S and σ_R are their corresponding standard deviations, and the over bar denotes time averaging.
- The symmetrically normalized root mean square error, HH, introduced by Hanna and Heinold [43], $HH = \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - R_i)^2 / \sum (S_i R_i)}$. This indicator combines information on the components of average error and dispersion and is characterized by not being biased towards simulations that underestimate the average [44].
- The root mean square error (RMSE), $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (S_i - R_i) \right]^2}$.
- The normalized root mean square error (NRMSE):

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - R_i)^2}{\sum_{i=1}^N (R_i)^2}}$$

- The bias (BIAS), $BIAS = \bar{S} - \bar{R}$.
- The normalized bias (NBI), $NBI = \sum_{i=1}^N (S_i - R_i) / \sum_{i=1}^N (R_i)$.
- The scatter index (SI), $SI = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(R_i - \bar{R}) \right]^2 / \bar{R}_i^2}$.

For the circular direction (θ), the normalized bias (NBI_θ) and the normalized root mean square error ($NRMSE_\theta$) are normalized by employing a 2π radians angle [45]:

- $NRMSE_\theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \text{mod}_{-\pi, \pi}(\theta_{Si} - \theta_{Ri})^2 / N}{2\pi}}$
- $NBIAS_\theta = \sum_{i=1}^N \text{mod}_{-\pi, \pi}(\theta_{Si} - \theta_{Ri}) / 2\pi N$ where the modulo operator $\text{mod}_{-\pi, \pi}$ indicates that if $(\theta_{Si} - \theta_{Ri}) > \pi$, a 2π angle is subtracted from the difference, and if $(\theta_{Si} - \theta_{Ri}) < -\pi$, a 2π angle is added to the difference.

The skill scores are computed for the whole time series but also for the upper tail (>99th) in order to specifically evaluate the capability of the global wave model and downscaling methods to reproduce extreme wave conditions because of their large potential to damage UCH.

2.2.3. Bathymetry and Sediment Characterization

The bathymetry and seabed slope required for wave modeling were derived from multibeam echosounder data obtained during a comprehensive eco-cartographic study conducted in 2011 [46]. Additionally, seafloor mapping using multibeam backscatter data allowed for the classification of seafloor types, distinguishing between rocky and unconsolidated sediments. Sediment grain size was determined using 460 samples collected using a Van Veen grab.

2.2.4. Archeological Datasets

The archeological database, compiled by Fernández-Montblanc et al. [7], provides information about the main characteristics of UCH sites. This dataset includes attributes such as provenance and chronology; material composition (organized into five categories: metallic, stone, glass, ceramic, and wood/organic materials) and dominant material; meta-data, including data source; and basic environmental characteristics of the sites, such depth and seabed type (when available). The archeological database comprises 56 sites of different chronologies spanning from 500 BC to AD 1820.

2.3. Risk Assessment

The risk assessment methodology evaluates UCH vulnerability to wave-induced hazards by calculating a risk index specific to each archeological site [7]. Each UCH site is treated as an asset susceptible to wave-induced damage.

The risk index is calculated as a function of vulnerability (determined by archeological materials, seabed slope, and type) and hazard. The analysis focuses on three primary wave-induced hazards that influence the long-term preservation of UCH: archeological decontextualization (DCR), scouring (SC), and erosive wear (EW). Each of these hazards is assessed independently without considering interactions between them. A response-based approach [47] is used, where hazard probability is directly calculated without presupposing underlying drivers or governing variables.

An indicator is defined for each hazard, and its assessment follows three sequential steps [48,49]. First, the time series of the hazard indicator are calculated based on the depth, seabed, grain size, wave characteristics, and sea level perturbation (tide + sea level rise). Second, extreme hazard probabilities are modeled using a transformed-stationary methodology. In this case, storm events are decluttered using a 72 h time window, and a constant threshold (97th percentile) is applied to select extreme events. The selected extreme events are fitted to a generalized Pareto distribution (see [50] for further details). For the case of archeological decontextualization and scour hazard, values corresponding to a 10-year return period are used as intermediate values in the extreme distribution. However, for the case of erosive wear hazard, a 1-year return period is selected to account for the continuous impact of wear on UCH materials. This reflects the high-frequency, cumulative damage of wear rather than isolated extreme events. Hazard indicators for each return period are ranked, and hazard scores (0 to 5) are assigned (see Table 3).

Table 3. Hazard indicator scores for decontextualization, scouring, and wear erosion.

Critical Size of Decontextualized Object, DCR (m) RT10	Scouring Volume, SV (m ³) RT10	Erosive Wear Potential, EWP (J/m ³) RT1	Scores	Level of Hazard
Dcr < 0.02	SV < 0.05	−20 ≥ EWP < −18	0	None
0.02 ≥ Dcr < 0.04	0.05 ≥ SV < 0.1	−18 ≥ EWP < −16	1	Low
0.04 ≥ Dcr < 0.08	0.1 ≥ SV < 0.15	−16 ≥ EWP < −13.5	2	Low/medium
0.08 ≥ Dcr < 0.12	0.15 ≥ SV < 0.3	−13.5 ≥ EWP < −12.5	3	High/medium
0.12 ≥ Dcr < 0.16	0.3 ≥ SV < 0.4	−12.5 ≥ EWP < −11.5	4	High
Dcr ≥ 0.16	SV ≥ 0.4	EWP ≥ −11.5	5	Very high

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

Given the limited amount of information about UCH sites, we assume that all of them have the same exposure value. The risk index is calculated as the geometric square root of the product of the hazard and the vulnerability scores [48,51]. The vulnerability index ranges from 1 to 5 and is determined by the material composition of the UCH site and the specific hazard considered (refer to Table 4).

$$\text{UCHrisk} = \sqrt{\text{Hazard} \cdot \text{Vulnerability}} \quad (1)$$

Table 4. Vulnerability scores in common material in underwater cultural heritage sites for decontextualization, scouring, and wear erosion hazard.

	Material Category	Material Type	Vulnerability Score
Decontextualization	Metallic	Gray iron	1
	Stone	Marble	2
	Glass	Glass	3

Table 4. Cont.

	Material Category	Material Type	Vulnerability Score
Scouring	Ceramics	Coarse ware	4
	Wood/organic material	Oak	5
	Glass	Glass	1
	Metallic	Gray iron	2
	Ceramics	Coarse ware	3
	Stone	Marble	4
	Wood/organic material	Oak	5
	Stone	Marble	1
Wear erosion	Metallic	Gray iron	2
	Ceramics	Coarse ware	3
	Glass	Glass	4
	Wood/organic material	Oak	5

Sites are classified as “at risk” when $UCH_{Risk} > 3.2$, a threshold derived as the rounded geometric mean of “low” (2) and “very high” (5) classes. Higher UCH_{Risk} values indicate a combination of medium to very high vulnerability and hazard classes.

2.4. Wave Energy Flux

Wave energy flux (WEF) serves as comprehensive indicator of wave climate within the study area.

To account for water depth effects, the WEF calculation follows the methodology outlined by Liang et al. [52]:

$$WEF = \frac{\pi \rho g h H_s^2}{16 T_e} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (2)$$

where ρ is the water density, g is the gravitational acceleration, h is the water depth taking into account the sea level perturbation (tide and sea level rise), and H_s and T_e are the significant wave height and energy period, respectively, where T_e can be approximated as $T_e = T_p$. T_p denotes the peak period, while $k = 2\pi/L$ represents the wave number, and L is the wavelength. An extreme value analysis of the WEF time series is conducted for each grid node using the methodology in Section 2.3, focusing on a 10-year return period.

2.5. Variations in WEF and UCH Risk Induced by Climate Change

From the 5-member model ensemble, and for each considered period and scenario, we calculate the ensemble mean and standard deviation of WEF, hazard indices, and risk.

Model agreement is evaluated based on the coefficient of variation (CV) [53–55]. The CV is defined as the ratio of the standard deviation of the model ensemble, σ , to the ensemble mean value:

$$CV = \frac{\sigma_\alpha}{\bar{\alpha}} \quad (3)$$

where σ_α is the standard deviation of the model ensemble and $\bar{\alpha}$ is the ensemble mean. CV decreases as intra-model variability becomes a smaller fraction of the ensemble mean value, implying greater agreement among models and statistical significance of the ensemble mean value. To reduce uncertainty, values with $|CV| > 0.8$ are not considered, corresponding approximately to an average agreement of four out of five models (i.e., 80% probability).

Finally, WEF or UCHrisk variation induced by climate change is assessed by means of absolute changes ($\Delta\alpha$) for each period (mid-century and end-of-century periods) corresponding to the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios (α_{RCP}) with respect to baseline values (α_{baseline}):

$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{RCP}} - \alpha_{\text{baseline}} \quad (4)$$

3. Results

3.1. Wave Climate

3.1.1. EQM Correction

Global wave model outputs, with and without correction, were compared with corrected Med-WAV (Figure 3). The uncorrected global models underestimate significant wave height (Hs) values and extreme Hs values. This is particularly noticeable for ACCESS 1.0, GFDL-ESM2G, and GFDL-ESM2M (Figure 3A,D,E; also, see Table S1 in SM) where the EQM largely improves the Hs NBI index. CSIRO-Mk3.6.0 and EC-EARTH show better performance (HH ~0.8; Table S1 in SM) with an EQM improvement of ~5% in HH.

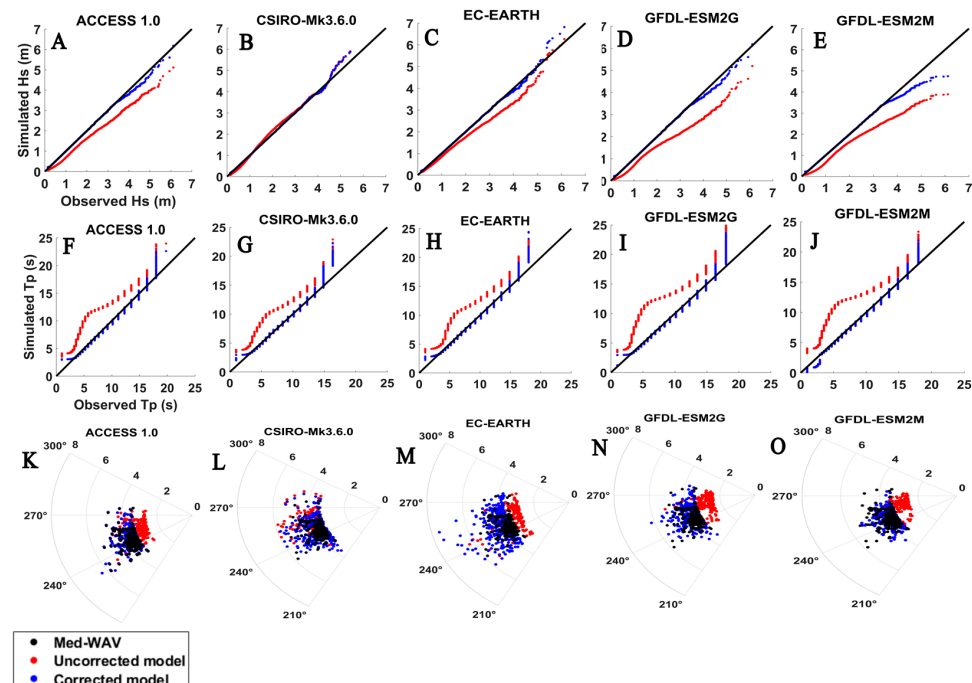


Figure 3. Q-Q plot of significant wave height (Hs) (A–E) peak period (Tp) (F–J). Polar plot for wave heights exceeding 99th percentile (K–O). Uncorrected global wave model (red), corrected global wave model (blue), and Med-WAV reanalysis (black) are represented.

The uncorrected global wave model outputs overestimate, in general, the peak period (Tp) (NRMSE ~0.6), with EQM correction improving ~10% for CSIRO-Mk3.6.0 and EC-EARTH models (Figure 3G,H) and ~18% for the rest of the models (Figure 3F,I,J).

For the case of wave directions with an Hs greater than or equal to the 99th percentile (P99), the uncorrected models show a deviation of approximately 25° (NRMSE₀ ~39°; Figure 3K,L,N,O). After applying the EQM correction, this improves by 63% (NRMSE₀ ~20°), except for the case of EC-EARTH, where the bias increases by 66% (Figure 3M). Overall, in the study area, EC-EARTH and CSIRO-Mk3.6.0 show the best agreement with the Med-WAV reanalysis, both with and without correction. Specifically, CSIRO shows better alignment for Hs, especially for extreme values. On the other hand, EC-EARTH performs better in capturing extreme Tp values compared to the other models. Regarding wave direction, EC-EARTH

shows the best agreement among the uncorrected models. However, after applying the EQM correction, CSIRO achieves the most accurate alignment with the observed data.

3.1.2. The Validation of the Wave Propagation Method

This section summarizes the performance of the wave propagation method to reproduce average and extreme wave conditions (>99th). This step is crucial for reducing the uncertainties associated with global models, which do not accurately represent wave transformation processes in intermediate and shallow waters due to their limited spatial resolution. Due to the lack of observational data within the bay, SIMAR points were selected to assess the model's performance within the bay. SIMAR reanalysis was selected as the best alternative due to its wide spatial distribution in the region, good temporal coverage, and frequent use in wave studies conducted across the Iberian Peninsula (e.g., [56,57]). Table 5 shows the average values of skill scores for Hs, Tp, and Dir calculated in the eight SIMAR locations in the Bay of Cadiz. The validation indicates a good performance, especially for extreme wave conditions, for Hs (ro = 0.95; HH = 0.07) and Tp (ro = 0.82; HH = 0.18). The biases related to Hs are practically zero, while Tp is generally affected by a negative bias. However, the results are quite adequate. The wave direction shows also good agreement, although performance worsens in extreme events.

Table 5. Statistical scores for mean and extreme significant wave height, peak period, and mean direction between propagated series and SIMAR points.

	ro	HH	NRMSE	NBI
Hs (m)	0.96	0.18	0.18	0.05
P99 Hs	0.95	0.07	0.07	−0.02
Tp (s)	0.82	0.28	0.26	−0.14
P99 Tp (s)	0.83	0.18	0.17	−0.11
Dir (°)	-	-	2.60	−1.72
P99 Dir (°)	-	-	13.42	38.39

3.2. Changes in WEF

Scalar and Direction Climate

The WEF associated with a 10-year return period (RT10) shows maxima (around $15 \times 10^4 \text{ Wm}^{-1}$) in the outer domain and by the rocky outcrops outside the bay. Minima appear by the coast, where shallow depths and the wave breaking limit reduce the WEF, and inside the bay due to the protective effect of the Cadiz tombolo against wave front propagation (Figure 4A). Under RCP4.5, the WEF associated with RT10 shows a general decrease, slightly increasing only by some coastal stretches, over rocky outcrops and inside the bay (Figure 4B,C). The general WEF decrease is weaker in the end-of-century period than in the mid-century period as a result of the larger SLR. The mid-century RCP8.5 WEF change pattern replicates that of the RCP4.5 WEF, but with a weaker general decrease and slightly larger increments located in the shallower areas (Figure 4E). By the end-of-century period in RCP8.5, there is a general WEF increase, with maxima located at shallow waters and rocky outcrops (Figure 4F). Additionally, a southward shift in the WEF direction is evident in all cases except for RCP4.5 in the mid-future period.

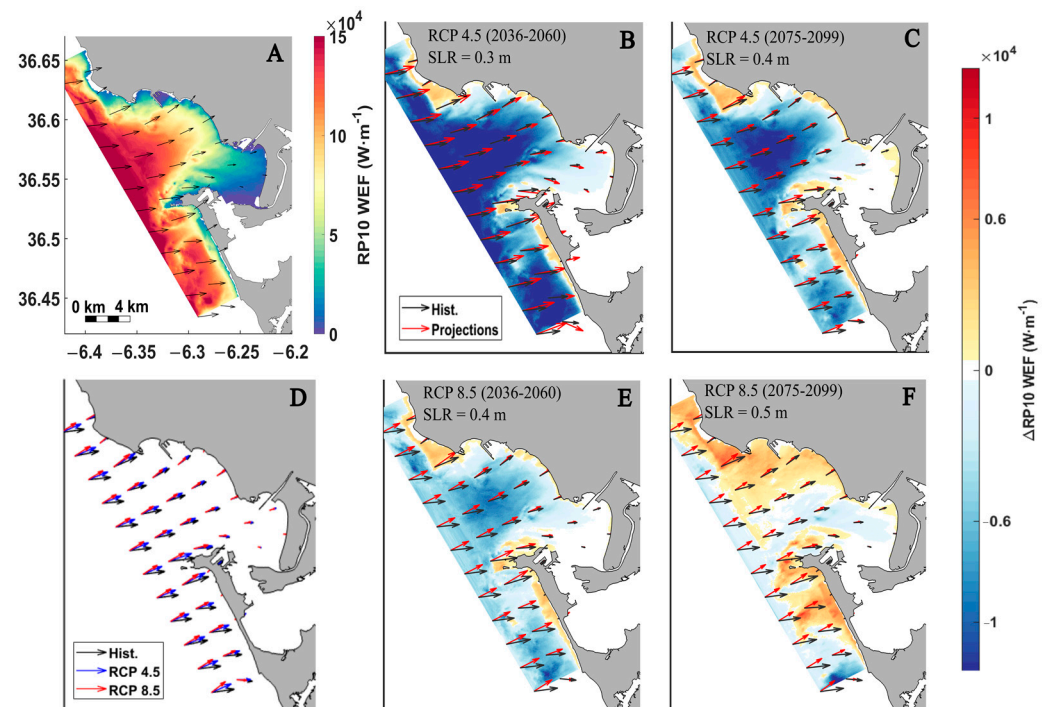


Figure 4. (A) The wave energy flux corresponding to the 10-year return period and the mean direction associated with the 99th percentile or greater of the WEF (black arrow). The absolute change and mean direction associated with the 99th percentile of the WEF for each simulation (red arrow): (B) the 2036–2060 period of the RCP 4.5 scenario, (C) the 2075–2099 period of the RCP 4.5 scenario, (E) the 2036–2060 period of the RCP 8.5 scenario, and (F) the 2075–2099 period of the RCP 8.5 scenario. The sea level rise (SLR) for each period is shown in the bottom left corner and represents the average increase calculated from the five global models used. (D) The mean direction associated with the 99th percentile or greater of the WEF for the historical period (black arrow), the end-of-century period of the RCP 4.5 scenario (blue arrow), and the end-of-century period of the RCP 8.5 scenario (red arrow).

Such a direction shift also takes place for the most energetic waves. Figure 4D shows the average of the directions of the extreme waves (>99th) for the historical period and for the end-of-century period in the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. While the most energetic waves impact the bay from the west (ca. 263°) during the historical period, they come from 250° in the RCP 4.5 scenario and from 240° in RCP 8.5. This change in the direction of incident waves in the bay leads to an alteration in their propagation within the Bay of Cadiz, resulting in a greater impact on the areas of Rota, Cadiz, and the surrounding areas.

To determine how the increase in sea level affects wave propagation, the methodology is repeated without considering the SLR (Figure 5). These results show a larger WEF decrease than when considering SLR, which is particularly notable over the shallow coastal areas and rocky outcrops, where the depth increase due to SLR makes a substantial contribution to the WEF.

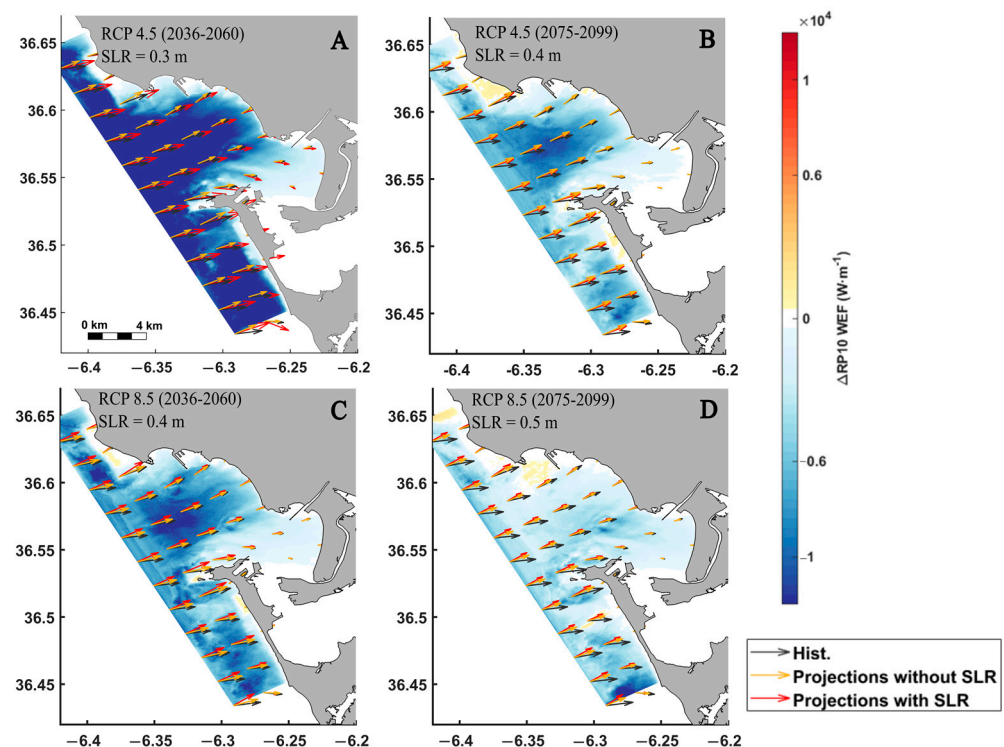


Figure 5. The absolute changes in wave energy flux (WEF) with and without sea level rise are shown for the following: (A) the 2036–2060 period of the RCP 4.5 scenario, (B) the 2075–2099 period of the RCP 4.5 scenario, (C) the 2036–2060 period of the RCP8.5 scenario, and (D) the 2075–2099 period of the RCP 8.5 scenario. The mean direction associated with the 99th percentile or greater of the WEF for the historical period (black arrow) is shown with sea level rise (red arrow) and without SLR (orange arrow) projections.

3.3. Hazard Assessment

3.3.1. Decontextualization Hazard

We relate decontextualization hazard (DCR) to the maximum critical diameter of an object (we assume sphericity) susceptible to be displaced due to wave action over a 10-year return period (Figure 6). All projections present a slight general reduction in the value of DCR, except for the bay's interior and shallower areas, where local significant increases (up to 25%) are observed compared to the historical period. This result aligns with the projected general reduction in the WEF and its local increase in shallower areas. In shallow areas, the wave-induced bottom stress is larger, but as wave orbital velocity strongly attenuates with an increasing depth (Figure S1), DCR is reduced throughout the rest of the bay. The mid-century RCP4.5 and the end-of-century RCP8.5 scenarios exhibit the most substantial hazard changes. However, the result of these changes reflects only as a decrease in the bay area under a hazard score of 3 and an increase in the bay area as a hazard score of 2. The percentages of the bay area classified as high and very high hazards (scores of 4 and 5; Figure 6D) remain nearly unchanged.

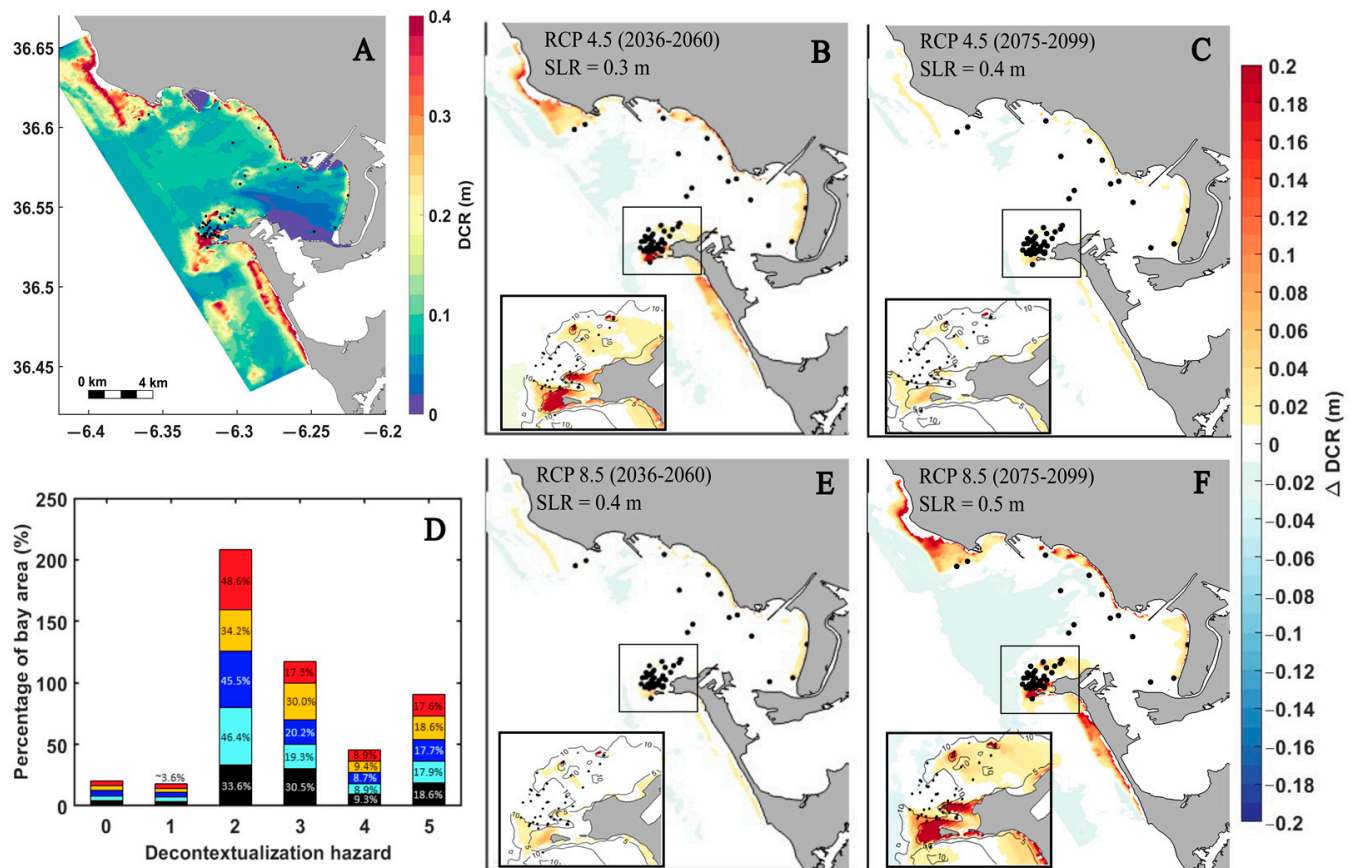


Figure 6. (A) A map of decontextualization hazard (the critical diameter of an object moved under wave action) for the historical period. The absolute change in this hazard for (B) the 2036–2060 period of the RCP 4.5 scenario, (C) the 2075–2099 period of the RCP 4.5 scenario, (E) the 2036–2060 period of the RCP 8.5 scenario, and (F) the 2075–2099 period of the RCP 8.5 scenario compared with the historical period. The black points indicate the locations of UCH sites. (D) A histogram of the hazard at UCH sites and hazard classes. The sea level rise (SLR) for each period is shown in the bottom left corner and represents the average increase calculated from the five global models used.

3.3.2. Scour Hazard

The scour hazard indicator is represented by the potential volume of scouring corresponding to a 10-year return period (Figure 7). In general, no significant changes in the scouring hazard are observed in the Bay of Cadiz for all the scenarios and periods considered. However, locally significant variations are identified in the shallower areas of the bay (less than 5 m) and in some rocky outcrops, such as those located off Rota and Cadiz. In these areas, the RCP 4.5 scenario for the mid-century period and the RCP 8.5 scenario for the end-of-century period show mostly positive anomalies, while the RCP 4.5 scenario for the end-of-century period and the RCP 8.5 scenario for the mid-century period exhibit mostly negative anomalies. These changes result in an increase in the percentage of the bay area classified as a high hazard level (4), accompanied by a decrease in the very high hazard level (5; Figure 7D). The percentage change is very similar across all periods; however, it is at the end of the century for the RCP 4.5 scenario where the greatest reduction in the percentage of the bay area classified as having a very high hazard level is observed.

