

MetalEspaña 2020/2021

III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico

Joaquín Barrio Martín
Milagros Buendía Ortuño (eds.)

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



ARQVA Museo Nacional
de Arqueología Subacuática



UAM Universidad Autónoma
de Madrid

Anejos nº 6 | 2022

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

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

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

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	

Aportación de la técnica FIB-FESEM-EDX al estudio del patrimonio en metal	71
Contribution of FIB-FESEM-EDX technique to the study of Metal Heritage	
CARLA ÁLVAREZ ROMERO, CAROLINA MAI CEROVAZ, MARÍA TERESA DOMÉNECH-CARBÓ, ANTONIO DOMÉNECH-CARBÓ, MILAGROS BUENDÍA ORTUÑO Y TRINIDAD PASÍES OVIEDO	
Nueva metodología para la eliminación de la corrosión en patrimonio metálico arqueológico: buffers, quelantes, geles y emulsiones	81
New methodology for the elimination of corrosion in archaeological metal heritage: buffers, chelators, gels and emulsions	
SILVIA MARÍN ORTEGA	
Medida directa de potenciales de circuito abierto como técnica no invasiva de evaluación del grado de corrosión de objetos arqueológicos	87
Direct measurement of open circuit potentials as a non-invasive technique for evaluating the degree of corrosion of archaeological objects	
MARÍA AMPARO PEIRÓ RONDA Y ANTONIO DOMÉNECH-CARBÓ	
Restauración virtual y recreación de uno de los jarros de bronce de la estancia del banquete (S-1) del yacimiento de Casas del Turuñuelo (Guareña, Badajoz), los medios digitales como continuidad de la restauración física	97
Virtual restoration and recreation of one of the bronze jugs from the banquet room (S-1) from the Casas del Turuñuelo site (Guareña, Badajoz), digital media as continuity of the physical restoration	
BÁRBARA MARTÍN GÓMEZ, ESTHER RODRÍGUEZ GONZÁLEZ Y SEBASTIÁN CELESTINO	
Estudio arqueológico y restauración de espuelas bajomedievales de Asturias	107
Archaeological study and restoration of late medieval spurs in Asturias	
SILVIA PÉREZ-DIEZ, BEATRIZ GARCÍA-ALONSO, LUIS J. FERNÁNDEZ-MENÉNDEZ, LARA LOBO, NEREA BORDEL, MAITE MAGUREGUI, NOELIA FERNÁNDEZ-CALDERÓN Y ALEJANDRO GARCÍA ÁLVAREZ-BUSTO	
Sesión II. MONEDAS Y PATRIMONIO NUMISMÁTICO: ESTUDIOS, PROYECTOS, RESTAURACIONES Y MUSEOS	
El Museo Casa de la Moneda. La colección de moneda islámica	117
The Museo Casa de la Moneda. The Islamic Coin Collection	
ALBERTO J. CANTO GARCÍA	
Composición y características de la acuñación de dos cecas hispanorromanas: análisis aplicados a las monedas de <i>Caesar Augusta</i> (Zaragoza) y <i>Emerita Augusta</i> (Mérida)	129
Composition and characteristics of the coinage of two Hispano-Roman mints: analysis applied to the coins of <i>Caesar Augusta</i> (Zaragoza) and <i>Emerita Augusta</i> (Merida)	
CRUCES BLÁZQUEZ CERRATO, MARTA GÓMEZ BARREIRO, JOSÉ MANUEL COMPAÑA PRIETO, JUAN GÓMEZ BARREIRO, CARMELO FERNÁNDEZ IBÁÑEZ, RUFO MARTÍN MATEO E INÉS PUENTE ORENCH	

