

MetalEspaña 2020/2021

III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico

Joaquín Barrio Martín
Milagros Buendía Ortuño (eds.)

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



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CULTURA
Y DEPORTE

ARQVA

Museo Nacional
de Arqueología Subacuática



MUSEO
CASA DE LA MONEDA

UAM Universidad Autónoma
de Madrid

Anejos nº 6 | 2022

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

Cuadernos
de Prehistoria
y Arqueología
de la Universidad Autónoma de Madrid

CUADERNOS
de Prehistoria y Arqueología
de la Universidad Autónoma de Madrid
ANEJOS

6

2022

MetalEspaña 2020/2021

III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico

Joaquín Barrio Martín
Milagros Buendía Ortuño
(eds.)



Universidad Autónoma
de Madrid

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

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

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

ISBN: 978-84-8344-853-3

Depósito Legal: M-24136-1995

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

Agradecimientos

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

Acknowledgments

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

Índice

Presentación	15
SESIÓN I. CIENCIA Y TECNOLOGÍAS DE INVESTIGACIÓN DEL PATRIMONIO METÁLICO	
Electrochemical techniques for dating metallic heritage	21
Técnicas electroquímicas para la datación del patrimonio metálico	
ANTONIO DOMÉNECH-CARBÓ	
Caracterización, diagnóstico y conservación de los lingotes de cobre del Pecio Arapal (Sancti Petri, Cádiz)	29
Characterization, diagnosis and conservation of copper ingots from the Arapal Wreck (Sancti Petri, Cadiz)	
ROCÍO MORÓN, MARÍA LLÜISA MATAS, LUIS CARLOS ZAMBRANO, FELIPE CEREZO Y MANUEL BETHENCOURT	
Estrategias innovadoras para la conservación preventiva de los objetos metálicos en colecciones de museos	39
Innovative strategies for the preventive conservation of metallic objects in museum collections	
MARÍA TERESA MOLINA, BLANCA RAMÍREZ, IVÁN DÍAZ Y EMILIO CANO	
Estudio de la efectividad del ácido tánico sobre piezas de hierro arqueológico	47
Study of the effectiveness of tannic acid on archaeological iron pieces	
TANIA PÉREZ TORDERA, ANTONIO DOMÉNECH-CARBÓ Y MONTSERRAT LASTRAS PÉREZ	
Estudio radiográfico de los metales arqueológicos de Casas del Turuñuelo (Guareña, Badajoz)	55
Radiographic study of the archaeological metals of Casas del Turuñuelo (Guareña, Badajoz)	
INMACULADA DONATE, MIRIAM BUESO, ESTHER RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, SEBASTIÁN CELESTINO Y JOAQUÍN BARRIO	
Extrapolación de técnicas no habituales en la reproducción de elementos metálicos asociados al Patrimonio Documental	65
Extrapolation of unusual techniques in the reproduction of metallic elements associated with Documentary Heritage	
ÍÑIGO GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, JUAN BERMEJO-SOLER, ESTÍBALIZ LAMA OCHOA Y M ^a DOLORES RODRÍGUEZ LASO	