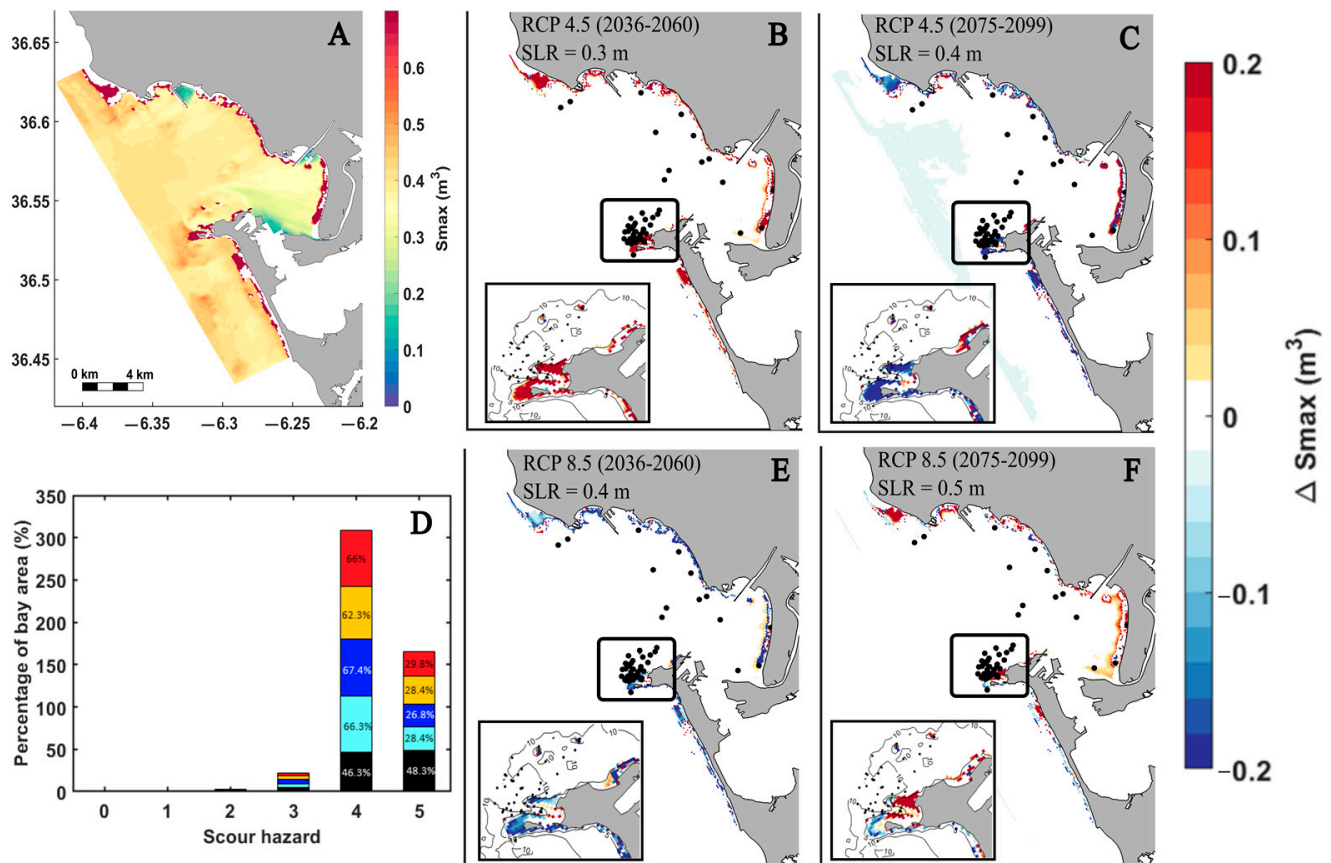


Figure 7. (A) A map of the scour hazard (scour volume) for the historical period. The absolute change in this hazard for (B) the 2036–2060 period of the RCP 4.5 scenario, (C) the 2075–2099 period of the RCP 4.5 scenario, (E) the 2036–2060 period of the RCP 8.5 scenario, and (F) the 2075–2099 period of the RCP 8.5 scenario compared with the historical period. The black points indicate the locations of UCH sites. (D) A histogram of the hazard at UCH sites and hazard classes. The sea level rise (SLR) for each period is shown in the bottom left corner and represents the average increase calculated from the five global models used.

3.3.3. Wear Erosion Hazard

The indicator erosive wear hazard is analyzed by means of the erosion potential (Figure 8). This hazard exhibits the most significant future changes compared to the historical period. The changes for both scenarios are predominantly positive, indicating an increase in the magnitude of the hazard. These changes are more intense near the southern entrance of the bay, where most UCH sites are located. However, significant negative anomalies are also recorded at the rocky outcrops off the city of Cadiz, being more pronounced in the RCP 8.5 scenario, particularly towards the end of the century. As a result, there is an increase in the percentage of the bay area that will be affected by a very high hazard level (5) for erosive wear hazard (Figure 8D).

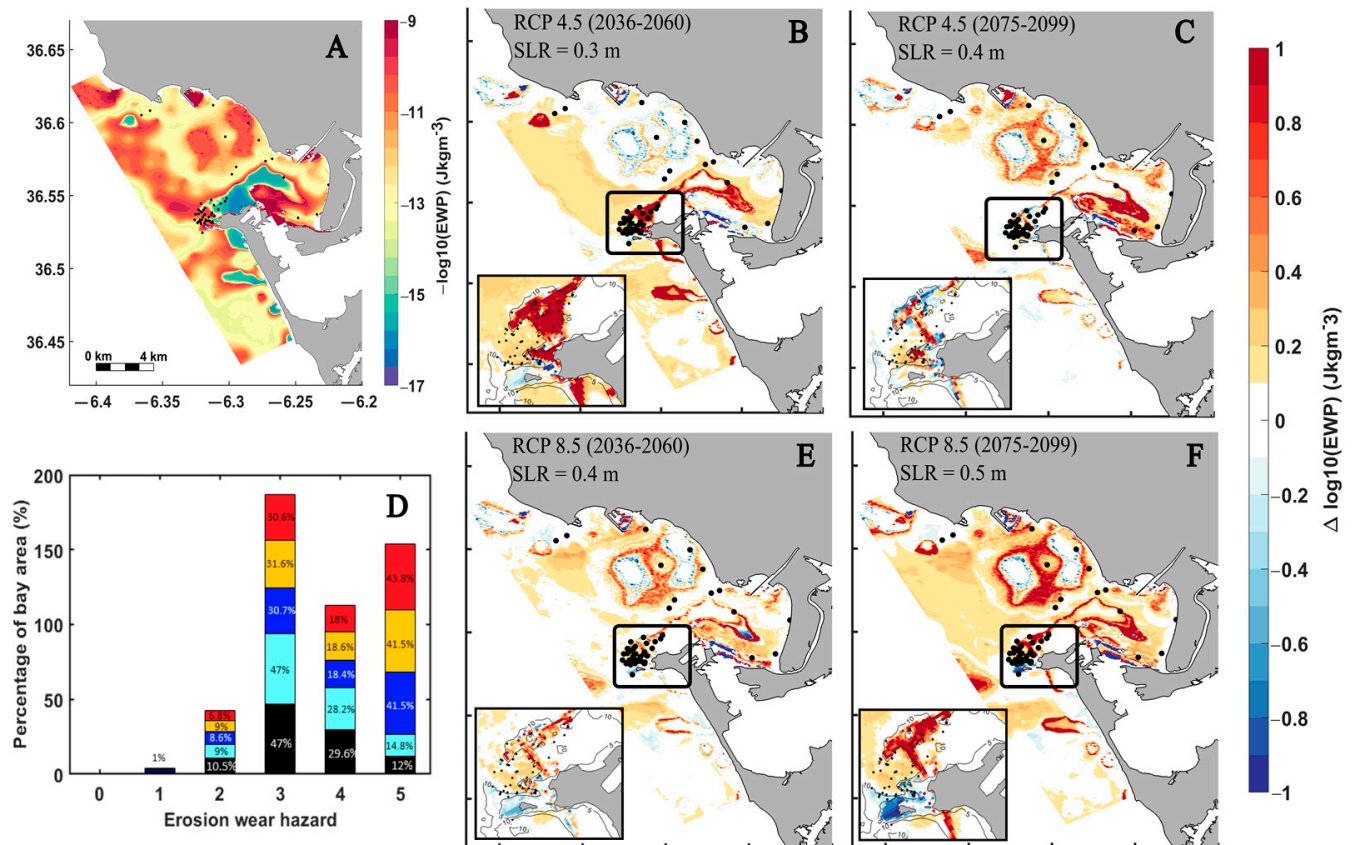


Figure 8. (A) A map of the erosive wear hazard (log of erosive wear potential) for the historical period. The absolute change in this hazard for (B) the 2036–2060 period of the RCP 4.5 scenario, (C) the 2075–2099 period of the RCP 4.5 scenario, (E) the 2036–2060 period of the RCP 8.5 scenario, and (F) the 2075–2099 period of the RCP 8.5 scenario compared with the historical period. The black points indicate the locations of UCH sites. (D) A histogram of the hazard at UCH sites and hazard classes. The sea level rise (SLR) for each period is shown in the bottom left corner and represents the average increase calculated from the five global models used.

3.4. UCH Risk Assessment

Figure 9 shows the underwater cultural heritage risks (UCHRs) at the studied sites in the Bay of Cadiz. During the historical period, there are 7 UCH sites under decontextualization risk, 19 under scour risk, and 21 under wear erosion risk (UCHR_{DE} , UCHR_{SC} , and $\text{UCHR}_{\text{EW}} > 3.2$). The sites under risk are mainly located around the city of Cadiz, with the exception of two located by the eastern coast of the Bay of Cadiz (Valdelagrana). In general, the sites present lower risk values associated with decontextualization and larger risk values associated with erosion wear. In the historical period, the distribution of risks is skewed towards low values for UCHR_{DE} , centered near 3.2 for UCHR_{SC} , and it presents a bimodal distribution with a narrow peak at 3.8 for UCHR_{WE} . In the future scenarios, the number of UCH sites at risk (>3.2) remains unchanged for the risks of decontextualization and scouring. However, for wear erosion under the RCP 4.5 scenario, the number of sites at risk increases from 21 to 23 at the mid-century period and to 22 at the end of the century (Figure 10). The sites turning under risk are located at the rocky outcrops off the city of Cadiz and are related to strong and very local changes in erosion wear hazard (see Figure 8).

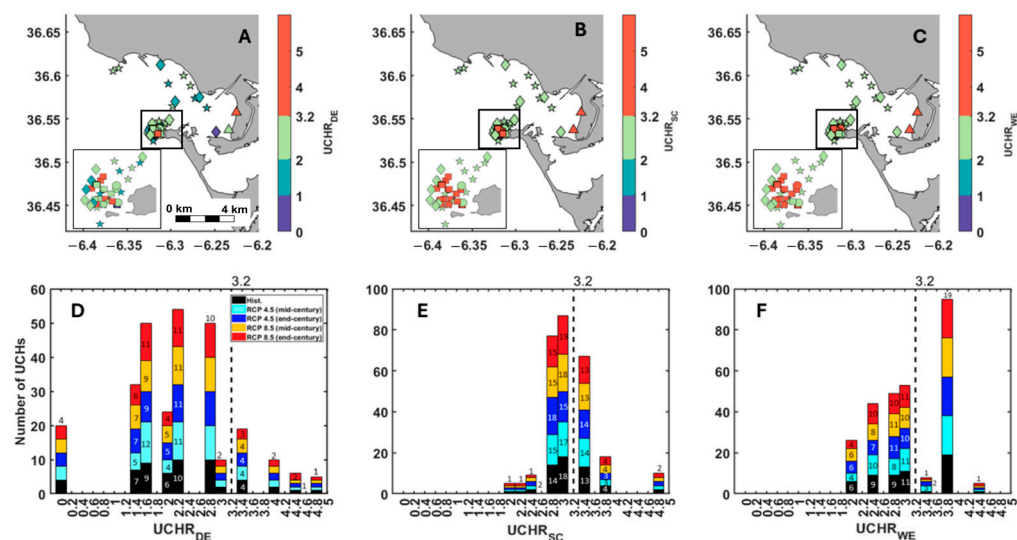


Figure 9. (A) The decontextualization risk ($UCHR_{DE}$) for UCH sites located in the Bay of Cadiz, (B) the scour risk ($UCHR_{SC}$) for UCH sites, and (C) the wear erosion risk ($UCHR_{WE}$) for UCH sites. Warm colors indicate a higher risk index, and different shapes refer to the prevalent material (diamonds, metallic material; squares, ceramic material; filled circles, stone; triangles, wood/organic material; pentagons, unknown material). Accumulated graphs of the classification of UCHs in terms of the risks of (D) decontextualization, (E) scour, and (F) wear erosion.

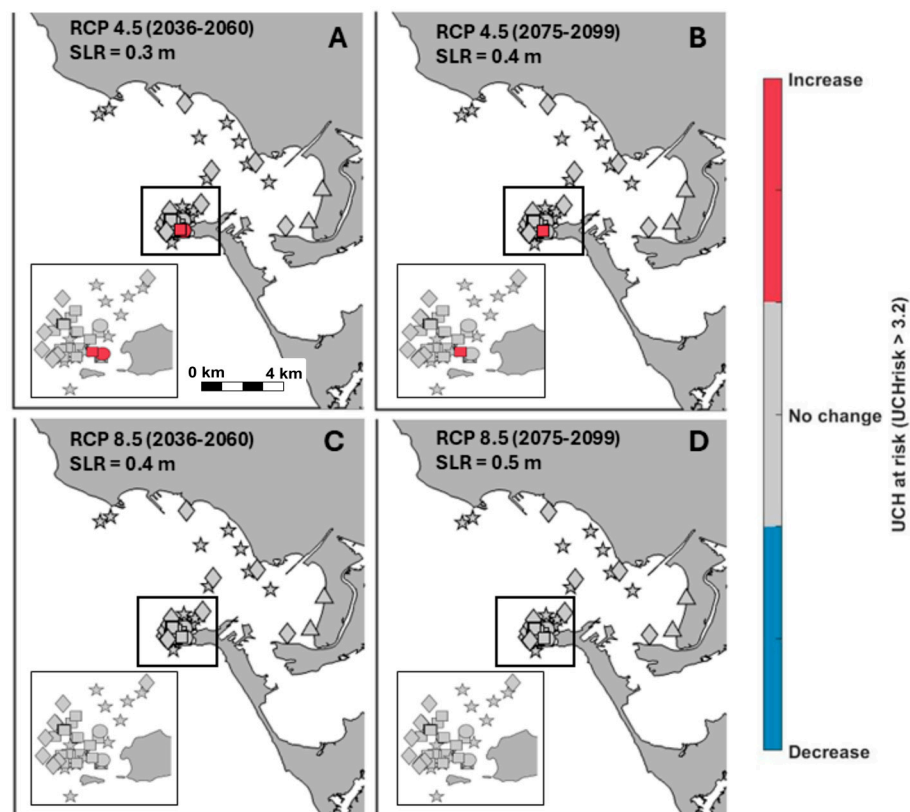


Figure 10. The erosive wear risk ($UCHR_{WE}$) for UCH sites located in the Bay of Cadiz. The absolute change for (A) the 2036–2060 period of the RCP 4.5 scenario, (B) the 2075–2099 period of the RCP 4.5 scenario, (C) the 2036–2060 period of the RCP 8.5 scenario, and (D) the 2075–2099 period of the RCP 8.5 scenario compared with the historical period. The sea level rise (SLR) for each period is shown in the bottom left corner and represents the average increase calculated from the five global models used.

4. Discussion

This study outlines a methodology to evaluate the impacts of climate change on UCH through wave-induced hazards. It is based on a hybrid downscaling [33] of the bias-corrected wave fields [31,32] corresponding to the CMIP5 RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. Both scenarios show a robust reduction in significant wave height in the North Atlantic (see also Wang et al. [58] and Lemos et al. [59]). However, most UCH is placed in shallow coastal areas, where the wave fields will be affected by shallow water processes, coastline orientation and bathymetric relief, and by the concurrent SLR; therefore, downscaling the global wave fields is necessary. Our results show that the use of the EQM method and the directional adjustment improved the global wave model outputs (see Table S1). This correction is key for obtaining accurate high-resolution wave propagated fields. This is corroborated by the validation of the wave downscaled fields against SIMAR reanalysis points (Table 3). The validation presented very good results for both mean wave climate and for extreme P99 waves.

Changes in the future WEF are the result of the combination of changes in projected significant wave height, energy (~peak) period, and depth changes (Equation (2)). As changes in peak period are small, the resulting WEF changes result from the opposite contribution of significant wave height diminution and sea level rise. The result is a general reduction in the WEF in the Bay of Cadiz, with local increases in shallow rocky outcrops and coastal areas, where the depth increase by SLR allows for the higher waves to appear without breaking. These results are consistent with the findings of Aarns et al. [25] and Chaigneau et al. [28], who demonstrated that changes in depth induced by sea level rise can lead to higher wave amplitudes near the coast. The impact of sea level variations is substantially more important on extreme significant wave heights over the wide continental shelf where shallow water dynamics prevail, particularly in large tidal range areas [28]. However, our results show the important contribution of SLR to changes in the WEF in a mesotidal bay (see Figure 5). This demonstrates that accurate high-resolution wave propagation fields enable better capture of the nonlinear interactions between sea level and waves. Additionally, there is a shift in the direction of incident waves, increasing the wave exposure in certain areas of Cadiz and Rota. Along with these changes in the WEF, there is a reduction in wave orbital velocity (Figure S1; increased depth and decreased H_s), which is a fundamental parameter for UCH risk assessment, either by direct impact of orbital velocity on object decontextualization or scour and wear erosion impact.

Our assessment of the impact of wave climate changes on UCH hazards shows limited consequences. For decontextualization and scour hazard, the changes in the critical diameter of the moved object and in scour volume are, in general, small. There are considerable changes only in those locations (shallows and coastal areas), where the hazard indicators already had maximum values and had very high hazard levels (>0.16 m and >0.4 m³ for decontextualization and scour indicators, respectively (Table 3; Fernández-Montblanc et al. [7])). Therefore, it is not surprising that remarkable increases, such as the 0.2 m increase in the decontextualization hazard indicator, have no clear impact on the distribution of hazard levels within the bay. Indeed, there is a strong sensitivity of the hazard change assessment to the definition of the hazard level classes.

Hazard and vulnerability thresholds are mainly determined through the likelihood of exceeding certain predefined thresholds [60] and active participation from local users and stakeholders responsible for the management and conservation of cultural heritage [61,62]. The reliance on hazard categories based on historical data assumes that future conditions will follow probability distributions similar to those of the past. However, climate change is significantly altering these distributions, increasing the frequency and intensity of extreme events, which shifts hazard thresholds toward higher categories. This could explain

why there are not important changes in UCH risk under the considered climate change scenarios; however, this does not imply that such changes are not occurring. The lack of quantitative data on observed and projected impacts under different climate scenarios limits the ability to establish acceptable risk thresholds and develop effective adaptation and mitigation strategies [63].

The proposed methodology represents the first attempt, to our knowledge, for addressing UCH risk assessment for wave-induced hazards under climate change projections, and it is not free of shortcomings and limitations. Some of the methodological limitations related to the simplifications applied to hazard quantification are exposed in [7]. Here, it is necessary to add the assumption used in the EQ bias correction that the wave parameter distributions (period, height, and direction) will remain unchanged in the future. Clearly, this may not be the case in real life, but it is the simplest and best choice we have. It is important to note that our study did not include the contribution of storm surge to the water level, as it was initially omitted due to the predominant influence of tides on the total water level in the study area. Additionally, the lack of consideration for possible changes in morphodynamic processes, such as those related to depth and the interaction between waves and currents, represents a significant limitation in our analysis. It is crucial to recognize that the relative rise in sea level could be mitigated by sediment accommodation depending on the sediment budget, which would have a substantial impact on coastal dynamics. Furthermore, the impact of waves on sea level was not included; if this factor was incorporated into the ocean model, it would result in a higher sea level, which, in turn, would have a greater effect on wave propagation and the hazards affecting underwater cultural heritage. For future research, it would be valuable to conduct a multiple-hazard analysis to assess whether risky events occur simultaneously in a cascading or cumulative manner over time. In risk assessment studies, multidisciplinary approaches and the use of precise data are of utmost importance for managing the impacts of climate change in coastal contexts [64]. Furthermore, the proposed methodology must be expanded to other environmental factors influencing UCH preservation (i.e., water temperature, salinity, and pH) to provide a holistic methodology to assess the evolution of the natural hazards affecting the in situ preservation of UCH in the context of CC.

5. Conclusions

Future changes in sea levels and wave climate in coastal areas represent one of the major threats to the preservation and conservation of underwater cultural heritage (UCH). However, understanding how these changes will unfold in the long term and the associated hazards remains a challenge due to the complexity and interaction between the processes involved. In this study, we propose an innovative methodology to assess the risk to UCH in shallow waters based on hybrid downscaling using an ensemble derived from CMIP5 wave projections. This methodology applies downscaling to bias-corrected wave fields corresponding to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios from CMIP5. The approach focuses on the primary wave-induced hazards, considering their impact on the long-term preservation of UCH: archeological decontextualization, scouring, and wear erosion. To evaluate the effects of climate change, we compare the historical period (1981–2005) with two future periods, the mid-century (2036–2060) and end-of-century (2075–2099) periods, for both scenarios.

First, we present and validate the methodology for wave correction and propagation. Our results show that the use of the EQM method and directional adjustment improved the global wave model outputs, which is essential for obtaining high-resolution and accurate propagated wave fields. Second, we assessed changes in wave climate, observing a general reduction in the wave energy flux in the Bay of Cadiz, with local increases in rocky outcrops

and coastal areas, where the increased depth due to SLR allows higher waves to appear without breaking. This finding highlights the importance of high-resolution wave fields in capturing the nonlinear interactions between sea level and waves. Additionally, a shift in the direction of incident waves was identified, increasing wave exposure in certain areas of Cadiz and Rota.

In the bay, a general reduction in wave orbital velocity is observed due to increased depth and decreased significant wave height. This parameter is crucial for assessing UCH risk, as most UCH sites lie on the seafloor. However, in shallow areas, where the highest density of UCH is concentrated, significant changes in decontextualization and scouring hazards are observed. The only relevant changes in risk ($UCH_{risk} > 3.2$) are associated with wear erosion, particularly in the sites located on rocky outcrops off the city of Cadiz, where local changes in this hazard are marked. However, the strict definitions of hazard level classes, which shift thresholds toward higher categories, do not adequately reflect the changes in hazard classes. This factor could explain why significant changes in UCH risk are not observed under the considered climate change scenarios, although this does not imply that such changes are not occurring.

In conclusion, this study emphasizes the importance of conducting local-scale studies that incorporate the nonlinear interactions between sea level and waves in extreme wave studies, as these interactions could lead to local trends in wave energy that are different to those indicated in the global projections. This could result in variations in the impact on UCH risk in specific areas. It is also crucial to consider the high sensitivity in defining hazard level classes, as inadequate definitions may mask significant changes in UCH risk. The obtained results offer the possibility to iteratively redefine the hazard level and/or hazard classes accounting for future changes. The proposed methodology offers a tool to perform a quantitative analysis on the impact of CC on UCH rather than the existing state-of-the-art qualitative approach and method. The methodology developed in this study therefore represents a crucial step toward a more accurate understanding and more effective management of UCH risk in the face of climate change, an area that has been relatively overlooked until now. This tool provides innovative approaches for decision making in the protection and conservation of this invaluable heritage.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/jmse13010136/s1>.

Author Contributions: Conceptualization, C.F.-M., A.I. and T.F.-M.; methodology, C.F.-M., A.I. and T.F.-M.; software, C.F.-M., A.I. and T.F.-M.; validation, C.F.-M., A.I. and T.F.-M.; formal analysis, C.F.-M., A.I. and T.F.-M.; investigation, C.F.-M., A.I. and T.F.-M.; resources, C.F.-M., A.I., M.B. and T.F.-M.; data curation, C.F.-M., A.I. and T.F.-M.; writing—original draft preparation, C.F.-M.; writing—review and editing, C.F.-M., A.I., M.B. and T.F.-M.; visualization, C.F.-M.; supervision, A.I. and T.F.-M.; project administration, M.B. and T.F.-M.; funding acquisition, M.B. and T.F.-M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study was partially supported by the Ministry of Science and Innovation thorough the project “Vulnerability of littoral cultural heritage to environmental agents: impact of climate change (VOLICHE)” (PID2020-117812RB-I00/AEI/10.13039/501100011033).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

Acknowledgments: The authors acknowledge Lorenzo Mentaschi for his useful suggestions and for providing the global wave projection dataset used in this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

- Thiébot, J.; Idier, D.; Garnier, R.; Falqués, A.; Ruessink, B.G. The Influence of Wave Direction on the Morphological Response of a Double Sandbar System. *Cont. Shelf Res.* **2012**, *32*, 71–85. [\[CrossRef\]](#)
- Pérez-Reverte Mañas, C.; Cerezo Andreo, F.; López Osorio, P.; González Gallero, R.; Mariscal Rico, L.; Arévalo González, A. Underwater Cultural Heritage as an Engine for Social, Economic and Cultural Development. State of Research at the University of Cadiz (Andalusia, Spain). *Heritage* **2021**, *4*, 2676–2690. [\[CrossRef\]](#)
- Khakzad, S.; Pieters, M.; Van Balen, K. Coastal Cultural Heritage: A Resource to Be Included in Integrated Coastal Zone Management. *Ocean Coast. Manag.* **2015**, *118*, 110–128. [\[CrossRef\]](#)
- Potts, A.L.A. *European Cultural Heritage Green Paper*; Europa Nostra: The Hague, The Netherlands; Brussels, Belgium, 2021.
- Quinn, R. 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.* **2006**, *33*, 1419–1432. [\[CrossRef\]](#)
- Fernández-Montblanc, T.; Quinn, R.; Izquierdo, A.; Bethencourt, M. Evolution of a Shallow Water Wave-Dominated Shipwreck Site: Fougues (1805), Gulf of Cadiz. *Geoarchaeology* **2016**, *31*, 487–505. [\[CrossRef\]](#)
- Fernández-Montblanc, T.; Bethencourt, M.; Izquierdo, A. Underwater Cultural Heritage Risk Assessment Methodology for Wave-Induced Hazards: The Showcase of the Bay of Cadiz. *Front. Mar. Sci.* **2022**, *9*, 1005514. [\[CrossRef\]](#)
- Fernández-Montblanc, T.; Izquierdo, A.; Quinn, R.; Bethencourt, M. Waves and Wrecks: A Computational Fluid Dynamic Study in an Underwater Archaeological Site. *Ocean Eng.* **2018**, *163*, 232–250. [\[CrossRef\]](#)
- McNinch, J.E.; Wells, J.T.; Trembanis, A.C. Predicting the Fate of Artefacts in Energetic, Shallow Marine Environments: An Approach to Site Management. *Int. J. Naut. Archaeol.* **2006**, *35*, 290–309. [\[CrossRef\]](#)
- Astley, A.J. The Taphonomy of Historic Shipwreck Sites. Ph.D. Thesis, University of Southampton, Southampton, UK, 2016.
- Bates, C.R.; Lawrence, M.; Dean, M. Robertson Geophysical Methods for Wreck-Site Monitoring: The Rapid Archaeological Site Surveying and Evaluation (RASSE) Programme. *Int. J. Naut. Archaeol.* **2011**, *40*, 404–416. [\[CrossRef\]](#)
- Quinn, R.; Smyth, T.A.G. Processes and Patterns of Flow, Erosion, and Deposition at Shipwreck Sites: A Computational Fluid Dynamic Simulation. *Archaeol. Anthropol. Sci.* **2018**, *10*, 1429–1442. [\[CrossRef\]](#)
- Plets, R.; Quinn, R.; Forsythe, W.; Westley, K.; Bell, T.; Benetti, S.; McGrath, F.; Robinson, R. Robinson Using Multibeam Echo-Sounder Data to Identify Shipwreck Sites: Archaeological Assessment of the Joint Irish Bathymetric Survey Data. *Int. J. Naut. Archaeol.* **2011**, *40*, 87–98. [\[CrossRef\]](#)
- Bethencourt, M.; Fernández-Montblanc, T.; Izquierdo, A.; González-Duarte, M.M.; Muñoz-Mas, C. Study of the Influence of Physical, Chemical and Biological Conditions That Influence the Deterioration and Protection of Underwater Cultural Heritage. *Sci. Total Environ.* **2018**, *613–614*, 98–114. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Angelini, E.; Grassini, S.; Tusa, S. Underwater Corrosion of Metallic Heritage Artefacts. In *Corrosion and Conservation of Cultural Heritage Metallic Artefacts*; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2013; pp. 236–259. [\[CrossRef\]](#)
- Cámara, B.; De Buergo, M.Á.; Bethencourt, M.; Fernández-Montblanc, T.; La Russa, M.F.; Ricca, M.; Fort, R. Biodeterioration of Marble in an Underwater Environment. *Sci. Total Environ.* **2017**, *609*, 109–122. [\[CrossRef\]](#)
- Björda, C.G.; Nilsson, T. Reburial of Shipwrecks in Marine Sediments: A Long-Term Study on Wood Degradation. *J. Archaeol. Sci.* **2008**, *35*, 862–872. [\[CrossRef\]](#)
- Alexandrakis, G.; Petrakis, S.; Kampanis, N. Preliminary Assessment of Wave Energy Hazards in a Shallow Underwater Cultural Heritage Site. In Proceedings of the 2023 IMEKO TC-4 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Rome, Italy, 19–21 October 2023.
- Weisse, R.; von Storch, H. *Marine Climate and Climate Change, Storms, Wind Waves and Storm Surges*; Praxis Publishing: Chichester, UK, 2010.
- Reguero, B.G.; Losada, I.J.; Méndez, F.J. A Recent Increase in Global Wave Power as a Consequence of Oceanic Warming. *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 205. [\[CrossRef\]](#)
- Casas-Prat, M.; Wang, X.L.; Swart, N. CMIP5-Based Global Wave Climate Projections Including the Entire Arctic Ocean. *Ocean Model.* **2018**, *123*, 66–85. [\[CrossRef\]](#)
- Hemer, M.A.; Fan, Y.; Mori, N.; Semedo, A.; Wang, X.L. Projected Changes in Wave Climate from a Multi-Model Ensemble. *Nat. Clim. Change* **2013**, *3*, 471–476. [\[CrossRef\]](#)
- Mentaschi, L.; Vousdoukas, M.I.; Voukouvalas, E.; Dosio, A.; Feyen, L. Global Changes of Extreme Coastal Wave Energy Fluxes Triggered by Intensified Teleconnection Patterns. *Geophys. Res. Lett.* **2017**, *44*, 2416–2426. [\[CrossRef\]](#)
- Morim, J.; Hemer, M.; Wang, X.L.; Cartwright, N.; Trenham, C.; Semedo, A.; Young, I.; Bricheno, L.; Camus, P.; Casas-Prat, M.; et al. Robustness and Uncertainties in Global Multivariate Wind-Wave Climate Projections. *Nat. Clim. Change* **2019**, *9*, 711–718. [\[CrossRef\]](#)