<p>Patrimonio Industrial en el Museo de la Fábrica Nacional de Moneda y Timbre de Madrid. Su conservación 139</p> <p>Industrial Heritage in the Museum of the Fábrica Nacional de Moneda y Timbre of Madrid. Its conservation</p> <p>SARA MARTÍN DE ANDRÉS Y BEATRIZ RUBIO VELASCO</p>	139
<p>La moneda en las <i>cetariae</i> de <i>Gadir-Gades</i> 149</p> <p>The coin in the <i>cetariae</i> of <i>Gadir-Gades</i></p> <p>ELENA MORENO PULIDO, ALICIA ARÉVALO GONZÁLEZ Y JOSÉ ÁNGEL EXPÓSITO ÁLVAREZ</p>	149
<p>Los criterios de intervención y el análisis científico en la restauración de un conjunto de monedas de plata emirales del yacimiento arqueológico La Ermita del Sacedal, en El Rebollar de El Boalo (Madrid) 159</p> <p>Intervention criteria and scientific analysis in conservation of a set of Emiral silver coins from the archaeological site La Ermita del Sacedal, el Rebollar de El Boalo (Madrid)</p> <p>ANA ISABEL PARDO NARANJO, MARÍA CRUZ MEDINA SÁNCHEZ Y MANUEL BLANCO DOMÍNGUEZ</p>	159
<p>El tesoro de monedas de plata de las taifas del siglo XI hallado en Jaén en 1914: proceso de restauración 167</p> <p>The treasure of silver coins from the taifa of the 11th century found in Jaen in 1914: restoration process</p> <p>ALBERTO J. CANTO GARCÍA, WIOLETA JABŁOŃSKA Y ANA ISABEL PARDO NARANJO</p>	167
<p>Tratamiento de conservación-estabilización aplicado al conjunto numismático recuperado de la Fragata <i>Nuestra Señora de las Mercedes</i> 177</p> <p>Conservation and stabilization treatment applied to numismatic set recovered from the frigate <i>Nuestra Señora de las Mercedes</i></p> <p>SOLEDAD DÍAZ MARTÍNEZ</p>	177
<p>Moneda y circulación monetaria en el ámbito minero del reborde meridional de la meseta sur. Un proyecto de investigación en marcha 185</p> <p>Currency and monetary circulation in the mining area of the southern edge of the southern plateau. An ongoing research project</p> <p>MAR ZARZALEJOS PRIETO Y ALICIA ARÉVALO GONZÁLEZ</p> <p>Con la colaboración de: JOAQUÍN BARRIO MARTÍN Y ANA ISABEL PARDO NARANJO</p>	185
<p>Intervención de urgencia de conjunto de monedas y vajilla de bronce de Pompeya. Una restauración de campaña junto al Vesubio 195</p> <p>Urgent intervention of a set of coins and bronze tableware from Pompeii. A campaign restoration next to Vesuvius</p> <p>BETLEM MARTÍNEZ PLA</p>	195
<p>Restauración y conservación de un conjunto de monedas (La Bienvenida) 205</p> <p>Restoration and conservation of a set of coins (La Bienvenida)</p> <p>FRANCISCO DEL PESO ROSADO</p>	205

SESIÓN III. PATRIMONIO METÁLICO ARQUEOLÓGICO

La experiencia de conservar metales: una labor de aprendizaje continuo 213 The experience of preserving metals: a work of continuous learning MARÍA ANTONIA MORENO CIFUENTES	213
Conservación. Propuesta metodológica para un caso práctico en el Pórtico Oriental de Plaza de Armas en <i>Madīnat al-Zahrā</i> (Córdoba) 223 Conservation. Methodological proposal for a practical case in the Portico Oriental of the Plaza de Armas in <i>Madīnat al-Zahrā</i> (Córdoba) INMACULADA C. MUÑOZ MATUTE Y ALEJANDRA DEL PINO CAMPOS	223
Arqueología y Restauración: un caso práctico en el Pórtico Oriental de la Plaza de Armas de <i>Madīnat al-Zahrā</i> (Córdoba) 231 Archaeology and Restoration: A practical example of the Pórtico Oriental of the Plaza de Armas in <i>Madīnat al-Zahrā</i> (Córdoba) MARÍA MUÑOZ MORA, WIOLETA JABŁOŃSKA Y ALEJANDRO UGOLINI SÁNCHEZ-BARROSO	231
Ciudad de México: un entorno excepcional para la corrosión de metales arqueológicos. Estudio de caso 239 Mexico City: an exceptional environment for archaeological metal corrosion. Case study ÁNGEL ERNESTO GARCÍA ABAJO, TERESITA LÓPEZ ORTEGA Y JOSÉ ANTONIO LÓPEZ PALACIOS	239
Conservación y estudio arqueológico de piezas ibéricas y vacceo-romanas de bronce y hierro procedentes de <i>Dessobriga</i> (Palencia) 249 Conservation and archaeological study of Iberian and Vacceo-Roman bronze and iron pieces from <i>Dessobriga</i> (Palencia) ÁGUEDA SÁENZ-MARTÍNEZ, FRANCISCO DEL PESO-ROSADO, ESPERANZA MARTÍN-HERNÁNDEZ Y DAVID EXPÓSITO	249
Decoración incisa bajo siglos de corrosión metálica 257 Incised decoration under centuries of metallic corrosion LUCÍA GUTIÉRREZ GONZÁLEZ	257
El conjunto de estatuillas de bronce de la Tumba n.º 14, Oxirrinco (El-Bahnasa), Egipto 269 The set of bronze statuettes from Tomb no. 14, Oxirrinco (El-Bahnasa), Egypt BERNAT BURGAYA MARTÍNEZ	269
Estado de conservación y metodología de intervención de una selección de bronce del yacimiento Casas del Turuñuelo 279 State of conservation and intervention methodology of a selection of bronzes from the archaeological site Casas del Turuñuelo MARÍA CRUZ MEDINA SÁNCHEZ, MARÍA MUÑOZ MORA Y JOAQUÍN BARRIO MARTÍN	279