Sesión I

Ciencia y tecnologías de investigación del patrimonio metálico



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

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

ROCÍO MORÓN

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

FELIPE CEREZO

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

MARÍA LLUISA MATAS

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

MANUEL BETHENCOURT

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

LUIS CARLOS ZAMBRANO

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

Resumen

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

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

Abstract

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

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

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

1. Introducción

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

2. Material y método

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

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

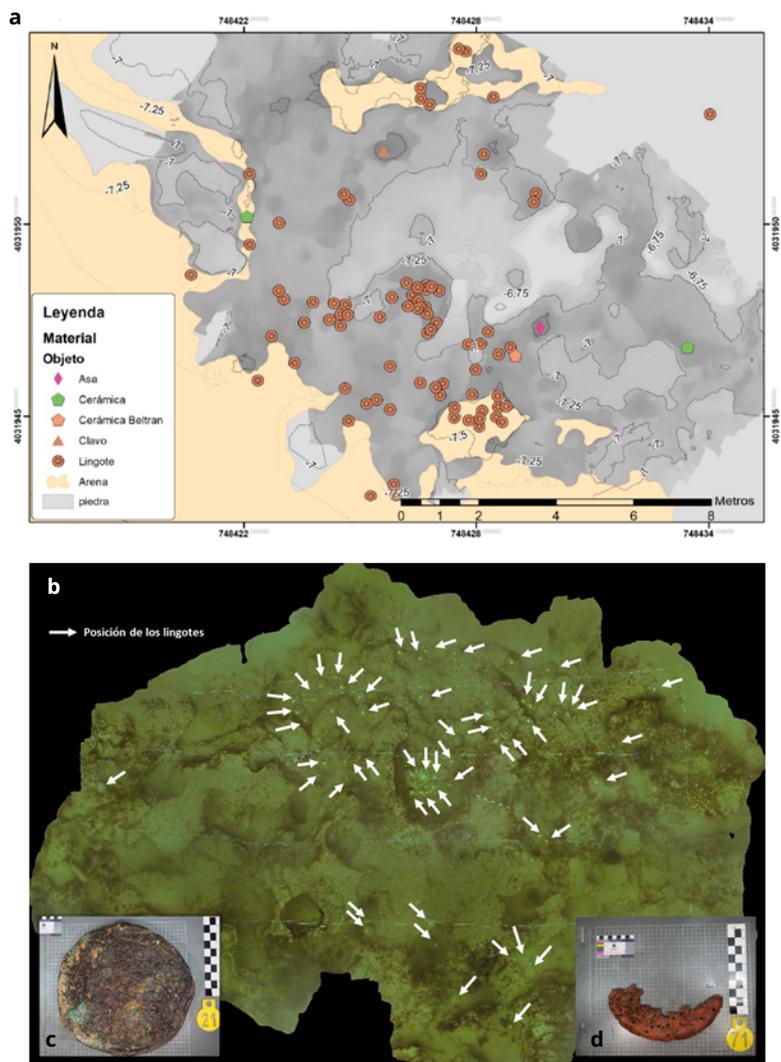


Figura 1. a. Localización de los materiales en el yacimiento en el que se representan los lingotes, los fragmentos de cerámica, un clavo y un asa moderna. b. Fotogrametría del yacimiento donde se aprecian los lingotes (señalados en blanco) dispersos entre la roca arenisca y en el sedimento arenoso. c-d.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

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

3. Resultados y discusión

3.1. Descripción de los lingotes

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

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

3.2. Inscripciones y sellos

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

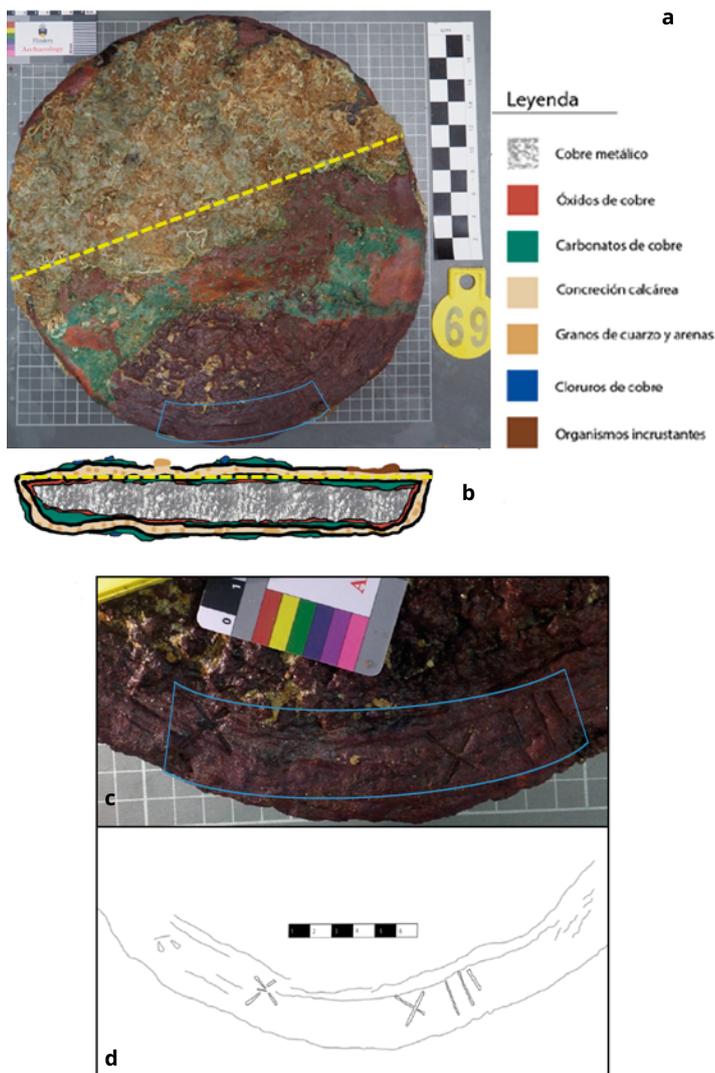


Figura 2. a. Lingote AR17-069, Tipo I.A, con diámetro máximo 43 mm y mínimo de 28,5 mm, altura máxima 6 cm y peso sin limpiar de 21,2 kg. b. Representación de la estratigráfica del lingote AR17-069. c-d. Detalle de la inscripción numeral X y XIII localizadas en el borde perimetral del lingote AR17-069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