25. Aarnes, O.J.; Reistad, M.; Breivik, Ø.; Bitner-Gregersen, E.; Ingolf Eide, L.; Gramstad, O.; Magnusson, A.K.; Natvig, B.; Vanem, E. Projected Changes in Significant Wave Height toward the End of the 21st Century: Northeast Atlantic. *J. Geophys. Res. Ocean.* **2017**, *122*, 3394–3403. [\[CrossRef\]](#)
26. Morim, J.; Vitousek, S.; Hemer, M.; Reguero, B.; Erikson, L.; Casas-Prat, M.; Wang, X.L.; Semedo, A.; Mori, N.; Shimura, T.; et al. Global-Scale Changes to Extreme Ocean Wave Events Due to Anthropogenic Warming. *Environ. Res. Lett.* **2021**, *16*, 074056. [\[CrossRef\]](#)
27. Meucci, A.; Young, I.R.; Hemer, M.; Kirezci, E.; Ranasinghe, R. Projected 21st Century Changes in Extreme Wind-Wave Events. *Sci. Adv.* **2020**, *6*, eaaz7295. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Chaigneau, A.A.; Law-Chune, S.; Melet, A.; Voldoire, A.; Refray, G.; Aouf, L. Impact of Sea Level Changes on Future Wave Conditions along the Coasts of Western Europe. *Ocean Sci.* **2023**, *19*, 1123–1143. [\[CrossRef\]](#)
29. Alvarez, O.; Izquierdo, A.; Tejedor, B.; Mañanes, R.; Tejedor, L.; Kagan, B.A. The Influence of Sediment Load on Tidal Dynamics, a Case Study: Cádiz Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **1999**, *48*, 439–450. [\[CrossRef\]](#)
30. Kagan, B.A.; Tejedor, L.; Álvarez, O.; Izquierdo, A.; Tejedor, B.; Mañanes, R. Weak Wave–Tide Interaction Formulation and Its Application to Cádiz Bay. *Cont. Shelf Res.* **2001**, *21*, 697–725. [\[CrossRef\]](#)
31. Meinshausen, M.; Smith, S.J.; Calvin, K.; Daniel, J.S.; Kainuma, M.L.T.; Lamarque, J.-F.; Matsumoto, K.; Montzka, S.A.; Raper, S.C.B.; Riahi, K.; et al. The RCP Greenhouse Gas Concentrations and Their Extensions from 1765 to 2300. *Clim. Change* **2011**, *109*, 213–241. [\[CrossRef\]](#)
32. Korres, G.; Ravdas, M.; Zacharioudaki, A. Mediterranean Sea Waves Hindcast (CMEMS MED-Waves) 2019. [Data Set]. [\[CrossRef\]](#)
33. Tolman, H.L. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III R Version 4.18. Available online: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v4.18.pdf> (accessed on 29 December 2024).
34. Perez, J.; Menendez, M.; Mendez, F.J.; Losada, I.J. Evaluating the Performance of CMIP3 and CMIP5 Global Climate Models over the North-East Atlantic Region. *Clim. Dyn.* **2014**, *43*, 2663–2680. [\[CrossRef\]](#)
35. De Winter, R.C.; Sterl, A.; Ruessink, B.G. Wind Extremes in the North Sea Basin under Climate Change: An Ensemble Study of 12 CMIP5 GCMs. *JGR Atmos.* **2013**, *118*, 1601–1612. [\[CrossRef\]](#)
36. Griffies, S.M.; Danabasoglu, G.; Durack, P.J.; Adcroft, A.J.; Balaji, V.; Böning, C.W.; Chassignet, E.P.; Curchitser, E.; Deshayes, J.; Drange, H.; et al. OMP Contribution to CMIP6: Experimental and Diagnostic Protocol for the Physical Component of the Ocean Model Intercomparison Project. *Geosci. Model Dev.* **2016**, *9*, 3231–3296. [\[CrossRef\]](#)
37. Goward Brown, A.J.; Neill, S.P.; Lewis, M.J. The Influence of Wind Gustiness on Estimating the Wave Power Resource. *Int. J. Mar. Energy* **2013**, *3–4*, e1–e10. [\[CrossRef\]](#)
38. Lobeto, H.; Menendez, M.; Losada, I.J. Future Behavior of Wind Wave Extremes Due to Climate Change. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 7869. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
39. Fanti, V.; Ferreira, Ó.; Kümmeler, V.; Loureiro, C. Improved Estimates of Extreme Wave Conditions in Coastal Areas from Calibrated Global Reanalyses. *Commun. Earth Environ.* **2023**, *4*, 151. [\[CrossRef\]](#)
40. Camus, P.; Mendez, F.J.; Medina, R. A Hybrid Efficient Method to Downscale Wave Climate to Coastal Areas. *Coast. Eng.* **2011**, *58*, 851–862. [\[CrossRef\]](#)
41. Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H. A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions: 1. Model Description and Validation. *J. Geophys. Res.* **1999**, *104*, 7649–7666. [\[CrossRef\]](#)
42. Battjes, J.A.; Janssen, J.P. Energy Loss and Set-up Due to Breaking of Random Waves. In Proceedings of the Sixteenth Conference on Coastal Engineering, Hamburg, Germany, 27 August–3 September 1978; pp. 569–587. [\[CrossRef\]](#)
43. Hanna, S.R.; Heinold, D.W. *Development and Application of a Simple Method for Evaluating Air Quality*; Technical Report; American Petroleum Institute, Health and Environmental Affairs Dept: Washington, DC, USA, 1985.
44. Mentaschi, L.; Besio, G.; Cassola, F.; Mazzino, A. Problems in RMSE-Based Wave Model Validations. *Ocean Model.* **2013**, *72*, 53–58. [\[CrossRef\]](#)
45. Mentaschi, L.; Besio, G.; Cassola, F.; Mazzino, A. Performance Evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. *Ocean Model.* **2015**, *90*, 82–94. [\[CrossRef\]](#)
46. Spanish Ministry of Agriculture, Food and Environment. Data from: Plan de Ecocartografías del litoral Español. 2012. Available online: <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/ecocartografias/ecocartografia-cadiz.html> (accessed on 29 December 2024).
47. Garrity, N.J.; Battalio, R.; Hawkes, P.J.; Roupe, D. Evaluation of Event and Response Approaches to Estimate the 100-Year Coastal Flood for Pacific Coast Sheltered Waters. In *Coastal Engineering 2006*; World Scientific Publishing Company: San Diego, CA, USA, 2007; pp. 1651–1663. [\[CrossRef\]](#)
48. Viavattene, C.; Jiménez, J.A.; Ferreira, O.; Priest, S.; Owen, D.; McCall, R. Selecting Coastal Hotspots to Storm Impacts at the Regional Scale: A Coastal Risk Assessment Framework. *Coast. Eng.* **2018**, *134*, 33–47. [\[CrossRef\]](#)
49. Ferreira, O.; Viavattene, C.; Jiménez, J.A.; Bolle, A.; Das Neves, L.; Plomaritis, T.A.; McCall, R.; Van Dongeren, A.R. Storm-Induced Risk Assessment: Evaluation of Two Tools at the Regional and Hotspot Scale. *Coast. Eng.* **2018**, *134*, 241–253. [\[CrossRef\]](#)

50. Mentaschi, L.; Vousdoukas, M.; Voukouvalas, E.; Sartini, L.; Feyen, L.; Besio, G.; Alfieri, L. The Transformed-Stationary Approach: A Generic and Simplified Methodology for Non-Stationary Extreme Value Analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2016**, *20*, 3527–3547. [\[CrossRef\]](#)
51. Gornitz, V. Vulnerability of the East Coast, U.S.A. to Future Sea Level Rise. *J. Coast. Res.* **1990**, *9*, 201–237.
52. Liang, B.; Shao, Z.; Wu, G.; Shao, M.; Sun, J. New Equations of Wave Energy Assessment Accounting for the Water Depth. *Appl. Energy* **2017**, *188*, 130–139. [\[CrossRef\]](#)
53. Alfieri, L.; Burek, P.; Feyen, L.; Forzieri, G. Global Warming Increases the Frequency of River Floods in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2015**, *19*, 2247–2260. [\[CrossRef\]](#)
54. Knutti, R.; Sedláček, J. Robustness and Uncertainties in the New CMIP5 Climate Model Projections. *Nat. Clim. Change* **2013**, *3*, 369–373. [\[CrossRef\]](#)
55. Vousdoukas, M.I.; Voukouvalas, E.; Annunziato, A.; Giardino, A.; Feyen, L. Projections of Extreme Storm Surge Levels along Europe. *Clim. Dyn.* **2016**, *47*, 3171–3190. [\[CrossRef\]](#)
56. Del Río, L.; Plomaritis, T.A.; Benavente, J.; Valladares, M.; Ribera, P. Establishing Storm Thresholds for the Spanish Gulf of Cádiz Coast. *Geomorphology* **2012**, *143–144*, 13–23. [\[CrossRef\]](#)
57. Ribeiro, A.S.; deCastro, M.; Costoya, X.; Rusu, L.; Dias, J.M.; Gomez-Gesteira, M. A Delphi Method to Classify Wave Energy Resource for the 21st Century: Application to the NW Iberian Peninsula. *Energy* **2021**, *235*, 121396. [\[CrossRef\]](#)
58. Wang, X.L.; Feng, Y.; Swail, V.R. Changes in Global Ocean Wave Heights as Projected Using Multimodel CMIP5 Simulations. *Geophys. Res. Lett.* **2014**, *41*, 1026–1034. [\[CrossRef\]](#)
59. Lemos, G.; Semedo, A.; Dobrynin, M.; Behrens, A.; Staneva, J.; Bidlot, J.-R.; Miranda, P.M.A. Mid-Twenty-First Century Global Wave Climate Projections: Results from a Dynamic CMIP5 Based Ensemble. *Glob. Planet. Change* **2019**, *172*, 69–87. [\[CrossRef\]](#)
60. Raposeiro, P.D.; Fortes, C.J.; Reis, M.T.; Ferreira, J.C. Development of A Methodology to Evaluate the Flood Risk at the Coastal Zone. Available online: <https://repositorio.inec.pt/handle/123456789/1002230> (accessed on 29 December 2024).
61. Sevieri, G.; Galasso, C.; D’Ayala, D.; De Jesus, R.; Oreta, A.; Grió, M.E.D.A.; Ibabao, R. A Multi-Hazard Risk Prioritisation Framework for Cultural Heritage Assets. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2020**, *20*, 1391–1414. [\[CrossRef\]](#)
62. Canesi, L.; Sardella, A.; Vogler, R.; Kaiser, A.; Vaccaro, C.; Bonazza, A. Hazard Analysis and Vulnerability Assessment of Cultural Landscapes Exposed to Climate Change-Related Extreme Events: A Case Study of Wachau (Austria). *Heritage* **2024**, *7*, 1917–1934. [\[CrossRef\]](#)
63. Bonazza, A.; Sardella, A. Climate Change and Cultural Heritage: Methods and Approaches for Damage and Risk Assessment Addressed to a Practical Application. *Heritage* **2023**, *6*, 3578–3589. [\[CrossRef\]](#)
64. Pica, A.; Lämmle, L.; Burnelli, M.; Del Monte, M.; Donadio, C.; Faccini, F.; Lazzari, M.; Mandarino, A.; Melelli, L.; Perez Filho, A.; et al. Urban Geomorphology Methods and Applications as a Guideline for Understanding the City Environment. *Land* **2024**, *13*, 907. [\[CrossRef\]](#)

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



Identificación de las patentes de Muntz por medio de técnicas de rayos X: caracterización del revestimiento de latón de dos pecios del siglo XIX localizados en México

Identification of Muntz's patents using X-ray techniques: characterisation of brass sheathing retrieved from two mid-19th century shipwrecks located in Mexico

Andrés R. Zuccolotto Villalobos¹, Nicolás C. Ciarlo², Florencia Malamud³, Laura Carrillo Márquez⁴ y Mariana Piña Cetina⁵

¹Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Niño Artillero 150, Zona Universitaria (78290), San Luis Potosí, México. <https://orcid.org/0009-0005-2428-5930>, E-mail: andres.zuccolotto@uaslp.mx

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Cádiz. Avda. Gómez Ulla, 1 (11003), Cádiz, España. <https://orcid.org/0000-0002-1995-6227>, E-mail: nicolas.ciarlo@uca.es

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Paul Scherrer Institut, Applied Materials Group (AMG), Forschungsstrasse 111 (5232), Villigen PSI, Suiza. <https://orcid.org/0000-0003-4987-2419>, E-mail: malamudflorencia@gmail.com

⁴Subdirección de Arqueología Subacuática, Instituto Nacional de Antropología e Historia (SAS-INAH). Moneda 16 (06060), Colonia Centro Histórico, Alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México. <https://orcid.org/0009-0006-7732-9156>, E-mail: laura.cmarquez@gmail.com

⁵Subdirección de Arqueología Subacuática, Instituto Nacional de Antropología e Historia (SAS-INAH). Moneda 16 (06060), Colonia Centro Histórico, Alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México. <https://orcid.org/0009-0002-5078-2920>, E-mail: mayipc29@gmail.com

Resumen

En este artículo se expone el examen arqueométrico de muestras de chapas de revestimiento recuperadas de dos sitios de naufragio de mediados del siglo XIX, en México: El Ángel y Black Warrior, estudiados por la Subdirección de Arqueología Subacuática (SAS) del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) en colaboración con especialistas de otros centros de investigación. El objetivo principal de este estudio fue doble: por un lado, obtener información microestructural y sobre la composición de planchas de latón producidas por la compañía Muntz en diferentes periodos y esclarecer sus características; por el otro, proporcionar nuevos datos que sirvan para evaluar el sitio El Ángel. Aunque la identidad de este pecio permanece aún sin definir, la evidencia analizada lo vincula con el comercio británico del palo de tinte a mediados del siglo XIX. El Black Warrior, si bien ha sido explorado de forma preliminar, ha aportado datos de interés con fines comparativos. A partir de un estudio documental y arqueométrico a través de DRX and FRX, se discuten los procesos de manufactura, materiales y patentes asociados a las láminas de latón de la compañía Muntz. La información obtenida ha contribuido al estudio de ambos sitios y reviste interés para la evaluación de sitios de naufragio no identificados.

Palabras clave: Revestimientos de latón; Metal Muntz; Siglo XIX; Arqueometría; Pecios.

Abstract

This article developed an archaeometric examination of the brass sheathing remains recovered from two mid-19th-century shipwrecks, in Mexico: El Ángel site and the Black Warrior (1858), studied by the Vice-Directorate of Underwater Archaeology (SAS) of the National Institute of Anthropology and History (INAH) in collaboration with scholars from other research centres. The main aim of this research was twofold: on the one hand, to obtain

Recibido 18-04-2024. Recibido con correcciones 08-01-2025. Aceptado 14-02-2025

Revista del Museo de Antropología 18 (1): 95-110 /2025 / ISSN 1852-060X (impreso) / ISSN 1852-4826 (electrónico)
<http://revistas.unc.edu.ar/index.php/antropologia/index>

IDACOR-CONICET / Facultad de Filosofía y Humanidades – Universidad Nacional de Córdoba - Argentina



compositional and microstructural data of brass sheets produced by the Muntz company in different periods and shed light on its features; on the other hand, to provide new data that help to assess the El Ángel site. Although the vessel's identity has not been defined yet, the analysed evidence links it to the mid-19th-century logwood british trade. The Black Warrior was thus far preliminarily explored, but it has provided valuable data to compare with. Based on historical research and archaeometric analyses using XRD and XRF, a discussion on the manufacturing processes, materials, and patents associated with Muntz company's brass sheathings is developed. The information obtained has contributed to the study of both wreck sites and is significant for assessing other unidentified sites.

Keywords: Brass sheathing; Muntz metal; 19th century; Archaeometry; Wreck sites.

Introducción

Este artículo presenta los resultados de la caracterización físico-química de muestras de revestimiento de aleación de cobre de dos sitios de naufragio de mediados del siglo XIX, localizados en el Pacífico y Caribe mexicanos. El estudio realizado supone un avance para la identificación de los procesos de manufactura, materiales y patentes asociados a los revestimientos de latón (aleación de cobre-zinc) de la renombrada empresa Muntz. Asimismo, la información obtenida reviste interés como recurso para establecer fechas aproximadas del hundimiento de barcos del periodo.

Los dos sitios bajo estudio son El Ángel (mediados del siglo XIX) y el *Black Warrior* (1858) (Figura 1). Estos pecios son estudiados por la Subdirección de Arqueología Subacuática (SAS) del Instituto Nacional de Antropología e

Historia (INAH), México, en colaboración con especialistas internacionales. La nave cuyos restos forman el sitio El Ángel no se ha identificado aún, por lo que no se cuenta con información concreta sobre la procedencia y fecha de hundimiento. No obstante, los estudios realizados desde el 2013 de los restos del casco, cargamento y otros objetos asociados, han permitido vincular esta embarcación con la explotación del palo de tinte, desarrollada en la Península de Yucatán y Honduras Británica (actual Belice) desde el siglo XVI hasta mediados del siglo XIX. El estudio del revestimiento del casco contribuyó a la discusión sobre este particular. El segundo sitio, en cambio, ha sido relativamente poco estudiado desde el punto de vista arqueológico. No obstante, las evidencias documentales sugieren que se trata del *Black Warrior*. En este caso, las muestras del revestimiento se utilizaron con fines comparativos, por conocerse la procedencia y fecha de hundimiento de la embarcación. En este sitio, además,



Figura 1. Ubicación de los sitios El Ángel (mediados del siglo XIX) y *Black Warrior* (1858), en la vertiente atlántica y pacífica de la costa de México, respectivamente. Imagen: A. Zuccolotto, con base en cartografía ESRI.

Figure 1. Location of sites El Ángel (mid-19th century) and *Black Warrior* (1858), on Mexico's Atlantic and Pacific coasts, respectively. Image: A. Zuccolotto, based on ESRI cartography.

se localizó una lámina de revestimiento con el sello de la misma empresa que produjo las planchas empleadas en El Ángel.

El análisis de este tipo de materiales no solo permite avanzar en el estudio de los casos mencionados, sino que también brinda información útil para la arqueología náutica y el estudio de pecios del siglo XIX. Junto a otras líneas de evidencia, documentales y arqueológicas, el análisis de la composición química de las aleaciones de cobre utilizadas en elementos de la arquitectura de barcos de madera ha servido para precisar la época y procedencia de contextos de naufragio sin identificar. A través de este trabajo se ofrece un primer acercamiento al estudio de las tres patentes de Muntz. Para ello, se abordan sus características técnicas y principales diferencias, con base en la investigación histórica sobre la empresa y productos Muntz y el análisis arqueométrico de muestras recuperadas de los pecios El Ángel y *Black Warrior*.

La protección del casco de los barcos de madera (siglo XIX)

Los revestimientos de latón Muntz

Uno de los problemas que históricamente enfrentaron los constructores navales fue el daño causado por varias especies de organismos marinos —conocidos genéricamente como broma— al maderamen exterior del casco de las embarcaciones. Desde la Antigüedad, los efectos perjudiciales de estos organismos incrustantes y perforantes motivaron el desarrollo de diversos métodos de protección. En época moderna, una de las soluciones más aceptadas a partir de la segunda mitad del siglo XVIII fue el uso de revestimiento con chapas de cobre. En los primeros años, este método ocasionó serios problemas a los barcos así forrados: los elementos de fijación de

hierro de la estructura del casco, principalmente los pernos que unían las cuadernas y el forro externo, en contacto con el cobre, se vieron afectados severamente por la corrosión galvánica generada entre ambos. La solución más difundida fue reemplazar los pernos y otros elementos de hierro ubicados por debajo de la línea de flotación por elementos de base cobre (ver Ciarlo, 2023; Staniforth, 1985; y la bibliografía allí citada).

A comienzos del siglo XIX, en Inglaterra se inició una carrera por encontrar un método más eficiente y económico para proteger los cascos de las embarcaciones, lo que derivó en numerosas patentes que presentaban diferentes técnicas de manufactura y diversas aleaciones de cobre. Estas invenciones se aplicaron tanto a las chapas como a los elementos de sujeción. También en este momento se comenzaron a explorar otras soluciones, como el uso de láminas de hierro, peltre y zinc (Bingeman *et al.*, 2000: 220). La competencia generada por obtener materiales con mejores características para forrar embarcaciones condujo a un crecimiento en la industria del cobre, sobre todo, que resultó en varias innovaciones en torno a los procesos, maquinaria y materiales utilizados. Tras una extensa búsqueda, en 1832 George Frederick Muntz (G.F. Muntz) patentó una aleación cuyas prestaciones y coste resultaron muy ventajosos con respecto a las alternativas de la época (McCarthy, 2005: 115).

G.F. Muntz nació en 1794 en el seno de una familia anglo-polaca que emigró a Inglaterra durante la revolución francesa. Su padre, un terrateniente francés, se estableció en Birmingham, donde se asoció con la familia Purden para fundar una modesta fábrica de metal (Figura 2) (Flick, 1975: 70). En 1811, tras el fallecimiento de su padre, G.F. Muntz se convirtió en el responsable de la empresa Muntz & Purden (*The Birmingham Daily Post*, Obituario



Figura 2. Lámina titulada “Muntz’s Rolling-Mills, Birmingham”, donde se ilustra la visita del Príncipe Alberto a las instalaciones fabriles de G.F. MUNTZ en 1842. Fuente: *London Illustrated News*, 9 de Diciembre 1843: 381.

Figure 2. Plate entitled “Muntz’s Rolling-Mills, Birmingham”, that shows the visit of Prince Albert to the G.F. MUNTZ’s industrial facilities in 1842. Source: *London Illustrated News*, 9 de Diciembre 1843: 381.

de Philip Henry Muntz, 26 de diciembre de 1888: 4). Aquella posición le proporcionó una amplia experiencia en la fabricación de metales desde temprana edad, la que además contribuyó a moldear su carácter empresarial. En 1820, a los 26 años de edad, G.F. Muntz incursionó en la política y se convirtió en el brazo derecho de Thomas Attwood. Juntos, en 1830 fundaron la Birmingham Political Union y lideraron la promulgación de la Great Reform Act (1832). Este mismo año, aquel asumió el escaño parlamentario en reemplazo de Attwood y patentó su innovadora aleación, aunque en 1834 renunció al parlamento para dedicarse por completo al negocio (Flick, 1975: 71–74).

Tras el fallecimiento de G.F. Muntz, en 1857, la empresa valuada en 600.000 libras esterlinas quedó en manos de su hijo, George Frederick Jr., y unos años más tarde, en 1864, pasó a cotizar en la bolsa de valores de Inglaterra bajo el nombre Muntz Metal Company Limited.¹ En este período, la producción de chapas para el revestimiento de embarcaciones disminuyó, debido a los cambios que experimentó la construcción naval a raíz de la introducción de los cascos de hierro/acero. Para evitar la bancarrota, la empresa diversificó su producción incorporando tubos para locomotoras, que exportó a Oriente (Flick, 1975: 84–87). Más tarde, la compañía pasó a manos del nieto de G.F. Muntz (padre), Gerard Albert, quien la mantuvo en pie hasta 1921. En esta fecha se inició la absorción por parte de ICI Metal Limited, industria que posteriormente se convertiría en Imperial Metal Industries.²

Especificidades de la aleación

La aleación que patentó G.F. Muntz en 1832, como novedad,³ estaba compuesta por un rango de proporción del cobre y zinc entre 50:50 y 63:37, siendo el más conveniente el 60:40 (ver más adelante).⁴ Esta aleación poseía las propiedades mecánicas necesarias para la producción de planchas y elementos de fijación, principalmente pernos, utilizados en embarcaciones (McCarthy, 2005: 115). A pesar de que varios inventores estaban trabajando en aleaciones similares, fue G.F. Muntz quien logró encontrar y promover las proporciones más adecuadas (Flick, 1975: 76).

Así, G.F. Muntz obtuvo en aquel año dos patentes. La primera, relativa a las láminas, le fue concedida en octubre (N°6325); la segunda, de diciembre, comprendía a los elementos de fijación (N°6347) (el texto de ambas patentes se puede consultar en: <http://www.bruzelius.info/Nautica/Shipbuilding/>). Con ello, este empresario

se aseguró un lugar dentro de la industria naval (Flick, 1975: 76). La aleación de la primera patente también fue conocida como *yellow metal* (por el típico color del material) o *Muntz metal*. Esta composición permitía que las chapas fueran laminadas en caliente, proceso que se realizaba cuando la aleación alcanzaba un característico color *red Cherry* (*Mechanics' Magazine*, No. 844, 12 de octubre de 1839: 31).

La aleación tuvo varias características destacables. Además de sus prestaciones mecánicas, ya referidas, se oxidaba lo suficiente como para repeler a los organismos marinos; esta oxidación era lenta, lo que garantizaba una mayor durabilidad. Por otro lado, era relativamente económica, debido a su alto contenido de zinc; también, era más resistente que el cobre sin alea y más fácil de laminar en caliente. Al respecto, se calcula que requería solo una cuarta parte de la energía necesaria para laminar el cobre (Flick, 1975: 74).