Un ataque microbiológico en objetos de hierro de época ibérica: proyecto interdisciplinar de investigación, intervención y conservación preventiva	289
A microbiological attack on iron objects from the Iberian period: interdisciplinary research, intervention and preventive conservation project	
RAMÓN CANAL ROCA, TRINIDAD PASÍES OVIEDO, JAIME VIVES-FERRÁNDIZ SÁNCHEZ, M ^a TERESA DOMÉNECH-CARBÓ, ROSA M ^a MONTES ESTELLÉS, JOSÉ ANTONIO MADRID GARCÍA Y ANTONIO DOMÉNECH-CARBÓ	

Propuesta para la conservación de una amplia colección de objetos arqueológicos de hierro	299
Proposal for the conservation of a wide collection of iron archaeological objects	
LAURA GARCÍA BOULLOSA	

Sistema expositivo en la colección de metales del Museo Foro Romano. Molinete (Cartagena)	309
Exhibition system in the metal collection of the Roman Forum Museum. Molinete (Cartagena)	
IZASKUN MARTÍNEZ PERIS	

Trabajos de conservación-restauración de cuatro tuberías de plomo de la ciudad romana de <i>Baetulo</i> (Badalona). Un caso de estudio interdisciplinar	319
Conservation-restoration work on four lead pipes in the Roman city of Baetulo (Badalona). An interdisciplinary case study	
ANNA BERTRAL ARIAS, ESTHER GURRI COSTA Y SANTIAGO RIERA MORA	

Métodos de limpieza sobre metales arqueológicos procedentes de medios marinos: clavos de hierro originarios del Pecio de Urbieta (Gernika, Vizcaya)	329
Cleaning methods on archaeological metals from marine environments: iron nails from the Urbieta Wreck (Gernika, Vizcaya)	
SARA MASTRAL-MOLINOS, AINARA ZORNOZA-ÍNDART, LAURA GARCÍA Y GIORGIO STUDER	

SESIÓN IV. PATRIMONIO METÁLICO HISTÓRICO, ARTÍSTICO Y RELIGIOSO

Acciones de Conservación de Patrimonio Militar de Artillería: de la intervención mínima a la intervención funcional	341
Actions for the Conservation of Artillery Military Heritage: from minimal intervention to functional intervention	
ANAHÍ MEYER RIERA Y JAIME FERREIRA REGALADO	

Construcción de decisiones para la producción y restauración de «El caballito»	351
Decision making for the production and restoration of “El caballito”	
JANNEN CONTRERAS VARGAS	

Estudio de la colección de objetos metálicos de la Villa Rica de la Veracruz (Veracruz)	361
Study of the collection of metallic objects of the Villa Rica de la Veracruz (Veracruz)	

ÁNGEL ERNESTO GARCÍA ABAJO, JANNEN CONTRERAS VARGAS,
DANIELA LIRA PACHECO Y GABRIELA PEÑUELAS GUERRERO

Patologías y restauración del grupo escultórico de la fuente de las Tres Gracias de Málaga	371
Pathologies and restoration of a sculpture group in the fountain Tres Gracias at Malaga	