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

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

3.3. Alteraciones

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

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

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

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

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

3.4. Análisis composicional y metalográfico

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

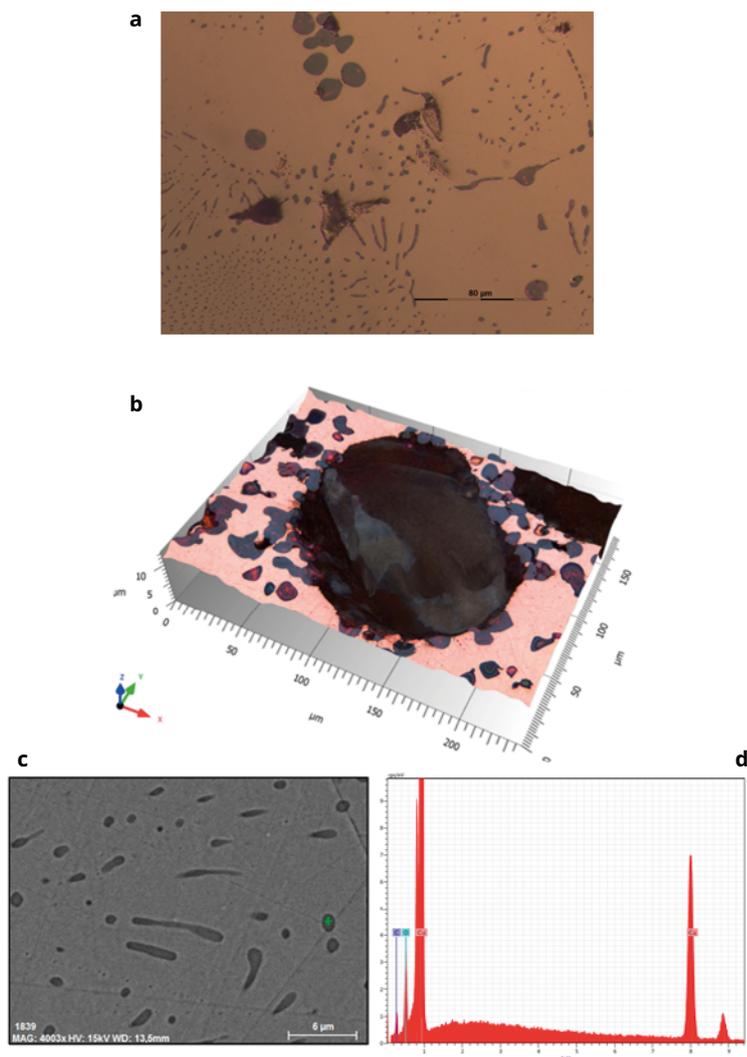


Figura 3. a. Imágenes de la muestra del lingote AR17-064 a 500 X, sin ataque metalográfico. Se aprecian inclusiones de formas globulares y aciculares, así como los límites o bordes de grano. b. Simulación 3D realizada con microscopio metalográfico sobre una inclusión con forma globular presente en la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

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

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

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

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

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

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

3.5. Conservación

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

4. Conclusiones

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

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

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

Agradecimientos

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

Bibliografía

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

Consejo evaluador Anejo 6 2022 / Reviewers Board Anejo 6 2022

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

Comités del Congreso

Coordinación

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

Secretaría del Congreso

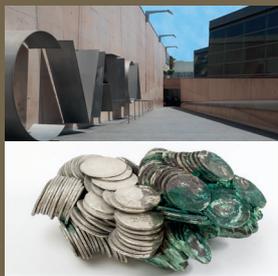
María Cruz Medina Sánchez	Universidad Autónoma de Madrid
---------------------------	--------------------------------

Organización

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

Comité científico

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



MetalEspaña 2020/2021

III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico

Joaquín Barrio Martín
Milagros Buendía Ortuño (eds.)

El volumen 6 de la Serie Anejos a CuPAUAM recoge la publicación de las Actas del III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, *MetalEspaña 2020/2021*. Esta monografía es el resultado de las actividades científicas llevadas a cabo en los tres días de sesiones. En sus páginas se integran, de una manera muy equilibrada entre investigación e intervención, trabajos con unos contenidos multidisciplinares en su carácter analítico, deontológico y técnico. Con ello se demuestra que la combinación de Ciencia, Tecnología Aplicada y Conservación-Restauración es la mejor manera de abordar la recuperación y cuidado de los objetos que componen el Patrimonio Metálico.

Las Actas que se editan en esta monografía han sido posibles gracias a la implicación y al trabajo conjunto de las tres instituciones organizadoras de *MetalEspaña 2020/2021*: Universidad Autónoma de Madrid (SECYR), la Subdirección General de los Museos Estatales (Museo Nacional de Arqueología Subacuática ARQVA) y la Fábrica Nacional de Moneda y Timbre (Museo Casa de la Moneda).