G.F. Muntz promovió su aleación destacando sus ventajas ante potenciales usuarios. Sin embargo, debido a experiencias desfavorables de otros fabricantes de aleaciones de cobre que le precedieron, en un primer momento no logró el éxito esperado. Ante esta situación, decidió ofrecer muestras sin coste a varios constructores de barcos para que las probaran. Entre estos estaba la Marina Real británica, que en un primer momento mostró recelo de la efectividad de esta nueva aleación (Flick, 1975: 74–76). Muntz optó así por una acción más audaz: garantizar el uso de sus láminas en embarcaciones mercantes, asegurando su carga si estas sufrían algún accidente a causa del uso de su revestimiento. Aunque estas garantías no fueron ejercidas, ya que nunca se demostró que algún naufragio estuviera relacionado con el uso de estas láminas, la compañía asumió en varios casos el costo de reemplazar las láminas perdidas durante la navegación (Flick, 1975: 77).

Para aumentar la producción y contar con un espacio adecuado, Muntz se asoció con Pascoe Grenfell & Sons, una empresa que, junto con Sims, Williams, Neville & Co. (todas en el sur de Gales), dominaban el mercado de la producción de cobre. Esta asociación se concretó hacia 1837 y tuvo éxito en la producción y comercialización del metal Muntz. En 1840, la fábrica de Muntz empleaba a treinta trabajadores y producía alrededor de 2.000 toneladas de latón al año, con un precio de catorce libras por tonelada. Sin embargo, en ese mismo año, Vivian & Sons, también dedicados a la producción de láminas de revestimiento, iniciaron una campaña de desprestigio contra Muntz, alegando que la aleación era invención suya. Dado que Muntz tenía la patente, ello le permitió demandar a su competencia por la producción no autorizada de productos de semejante composición. Al parecer, G.F. Muntz no consideraba que Vivian & Sons constituyera una amenaza para su empresa, por lo que llegaron a un acuerdo para producir

¹ Muntz's Metal Company vs Muntz (The National Archives, C 16/285/M25: 5).

² Company No: 31784; Muntz's Metal Company Ltd. Incorporated in 1890. Dissolved between 1916 and 1932 (The National Archives, BT 31/15082/31784).

³ En ese momento varias empresas estaban experimentando con latones, tal es el caso de Vivian & Sons, quienes patentaron una aleación similar en 1824.

⁴ Printed history of Muntz's Metal Company Ltd. (includes illustrations and photographs) (The Library of Birmingham, 1422/39/7/7/1: 29).

la aleación conjuntamente. Una situación similar ocurrió con la Williams Foster Company, que también produjo la aleación sin contar con licencia hasta 1844, cuando se les prohibió continuar (Flick, 1975: 78–82).

Muntz puso fin a su sociedad con Grenfell & Sons en 1842, alegando mal manejo en la contabilidad. Además, ese mismo año, demandó a la empresa por la producción no autorizada de su aleación. Estos litigios le causaron dificultades para adquirir el cobre usado como materia prima. No obstante, a mediados de 1842, logró que la Sims, Williams, Neville & Co. accediera a venderle este material. Dentro de este escenario, un evento que marcó el curso de la empresa fue la visita que hizo el príncipe Albert a las instalaciones fabriles de Water Street, en Birmingham. Gracias al impacto político de este suceso, al año siguiente, G.F. Muntz finalmente logró firmar un contrato de abastecimiento con la Marina Real británica (Flick, 1975: 80–82).

Hacia 1842, la compañía de Muntz se había convertido en la principal consumidora de cobre, situación que le planteó varios desafíos. El primero fue garantizar el suministro de materia prima para sus productos, que solucionó por un precio razonable asociándose con Welsh Copper Company y Sims, Williams, Neville & Co. El segundo desafío fue ampliar el espacio de las instalaciones fabriles, por lo que en 1844 trasladó su fábrica a un terreno conocido como French Walls, también en la ciudad de Birmingham. Allí empleó a 200 trabajadores, con una capacidad de producción de entre 3.000 y 4.000 toneladas al año, con un beneficio de ocho libras por tonelada (Flick, 1975: 83).

Tras finalizar la primera patente, en 1846 Muntz modificó la aleación original y obtuvo una nueva patente. La composición era: 56% de cobre, 40,75% de zinc y 3,25% de plomo; el contenido de este último supuso una ventaja económica en la manufactura (Franklin Institute, 1847: 239; McCarthy, 2005: 117). Sin embargo, esta aleación no presentaba las mismas características de trabajabilidad que la anterior. Hasta la fecha se desconoce por qué cayó en desuso esta patente, pero posteriormente la empresa Muntz eliminó el plomo y aumentó la proporción de cobre al 63%. A diferencia de las dos anteriores, esta nueva aleación podía ser laminada en frío (Bingeman, 2018: 466). Cabe señalar que la proporción 63:37 ya estaba contemplada como límite superior del rango de composición en la patente de 1832, tal como se expresó más arriba. Este cambio habría estado favorecido por la necesidad de laminar en frío las planchas tras mudar la fábrica a French Walls.

A través de su arduo trabajo e iniciativa, tanto en la investigación como en la promoción de su patente, G.F. Muntz logró obtener éxito y reconocimiento como empresario. No solo pasó de ser un pequeño productor a convertirse en una industria a gran escala; además, como

sostuvo su principal biógrafo, podría ser considerado como uno de los primeros individuos en llevar a cabo una campaña de marketing, a través de la cual logró posicionar su producto de manera destacada frente a su competencia (Flick, 1975: 70).

Estudios histórico-arqueológicos de las planchas Muntz

En pecios del siglo XIX, los restos de revestimiento de cobre y aleación de cobre son un hallazgo habitual. En aguas cálidas como las del Caribe mexicano, a diferencia de lo que sucede con los materiales orgánicos, este tipo de elementos suele conservarse relativamente en buenas condiciones. Las chapas y tachuelas, así como otros elementos de sujeción del casco, han sido estudiados en diferentes partes del mundo, generalmente desde un enfoque descriptivo y tecnológico.

El forro de cobre ha sido objeto de numerosos estudios históricos, que desarrollan diferentes aristas del tema, entre los que destacan varios trabajos (*e.g.* Cock, 2001; Ferreiro, 2007; Harris, 1966; Knight, 1973; U.S. Naval Institute, 1952). Este componente de la tecnología náutica moderna también fue abordado desde una perspectiva arqueológica (*e.g.* Bingeman *et al.*, 2000; Ciarlo, 2017, 2023; Staniforth, 1985; van Duivenvoorde, 2015). En la obra de referencia de McCarthy, *Ships' fastenings. From sewn boat to steamship*, el autor también aborda el tema (McCarthy, 2005). Dentro de este contexto, Bingeman (2018) presentó su investigación histórica sobre los forros de Muntz, destacando a la fecha como el principal referente. Anteriormente, también se hizo mención a la obra de Flick (1975), quien desarrolló los aspectos biográficos de George Frederick Muntz y su empresa.

Desde la década de 1980, se han caracterizado numerosas muestras metálicas procedentes de naufragios de los siglos XVIII y XIX. Los primeros estudios se centraron en aspectos técnicos vinculados a los materiales y procesos de manufactura (*e.g.* MacLeod, 1994; MacLeod y Pitrun, 1996; Samuels, 1992), así como a la problemática del deterioro y conservación en el medio marino (*e.g.* MacLeod y Pitrun, 1986). Estos trabajos sentaron las bases del desarrollo de la línea de investigación sobre metales navales impulsada por otros autores a partir de los años 2000. Algunas de estas investigaciones se han centrado en los elementos de sujeción estructurales y el revestimiento de los barcos (*e.g.* Ashkenazi *et al.*, 2018; Bethencourt *et al.*, 2013; Ciarlo *et al.*, 2013, 2015; Ciarlo *et al.*, 2014, 2016; Cohen *et al.*, 2015; De Rosa *et al.*, 2008; Jones, 2004; Malamud *et al.*, 2022; Viduka y Ness, 2004) y se inscriben dentro de una corriente creciente de estudios arqueométricos de naufragios históricos (ver Ciarlo, 2020 y la bibliografía allí citada). En la última década se han efectuado análisis comparados que buscan dar respuesta a cuestiones más amplias relacionadas con la tecnología naval y metalúrgica

de la época (e.g. Ciarlo, 2023; Ciarlo y Argüeso, 2019).

En relación con el metal Muntz, o aleaciones de similar composición, existen algunos antecedentes de estudios técnicos realizados en distintas partes del mundo (e.g. De Rosa et al., 2015; Lorusso et al., 2003; McAllister, 2012; McCarthy y Stanbury, 2003; Northover, 2011; O'Guinness Carlson et al., 2011; van Duivenvoorde et al., 2023). En ocasiones, la identificación de las planchas a través de la composición química, o los sellos, cuando se conservan, han servido como elemento de datación relativa de los pecios. El proceso, sin embargo, no es lineal ni está exento de dificultades, en parte vinculadas con las diferentes empresas contratistas de Muntz y otras competidoras de esta última, que en la época produjeron planchas de similares características (ver Bingeman, 2018).

Estudio de materiales

Los sitios El Ángel y Black Warrior

Las muestras analizadas fueron recuperadas de los restos del casco de dos embarcaciones con revestimiento Muntz: el pecio El Ángel, localizado en Banco Chinchorro, Quintana Roo, y el *Black Warrior*, ubicado en Guerrero Negro, Baja California, ambos en México. El estudio de las planchas del primer sitio fue iniciado en el marco de la maestría del primer autor de este trabajo (Zuccolotto Villalobos, 2020), cuyos resultados preliminares fueron publicados recientemente (Zuccolotto Villalobos et al., 2023). Como se anticipó en la introducción, teniendo en cuenta la información documental disponible sobre el *Black Warrior*, se decidió realizar una evaluación comparativa entre ambos revestimientos, que contribuyera a definir el marco temporal de los elementos hallados en el primer pecio.

El sitio El Ángel se ubica al sur de Banco Chinchorro, a una profundidad que oscila entre los 10 y 12 m. Su estudio se inscribe dentro del proyecto "Inventario y diagnóstico del patrimonio arqueológico e histórico sumergido en la Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro" de la SAS-INAH (Carrillo Márquez, 2018; Guzmán Torres et al., 2023). Los restos de la parte inferior del casco yacen parcialmente expuestos sobre el sedimento. Entre otros elementos estructurales, pueden apreciarse las cuadernas, el forro exterior y el revestimiento del sector de proa y medio del barco, por ambos costados y a una altura cercana a la curva del pantoque. Las excavaciones permitieron estudiar parte de la arquitectura naval y del cargamento, este último formado principalmente por palo de tinte. Hacia la popa, la hilera de planchas metálicas se encuentra bajo el sedimento, al igual que otros rasgos estructurales. Lo anterior dificulta determinar la eslora del barco, que se estima superior a 30 m. Las evidencias analizadas han permitido concluir que se trata de una embarcación de madera y refuerzos internos de hierro, propulsada a vela, que fue construida y operada hacia la primera mitad del siglo XIX. En particular, con base en la información documental disponible y las características constructivas y equipamiento de la embarcación, esta se asoció a las actividades de explotación y comercio de palo de tinte desarrolladas por los británicos en Honduras Británica (Carrillo Márquez et al., 2022; Carrillo Márquez et al., 2023).

En 2017, durante las actividades de campo, se obtuvieron siete muestras de chapas ubicadas entre el sector medio y la proa de la embarcación, que asomaban naturalmente sobre el lecho (Figura 3). En laboratorio, como se verá más adelante, estas muestras fueron objeto de estudios de caracterización físico-química con el fin de determinar

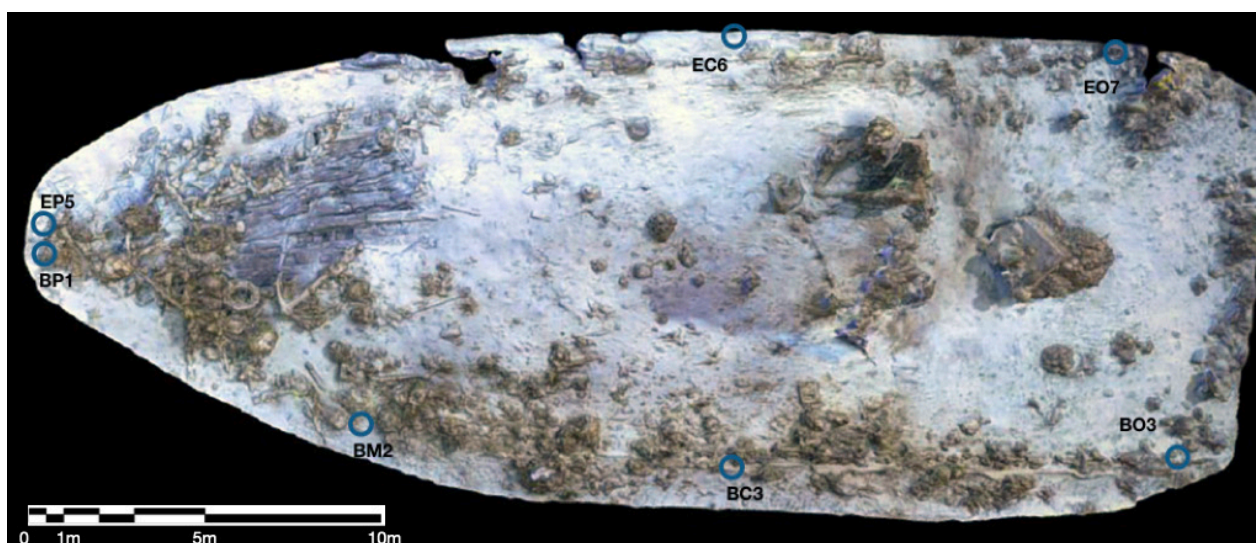


Figura 3. Imagen del pecio El Ángel: se muestran los sectores donde se obtuvieron las muestras (2017). Fuente: fotogrametría realizada por A. Soto y M. Segura, Archivo SAS-INAH.

Figure 3. Image of El Ángel site: the sectors where the samples were obtained (2017) are shown. Source: photogrammetry by A. Soto and M. Segura, Archive SAS-INAH.

su composición y el método de manufactura utilizado.

Una de las muestras (BM-2) se extrajo de una plancha con el sello de Muntz (Figura 4a). Esta marca está formada por dos óvalos concéntricos (30 x 28,3 mm y 18 x 15 mm); entre ambos, se lee la leyenda *Muntz's Patent*, con una tipografía tamaño 9.5 pt.⁵ Además, se aprecian dos números: 31 (9 pt) y 24 (15 pt). Este último se ubica en el interior del óvalo más pequeño y refiere al peso de la plancha, expresado en onzas/pie². A la fecha, se desconoce la función del primer número, que en otros sellos afines cubre un amplio espectro de cifras de uno y dos dígitos (Bingeman, 2018: 467).

Las muestras comparativas proceden del *Black Warrior*, barca ballenera botada en San Diego, en 1834. Posteriormente, fue adquirida por el Capitán Robert Brown, quien la convirtió en ballenero en Honolulu, en 1854 (*The Friend*, March 1859: 24). Es probable que durante esta conversión se le colocara el forro metálico. Tras una temporada en el Ártico, en noviembre de 1858 se dirigió hacia Bartholomew Bay, en las costas de Baja California, en busca de ballenas. En diciembre del mismo año, quedó varada y se perdió en las barras de arena de Frenchmans Lagoon, en la costa del Pacífico mexicano. Parte de la carga se recuperó con la ayuda de los barcos *Metropolis* y *Lark* (*The Friend*, March 1859: 24). Este naufragio dio origen al nombre de la población que se estableció en el lugar, hoy conocida como Guerrero Negro.

Durante la temporada de campo 2016 del “Proyecto Galeón de Manila, Baja California”, se recuperaron varios fragmentos de chapas en la costa de Guerrero Negro, sobre la línea de dunas. Allí también se localizaron otros restos que fueron asociados de forma preliminar al pecio del *Black Warrior* (Junco *et al.*, 2016).

Para su análisis y comparación con las láminas de El Ángel, se seleccionaron dos fragmentos. La muestra BW-1 se obtuvo de una lámina en la que se identificó el sello utilizado por Muntz de 1846 hasta su absorción (Figura 4b). La marca está formada por un óvalo externo de 32 x 25 mm y un óvalo interno de 18 x 10 mm. La inscripción *MUNTZ'S PATENT*, que se lee entre ambos, tiene un tamaño de 11 pt. Debido al deterioro de la plancha, los números que se encuentran dentro del primer óvalo no pudieron identificarse. Dentro del óvalo interno se observa el número 14, con una tipografía de ca. 17 pt.

Aplicación de técnicas instrumentales

Para identificar las diferentes aleaciones y técnicas de manufactura en las patentes de Muntz, a través de las muestras recuperadas de los dos sitios reseñados más arriba, se realizaron análisis por medición de texturas mediante Difracción de Rayos X (DRX) y Fluorescencia de Rayos X (FRX). Los análisis por medio de DRX se hicieron

solo a las muestras recuperadas de El Ángel.

Texturas por medio de DRX

Los materiales policristalinos—los metales y sus aleaciones, en este caso—están conformados por pequeños cristales denominados granos. En la mayoría de los materiales metálicos, los granos tienen tamaños medios entre 1 µm a 1 mm. Por este motivo, una muestra arqueológica suele contar con una cantidad ingente de granos. Cada uno de estos está conformado por un arreglo de átomos que forma una red cristalina con una simetría precisa (Bunge, 2015).

En el caso de los materiales de base cobre, los latones incluidos, la estructura cristalina es cúbica centrada en las caras, conocida por sus siglas como CCC. La orientación de cada red cristalina en el sistema de referencia de la muestra puede ser descrita mediante una serie de rotaciones que llevan a coincidir el sistema de referencia del cristal con el sistema de referencia de la muestra. Si todas las orientaciones cristalinas se encuentran con igual probabilidad, se dice que el material se encuentra orientado de forma aleatoria. En el otro extremo, si todos los granos poseen la misma orientación, el material puede ser representado como un monocristal. Sin embargo, en componentes formados por materiales policristalinos, estas orientaciones no siempre se distribuyen de forma aleatoria o en forma monocristalina, y el material posee una función de distribución de orientaciones (ODF), conocida como textura cristalográfica (Bunge, 2015). La ODF de un material depende directamente de los procesos termo-mecánicos empleados durante su manufactura, y a partir del análisis cuantitativo de la misma es posible extraer información de la ruta de manufactura empleada en la fabricación de un objeto.

Existen diversos métodos para caracterizar la textura cristalográfica, en particular los basados en técnicas de difracción suelen ser los más empleados (Wenk y Houtte, 2004). La técnica de medición de texturas por medio de DRX fue empleada por primera vez en 1924 por Franz Wever, en Alemania, con el fin de investigar las orientaciones preferenciales en metales y evaluar la intensidad heterogénea a lo largo de los anillos de Debye-Scherrer. No obstante, fue recién en 1949 que se inician los análisis de texturas cuantitativos modernos, gracias a los trabajos de Schulz (Engler y Randle, 2009: 75).

El principio para la medición de figuras de polos plana con configuración Bragg-Brentano está basado en la Ley de Bragg $\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$. Si un cristal es irradiado con radiación monocromática de longitud de onda λ al correcto ángulo de Bragg para la reflexión de los planos de red (hkl) y el detector es colocado en el ángulo 2θ con respecto al haz primario, aquel reflejará la intensidad correspondiente a ese plano. Si la muestra es rotada o inclinada, esta intensidad cambiará (Engler y Randle, 2009: 76). De esta manera, midiendo la intensidad

⁵ Punto (pt) es la unidad de medida más pequeña en tipografía.

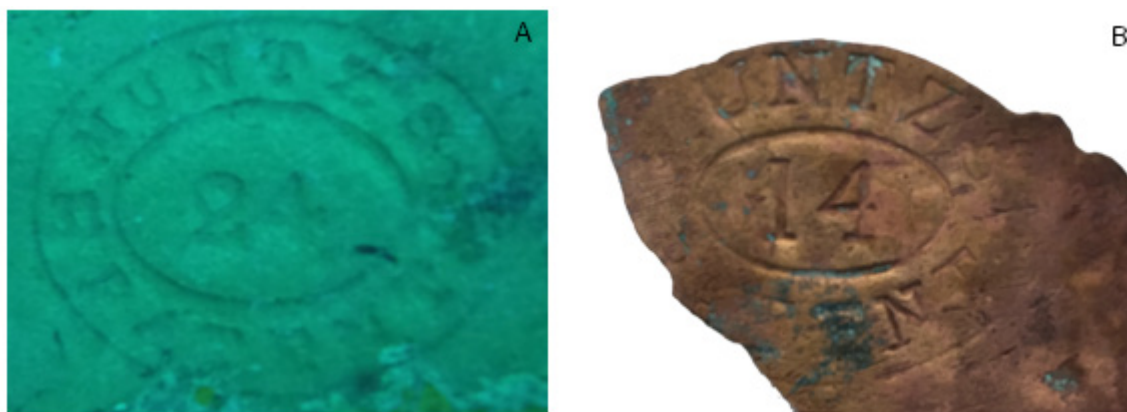


Figura 4. Sellos Muntz: a) registrado en una lámina recuperada del sitio El Ángel, sujeta a análisis (muestra BM-2); y b) fragmento de chapa del *Black Warrior*, seleccionada para análisis (muestra BW-1). Imágenes: A. Zuccolotto.

Figure 4. Muntz's stamps: a) recorded in a sheathing plate retrieved from the El Angel site and studied (sample BM-2); and b) fragment of a sheet from the Black Warrior, selected for analysis (sample BW-1). Images: A. Zuccolotto.

difractada como función de la orientación de la muestra para cada familia de planos (hkl), es posible obtener mapas de intensidad conocidos como figuras de polos (Wenk y Houtte, 2004). En forma similar, cambiando el ángulo de Bragg para que una familia de planos diferente se encuentre en condición de difracción, y rotando la muestra frente al haz, es posible obtener una colección de figuras de polos experimentales a partir de las cuales se puede recalcular la ODF. Las mismas deben corregirse por fondo y desenfoque (Engler y Randle, 2009: 87) antes de ser empleadas en los programas de inversión para obtener la ODF.

Este tipo de análisis ha sido empleado de manera relativamente reciente en materiales arqueológicos, especialmente en elementos de fijación de embarcaciones de madera datadas a principios del siglo XIX (Artioli, 2007; Malamud *et al.*, 2016; Malamud *et al.*, 2017, 2022; Santisteban *et al.*, 2006). En estos estudios se ha demostrado la efectividad de esta técnica para resolver interrogantes relacionadas con la manufactura de las piezas.

Las mediciones de las figuras de polos experimentales se realizaron con el equipo *Empyrean X-ray Diffraction System* de la compañía *PANalytical* de las instalaciones del Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de

Energía Atómica, Argentina, empleando el método de reflexión de Schulz. El análisis de resultados se llevó a cabo por medio del programa MatLab con la aplicación Mtex (Hielscher y Shaebein, 2008). Las ODF obtenidas se analizaron en términos de las componentes de textura principales presentes en aleaciones Cu-Zn laminadas en caliente, presentadas por Hatherly, Malin, Carmichael, Humphreys y Hirsch (1986: 2251): las fibras α , β y γ , siendo sus principales características las siguientes:

Fibra α : se encuentra entre las orientaciones $\{110\} \langle 001 \rangle$ (Goss) y $\{110\} \langle 112 \rangle$ (Brass)

Fibra β : se encuentra entre las orientaciones $\{112\} \langle 111 \rangle$ (Copper) y $\{123\} \langle 634 \rangle$ (S) y $\{110\} \langle 112 \rangle$

Fibra γ : tienen el plano $\{111\}$ paralelo al plano de laminado.

La Figura 5 muestra las ODF correspondientes a las fibras antes mencionadas en el espacio de Euler, en la notación de Bunge (2015). Los resultados obtenidos para las muestras BM-2 y EP-5 se presentan en las Figuras 6 y 7, respectivamente, en términos de secciones $\varphi_2 = \text{cte}$ de las ODF recalculadas. Los volúmenes de los componentes de textura encontrados en las distintas muestras se resumen en la Tabla 1, calculados con el programa MTEX.

Debido a que no se encontró información comparable

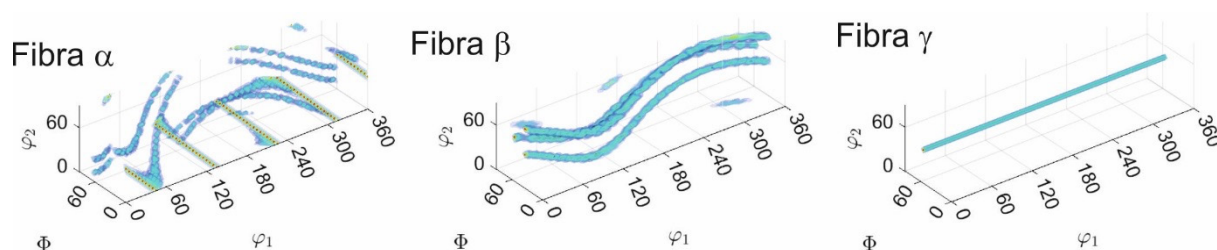


Figura 5. Orientaciones de las fibras α , β y γ . Elaboración a través del programa MatLab.

Figure 5. Orientations of fibres α , β and γ . Produced using MatLab.

Muestras	Volumen de textura (%)	
	Fibra α	Fibra β
BP-1	4,3	8,4
BM-2	4,2	8,6
BC-3	3,6	8,4
BO-4	6,8	9,1
EP-5	0,01	8,4
EC-6	5,7	6,9
EO-7	4,1	8,6

Tabla 1. Volumen de textura en porcentajes.

Table 1. Texture volumen in percentage.

en latones 60:40, se hizo la relación con lo expuesto por Hatherly *et al.* (1986: 2254) para los latones 70:30. A temperatura ambiente (20 °C), este tipo de aleaciones tiene un comportamiento fuertemente marcado por un

componente $\{110\} \langle 112 \rangle$, que se propaga a lo largo de las fibras α y β . Lo mismo sucede en las orientaciones de la fibra β , que tienen origen en la dirección de deformación, observándose una microestructura prominente. Después de los 275 °C de laminación, el componente $\{110\} \langle 112 \rangle$ sigue siendo fuerte y es dispersado a lo largo de la fibra α , donde todavía está presente la dirección de deformación, mientras que las orientaciones de la fibra γ están ausentes. Los especímenes laminados entre 350 °C y 450 °C tienen texturas muy similares, y el componente *Brass* es menor que lo que se observa en las muestras laminadas a 275 °C. Después de un laminado a 550 °C, la intensidad máxima ocurre en la orientación *Copper* y la textura es similar a lo observado en el cobre laminado a temperatura ambiente (Hatherly *et al.*, 1986: 2254).

Con base en lo anterior, las muestras del sitio El Ángel habrían sido manufacturadas por laminado en caliente, con las características de los especímenes mencionados

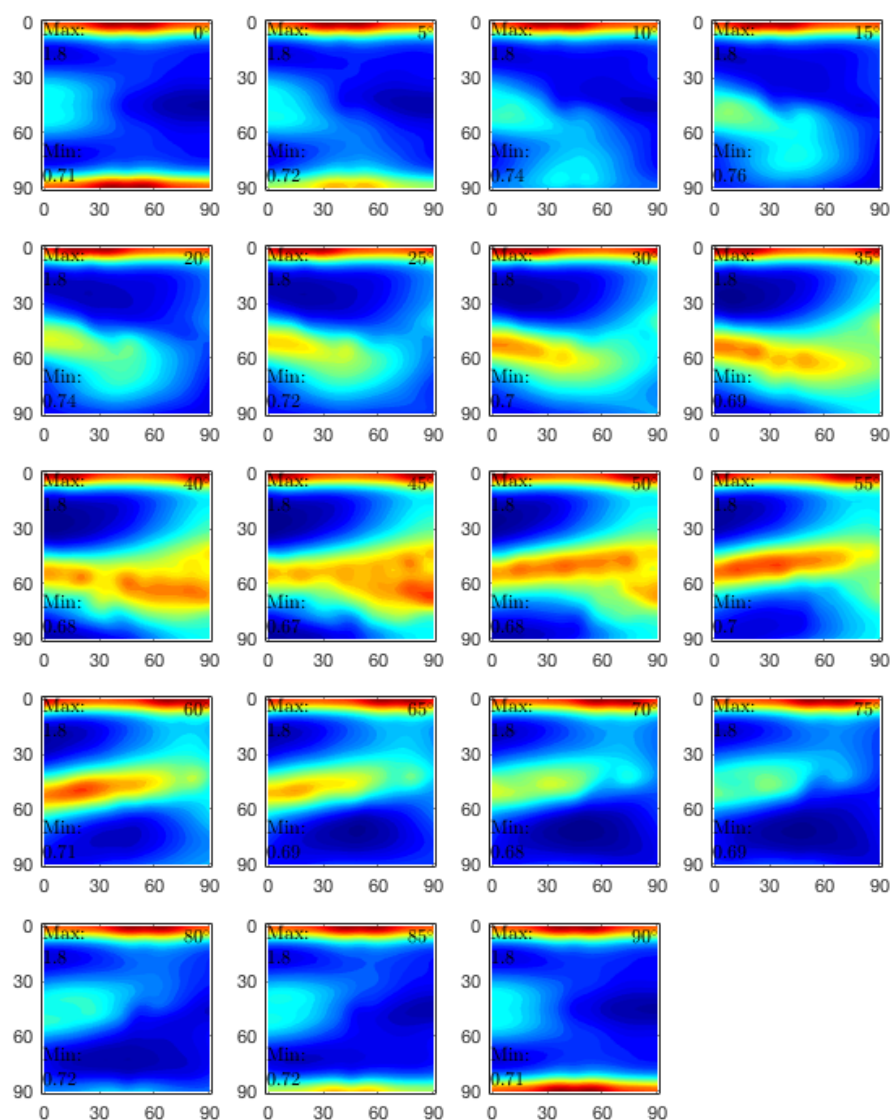


Figura 6. Secciones ODF de la muestra BM-2. Elaboración a través del programa MatLab.

Figure 6. ODF sections of sample BM-2. Produced using MatLab.

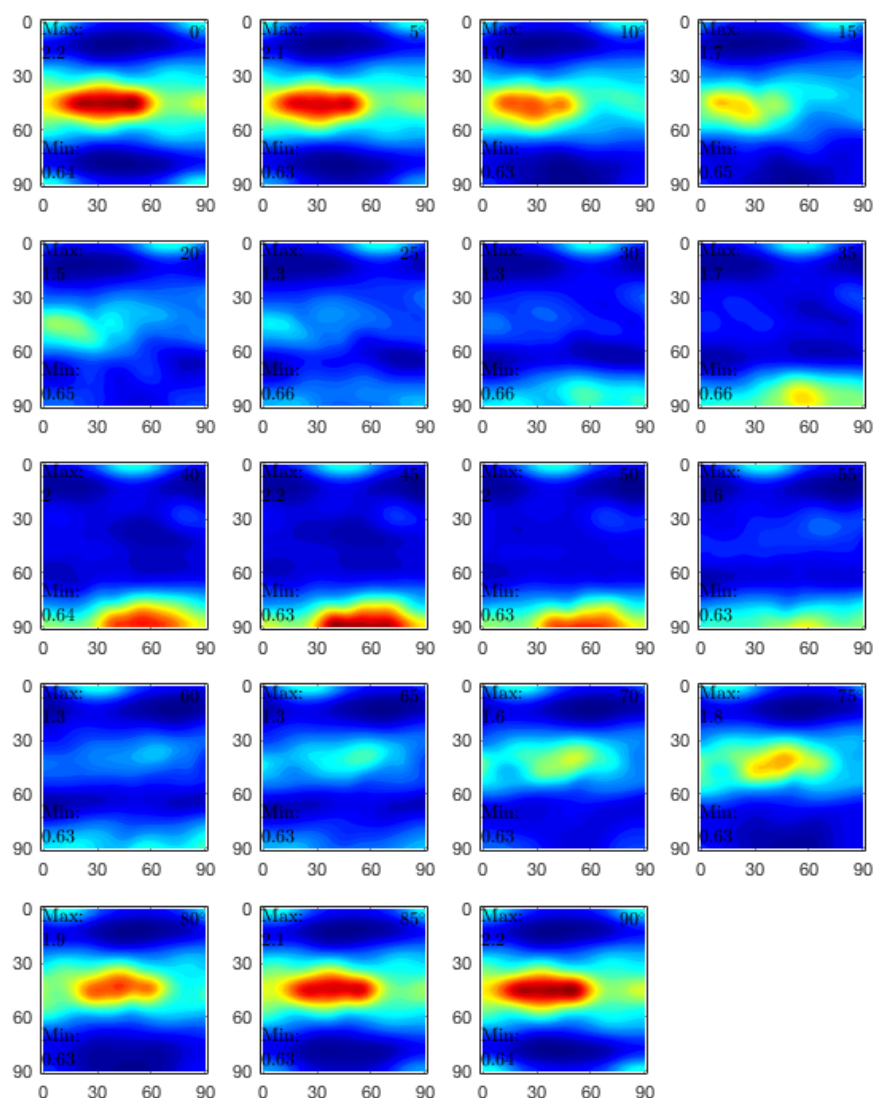


Figura 7. Secciones ODF de la muestra EP-5. Elaboración a través del programa MatLab.

Figure 7. ODF sections of sample EP-5. Produced using MatLab.

por Hatherly *et al.* (1986), laminados entre 350 °C y 550 °C, como se observa en la muestra BM-2 (ver Figura 6). El único caso que difiere es la muestra EP-5, la cual corresponde a una plancha laminada a temperatura ambiente (ver Figura 7).

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Esta es una técnica analítica de determinación de composición química elemental. El principio físico se basa en la emisión de un electrón muy energético por un generador de rayos X, que se hace incidir en un átomo que expulsa así un electrón interno de los orbitales denominados K, L y M. Debido a que cada elemento químico tiene una energía de transición característica, la radiación emitida por este átomo en particular se puede utilizar para diferenciar a los elementos químicos presentes, así mismo la intensidad de la señal sirve para cuantificar la cantidad de ese elemento (Rubinson y Rubinson, 2001: 399).

Una de las limitaciones de esta técnica es que los elementos químicos que se pueden cuantificar deben de ser más pesados que el neón. Es también un problema el contraste, debido a que todos los elementos producen rayos X; por lo tanto, los niveles de concentración mínimos deben de ser mayores al 0,1% (Rubinson y Rubinson, 2001: 399).

La FRX es ampliamente utilizada para determinar de una manera rápida y precisa la composición química de materiales a escalas microscópicas y macroscópicas. También ha sido ampliamente utilizada en arqueometría, debido a que se pueden utilizar muestras sólidas sin necesidad de una preparación previa (Rubinson y Rubinson, 2001: 399).

En esta investigación se utilizó el espectrómetro NITON XL3t GOLDD+ del Laboratorio de Análisis y Diagnóstico de Patrimonio (LADIPA) del Colegio de Michoacán, México,

Muestras	%Cu	%Zn	%Pb
BP-1	60,18	38,1	0,77
BM-2	61,25	36,83	0,84
BC-3	60,49	37,08	0,71
BO-4	59,66	36,74	0,74
EP-5	60,7	36,82	0,61
EC-6	59,99	37,32	0,48
EO-7	60,38	36,9	0,81
BW-1	63,73	35,71	0,13
BW-2	61,37	36,64	0,47

Tabla 2. Composición elemental de las muestras analizadas utilizando FRX: cobre (Cu), zinc (Zn) y plomo (Pb), calculadas a partir de un promedio de al menos tres mediciones. Nota: no se incluyen los porcentajes de níquel (Ni) que fueron detectados por debajo del 0,1%.

Table 2. Elemental composition of analysed samples using FRX: copper (Cu), zinc (Zn) and lead (Pb), mean values of a minimum of three measures. Note: nickel (Ni) percentages, detected below 0.1%, are not included.

operado por el Mtro. Luis Ramón Velázquez Maldonado. Las muestras no requirieron de preparación previa. En total, se analizaron siete muestras del sitio El Ángel y dos del *Black Warrior*.

Estas mediciones se hicieron en el arreglo *Metals* del espectrómetro durante 80 s, dedicando 60 s para cada rango, utilizando los rangos Light (de 1,15 keV a 2,8 keV), Low (de 3,4 keV a 6 keV) y Main (de 6 keV a 15 keV), con un tamaño de haz de 3mm. En cada muestra se hicieron tres mediciones y para su análisis se promediaron los resultados, tomando en cuenta solo las relaciones de cobre, zinc y plomo (Tabla 2).

Los análisis estadísticos multivariados se realizaron con Excel y el complemento Xlstat, siendo los componentes principales el cobre y el zinc. En la Figura 8 se grafican los resultados obtenidos.

Los resultados de este análisis permiten observar de forma general dos agrupaciones de elementos, aquellos que pertenecen al sitio El Ángel y al *Black Warrior*, siendo su principal diferencia la relación cobre-zinc. En las muestras de El Ángel, esta relación es más cercana al $\approx 60:40$, mientras que las del *Black Warrior* presentan una relación más cercana a $\approx 63:37$. Esta última proporción es más parecida a lo presentado por O'Guinness Carlson *et al.* (2010: 112) para el caso del *Snow Squall*, embarcación laminada en 1862 y reparada en 1864. Como ya se mencionó, el *Black Warrior* fue laminado probablemente en 1854, con chapas que corresponden a la segunda patente de Muntz. Al respecto, cabe mencionar que la

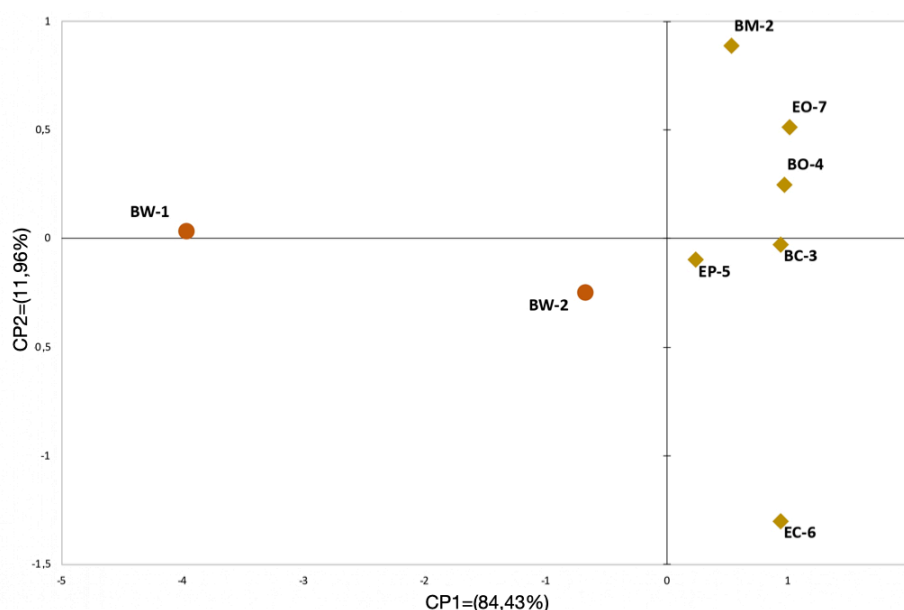


Figura 8. Análisis de componentes principales (PCA), en el cual se muestra la distribución de las observaciones basado en las variables cobre, zinc y plomo. El eje X (CP1) explica el 84,43% de la varianza total, mientras que el eje Y (CP2) explica el 11,96%. Estos componentes reflejan las principales fuentes de variación en las concentraciones de los elementos analizados. Imagen: A. Zuccolotto.

Figure 8. Principal Component Analysis (PCA) showing the distribution of observations based on the variables copper, zinc, and lead. The X-axis (CP1) explains 84.43% of the total variance, while the Y-axis (CP2) explains 11.96%. These components reflect the main sources of variation in the concentrations of the analyzed elements. Image: A. Zuccolotto.

muestra EP-5 de El Ángel muestra ligeras similitudes con las del *Black Warrior* a nivel de composición, pero sobre todo con respecto a la técnica de laminación.

Los datos obtenidos de este conjunto de muestras sugieren que es difícil realizar una distinción precisa de las patentes de Muntz basándose únicamente en las diferencias de composición de las planchas. En este sentido, los resultados presentados en este artículo permiten proponer que la técnica de análisis de textura por medio de DRX presenta mejores condiciones para identificar diferencias entre las planchas fabricadas por Muntz previo y posterior a mediados de la década de 1840.

Discusión y conclusiones

Los resultados de esta investigación permitieron identificar la composición de las muestras de planchas recuperadas de los sitios El Ángel y *Black Warrior*. En ambos casos, también se registraron los sellos de las chapas, alusivos a la compañía británica Muntz. A nivel de composición y manufactura, se determinó la existencia de dos patentes diferentes de la misma empresa. Específicamente, cinco muestras de El Ángel presentan una técnica de manufactura, laminado en caliente, y una aleación cobre-zinc $\approx 60:40$, que corresponde a las aleaciones realizadas por Muntz entre 1832 y 1846. Con respecto a estas últimas, las muestras del *Black Warrior* difieren en su aleación, más cercana a la relación $\approx 63:37$. Teniendo en cuenta la composición, y pese a las diferencias encontradas con respecto al contenido de plomo, es posible estimar que su fabricación es posterior a 1846. Dos de las muestras de El Ángel, BM-2 y EP-5, también se podrían vincular a esta segunda patente en función de su composición química; sin embargo, esta información no resultó determinante. Por otro lado, el estudio de la textura cristalográfica indicó que la muestra BM-2 fue producida por laminado en caliente, mientras que la muestra EP-5 fue laminada en frío. Este último sistema, como se explicó, coincide con el método empleado para la fabricación de las planchas bajo patentes posteriores a 1846.

Los datos derivados del estudio de las planchas de revestimiento empleadas en los sitios El Ángel y *Black Warrior* constituyen un indicador cronológico de interés para la evaluación de los pecios. En el caso del *Black Warrior*, existe información documental sobre la biografía del barco. Por otro lado, aunque el primer sitio no ha sido identificado aún, la información sobre su revestimiento es interesante principalmente por dos motivos. Primero, aunque la evidencia no es concluyente, es posible que esta embarcación haya naufragado con posterioridad a 1846. Segundo, la combinación de planchas de dos tipos y momentos diferentes, sumado a otras evidencias registradas en la estructura del casco, permiten suponer que la embarcación tuvo una larga vida útil, durante

la cual estuvo sujeta a instancias de mantenimiento y reparación.

En suma, el análisis documental, iconográfico y arqueométrico llevado a cabo en este trabajo ha permitido ahondar en la tecnología náutica empleada durante el segundo tercio del siglo XIX. A partir de dos sitios de naufragio localizados en México, fue posible analizar las características técnicas (sellos, composición y manufactura) de las planchas de latón Muntz utilizadas para proteger sus cascos y, con base en ello, identificar dos patentes diferentes. En el caso del pecio El Ángel, esta información contribuyó a su vez a establecer tentativamente la fecha cercana a su naufragio y conocer un rasgo adicional de su historia de vida.

Agradecimientos

Al Dr. Roberto Junco, Subdirector de Arqueología Subacuática (SAS-INAH), por su apoyo para el análisis de las muestras que aquí se presentan. Al Centro de Estudios Arqueológicos, al Laboratorio de Análisis y Diagnóstico del Patrimonio y en especial a Ramón Velázquez Maldonado, operador del FRX del Colegio de Michoacán. Al Centro Atómico Bariloche de la Comisión Nacional de Energía Atómica (Argentina), donde se realizaron los análisis de DRX. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca de posgrado otorgada a uno de los autores (AZV) para la realización de sus estudios de maestría en el Colegio de Michoacán, México. A los dos evaluadores anónimos, por sus generosas y constructivas sugerencias.

Contribución de los autores

Diseño de investigación: AZV, NCC y FM; trabajo de campo: AZV, NCC, LCM y MPC; antecedentes histórico-arqueológicos: AZV y NCC; toma de muestras: AZV y MPC; estudios de caracterización: AZV y FM; análisis e interpretación de los resultados: AZV, NCC y FM; redacción del manuscrito: AZV, NCC y FM; edición: AZV y NCC; todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del artículo.

San Luis Potosí, 6 de febrero de 2025

Referencias

- Artioli, G. (2007). Crystallographic texture analysis of archaeological metals: interpretation of manufacturing techniques. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 89: 899–908. <https://doi.org/10.1007/s00339-007-4215-2>.
- Ashkenazi, D., Inberg, A. y Cvikel, D. (2018). Analysis of naturally etched surface of brass sheathing from a nineteenth-century shipwreck. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 54 (1): 101–110. <https://aseestant.ceon.rs/index>.

php/jmm/article/view/14406

- Bethencourt, M., Bocalandro Rodríguez, A. y Romero-Pastor, J. (2013). Datación de pecios de los siglos XVIII y XIX a través de la caracterización de los forros de cobre. *Actas del IV Congreso Latinoamericano de Conservación y Restauración de Metal* (pp. 51–62). Madrid: Instituto del Patrimonio Cultural de España & Grupo Español de Conservación.
- Bingeman, J.M. (2018). Copper and Muntz metal sheathing: A global update. *International Journal of Nautical Archaeology*, 47 (2): 460–471. <https://doi.org/10.1111/1095-9270.12299>
- Bingeman, J.M., Bethell, J.P., Goodwin, P. y Mack, A.T. (2000). Copper and other sheathing in the Royal Navy. *International Journal of Nautical Archaeology*, 29 (2): 218–229. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2000.tb01453.x>
- Bunge, H.-J. (2015). *Texture Analysis in Materials Science: Mathematical Methods* (traducido al inglés por P.R. Morris). Wolfratshausen: Helga & Hans-Peter Bunge.
- Carrillo Márquez, L. (2018). Arqueología Marítima en México. *Revista de Arqueología Histórica Argentina y Latinoamericana*, 12 (1): 37–68. <https://www.rdahayl.com/index.php/rdahayl/article/view/83>
- Carrillo Márquez, L.R., Ciarlo, N.C. y Zuccolotto Villalobos, A. (2022). El Ángel, testigo de la explotación comercial de una tintórea y de la transición hacia la construcción naval mixta. *Cuadernos de Arqueología de Sitios Subacuáticos y Marítimos de México*, 4: 1–18. <https://revistas.inah.gob.mx/index.php/serie/issue/view/2521>
- Carrillo Márquez, L.R., Ciarlo, N.C., Zuccolotto Villalobos, A. y Guzmán Torres, J. (2023). Archaeological research of El Ángel and 40 Cañones sites, two ships lost in Banco Chinchorro, Quintana Roo, Mexico. En D. Elkin y C. Delaere (Eds.), *Underwater and Coastal Archaeology in Latin America* (pp. 201–211). Gainesville, FL: University Press of Florida.
- Ciarlo, N.C. (2015). Naval metals from mid 18th- to early 19th-century European shipwrecks: a first analytical approach. *Historical Metallurgy*, 47 (2): 146–152. <https://hmsjournal.org/index.php/home/article/download/100/97>
- Ciarlo, N.C. (2017). Experimentación, transferencia tecnológica y conservadurismo: notas sobre la introducción del aforro de cobre en los barcos de madera del siglo XVIII. *Revista Teoría y Práctica de la Arqueología Histórica Latinoamericana*, 6: 9–27. <https://doi.org/10.35305/tpahl.vi6.48>
- Ciarlo, N.C. (2020). Historical Shipwrecks, Archaeometry of. En C. Smith (Ed.), *Encyclopedia of Global Archaeology* (2a Ed., pp. 5131–5147). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30018-0_3120
- Ciarlo, N.C. (2023). Industrialisation, Warfare, and Science: An Archaeological-historical Insight into Technological Changes of Mid-18th to Early 19th-century European Naval Ships. *International Journal of Nautical Archaeology*, 52 (2): 384–417. <https://doi.org/10.1080/10572414.2023.2212408>
- Ciarlo, N.C. y Argüeso, A. (2019). Archaeometric and Archaeometallurgical Studies on Historical Shipwrecks: Research Experiences in Argentina. *Journal of Maritime Archaeology*, 14 (1): 127–150. <https://doi.org/10.1007/s11457-018-9203-5>
- Ciarlo, N.C., Lucchetta, M.C., y De Rosa, H. (2013). Análisis metalográfico y químico de un conjunto de artefactos recuperados del naufragio *Triunfante* (1756-1795), Golfo de Rosas (Cataluña, España). En M. Pujol i Hamelink, P. de la Fuente, G. Vivar, y F.J. Nieto (Eds.), *El vaixell Triunfante: Una fita de la ciència i de la tècnica del segle XVIII*. Monografies del CASC (No. 10, pp. 159–171). Girona: Museu d'Arqueologia de Catalunya.
- Ciarlo, N.C., De Rosa, H., Lucchetta, M.C., Marino, P., Rodríguez Mariscal, N., Martí Solano, J., y Maxia, G. (2014). Estudio comparado de dos navíos franceses de la Batalla de Trafalgar: los elementos de fijación estructurales del *Fougueux* (1785-1805) y *Bucentaure* (1804-1805). En D. Juanes y C. Roldán (Eds.), *Actas del X Congreso Ibérico de Arqueometría* (pp. 217–229). Castellon: Subdirección de Conservación, Restauración e Investigación IVC+R de CulturArts Generalitat.
- Ciarlo, N.C., Maxia, G. Rañi, M. De Rosa, H., Geli Mauri, R., y Vivar Lombarte, G. (2016). Craft production of large quantities of metal artifacts at the beginnings of industrialization: Application of SEM-EDS and multivariate analysis on sheathing tacks from a British transport sunk in 1813. *Journal of Archaeological Sciences: Reports*, 5: 263–275. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.11.019>
- Cock, R. (2001). 'The finest invention in the world': the

- Royal Navy's early trials of copper sheathing, 1708-1770. *The Mariner's Mirror*, 87 (4): 446-459. <https://doi.org/10.1080/00253359.2001.10656815>
- Cohen, M., Ashkenazi, D., Kahanov, Y., Stern, A., Klein, S., y Cvikel, D. (2015). The Brass Nails of the Akko Tower Wreck (Israel): Archaeometallurgical Analyses. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 4: 188-206. <https://doi.org/10.1007/s13632-015-0203-7>
- De Rosa, H., Lorusso, H., y Svoboda, H.G. (2008). Estudio de chapas metálicas empleadas como revestimiento de cascos de embarcaciones de madera. En M.T. Carrara (Ed.), *Continuidad y Cambio Cultural en Arqueología Histórica* (pp. 551-556). Santa Fe: Universidad Nacional de Rosario.
- De Rosa, H., Ciarlo, N.C., Pichipil, M., y Castelli, A. (2015). 19th Century Wooden Ship Sheathing. A Case of Study: The Materials of Puerto Pirámides 1, Península Valdés. *Procedia Materials Science*, 9: 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.023>
- Engler, O., y Randle, V. (2009). Introduction to Texture Analysis: Macrotexture, Microtexture, and Orientation Mapping (2a Ed.). Londres: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/978142006366>
- Ferreiro, L.D. (2007). Spies versus prize: technology transfer between navies in the Age of Trafalgar. *Mariner's Mirror*, 93 (1): 16-27. <https://doi.org/10.1080/00253359.2007.10657024>
- Flick, C. (1975). Muntz metal and ship's bottoms: The industrial career of G.F. Muntz (1794-1857). *Proceedings Birmingham and Warwickshire Archaeological Society*, 87: 70-88.
- Guzmán Torres, J., Carrillo Márquez, L., Ciarlo, N.C., Zuccolotto Villalobos, A.R., y López Martín, S. (2023). El paisaje cultural marítimo de Banco Chinchorro, México: una aproximación arqueológica e histórica para su estudio y conservación. En: F. Cerezo Andreo, C. Pérez-Reverte Mañas, y S.E. Solana Rubio (Eds.), *Actas del I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática*. Cádiz: Editorial UCA (en prensa)
- Franklin Institute (1847). Specifications of English Patents. *Journal of the Franklin Institute*, 44 (4): 229-248. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(47\)90368-2](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(47)90368-2)
- Harris, J.R. (1966). Copper and Shipping in the Eighteenth Century. *The Economic History Review*, 19: 550-568. <https://doi.org/10.2307/2593163>
- Hatherly, M., Malin, A.S., Carmichael, C.M., Humphreys, F.J., y Hirsch, J. (1986). Deformation processes in hot worked copper and α brass. *Acta Metallurgica*, 34 (11): 2247-2257. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90170-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90170-7)
- Hielscher, R. y Schaeben, H. (2008). A novel pole figure inversion method: Specification of the MTEX algorithm. *Journal of Applied Crystallography*, 41 (6): 1024-1037. <https://doi.org/10.1107/S0021889808030112>
- Jones, T.N. (2004). *The Mica Shipwreck: Deepwater Nautical Archaeology in the Gulf of Mexico* (Tesis de maestría), Texas A&M University, College Station, TX. <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/311>
- Junco, R., Von der Porten, E., y Piña, M. (2016) Informe de proyecto Galeón de Manila, Baja California. Archivo técnico, Subdirección de Arqueología Subacuática, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Ciudad de México. Ms. Manuscrito inédito.
- Knight, R.J.B. (1973). The introduction of copper sheathing into the Royal Navy, 1779-1786. *The Mariner's Mirror*, 59 (3): 299-309. <https://doi.org/10.1080/00253359.1973.10657911>
- Lorusso, H., Svoboda, H.G., y De Rosa, H. (2003). Caracterización microestructural de componentes metálicos hallados en el pecio de Reta. *Actas de las Jornadas SAM/CONAMET* (pp. 1103-1106). San Carlos de Bariloche: Asociación Argentina de Materiales.
- MacLeod, I.D. (1994). Conservation of corroded metals – a study of ships' fastenings from the wreck of HMS *Sirius*. En D.A. Scott, J. Podany, y B. B. Considine (Eds.), *Ancient and Historic Metals Conservation and Scientific Research* (pp. 265-278). Los Ángeles, CA: Getty Conservation Institute.
- MacLeod, I.D. y Pitrun, M. (1986). The effects of microstructure on long-term corrosion. *Australasian Corrosion Association, Proceedings Conference*, 26 (2): 1-14. Adelaide.
- MacLeod, I.D. y Pitrun, M. (1996). Metallography of Copper and its Alloys Recovered from Nineteenth Century Shipwrecks. En G. Kuppuram y K.

- Kumudamani (Eds.), *Marine Archaeology. The Global Perspectives* (pp. 347–356). Nueva Deli: New Gyan Offset Press.
- Malamud, F., Northover, S., James, J., Northover, P. y Kelleher, J. (2016). Texture analysis of Napoleonic War Era copper bolts. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 122: 276. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9835-y>
- Malamud, F., Northover, S., James, J., Northover, P., Nneji, S., y Kelleher, J. (2017). Spatially resolved texture analysis of Napoleonic War era copper bolts. *Journal of Applied Crystallography*, 50: 1359–1375. <https://doi.org/10.1107/S1600576717011761>
- Malamud, F., Northover, P., Northover, S., Nneji, S., Kelleher, J., Ciarlo, N.C., y Geli Mauri, R. (2022). Spatially resolved neutron texture measurements of copper bolts from the Deltebre I (1813) site. *Materials Characterization*, 192: 112183. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112183>
- McAllister, M. (2012). Preliminary analysis of copper alloy fastenings from an unidentified shipwreck in Koombana Bay, Western Australia. *The Bulletin of the Australasian Institute for Maritime Archaeology*, 36: 36–43.
- McCarthy, M. (2005). *Ships' fastenings. From sewn boat to steamship*. College Station, TX: Texas A&M University Press.
- McCarthy, M. y Stanbury, M. (2003). The structure of the *Eglinton*, its associated fastenings and fittings. En M. Stanbury (Ed.), *The barque Eglinton—wrecked Western Australia 1852* (pp. 47–70). Australian National Centre of Excellence for Maritime Archaeology, Special Publication No. 6 / The Australian Institute for Maritime Archaeology, Special Publication No. 13. Fremantle: The Australian Institute for Maritime Archaeology.
- Northover, P. (2011). Metal Analysis of Hull Fastening and Sheathing. En J. Whitewright & J. Satchell (Eds.), *The Archaeology and History of the Flower of Ugie, wrecked 1852 in the Eastern Solent* (pp. 31–34). The Hampshire and Wight Trust for Maritime Archaeology Monograph Series No. 1 / British Archaeological Reports, British Series 551. Oxford: Archaeopress.
- O'Guinness Carlson, M., Lipfert, N.R., Ronnberg, E.A.R., y Scott, D.A. (2011). Technical Analysis of Muntz Metal Sheathing from the American Clipper Ship Snow Squall (1851-1864). En P. Mardikian, C. Chemello, C. Watters, y P. Hull (Eds.), *Metal 2010* (Actas del *Interim Meeting of the ICOM-CC Metal Working Group*, 11–15 October 2010, Charleston, Carolina del Sur, pp.107–114). Charleston, SC: Clemson University.
- Rubinson, K. A. y Robinson, J. F. (2001). *Análisis instrumental* (traducido al español por L.L. Ros; revisión técnica por Y. Madrid Albarrán). Madrid: Prentice Hall.
- Samuels, L.E. (1992). Australia's Contribution to Archaeometallurgy. *Materials Characterization*, 29, 69–109. [https://doi.org/10.1016/1044-5803\(92\)90108-T](https://doi.org/10.1016/1044-5803(92)90108-T)
- Santisteban, J.R., Siano, S., y Daymond, M.R. (2006). Neutron Strain Scanning of Archaeological Bronzes. *Materials Science Forum*, 524–525: 975–980. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.524-525.975>
- Staniforth, M. (1985). The introduction and use of Copper Sheathing – A history. *The Bulletin of the Australian Institute for Maritime Archaeology*, 9(1–2): 21–48.
- U.S. Naval Institute (1952). *The History of the Prevention of Fouling. Marine Fouling and its Prevention*, pp. 211–223. Woods Hole Oceanographic Institute, No.580. Menasha, WI: George Banta Publishing Co.
- Van Duivenvoorde, W. (2015). The Use of Copper and Lead Sheathing in VOC Shipbuilding. *International Journal of Nautical Archaeology*, 44(2): 349–361. <https://doi.org/10.1111/1095-9270.12118>
- Van Duivenvoorde, W., Davison, L., Polzer, M., de Ruyter, M., Bennett, K., Nutley, D. y Waterson, P. (2023). Wrecked All Over the Place: The Identification of Disarticulated Context-Free Ship Remains from the Gold Coast in Queensland, Australia. *Historical Archaeology*, 57: 126–153. <https://doi.org/10.1007/s41636-023-00394-3>
- Viduka, A. y Ness, S. (2004). Analysis of some copper-alloy items from HMAV *Bounty* wrecked at Pitcairn Island in 1790. *Proceedings of Metal* (pp. 160–172). Canberra: National Museum of Australia.
- Wenk, H.-R. y Houtte, P. V. (2004). Texture and anisotropy. *Reports on Progress in Physics*, 67 (8): 1367–1428. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/67/8/R02>
- Zuccolotto Villalobos, A.R. (2020). Las láminas de Muntz

del pecio "El Ángel": un caso de navegación comercial en el Caribe durante el siglo XIX (Tesis de maestría), Centro de Estudios Arqueológicos, El Colegio de Michoacán, Michoacán, México. <https://colmich.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1016/1143>

Zuccolotto Villalobos, A.R., Ciarlo, N.C., Malamud, F., Carrillo Márquez, L., Guzmán Torres, J. y Girón

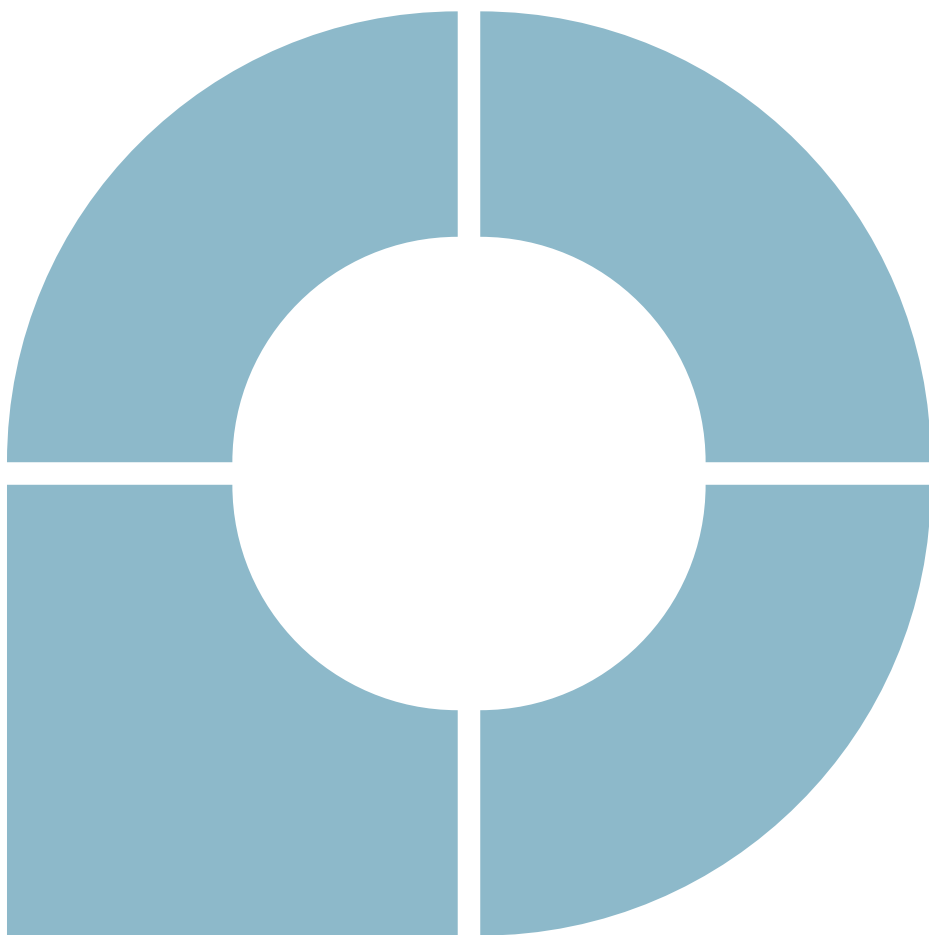
Pillado, C. (2023). Aportes de los estudios arqueométricos para la identificación de la proveniencia y temporalidad del pecio El Ángel, Banco Chinchorro, México. En: F. Cerezo Andreo, C. Pérez-Reverte Mañas, y S.E. Solana Rubio (Eds.), *Actas del I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática*. Cádiz: Editorial UCA (en prensa).

NANS

Noticiario de Arqueología Náutica y Subacuática

Año 3: 2025

4



Noticiario de Arqueología Náutica y Subacuática
NANS Año 3: 2025 | n.º 4

ISSN: 2952-1149
NIPO: 822-22-111-9

Noticiario de Arqueología Náutica y Subacuática (NANS) es una publicación periódica en acceso abierto orientada a la difusión de novedades en la órbita de estas disciplinas y de todos aquellos aspectos relacionados con el patrimonio cultural subacuático.

Cada noticia conforma un fascículo independiente, cuya periodicidad va asociada a la recepción de los textos, con unos ciclos de revisión muy breves. Sus contenidos, categorizados por su temática específica en distintas secciones, están disponibles en la página web de ARQVA: <https://www.cultura.gob.es/mnarqua/home.html>

Todas las contribuciones han de ir dirigidas a:
publicaciones.arqua@cultura.gob.es

Director:
Rafael Sabio González

Editor técnico:
Abraham Ramírez Pernía

Consejo editorial:
Carlos Andrés Cristóbal
Marta Arcos García
Milagros Buendía Ortuño
Celia Cantero Escribano
Rocío Castillo Belinchón
Marta Duarte Chacón
Juan José Gordón Baeza
Soledad Pérez Mateo
Paloma Sánchez Gómez
Juan Luis Sierra Méndez
Ángel Villa González
Ángela Yebra Praena



Edita:
© **SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA**
Subdirección General de Atención al Ciudadano,
Documentación y Publicaciones

© del texto y las imágenes: sus autores.

Diseño editorial: David Marote

Noticiario de Arqueología Náutica y Subacuática (NANS) se distribuye bajo una licencia **Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

Cómo citar: Zubeldia, G. *et al.* (2025). Estudio y análisis del pecio 'Almiranta'. *NANS*, 3(4).

ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL PECIO ‘ALMIRANTA’: IDENTIFICACIÓN, ESTADO DE CONSERVACIÓN Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE UN GALEÓN DEL SIGLO XVII EN LA BAHÍA DE SANTOÑA (CANTABRIA)

Germán ZUBELDIA PÉREZ¹, Sergio José LÓPEZ MARTÍN²,
Juan Carlos ARROYO LÁZARO³
y Marina GOÑALONS LAPIEDRA⁴

INTRODUCCIÓN

El 12 de enero de 1881 el vapor inglés Blyth encalló en un bajo arenoso en la bocana del puerto de Santoña (Cantabria), en un área conocida como el bajo del Tobedo. Los trabajos de reflotamiento del barco y dragado de esta área pusieron en evidencia la existencia de una acumulación anómala de piedras de lastre y de materiales pertenecientes a un buque de grandes di-

1 Arqueólogo subacuático, germanzp17@gmail.com, ORCID iD: 0009-0008-3631-1720.

2 Arqueólogo subacuático, sergis.mundo92@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-8703-6721.

3 Arqueólogo subacuático, juancarlos.arroyolazaro@gmail.com, ORCID iD: 0009-0000-1236-6518.

4 Conservadora de bienes culturales, marinagl17@gmail.com, ORCID iD: 0000-0001-7111-1558.

mentaciones. Con el tiempo, esta zona fue usada comúnmente como lugar de pesca entre los marineros y aficionados locales.

No fue hasta 1997 y 1998, con la elaboración de la Carta Arqueológica Subacuática de Cantabria (CARSUCAN), cuando el director del Museo Marítimo del Cantábrico, José Luis Casado Soto, descubrió la existencia de restos estructurales de un buque de época moderna junto a varios cañones de hierro colado. Tras el examen de la estructura del pecio y las investigaciones documentales, Casado Soto planteó la hipótesis de que se trataba de la Almiranta de la Escuadra de Galicia, el galeón Nuestra Señora de la Concepción, perdido en la batalla de la bahía de Santoña en 1639 (Casado Soto, 2004, pp. 153-163). No obstante, las investigaciones efectuadas en el marco de este reciente proyecto han confirmado que, en realidad, pertenecen al galeón Nuestra Señora de la Purificación, hundido en la misma batalla, en el contexto de la guerra de los Treinta Años.

En agosto de 1639, la nave se encontraba en la bahía de Santoña esperando el embarque de pertrechos de artillería y pólvora destinados a los galeones de Galicia, cuando les sorprendió la flota francesa. Esta, al mando de Henri de Sourdis, arzobispo de Burdeos y almirante, organizó una ofensiva naval contra los puertos y asentamientos costeros estratégicos de la cornisa cantábrica con el objetivo de debilitar la presencia naval española en el Cantábrico y bloquear las comunicaciones marítimas con Flandes. Santoña y Laredo fueron algunos de los principales objetivos, debido a su papel como puntos de aprovisionamiento y construcción naval de la monarquía hispánica en el Atlántico. La flota francesa, compuesta por 189 navíos y apoyada por más de 12000 soldados, saqueó y arrasó ambas villas, destruyendo infraestructuras clave y apoderándose de un galeón real español, la Almiranta, mientras que la Purificación fue hundida por los propios españoles para evitar su captura (Brígido Gabiola, 1998, p. 168).

S2 ARQUEOLOGÍA MARÍTIMA

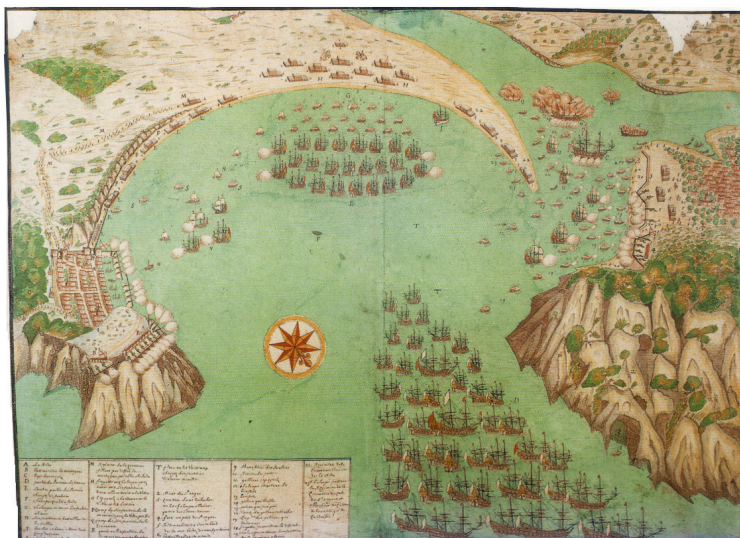


fig. 1. Acuarela dibujada por un oficial francés presente en batalla de Santaña (Archives du Génie, Château de Vincennes)

RESULTADOS DE LA CAMPAÑA ARQUEOLÓGICA DE 2024

Los estudios de Casado Soto pusieron de manifiesto la importancia de este yacimiento arqueológico para el conocimiento de la arquitectura naval española de época moderna, y más concretamente de esta tipología de embarcaciones. Los trabajos arqueológicos se plantearon con la intención de dar continuidad a las intervenciones realizadas previamente por Casado Soto buscando profundizar en la identificación del pecio, evaluar su estado de conservación y establecer estrategias para su protección.

Trabajos de documentación

Uno de los aspectos más relevantes de la campaña ha sido la confirmación de que el pecio corresponde al galeón Nuestra



fig. 2. Trabajos arqueológicos de prospección visual y registro del yacimiento

Señora de la Purificación, descartando la hipótesis inicial que lo identificaba como Nuestra Señora de la Concepción.

La Purificación fue uno de los ocho galeones construidos en los astilleros de Deusto (Acedo Guevara, 1975) bajo el asiento de Francisco de Quincoces (Artaza Montero, 1996a; 1996b) para la Escuadra del Reino de Galicia. Si bien debía responder a los estándares de la Real Ordenanza para la Fábrica de Navíos de 1618, lo cierto es que no se siguieron dichas ordenanzas, aspecto que resulta de gran interés para la investigación arqueológica, pues nos permitirá comparar los restos con dicho tratado⁵. Este galeón desplazaba unas 495 toneladas y un tercio, medía 32,75 m de eslora interior en la cubierta principal, contaba con una quilla de 26,57 m, una manga de 9,76 m, un puntal de 4,50 m y

5 Asiento original del Reino de Galicia con Don Juan Pardo Osorio y Don Antonio de Castro Osorio y Tobar, 5 de abril de 1633. Archivo General de Simancas, Contaduría Mayor de Cuentas, 3.ª Época, Leg. 85, f. 1-3.

un plan de 4,59 metros⁶. Tanto este galeón como la Almiranta, Nuestra Señora de la Concepción, fueron terminados e incorporados al servicio el 23 de junio de 1639⁷.

En cuanto a la artillería que portaba, las fuentes citan que «mientras que la Capitana como la Almiranta montaban 40 piezas cada uno, la Purificación debía llevar 36 cañones». Toda la artillería que debía embarcarse en los dos galeones de Quincoces provenía de la Fábrica de Liérganes, y a tal efecto, se fundieron 370 cañones de hierro colado para la Escuadra de Galicia entre los años 1638 y 1639⁸.

El estudio comparativo de fuentes documentales ha sido fundamental en este hallazgo, ya que existían ciertas contradicciones entre la bibliografía española y francesa (Phillips, 1996, p. 359). En gran parte de la documentación consultada en el Archivo General de Simancas, dentro de los Legajos de Guerra y Marina, nunca se menciona el nombre de los dos galeones. Inclusive, en un memorial del asentista Francisco de Quincoces, que presencié la batalla desde tierra, se precisa que el más pequeño de los dos «voló» [por los aires], mientras que el más grande, en el cual se encontraba embarcado Nicolás Judice, fue apresado por las tropas francesas, tras un intento fallido de sus oficiales de prenderle fuego⁹.

6 De los maravedís que se libraron por todo lo que se hubo de hacer para el apresto, sustento y paga de la Escuadra de Galicia, s.f. Archivo General de Simancas, Contaduría Mayor de Cuentas, 3.^a Época, Leg. 85, f. 8v-9bis r.

7 De los maravedís que se hacen buenos por la provisión y fábrica de los ocho navíos y un patache para la Escuadra de Galicia, s.f. Archivo General de Simancas, Contaduría Mayor de Cuentas, 3.^a Época, Leg. 85, f. 21v.

8 La Junta de Armadas. Sobre lo que se debe a los Partícipes de la fundición de Liérganes por la Artillería y Valería que han dado para los Navíos de las fábricas nuevas de Cantabria, 29 de agosto de 1639. Archivo General de Simancas, Guerra y Marina, Leg. 3173, f. 12-15.

9 Francisco de Quincoces. Da cuenta por menor de lo sucedido desde que llegó la Armada de Francia a la costa de Cuatro Villas, 19 de agosto de 1639. Archivo General de Simancas, Guerra y Marina, Leg. 1284, f. 5-7.

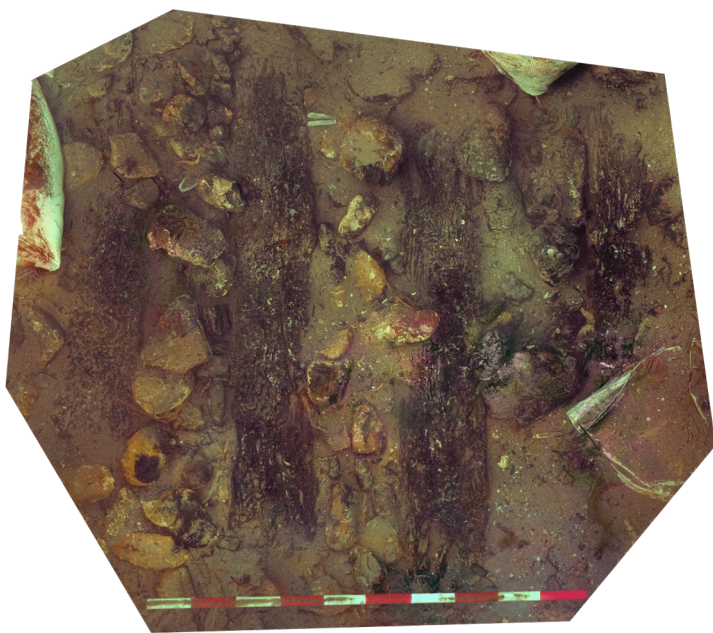


fig. 3. Fotogrametría de la primera sección que revela parte de las varengas

Localización

La ubicación precisa del yacimiento ha sido delimitada a partir de prospecciones visuales, sonar de barrido lateral y toma de coordenadas, los cuales han permitido verificar que parte del sitio arqueológico se encuentra dentro de la canal de navegación. Por añadidura, la escasa profundidad en marea baja, 3,5 m en su parte más somera, ha evidenciado una interacción directa con la actividad portuaria, lo que plantea una serie de problemáticas de conservación.

En comparación con los trabajos de Casado Soto, el pecio presenta variaciones en su nivel de sedimentación. Este yacimiento se encuentra en una zona de depósitos sedimentarios activos, en una ría en la que le afectan tanto los aportes ma-

rinosa como fluvial. En consecuencia, el sitio arqueológico se encuentra mayormente enterrado. En toda la zona se observó una acumulación considerable de lastre a lo largo de un túmulo que va desde los 3,5 m a los 5 m de profundidad. Se observó que esta capa de arena presenta un bajo grado de compactación, lo que es indicativo de procesos sedimentarios recientes o de dinámicas activas de transporte. La cubrición del yacimiento varía entre 5 y 10 cm de potencia estratigráfica, dependiendo de la profundidad de cada punto investigado, siendo mayor en las áreas más profundas. El entorno de la bahía de Santoña presenta además una fuerte influencia de las corrientes de marea, cuya variabilidad ha afectado la estabilidad del pecio a lo largo del tiempo. Los análisis hidrodinámicos indican que esta dinámica genera movimientos de sedimentos que han contribuido tanto a la exposición como a la cobertura de distintas secciones de la estructura sumergida.

Restos materiales y estado de conservación

Se ha constatado que gran parte de la estructura se encuentra cubierta por un túmulo de lastre, lo que ha favorecido la preservación de los elementos constructivos subyacentes. Sin embargo, las zonas cubiertas por sacos de arena en las que se realizaron los sondeos en los años 1997 y 1998, sufren una mayor exposición al tener solo una capa superficial de arena. Otras, directamente no tienen cubierta protectora, seguramente producto de las dinámicas activas del sedimento arenoso en la zona. En las áreas más expuestas, se han detectado signos evidentes de erosión y degradación, atribuibles tanto a la acción del medio marino como a factores antrópicos. Debido a estos factores de alteración constantes, el material arqueológico no protegido ha sido objeto de erosión continua y los restos orgánicos se han visto afectados por la acción de organismos marinos xilófagos como el *Teredo navalis*.

En cuanto a los restos materiales, se han observado mayormente elementos estructurales de madera con elementos de sujeción, como cabillas de madera y clavazón de hierro de sección cuadrada junto con uniones como los escarpes a colas de milano, características de la carpintería naval española de la época. Además, se han observado también pequeñas concreciones de hierro dispersas bajo una capa de sedimento arenoso, probablemente vinculadas a partes de la estructura del barco, a elementos materiales de la tripulación o a componentes de su artillería.

Aparentemente, a pesar de observar elementos náuticos dispersos, los restos parecen constituir una sola estructura náutica, en la que se han identificado distintos componentes longitudinales y transversales de la arquitectura naval que concuerdan, en su morfología y tipología, con los restos materiales de una embarcación de época moderna. La mayoría de estos restos materiales pertenecen a la obra viva de la embarcación (quilla, varengas, etc.) en relativo buen estado de conservación, aunque algunos elementos presentan un deterioro evidente por los agentes anteriormente mencionados.

Riesgos naturales y antrópicos detectados

Los procesos de degradación que afectan al pecio responden a un complejo equilibrio entre los factores naturales, derivados de la interacción con el entorno marino, y los factores antrópicos, vinculados a la actividad humana. El análisis de la evolución del yacimiento ha permitido identificar varios agentes de deterioro.

Como ya se ha mencionado, la bahía de Santoña presenta un sistema de mareas y corrientes que genera movimientos constantes de sedimentos, tanto de origen fluvial como de origen marino alternando períodos de enterramiento con episodios de exposición de los restos. Esta dinámica ha jugado un doble papel: por un lado, ha favorecido la protección de ciertos

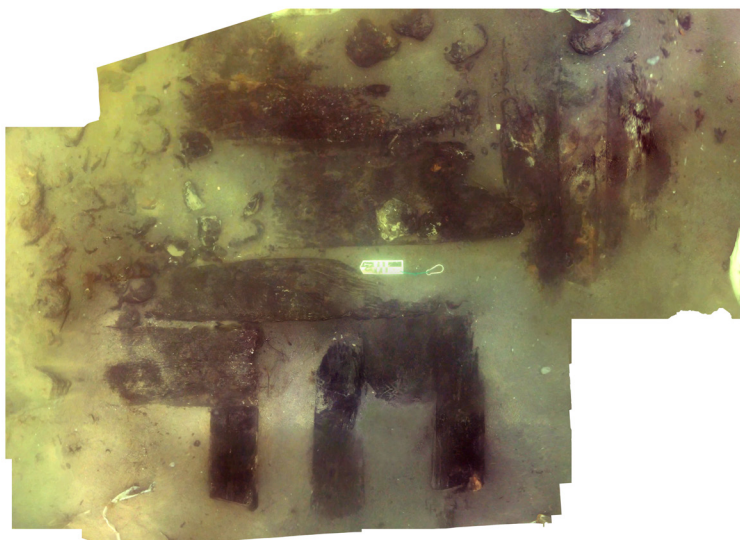


fig. 4. Fotogrametría de la segunda sección y zona adyacente que revela elementos estructurales longitudinales y transversales

sectores del pecio al cubrirlos con una capa de sedimentos que limita la acción de los agentes degradantes; por otro, ha dejado expuestas áreas más vulnerables a la abrasión y a la acción directa de las corrientes (Bethencourt Núñez *et al.*, 2013). En estos sectores, la progresiva desestabilización de los elementos estructurales ha generado reactivaciones de procesos de corrosión, llegada de microorganismos, desplazamientos de fragmentos y pérdida de material arqueológico.

La acción de organismos xilófagos, entre los que destaca el *Teredo navalis*, es uno de los principales agentes de degradación del material orgánico, junto con los daños mecánicos que puede provocar toda la fauna y el ecosistema del yacimiento (Fernández y Palacio, 2003). Dentro de los restos de naturaleza orgánica cabe destacar la especial delicadeza de aquellos materiales muy frágiles, normalmente pertenecientes a la arquitectura naval, como la cabuyería, que también pueden verse

afectados por estos agentes biológicos y mecánicos (Zambrano Valdivia *et al.*, 2016). Asimismo, la colonización del yacimiento por otros organismos, como algas, bacterias sulfato reductoras, esponjas y crustáceos, puede haber modificado la superficie del pecio, alterando su morfología, acelerando procesos de deterioro y dificultando su análisis arqueológico (Hormaechea Arenaza *et al.*, 2018). A estos procesos se suma la corrosión de los elementos metálicos, especialmente en los clavos, pernos y piezas de fijación de la estructura. La interacción prolongada con el agua marina ha generado un avanzado proceso de oxidación y concreción en estos materiales, lo que ha debilitado su integridad y acelerado la descomposición de los ensambles estructurales originales. Por último, el impacto de eventos meteorológicos extremos, como temporales y fuertes marejadas, también debe considerarse un factor de riesgo para la estabilidad del pecio. Estos episodios pueden provocar alteraciones súbitas en la disposición del yacimiento, removiendo sedimentos y generando una mayor exposición de las zonas más frágiles.

Más allá de los procesos naturales de degradación, la presencia del pecio en una zona de alta actividad portuaria lo expone a diversos riesgos antrópicos que podrían comprometer su conservación de manera irreversible. Uno de los problemas detectados más preocupantes es su proximidad a la canal de navegación del puerto de Santoña. Las prospecciones realizadas han determinado que parte del yacimiento se encuentra en un área transitada por embarcaciones de todo tipo, grandes y pequeñas, lo que aumenta el riesgo de colisiones accidentales y de afectación por las ondas de presión generadas por el tráfico marítimo. Además, el continuo mantenimiento de la canal mediante la ejecución de trabajos de dragado en la zona podría suponer una amenaza directa, al alterar la sedimentación natural que ha protegido la estructura del pecio hasta la actualidad.

Otros factores de deterioro son el impacto derivado del fondeo de embarcaciones y la actividad pesquera en la bahía. La

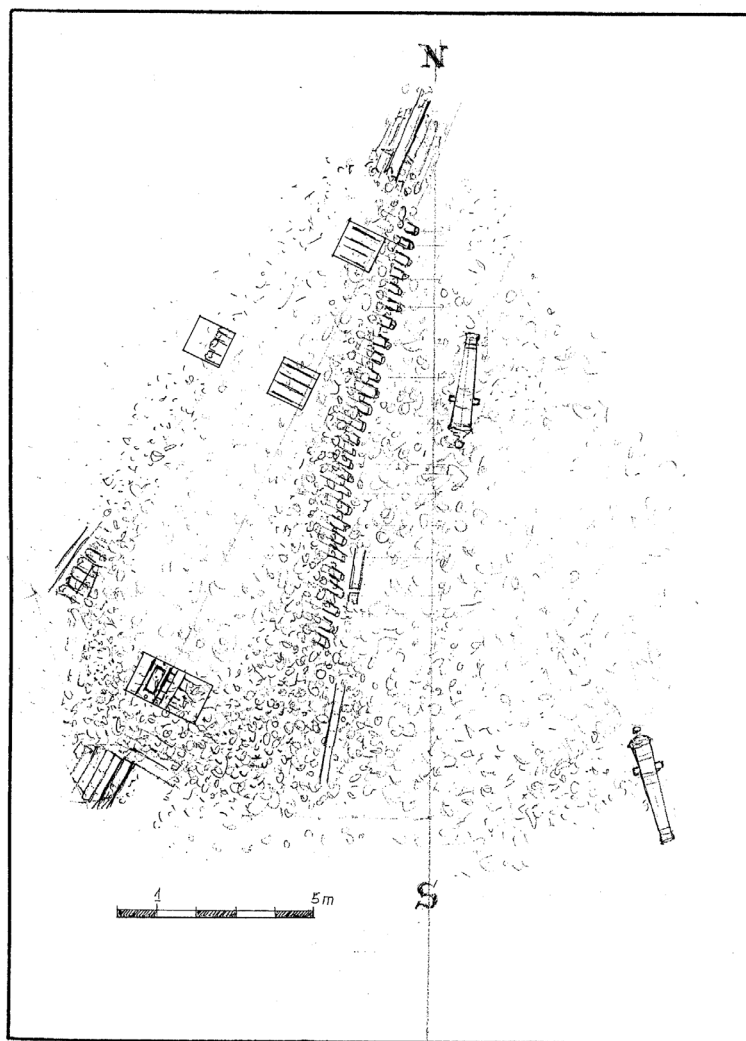


fig. 5. Croquis del pecio y sondeos realizados por José Luis Casado Soto (CARSUCAN 98)

presencia de redes y otros aparejos de pesca ha sido documentada en yacimientos similares y representa un peligro potencial para los restos arqueológicos expuestos. De igual modo, el uso

de anclas en las inmediaciones del pecio podría causar daños estructurales severos, desplazando fragmentos de la nave y afectando la integridad del sitio. Por último, la contaminación marina representa una amenaza adicional para el pecio. La presencia de hidrocarburos, residuos industriales y vertidos urbanos en la bahía podría alterar la composición química del agua y afectar negativamente a los procesos de conservación natural de los materiales arqueológicos.

CONCLUSIONES

Los trabajos realizados hasta la fecha han permitido delimitar con precisión la extensión del yacimiento, obtener una visión más precisa del estado de conservación del pecio, así como esclarecer aspectos fundamentales sobre su estructura y las condiciones en las que se encuentra actualmente. Se ha constatado que, en comparación con los trabajos de Casado Soto, existe una evidente progresión en sus procesos de sedimentación, lo que no ha permitido encontrar los cañones de hierro, ni otras zonas ya registradas en las campañas de los años 1997 y 1998, y esto hace pensar que parte de la estructura aún se encuentra debajo de la arena.

El progresivo incremento de la sedimentación podría dar lugar a la formación de un banco de arena similar al que propició su descubrimiento, representando un riesgo tanto para la seguridad de la navegación como para la propia conservación de los restos arqueológicos. La combinación de estos factores de riesgo hace necesario un enfoque integral que combine estrategias de conservación preventiva, como el monitoreo continuo o balizamiento del sitio arqueológico.

El galeón se perfilaba como una pieza clave en la estrategia defensiva española en el Atlántico, representando la evolución de la arquitectura naval española en una época en la que la supremacía en los mares era determinante en la geopolítica euro-

pea (Alcalá-Zamora, 2008, pp. 187-208). De este modo, lo más reseñable de este pecio es que puede representar un caso único de galeón español documentado en costas españolas en el que se permite estudiar su arquitectura naval y comparar las medidas teóricas establecidas en las Reales Ordenanzas con las características reales del navío. La conservación de una parte significativa de su estructura en buen estado y a poca profundidad también lo convierte en una oportunidad excepcional para la investigación arqueológica sobre la construcción naval en época moderna. Además, abre nuevas líneas de estudio sobre los materiales empleados, los sistemas de ensamblaje y el proceso de fabricación de estos navíos.

Aún quedan muchos interrogantes, pero el estudio realizado ha sentado las bases para futuras investigaciones y medidas de preservación. La continuidad de estos trabajos junto con la combinación de investigaciones arqueológicas, estrategias de conservación y programas de divulgación educativa serán fundamentales para preservar este importante vestigio histórico del patrimonio cultural subacuático de Cantabria y asegurar su legado para las futuras generaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- ACEDO GUEVARA, José Antonio. (1975). *La construcción naval en Vizcaya*. Bilbao Bizkaia Kutxa.
- ACHUTEGUI RODRÍGUEZ, Juan José. (2001). La navegación en la época de los Descubrimientos. *Monte Buciero*, 6, 9-24.
- ABILLEIRA CRESPO, Yago. (2006). Piezas de la Batalla de Rande en el Museo de Pontevedra. *El Museo de Pontevedra*, 60, 311-320.
- ALCALÁ-ZAMORA, José. (2008). Los cañones de España. En José Alcalá-Zamora (Ed.), *La España oceánica de los si-*

- glos modernos y el tesoro submarino español* (pp. 187-208). Academia de la Historia.
- ARTAZA MONTERO, Manuel María. (1996a). La Junta del Reino y la Escuadra de Galicia (1ª parte). *Revista de Historia Naval*, 14(54), 7-34.
- (1996b). La Junta del Reino y la Escuadra de Galicia (2ª parte). *Revista de Historia Naval*, 14(55), 21-46.
- BETHENCOURT NÚÑEZ, Manuel; FERNÁNDEZ-MONTBLANC, Tomás, e IZQUIERDO GONZÁLEZ, Alfredo. (2013). Arqueomonitor: contribución de las condiciones físicas, químicas y biológicas en el deterioro y salvaguarda del patrimonio cultural subacuático. Influencia sobre las velocidades de corrosión en la artillería de dos pecios asociados a la Batalla de Trafalgar (1805). En Xavier Nieto Prieto, Abraham Ramírez Pernía y Patricia Recio Sánchez (Eds.), *I Congreso de Arqueología Náutica y Subacuática Española, Cartagena 14, 15 y 16 de Marzo de 2013* (pp. 1064-1079). Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- BRÍGIDO GABIOLA, Baldomero. (1998). El asalto del Arzobispo de Burdeos a la villa de Santoña en 1639. *Monte Buciero*, 2, 167-182.
- CASADO SOTO, José Luis. (2004). La Almiranta de Santoña. Pecio del galeón oceánico español de guerra Nuestra Señora de la Concepción, 1639. En *La memoria sumergida* (pp. 153-163). Untzi Museoa.
- (1991). Arquitectura naval de Idade Moderna. En *Ciclo de conferencias de arqueoloxía subacuática. Vigo, 16-19 decembro 1991* (pp. 61-65). Conselleria de Pesca e Acuicultura.
- FERNÁNDEZ IBÁÑEZ, Carmelo, y PALACIO RAMOS, Rafael. (Eds.) (2003). *La conservación del material arqueológico subacuático* (Monte Buciero, vol. 9). Ayuntamiento de Santoña, Comisión de Educación y Cultura.

- HORMAECHEA ARENAZA, Cayetano; RIVERA VAQUERO, Isidro, y DERQUI CIVERA, Manuel. (2018). *Los barcos oceánicos del Atlántico ibérico en los siglos XVI y XVII*. s.n.
- PHILLIPS, Carla Rahn. (1996). *Seis Galeones para el Rey de España. La defensa imperial a principios del siglo XVII*. Alianza.
- TODOAVANTE. (s.f.). *Nuestra Señora de la Purificación o Almiranta de Galicia 1638*. https://www.todoavante.es/index.php?title=Nuestra_Senora_de_la_Purificacion_o_Almiranta_de_Galicia_193_1638
- ZAMBRANO VALDIVIA, Luis Carlos; BETHENCOURT NÚÑEZ, Manuel, y GIL MONTERO, María Luisa Almoraima. (2016). Recovery of super-fragile materials in underwater sites with silicone elastomers. En Rocío Castillo Belinchón, Abraham Ramírez Pernía y Luis Ángel Torres Sobrino (Eds.), *Un patrimonio para la humanidad. Actas del V Congreso Internacional de Arqueología Subacuática (IKUWA V). Cartagena, 15-18 de octubre de 2014* (pp. 302-311).

ANEXO II

Productividad

Participación en Congresos

23, 24 y 25 de abril 2025

La artillería de la fragata Santa María Magdalena (1773-1810): un análisis histórico y arqueológico
Ciarlo, Nicolás C.; López-Arenas, Antonio V.; Guimarey-Duarte, Rosario

LA ARTILLERÍA DE LA FRAGATA SANTA MARÍA MAGDALENA (1773-1810): UN ANÁLISIS HISTÓRICO Y ARQUEOLÓGICO

Nicolás C. Ciarlo¹, López-Arenas, António V.², Guimarey-Duarte, Rosario³

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Instituto de Arqueología, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires. 25 de Mayo 221, 3er piso (C1002ABE), Ciudad Autónoma de Buenos Aires (Argentina). nciarlo@conicet.gov.ar

²Proyecto Ría de Viveiro. Federación Española de Actividades Subacuáticas (FEDAS) - Lembranza GIHA (Grupo de Investigación Histórica y Arqueológica). Urb. Pedrapartida-Figueiras 31 D, C.P 15316 Coirós (A Coruña). patrimonionoroeste@gmail.com

³Proyecto Ría de Viveiro. Federación Española de Actividades Subacuáticas (FEDAS) - Lembranza GIHA (Grupo de Investigación Histórica y Arqueológica). Urb. Pedrapartida-Figueiras 31 D, C.P 15316 Coirós (A Coruña). guimarey21@gmail.com

RESUMEN

La fragata de guerra de 38 cañones *Santa María Magdalena* sirvió a la Armada española por casi cuatro décadas (1773-1810), durante las que participó de diversas acciones navales en Europa y América. Durante su última misión, como escolta de una escuadra hispano-británica que operó en la costa cantábrica durante la Guerra de Independencia Española (1808-1814), naufragó por un temporal en la ría de Viveiro. Este evento, ocurrido el 2 de noviembre frente a la playa de Covas, se cobró la vida de la mayor parte de la tripulación. Los restos de la fragata fueron localizados e intervenidos en varias oportunidades desde el siglo XIX, por parte de buceadores particulares y la Armada, que extrajeron numerosos elementos vinculados con la artillería y otros objetos asociados al casco, equipamiento, pertrechos y la tripulación del barco. Estas actividades se realizaron de forma asistemática, sin la participación de arqueólogos. Parte de los hallazgos se encuentra en el Museo Naval de Ferrol y el Museo de Construcción Naval en Ferrol (Exponav). Numerosas piezas de artillería procedentes del pecio también yacen distribuidas en Viveiro y otras localidades de España, en diferentes museos y espacios públicos. Tras estas actividades de salvamento, en 2014, un equipo bajo la coordinación de Miguel San Claudio realizó una primera evaluación arqueológica que determinó el estado de preservación del pecio y la necesidad de su estudio y protección. Más tarde, dentro del proyecto Ría de Viveiro, en 2017 los autores de esta ponencia comenzaron un plan sistemático de excavación e investigación de los restos sumergidos, junto al estudio del material de colecciones públicas y privadas. En esta presentación, en particular, exponemos los resultados alcanzados con relación a la artillería de hierro y bronce de la *Magdalena*, que incluye la propia dotación del buque y otras piezas embarcadas durante su última expedición.

PALABRAS CLAVE

Artillería naval; barco de guerra; siglo XVIII; arqueología subacuática / Naval ordnance; warship; 18th century, underwater archaeology

INTERVENCIÓN

Línea temática 6: Historia naval, artillería costera y embarcada, defensa portuaria, infantería de marina y operaciones anfibias

Fecha: Viernes, 25 de abril de 2025

Sesión: 11.45-13.30 h

Presidente de mesa: Ana Crespo Solana (CSIC)

III Congreso Internacional Guerra y sociedad en la monarquía hispánica

Política, estrategia, ejércitos, historia naval, organización
y cultura militar en el mundo moderno (1500-1800)

Libro de Abstracts

23, 24 y 25 de abril de 2025

Instituto de Historia del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

<https://warandsociety3.csic.es>

La recuperación de la isla de San Cristóbal (1634-1635), Félix Castelló (Museo Nacional del Prado)



Con el aval científico de:



MUSEO
NAVAL

MUSEO DE AMÉRICA

MUSEO NACIONAL
DEL PRADO

FUNDACIÓN CASA DE ALBA



Asociación Jeroni d'Argençola

III Congreso Internacional Guerra y sociedad en la monarquía hispánica

Política, estrategia, ejércitos, historia naval, organización
y cultura militar en el mundo moderno (1500-1800)

Libro de Abstracts



CSIC



Con el aval científico de:



CESEDEN



CEHIMI



MUSEO
NAVAL

MUSEO DE AMÉRICA

MUSEO NACIONAL
DEL PRADO

FUNDACIÓN CASA DE ALBA



Asociación Jeroni
d'Argençola

Créditos

© De los textos, sus autores

© De la edición Enrique García Hernán y Davide Maffi

DOI: <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/17194>

HANDLE: <http://hdl.handle.net/10261/384426>

Este Libro de abstracts está sujeto a una licencia Creative Commons CC BY 4.0, según la cual se debe dar crédito de manera adecuada a la publicación, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Diseño y maquetación: Cortijo y Asociados

Año de edición 2025

La Universidad del Magdalena hace constar que

Carlos del Cairo Hurtado, Nicolás Carlos Ciarlo, Victoria Báez Santos, Jesús Aldana Mendoza, Saúl

Vallejo Quintero, Maritza Moreno Calderón, Gina Hernández Zárate y Hermann León Rincón

del

ICANH-DIMAR

Asistieron y presentaron la ponencia “*Aproximación interdisciplinaria al contexto arqueológico del naufragio Salmedina II en Cartagena de Indias (Caribe colombiano)*” en el IX Simposio Internacional de Historia y Arqueología Marítimas: ciudades, nodos y conexiones marítimas, del 16 al 19 de septiembre 2025, en Santa Marta, Colombia.


Jorge Enrique Elías-Caro, Ph. D.

Dirección general

Vicerrector de Investigación, Universidad del Magdalena

proporción, predominando los “extruidos”. En cuanto a las “harinas”, la de almendras presentó un 90 % de adulteración con harina de maíz. Los “untables vegetales” fueron los productos de mejor calidad botánica. Los controles de calidad botánica son esenciales para garantizar la autenticidad y seguridad de los ingredientes vegetales presentes en los alimentos.

MORFOANATOMÍA FLORAL EN *GYMNOCALYCIUM* (CACTACEAE): IMPLICANCIAS FILOGENÉTICAS A PARTIR DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

Floral morphoanatomy in *Gymnocalycium*: phylogenetic insights from structural analysis.

Pérez, C. B.¹, Solís, S. M.² & González, V. V.³

¹Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV) (UNC-CONICET), Córdoba, Argentina.

²Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina.

³Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina.

cperez@imbiv.unc.edu.ar

Las flores son esenciales para estudios comparativos y filogenéticos en Angiospermas. La familia Cactaceae ha sufrido numerosas modificaciones en su estructura floral. *Gymnocalycium* es uno de los géneros mejor representado en Argentina, a pesar de ello su morfoanatomía floral permanece poco explorada. Este estudio compara cuatro especies filogenéticamente representativas: *G. saglionis*, *G. schickendantzii*, *G. schroederianum* y *G. spegazzinii*. Se indaga sobre la morfoanatomía floral, estructura e histoquímica de nectarios florales y presencia de orbículas en relación a la morfología polínica. Para ello, se realizaron cortes con micrótopo rotativo de nectarios florales y pruebas histoquímicas (Lugol, Sudán Black y Xilidina); los granos de polen fueron acetolizados y las orbículas se examinaron con microscopía electrónica de barrido. Los caracteres morfoanatómicos florales estudiados apoyan la filogenia molecular y se proponen como sinapomorfias del género. Se registraron diferencias anatómicas interespecíficas. En nectarios se observaron tricomas multicelulares ramificados, un rasgo inédito en la familia. Este es el primer reporte de orbículas para la subfamilia Cactoideae. La morfología polínica típica de la

tribu Trichocereae, refuerza la validez de los criterios taxonómicos empleados. El enfoque comparativo y anatómico de este estudio aporta una perspectiva novedosa y amplía el conocimiento sobre estructuras reproductivas de un género de cactus tan abundante en Argentina.

PRIMERA CARACTERIZACIÓN ARQUEOBOTÁNICA DE NAUFRAGIOS DEL SIGLO XIX EN PATAGONES, ARGENTINA.

First archaeobotanical characterization of 19th century shipwrecks in Patagones, Argentina.

Picca, P. I.¹, Ciarlo, N. C.² & Castelli, A.³

¹Laboratorio de Sistemática y Biología Reproductiva de Plantas Vasculares, Instituto de Micología y Botánica (INMIBO, UBA-CONICET), Departamento de Biodiversidad y Biología Experimental, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

²Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Cádiz, Cádiz, España - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

³Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

piccablo@gmail.com

Estudios enmarcados en el Proyecto “Investigación arqueológica y puesta en valor de las actividades marítimas en Norpatagonia, 1779-1879” permitieron identificar seis sitios de naufragios del siglo XIX entre la Punta Rasa y el Faro Segunda Barranca, provincia de Buenos Aires. Se estudiaron restos de cascos de barcos de madera, sin cultura material asociada, cuya identificación y adscripción geográfica y cronológica presentan desafíos. Se analizaron 14 muestras de componentes estructurales (cuadernas, tablazón del forro interno y externo, cabillas y maderos componentes de una roda). A partir de tacos cúbicos confeccionados con las maderas incógnitas, se realizaron cortes en los tres planos espaciales con el auxilio de un micrótopo de deslizamiento. Los espesores variaron de acuerdo al tipo de madera. Los cortes se colorearon con safranina diluida y se montaron en gelatina-glicerina. Los preparados se observaron al microscopio óptico empleando la técnica de campo claro. La identidad taxonómica de las muestras se llevó a cabo utilizando claves dicotómicas, bases de datos anatómicos online y consultando bibliografía especializada. Se determinó cada espécimen hasta la categoría taxonómica menos

inclusiva posible. Dentro del conjunto de muestras analizadas se identificaron tres especies boreales: *Robinia pseudoacacia* ("black locust"), *Quercus* sp. (subg. *Quercus*) y *Pinus* sp. (subg. *Pinus*).

ANATOMÍA ECOLÓGICA DE ESPECIES DE HELECHOS EN HUMEDALES. Ecological anatomy of wetland fern species.

Polentarrutti, P. B.¹, Meza Torres, E. I.² & Solís, S. M.^{1,3}

¹Instituto de Botánica del Nordeste (IBONE, UNNE - CONICET), Corrientes, Argentina.

²Fundación Miguel Lillo, Tucumán, Argentina.

³Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agrimensura (FaCENA - UNNE), Corrientes, Argentina.

ppolentarrutti@gmail.com

Los helechos habitan diversos ambientes, esto refleja su gran diversidad morfológica. Su anatomía ecológica aún requiere mayor exploración. El objetivo fue caracterizar la anatomía foliar en especies de helechos higrofilos en relación con sus ambientes. Se estudiaron ejemplares de *Lomariocycas schomburgkii* (*Ls*), *Telmatoblechnum serrulatum* (*Ts*) de pastizales en bordes de esteros, y *Neoblechnum brasiliense* (*Nb*) del interior de bosque con suelos saturados. El estudio se realizó mediante MO y MEB, a partir de material fijado en FAA. En vista superficial, exhiben láminas con células epidérmicas de paredes onduladas con estomas anomocíticos y polocíticos. En corte transversal, se observan ambas epidermis con cutícula gruesa. *Ls* presenta una hipodermis uniestratificada discontinua. Todas las especies manifiestan mesófilo homogéneo, con células braciiformes en *Ls*, algo redondeadas y laxas en *Nb* y redondeadas menos laxas en *Ts*. Las venas mayores con un haz anficribal, excepto *Ts* que posee dos, en ambos casos acompañados de periciclo y endodermis. El pecíolo con epidermis uniestratificada, esteroma, córtex y dictiostela con haces anficribales. Médula compacta en *Ls* y *Nb*, en tanto que *Ts* con aerénquima que se extiende hacia la zona cortical. La presencia de espacios intercelulares es representativa de los ambientes higrofilos. La cutícula gruesa y el mesófilo homogéneo, podrían vincularse a la exposición solar. Se prevé ampliar el estudio a otras especies para alcanzar interpretaciones más integrales.

¿QUÉ HAY BAJO EL SUELO? ANATOMÍA COMPARADA DE ÓRGANOS SUBTERRÁNEOS DE RESERVA EN FABACEAS HERBÁCEAS DE LAS SIERRAS DE CÓRDOBA. What Is Hidden Underground? Comparative Anatomy of Underground Storage Organs in Herbaceous Fabaceae from the Sierras Chicas of Córdoba.

Quiroga, M. B.¹, Machado, A. S.^{1,2} & Gurvich, D. E.^{1,3}

¹Cátedra de Morfología Vegetal, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

²Instituto de Investigaciones Biológicas y Tecnológicas (CONICET-UNC).

³Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (CONICET-UNC) Córdoba, Argentina. quiroga.maria.belen@mi.unc.edu.ar

En los pastizales serranos se desarrollan comunidades vegetales con especies de distintas formas de vida entre las que se destacan aquellas con órganos de reserva subterráneos (ORS), relacionados al clima y a disturbios, de los cuales existe poca información a nivel anatómico y morfológico. Se recolectaron 9 especies de fabáceas herbáceas de Sierras Chicas (Córdoba) y se realizaron cortes histológicos de sus ORS, para caracterizarlos anatómicamente. *Stylosanthes montevidensis*, *Nanogalactia heterophylla*, *Desmanthus acuminatum* y *Desmodium uncinatum*, presentan raíz reservante con gran proporción de parénquima con almidón y fibras, asociados al sistema vascular (SV). En las 2 primeras especies, los vasos son abundantes y de gran tamaño, mientras que en *D. acuminatum* y *D. uncinatum* se observa lo contrario. *Adesmia incana*, *Cologania broussonetii*, *Dalea elegans*, *Galactia glaucophylla* y *Rhynchosia edulis* presentan tallo reservante. Las 2 primeras muestran variantes cambiales con un SV formando cuñas. Las 3 especies restantes, el SV presentan abundantes fibras; en el floema predomina el parénquima y en el xilema se observan pocos vasos. Los ORS analizados, presentan abundante parénquima y fibras asociadas al SV. El predominio de parénquima con abundante almidón, amplía el área de reserva pudiendo favorecer absorción y retención de agua, mientras que las fibras asociadas, protegerían el meristema para la formación de futuras yemas de rebrote, características de estas especies.

VOLUMEN 60

SUPLEMENTO

SEPTIEMBRE 2025

Boletín de la Sociedad Argentina de **BOTÁNICA**



Mar del Plata, Septiembre de 2025

SOCIEDAD ARGENTINA DE BOTÁNICA

ISSN 0373-580X Córdoba, Argentina



VLIZ SPECIAL PUBLICATION #95

Book of Abstracts

IKUWA8: Telling the Exciting Tales of Our Past

Conservation during the archaeological works of the Herakles Project. Methodology and best practices

Goñalons Lapiedra Marina ¹, Cerezo Andreo Felipe ¹

¹ Universidad de Cádiz

E-mail: marina.gonalons@uca.es

The methodology of underwater archaeological excavations has evolved since the beginning of the discipline, not only from a technological point of view, but also because the objectives and questions that researchers seek to answer have changed. As a result, in recent decades there has been a growing concern for the conservation of underwater heritage, from the moment it is found to its long-term preservation without the need for intervention. The aim of the Heracles project, carried out by the University of Cádiz between 2020 and 2023, was the location of archaeological sites in the area of the Bay of Algeciras. This poster explains the three main lines of action for conservation during the archaeological work carried out: preparation of protocols for the whole team, diagnosis of the state of conservation, and methods of protection.

The first block consisted of determining how to identify a vulnerable find and how each member of the team should act, prioritising documentation. Next, the factors and risks of alteration had to be assessed, and the level of conservation status determined. Finally, non-intervention, protection in situ or, exceptionally and in specific cases, preventive extraction was carried out. For the latter, very specific methods, designed for each type of material, were used to minimise alterations during the process. This set of guidelines developed during the Heracles project is part of a methodology that is present in many research projects in underwater archaeology, but in most cases, they are unwritten rules or are applied arbitrarily, without formalising the protocol that is essential for working with interdisciplinary teams to be as effective as possible.

The criteria and methods used are based on the standards set by the 2001 UNESCO Convention and the Green Paper: National Plan for the Protection of Cultural Heritage (2007), always giving priority to in situ conservation.

Keywords: Conservation; Best Practices; In Situ Conservation; Documentation; State Of Conservation; Underwater Archaeological Sites

Poster presentation in session O1: Preservation of UCH (Jordy Moies)

Metal España 2025

IV Congreso de Conservación y Restauración de Patrimonio Metálico

Universidad de Cádiz 23, 24 y 25 de octubre de 2025



LIBRO DE RESÚMENES



ÍNDICE

Comunicaciones orales	3
Sesión I.....	4
Ciencia y Tecnología de Investigación del Patrimonio Metálico	4
Sesión II.....	20
Patrimonio Metálico Arqueológico.....	20
Sesión III.....	42
Patrimonio Arqueológico Subacuático	42
Sesión IV.....	56
Patrimonio Metálico Histórico, Artístico y Religioso.....	56
Sesión V	68
Patrimonio Metálico Científico, Tecnológico, Industrial y Urbano.....	68
Pósteres	81
Sesión I.....	82
Ciencia y Tecnología de Investigación del Patrimonio Metálico	82
Sesión II.....	91
Patrimonio Metálico Arqueológico.....	91
Sesión III.....	98
Patrimonio Arqueológico Subacuático	98
Sesión IV.....	103
Patrimonio Metálico Histórico, Artístico y Religioso.....	103
Sesión V	111
Patrimonio Metálico Científico, Tecnológico, Industrial y Urbano.....	111



Sesión I: Ciencia y Tecnología de Investigación del Patrimonio Metálico

Sesión I

Ciencia y Tecnología de Investigación del Patrimonio Metálico

El uso de equipos portátiles de Fluorescencia de Rayos X para la investigación de cepos de plomo de época antigua. Criterios metodológicos

Elisa Fernández Tudela¹, Carlos Moreno², Luis Carlos Zambrano Valdivia³, Manuel Bethencourt Núñez⁴

¹ Centro de Arqueología Subacuática. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (IAPH), Cádiz.

elisa.fernandez.tudela@juntadeandalucia.es

² Departamento de Química Analítica. Universidad de Cádiz

³ Departamento de Restauración. Museo de Cádiz.

⁴ Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico, Universidad de Cádiz.

Los equipos portátiles de Fluorescencia de Rayos X constituyen una herramienta eficaz para el análisis elemental de los metales y otros elementos químicos en objetos que conforman el patrimonio histórico, como se evidencia en su amplio uso. Entre sus numerosas ventajas destacan la facilidad de uso, la rapidez en la obtención de resultados y la posibilidad de realizar análisis in situ, característica que la sitúa entre las técnicas consideradas mínimamente invasivas o incluso no destructivas. Sin embargo, son precisamente estas ventajas las que pueden provocar en ocasiones un exceso de confianza que puede llegar a traducirse en pérdida de información o incluso en resultados erróneos.

Son numerosas las variables instrumentales que afectan a la medida, y que por lo tanto deben tenerse en cuenta para obtener una señal óptima que se traduzca en resultados fiables. Entre estas variables, condicionadas por las características del propio equipo, se encuentran el tipo de calibración empleada, la energía del haz de radiación y su posible colimación, el tiempo de exposición utilizado, etc.

En este estudio se presentan los criterios metodológicos seleccionados para el análisis de una colección de 120 muestras procedentes de 60 cepos de plomo de época antigua, pertenecientes al Museo de Cádiz. Aunque este metal es mayoritario en los cepos, y presenta pocas variaciones, estos contienen otros elementos minoritarios, que pueden resultar claves para el estudio de estos objetos. De los resultados obtenidos se desprende que la correcta selección de las variables instrumentales permite la medición de algunos



Sesión I: Ciencia y Tecnología de Investigación del Patrimonio Metálico

de estos metales presentes en concentraciones muy bajas, los cuales de otra manera permanecen ocultos al observador. Todo ello ha permitido realizar la caracterización química de los cepos estudiados y su comparación, arrojando información sobre posibles rasgos comunes. Además, esta metodología constituye una herramienta eficaz para futuros estudios similares.



Sesión I: Ciencia y Tecnología de Investigación del Patrimonio Metálico

El uso de la Inteligencia Artificial para la conservación y restauración del patrimonio arqueológico metálico. ¿Nuevo reto o herramienta?

Marina Goñalons Lapiedra – Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH), Universidad de Cádiz. marina.gonalons@uca.es

A lo largo de la última década, el ritmo del avance científico y tecnológico ha sido vertiginoso, generando transformaciones profundas en la forma en que accedemos al conocimiento y nos comunicamos. Entre estos avances, destaca la irrupción de las Inteligencias Artificiales, herramientas basadas en modelos computacionales que simulan procesos del razonamiento humano. Estas tecnologías permiten al usuario interactuar con grandes volúmenes de información de manera ágil, intuitiva y personalizada, abriendo nuevas posibilidades en ámbitos como la educación, la investigación y la divulgación científica.

Sin embargo, en algunos campos han surgido las polémicas de la ética de su uso. Desde preocupación por la desaparición de puestos de trabajo, mermar la capacidad resolutoria de los usuarios o la incapacidad del programa de discernir cuestiones éticas propias de los humanos.

La profesión del conservador/restaurador si de algo sabe es de adaptar métodos, productos y tecnologías diseñadas para otras ciencias a la salvaguarda del patrimonio cultural. Sin embargo, cada una de estas adaptaciones conlleva un riguroso estudio para conseguir seguir la ética de buenas prácticas: mínima intervención, reversibilidad, respeto histórico y sostenibilidad.

En este trabajo se presentan a la Inteligencia Artificial tres problemáticas de conservación distintas con tres perfiles de usuario. En primer lugar, un laboratorio de restauración con alto equipamiento solicita el diseño de un plan de intervención para una colección de monedas romanas de bronce, mientras que otro caso de estudio es la restauración de una pieza de artillería de procedencia subacuática por parte de un arqueólogo sin ningún equipamiento. Por último, una persona sin formación solicitará a la IA cómo restaurar un arma de época antigua hallada de manera casual por un familiar.

Los resultados serán considerados intentando entender en que se basan las respuestas y analizando el código ético de dichas propuestas de intervención.



Sesión II. Patrimonio Metálico Arqueológico

Estudio comparativo de los factores de alteración en monedas halladas en la Bética en función del tipo de sedimento

Marina Goñalons Lapiedra¹, Alicia Arévalo González²

¹ Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH), Universidad de Cádiz - marina.gonalons@uca.es

² Departamento de Historia, Geografía y Filosofía, Universidad de Cádiz.

El Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH) del INMAR-UCA está dotado de un equipamiento de primer nivel gracias a recientes concesiones de Ayudas para la adquisición de equipamiento científico-técnico del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Gracias a este nuevo equipamiento se están desarrollando trabajos de conservación y restauración en diversos tipos de materiales procedentes de intervenciones arqueológicas tanto terrestres como subacuáticas. Entre los materiales tratados se encuentran monedas procedentes de diversos proyectos de investigación acometidos en diferentes yacimientos béticos.

Por un lado, se ha intervenido en el numerario recogido durante las excavaciones de 2022 en la fábrica de salazones situada en la calle San Nicolás (Algeciras), un entorno con gran influencia de los factores marinos y urbanos. El otro caso de estudio han sido las monedas procedentes de las intervenciones arqueológicas practicadas en el yacimiento minero de Riotinto (Huelva).

A pesar de pertenecer ambos conjuntos a época romana, aunque de distintos momentos cronológicos, y de haber sido fabricadas en bronce, normalmente una aleación ternaria de cobre, estaño y plomo, las piezas presentan estados de conservación diversos. Las alteraciones observadas incluyen depósitos de suciedad, sales y productos de corrosión del metal, tanto estables (como la cuprita) como degradantes (como los cloruros). La presencia de estos compuestos varía entre ambos conjuntos.

El análisis del contexto arqueológico y de los sedimentos asociados ha permitido establecer relaciones directas entre los factores ambientales de cada yacimiento y los procesos de alteración detectados. Las diferencias entre entornos terrestres, con sedimentos con mayor riqueza de minerales de hierro, sales o contaminaciones, o en entornos subacuáticos, resultan determinantes en el desarrollo de alteraciones en el material numismático, condicionando así la elección de los protocolos de conservación.



Sesión II. Patrimonio Metálico Arqueológico

Un bichero tardorromano para la pesca de atunes de las cetariae de Traducta (Algeciras)

Darío Bernal-Casasola¹, José Luis Portillo-Sotelo¹, Rafael Jiménez-Camino², José Ángel Expósito³, Elisa Fernández Tudela⁴, José Manuel Vargas¹

¹ Departamento de Historia, Geografía y Filosofía, Universidad de Cádiz, Universidad de Cádiz.

² Ayuntamiento de Algeciras. dario.bernal@uca.es

³ Universidad Complutense de Madrid.

⁴ Centro de Arqueología Subacuática. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (IAPH), Cádiz.

Presentamos un “gancho” de hierro de época tardorromana (momentos avanzados del s. VI d.C.) localizado en los niveles de abandono de las factorías de salazones de la calle San Nicolás de Algeciras. Dado el contexto de hallazgo, reflexionaremos sobre su posible identificación con un bichero relacionado con las actividades haliéuticas desarrolladas en el barrio pesquero-conservero de la antigua *Iulia Traducta*, quizás destinado a ensartar y facilitar la manipulación de las capturas como los atunes, ya sea para subirlos a bordo en la fase de pesca o como instrumental auxiliar para el procesado y ronqueo de los pescados en los talleres salazoneros.

Debido a la excepcionalidad de la pieza, que de relacionarse con una funcionalidad haliéutica sería un *unicum* para época antigua en el Mediterráneo, procedimos a su restauración y consolidación en el Laboratorio de Arqueología y Prehistoria de la Universidad de Cádiz (LABAP). Previamente, realizamos una radiografía de Rayos X que, además de apoyar los trabajos de restauración, reveló detalles morfológicos de interés para su estudio como la presencia de un orificio cuadrangular, posiblemente para insertar un cabo y asegurar el agarre, así como un extremo apuntado, evidencia quizás de un enmangue ya perdido.



Sesión III. Patrimonio Arqueológico Subacuático

Sesión III

Patrimonio Arqueológico Subacuático

Análisis y Estabilización de un Calibre de Artillero del sitio La Ballenera I (s. XVI-XVII), Ensenada de Getares, Algeciras

Iris Bartolomé Ortúñez¹, Nicolás C. Ciarlo², Marina Goñalons¹, Felipe Cerezo², Sergio López³
Manuel Bethencourt⁴

¹ Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH). Universidad de Cádiz.
iris.bartolome.o@gmail.com

² Departamento de Historia, Geografía y Filosofía, Universidad de Cádiz

³ Investigador independiente.

⁴ Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica,
Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico, Universidad de Cádiz.

El estudio de materiales metálicos hallados en contextos arqueológicos subacuáticos plantea retos específicos para su análisis y conservación. Este trabajo presenta los resultados del análisis histórico y arqueométrico, junto a una propuesta para la preservación, de una vara de artillero del siglo XVI-XVII procedente del pecio La Ballenera I, en la ensenada de Getares, Algeciras, España.

La pieza destaca por tratarse de un ejemplar del que existen escasos paralelos arqueológicos. Su estudio ha aportado nueva información sobre este tipo de piezas, que contribuye al conocimiento de

los instrumentos auxiliares de artillería y su papel en la profesionalización del oficio artillero en la Edad Moderna. Además, este hallazgo aporta información de interés sobre los procesos de alteración en objetos metálicos no ferrosos de procedencia subacuática.

En una primera fase, la pieza fue analizada mediante SEM-EDX, lo que reveló una composición de la matriz de Cu-Zn (latón) y la presencia de cuprita (Cu_2O) como producto de corrosión; y otros contaminantes superficiales. En una segunda fase, se ha llevado a cabo un estudio mediante XRF para profundizar en la caracterización.

Aunque la pieza ya fue intervenida, esta actuación no resultó efectiva. Actualmente, se observan focos de productos de corrosión activos, requiriendo de una actuación de



Sesión III. Patrimonio Arqueológico Subacuático

Arqueometría y datación relativa de metales navales del Siglo XIX: casos de estudio de Argentina, Chile y México

Nicolás C. Ciarlo^{1,2*}, Laura Noel García², Ana Castelli³, Diego Carabias⁴, Andrés Zuccolotto⁵, Laura Carrillo⁶, Nicolás Lira⁷, Raúl E. Bolmaro⁸

¹ Departamento Historia, Geografía y Filosofía, Universidad de Cádiz, España. nicolas.ciarlo@uca.es

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

³ Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

⁴ Centro de Investigación en Arqueología Marítima del Pacífico Sur Oriental (ARQMAR), Chile.

⁵ Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

⁶ Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), México.

⁷ Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Chile, Chile.

⁸ Instituto de Física Rosario, Argentina.

Una de las principales líneas de desarrollo de la arqueometría es la datación de artefactos. En el caso de los objetos metálicos de época moderna y contemporánea, sus propiedades fisicoquímicas aunadas a la información histórica sobre las aleaciones utilizadas, en ocasiones han contribuido a la identificación temporal de los restos. Lo anterior aplica, por ejemplo, a los elementos de base cobre utilizados en las embarcaciones de madera del siglo XIX. Por extensión, esta información ha sido utilizada como *terminus post quem* de los eventos de naufragio, contribuyendo al proceso de identificación de los sitios.

En este sentido, los procesos de manufactura y aleaciones utilizadas en la pernería, clavazón y revestimiento metálico de los cascos, a través de diferentes técnicas de caracterización avanzadas (e.g., EBSD), pueden considerarse como indicadores temporales relativos. Las numerosas patentes de la época han servido para contrastar los datos analíticos y, en función de las similitudes, precisar las interpretaciones.

No obstante, este proceso de identificación usualmente está condicionado por múltiples factores que dificultan e incluso impiden realizar una correcta evaluación de los resultados. A los fines analíticos, además de los procesos de deterioro en contextos sumergidos, que pueden afectar desde la superficie hasta el interior de los objetos (e.g. corrosión selectiva de las aleaciones), es necesario considerar la variabilidad asociada a la tecnología en cuestión, como la heterogeneidad de los materiales, las experimentaciones, las copias, las diferencias de criterio entre los artesanos y otros fenómenos dependientes de la técnica del periodo. Al evaluar el todo por la parte, además, se suma la propia historia de vida de una embarcación y las modificaciones que esta pudo haber sufrido.

En esta presentación, exponemos varios casos de estudio de pecios del siglo XIX estudiados en Argentina, Chile y México, que reflejan esta complejidad.



Sesión III. Patrimonio Arqueológico Subacuático

Cobres para la *marine de l'Empire*: análisis SEM-EDX e ICP-MS de los elementos de sujeción y revestimiento de forro de los navíos Lion (1804-1809) y Robuste (1806-1809)

Sébastien Berthaut-Clarac¹, Nicolás C. Ciarlo^{2,3}, Manuel Bethencourt⁴

¹ Centre de Recherche sur les Sociétés et Environnements en Méditerranée, Université de Perpignan – Groupe de recherche en archéologie Navale (GRAN, NGO), Francia.

² Departamento Historia, Geografía y Filosofía, Universidad de Cádiz, nicolas.ciarlo@uca.es

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

⁴ Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico, Universidad de Cádiz

La Batalla de Trafalgar (1805) tuvo serias implicaciones sobre el devenir de las fuerzas navales de las tres principales marítimas del periodo. La supremacía alcanzada por Gran Bretaña perduró hasta el final de la época de la vela. La derrota y merma de la flota franco-española no implicó la desaparición de sendas armadas. Ambas naciones, sin embargo, siguieron derroteros diferentes: mientras España abandonó cualquier intento por recomponer y ampliar sus efectivos, Francia continuó construyendo nuevos barcos de guerra, entre estos, navíos de línea.

En 1808, España, ocupada por las fuerzas de Napoleón, se sublevó. En este contexto, en marzo de 1809, una escuadra de 21 buques de aprovisionamiento escoltada, entre otros, por el *Lion* (74 cañones, Rochefort, 1804) y el *Robuste* (80 cañones, Tolón, 1806), partió de Tolón rumbo a Rosas. Sin embargo, estos dos buques se hundieron frente a Les Aresquiers (Francia) durante un enfrentamiento con fuerzas británicas. Construidos según los planos de Jacques Noël Sane, atestiguan la transformación del poder naval durante las guerras napoleónicas, en los años que siguieron a la Batalla de Trafalgar.

Esta presentación muestra los avances de investigación arqueométrica de los elementos de sujeción y revestimiento de forro recuperados de los pecios (sitios Aresquiers 1.5 y Aresquiers 1.1, respectivamente). La caracterización fisicoquímica, llevada a cabo mediante SEM-EDX e ICP-MS, permitió obtener información sobre los procesos de manufactura y materiales empleados. La heterogeneidad que presentan las muestras analizadas estaría vinculada con el empleo de diferentes materias primas, o bien al interior de un taller, o bien en diferentes centros de producción.

Esta variabilidad fue registrada tanto a nivel inter-sitio como intra-sitio. A la luz de la documentación histórica, se discuten las implicancias de estos resultados para el conocimiento de la tecnología (e.g. experimentaciones) e historia de vida (e.g. reparaciones) de estos barcos de guerra.



Sesión III. Patrimonio Arqueológico Subacuático

Impacto del cambio climático en los procesos de deterioro de artefactos metálicos de procedencia subacuática: los pecios de la bahía de Algeciras, España.

Ilaria Vitiello¹, Carmen Ferrero², Alfredo Izquierdo³, Nicolás C. Ciarlo⁴, Felipe Cerezo⁴, Elisa Fernández Tudela⁵, Tomás Fernández-Montblanc², Manuel Bethencourt⁶

¹ Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH). Universidad de Cádiz.
ilaria.vitielloviti@alum.uca.es

² Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz.

³ Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cádiz.

⁴ Departamento de Historia, Geografía y Filosofía, Universidad de Cádiz

⁵ Centro de Arqueología Subacuática. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (IAPH), Cádiz

⁶ Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico, Universidad de Cádiz

Actualmente, el fenómeno del cambio climático (CC) es objeto de debate y estudio a nivel internacional, fruto de la enorme preocupación que generan las repercusiones que tiene a nivel ambiental, social y económico. Este fenómeno representa, además, una amenaza creciente para la conservación del patrimonio cultural subacuático (PCS), al modificar los procesos físico-químicos que afectan la estabilidad de los materiales arqueológicos sumergidos. Entre los más vulnerables al CC se encuentran los artefactos metálicos, cuyas reacciones de corrosión pueden acelerarse notablemente debido a factores como el aumento de la temperatura del agua o la acidificación oceánica, entre otros. Sin embargo, la particular interacción entre estas variables naturales, bajo determinadas condiciones, podría en algunos casos favorecer la preservación de estos materiales. Ello dependerá, a su vez, de la ubicación, cronología y materialidad específica de cada sitio arqueológico.

Este trabajo presenta una revisión crítica sobre el impacto del CC en los procesos de deterioro de objetos metálicos ubicados en entornos subacuáticos, con el objetivo de poder proteger y gestionar el PCS frente a esta creciente amenaza, desarrollando estrategias efectivas de conservación y seguimiento de los yacimientos considerados en riesgo.

A partir de datos recopilados por un equipo interdisciplinario adscrito a la Universidad de Cádiz en varios sitios sumergidos de la Bahía de Algeciras, se analizan las condiciones ambientales actuales y su evolución previsible, así como los efectos que estas variaciones pueden tener sobre aleaciones ferrosas y no ferrosas empleadas históricamente.



Pósteres: Sesión I: Ciencia y Tecnología de Investigación del Patrimonio Metálico

Utilización de analizadores portátiles de Fluorescencia de Rayos X en estudios de patrimonio histórico subacuático. Criterios de selección de las condiciones de medida y aplicación a objetos de cobre y peltre procedentes de Ceuta y de la bahía de Cádiz

Ilaria Vitiello¹, Carlos Moreno², Ernesto J. Toboso Suárez³, Manuel Bethencourt¹

¹ Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH). Universidad de Cádiz, ilaria.vitielloviti@alum.uca.es

² Departamento de Química Analítica. Universidad de Cádiz

³ Gerión Arqueología, S.L.

⁴ Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico, Universidad de Cádiz

Las técnicas no destructivas (TND) son fundamentales en el estudio de materiales del patrimonio histórico, permitiendo obtener información valiosa sin alterar ni dañar unos objetos que son únicos, frágiles o tienen un valor histórico, cultural y artístico incalculable. Entre las TND, la fluorescencia de rayos X (FRX) destaca por su utilidad en la caracterización elemental de materiales. Esta técnica permite identificar y cuantificar elementos químicos presentes, en cualquier material, incluyendo los metales comunes del patrimonio. La FRX es especialmente valiosa porque es rápida, no invasiva y puede aplicarse a piezas de elevado tamaño o in situ, mediante equipos portátiles, en los propios yacimientos, museos, etc. De esta forma se evitan los riesgos asociados al transporte de piezas delicadas, permitiendo el análisis en contexto, algo importante para comprender mejor el entorno y la historia del objeto. Es por ello que en los últimos años se ha consolidado como una herramienta de gran importancia en arqueometría y conservación del patrimonio, combinando la eficacia analítica con la integridad de los bienes culturales.

Sin embargo, la técnica de FRX también presenta algunos inconvenientes y limitaciones, que deben ser tenidos en cuenta a la hora de su aplicación, pues en caso contrario los resultados obtenidos, y con ello las posibles conclusiones, pueden ser incorrectas. Debido a ello resulta esencial conocer bien la técnica y sobre todo aplicarla correctamente, especialmente cuando se utilizan equipos portátiles. Ello se debe a que son los más sencillos desde un punto de vista tecnológico, pueden proporcionar resultados semi-cuantitativos, especialmente para bajas concentraciones, y suelen incluir sistemas de calibración previamente instalados que, en caso de no utilizarse correctamente, pueden proporcionar errores significativos en los resultados.

En este trabajo presentamos algunos de los estudios llevados a cabo sobre algunas piezas metálicas pertenecientes a sendas colecciones de objetos recuperados, por un lado, durante un dragado en aguas del entorno costero de Ceuta (un cazo, una fuente, un asa y



Pósteres: Sesión I: Ciencia y Tecnología de Investigación del Patrimonio Metálico

una llave, todos ellos de cobre), y por otro lado dos objetos fabricados con peltre (un plato y una jarra), procedentes de un dragado llevado a cabo en la bahía de Cádiz. Para ello se han utilizado dos equipos portátiles de FRX dotados de sistemas de calibración diferentes. Los resultados se han comparado, determinando las condiciones adecuadas para el análisis de la composición química de los objetos en estudio, la cual puede ser utilizada para su caracterización.



Pósteres: Sesión III: Patrimonio Arqueológico Subacuático

Sesión III

Patrimonio Arqueológico Subacuático

Análisis e intervención de conservación de los objetos metálicos del pecio tardorromano de Ses Fontanelles (Palma, Mallorca)

Elisa Fernández Tudela¹, Marina Goñalons Lapiedra², Darío Bernal Casasola³, Miguel Ángel Cau Ontiveros⁴, Enrique García Ríaza⁵, Jaume Cardell Perelló⁶, Manuel Bethencourt⁷

¹ Centro de Arqueología Subacuática. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (IAPH), Cádiz
elisa.fernandez.tudela@juntadeandalucia.es

² Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH), Universidad de Cádiz

³ Departamento Historia, Geografía y Filosofía. Universidad de Cádiz

⁴ ICREA y ERAAUB-IAUB, UB.

⁵ Universidad de las Islas Baleares

⁶ Consell de Mallorca

⁷ Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico, Universidad de Cádiz.

El pecio tardorromano de Ses Fontanelles (Palma, Mallorca) constituye un ejemplo único en cuanto al estado de conservación de materiales arqueológicos de procedencia subacuática. Así lo evidencian los múltiples objetos excepcionales documentados, como la colección de ánforas con *tituli picti* o los numerosos elementos conservados en cuero y otros materiales orgánicos (un zapato, una sandalia, un taladro de carpintero o tapones de corcho, entre otros). Sin embargo, los elementos metálicos encontrados han sido muy escasos, limitándose a unos pocos objetos de aleación de cobre (clavos, anzuelos y una moneda), hierro (concreciones con forma de clavos) y otros materiales sin identificar.

De estos materiales, apenas una decena corresponden a la primera campaña de excavación de 2022 del proyecto ARQUEOMALLORNAUTA, y únicamente la moneda fue recuperada durante la última campaña desarrollada en 2024.

La aplicación de diferentes técnicas de análisis no destructivas a algunos de estos objetos, realizada en el Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico y en el Laboratorio de Arqueología y Prehistoria de la Universidad de Cádiz, ha permitido identificar sus características composicionales y morfológicas. Esta aproximación integrada ha permitido establecer una metodología específica de intervención de conservación para cada uno de estos elementos, desarrollada tanto en la Universidad de Cádiz como en el Centro de Arqueología Subacuática de Andalucía (IAPH). Para ello, se han



Pósteres: Sesión III: Patrimonio Arqueológico Subacuático

Estudio arqueométrico de artillería de procedencia subacuática: el caso de dos bombardetas recuperadas del Río Sado, Portugal.

Jesús Adrián Marcos San Fulgencio¹, Nicolás C. Ciarlo², Manuel Bethencourt³

¹ Tiago Miguel Fraga, Lda. jamsanfulgencio@hotmail.com

² Departamento de Historia, Geografía y Filosofía. Universidad de Cádiz.

³ Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico, Universidad de Cádiz

En el marco de una intervención de arqueología preventiva desarrollada durante labores de dragado en el estuario del río Sado (Portugal), se recuperaron fortuitamente dos piezas de artillería fabricadas en hierro forjado, cuya morfología remite a bombardetas de retrocarga empleadas entre finales del siglo XV y comienzos del XVI. Estas piezas constituyen ejemplos singulares de artillería naval ligera en un periodo de transición hacia la consolidación de sistemas más estandarizados en la artillería en fundición de hierro. Su análisis permite adentrarse en las prácticas técnico-artesanales propias del campo armamentístico peninsular y ofrece un valioso testimonio sobre los procesos de innovación material vinculados a la expansión marítima de los reinos ibéricos y al fortalecimiento del poder naval en el contexto atlántico.

La investigación se enfrentó a la complejidad inherente al análisis de materiales degradados en el medio acuático, sin un contexto arqueológico claro y con un elevado grado de heterogeneidad a nivel del material constitutivo. A los fines del análisis, se tomaron diversas muestras de ambas piezas, en sectores representativos, que permitieron desarrollar una caracterización de sus componentes estructurales.

El estudio se llevó a cabo a través de varias técnicas complementarias: fotogrametría, análisis metalográfico, ensayos de microdureza, microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX) y tomografía axial computarizada. Ello permitió obtener información general sobre la morfología externa y estado de preservación de las piezas, así como sobre la estructura interna y composición de los diversos elementos que las componen. Los primeros resultados sugieren una manufactura basada en ensamblajes modulares, con variaciones intencionadas en la composición y el tratamiento del metal, que responden a los requerimientos funcionales de cada sector de las bombardetas.

Sobre la base de estas evidencias, se discuten aspectos vinculados con la lógica constructiva de la artillería naval en hierro forjado y las prácticas desarrolladas en talleres peninsulares en un momento clave de transición tecnológica.



Pósteres: Sesión V: Patrimonio Metálico Científico, Tecnológico, Industrial y Urbano

Ventanas hacia el pasado en espacios públicos. Retos en la preservación de piezas históricas de gran formato en hierro en clima tropical.

Margarita Alcántara Mejorada¹, César Téllez Castro¹, Carlos Gálvez Valencia¹, Jareth Anuar Guadarrama Moreno¹, Diana E. Arano Recio¹

¹ Sección de Conservación y Restauración, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Mérida, Yucatán. margarita.alme@gmail.com

Las ciudades mutan y se transforman a la par de las necesidades y cambios de las sociedades que las habitan. A lo largo del tiempo, estas transformaciones llegan a ocultar rasgos y usos que en algún momento fueron habituales, para después, ante más transformaciones volver a salir a la luz y recordar las viejas usanzas. Las ciudades de Mérida y Progreso en el estado mexicano de Yucatán han experimentado en los últimos años, cambios impulsados por su desarrollo urbano e industrial y el crecimiento demográfico.

Durante labores de renovación de espacios públicos, se encontraron un cambio de vía de ferrocarril y un ancla respectivamente, ambos de hierro testigos de estas transformaciones en el paisaje. El hallazgo de estas piezas se realizó de manera fortuita sin la participación de profesionales de la arqueología. Estas proceden de contextos de enterramiento donde, por la cercanía con la línea litoral, prevalecen los compuestos salinos. Este trabajo habla sobre los retos de la conservación de patrimonio metálico en hierro descubierto en el contexto de obra pública donde prevalecen los limitados tiempos de entrega e inauguración de obras. En este sentido, la conservación y la puesta en valor del patrimonio metálico en hierro han representado un reto por subsanar por parte de especialistas, que han desarrollado una metodología para su conservación, puesta en valor y mantenimiento ante condiciones a cielo abierto en clima cálido tropical húmedo, condiciones ambientales poco favorables para la preservación de este tipo de bienes y ante la premura de la inauguración de proyectos gubernamentales.

Dña. Isabel Rondán Sevilla y D. Enrique Aragón Núñez Investigadores Postdoctorales, Servicio de Geodetección, Análisis y Georreferenciación del Patrimonio Histórico (IVAGRO) de la Universidad de Cádiz, acreditan que **Bethencourt Núñez, M.; Callejo Gómez, J.** han participado como ponentes invitados en el **Congreso Internacional II GEOFISIC-ARQ**, celebrado los días **28 y 29 de octubre de 2025**, en formato híbrido con una duración total de 14 horas con la ponencia: **Empleo de vehículos autónomos de superficie en la prospección del patrimonio cultural subacuático**. Y para que conste y surta los efectos oportunos se firma y se sella en **Cádiz a 5 de noviembre de 2025**.



Isabel Rondán Sevilla
Coordinadora del Congreso



Enrique Aragón Núñez
Coordinador del Congreso

ANEXO III

Algunas imágenes

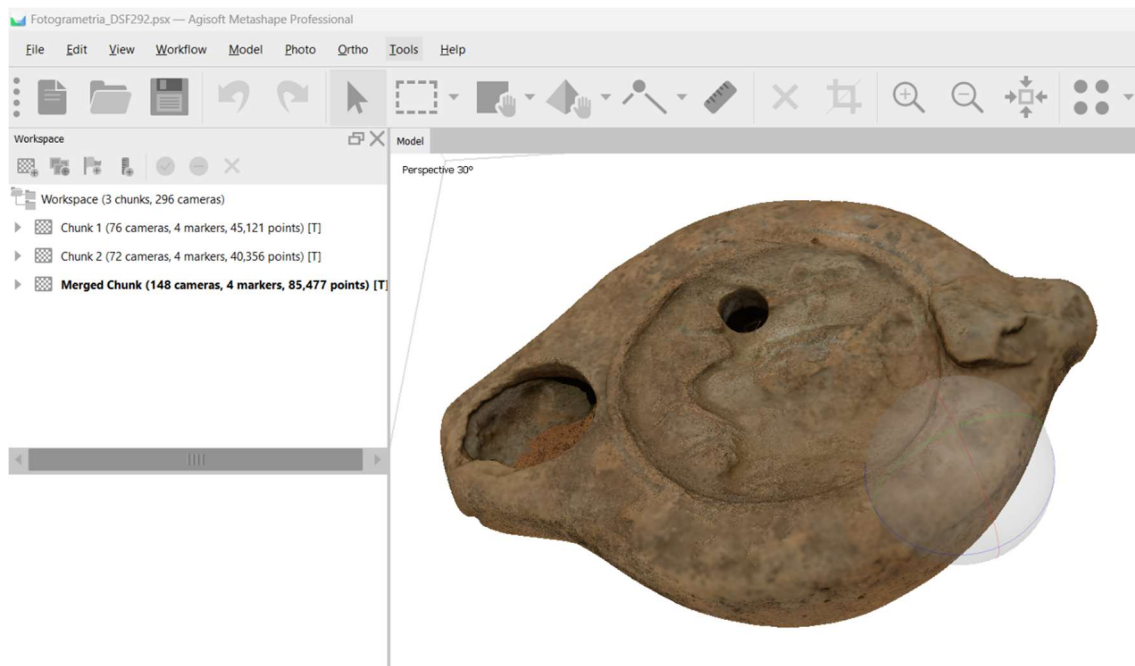


Figura 1. Captura de pantalla del procesado fotogramétrico de una de las piezas (DSF292) del proyecto ARQUEOMALLORNAUTA. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Ejemplo de embalaje para piezas de cerámica (Proyecto ARQUEOMALLORNAUTA). Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Antes (Izq.) y después (dcha.) del tratamiento propuesto para los individuos de la colección de Isla del Fraile (Murcia) que presentaban intervenciones anteriores con ácido tánico. Pieza IF2024-S3-009. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Algunos de los participantes en el Congreso MetalEspaña 2025.



Figura 5. Miembros del Comité Organizador del Congreso MetalEspaña 2025.



Figura 6. Prácticas en el CAS-IAPH del curso “La conservación de hierro y aleaciones de cobre arqueológico de procedencia subacuática”