DANIEL MORALES-MARTÍN, FERNANDO AGUA, MANUEL GARCÍA-HERAS,
RAFAEL RUIZ DE LA LINDE Y M^a ÁNGELES VILLEGAS

Intervención sobre una empuñadura de una espada ropera procedente del sitio histórico de Panamá Viejo (Panamá): estado de conservación, análisis y restauración	379
---	-----

Intervention in the hilt of a rapier sword at the historic site of Panamá Viejo (Panama): state of conservation, analysis and restoration

BÁRBARA MARTÍN GÓMEZ, CRISTINA CABELLO BRIONES, MANUEL BLANCO DOMÍNGUEZ,
M^a CRUZ MEDINA SÁNCHEZ, INMACULADA DONATE CARRETERO, JOAQUÍN BARRIO MARTÍN
Y MARCELINA GODOY VALENCIA

Os pratos em estanho do Rio Arade, estratégias de conservação	387
Tin dishes from Rio Arade, conservation strategies	

ANDREIA ROMÃO

SESIÓN V. PATRIMONIO METÁLICO CIENTÍFICO, TECNOLÓGICO, INDUSTRIAL Y URBANO

Documentación, conservación y restauración de una fuente escultórica de fundición: La diosa Fortuna de Daimiel (Ciudad Real)	395
Documentation, conservation and restoration of a foundry sculptural fountain: The goddess Fortuna de Daimiel (Ciudad Real)	

M^a ISABEL ANGULO BUJANDA, MANUEL M. BLANCO DOMÍNGUEZ Y MIGUEL TORRES MAS

Diagnóstico del estado de conservación de un conjunto de cepos de plomo de procedencia subacuática: uso de geles rígidos de agar-agar para su intervención	407
Diagnosis of the conservation status of a set of lead traps from underwater origin: use of rigid agar-agar gels for their intervention	

ELISA FERNÁNDEZ TUDELA, LUIS CARLOS ZAMBRANO VALDIVIA Y MANUEL BETHENCOURT

Estudio, caracterización y diagnóstico de una fuente de peltre de procedencia subacuática depositada en el Museo de Cádiz	417
Study, characterization and diagnosis of a pewter dish of underwater provenance deposited in the Cadiz Museum	

MANUEL JESÚS GRUESO JIMÉNEZ Y LUIS CARLOS ZAMBRANO VALDIVIA

<p>La conservación de las culebrinas de bronce recuperadas de la fragata <i>Nuestra Señora de las Mercedes</i></p> <p>The conservation of the bronze culverins recovered from the <i>Nuestra Señora de las Mercedes</i> frigate</p> <p>JUAN LUIS SIERRA MÉNDEZ</p>	427
<p>La Estación Central de Santiago de Chile. Arquitectura metálica y vanguardia decimonónica</p> <p>The Central Station of Santiago de Chile. Metallic architecture and nineteenth-century avant-garde</p> <p>MARÍA PAZ VALENZUELA BLOSSIN</p>	437
<p>Las jardineras tipo Monier en las Galerías Punta Begoña. Degradaciones y proceso de conservación</p> <p>The Monier-type planters in the Punta Begoña Galleries. Degradation and conservation process</p> <p>JUAN BERMEJO-SOLER, ÍÑIGO GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, ESTÍBALIZ LAMA OCHOA, NAGORE PRIETO-TABOADA Y M^a DOLORES RODRÍGUEZ LASO</p>	445
<p>Los inicios de la industria del hierro en Madrid en el siglo XIX: cerramientos de edificios reseñables</p> <p>The beginnings of the iron industry in Madrid in the 19th century: remarkable building enclosures</p> <p>SUSANA LÓPEZ GINESTAL Y SOLEDAD DÍAZ MARTÍNEZ</p>	453
<p>Restauración del Patrimonio Metálico Urbano: la escultura de la Flama Rotaria de la ciudad de Valencia</p> <p>Restoration of the Urban Metallic Heritage: the sculpture of the Rotary Flame of the city of Valencia</p> <p>PABLO GRIÑENA</p>	461
<p>Westfalia Manteigueira com Centrifugadora: desafios e soluções de conservação</p> <p>Westfalia Butter with Centrifuge: challenges and conservation solutions</p> <p>ANDREIA ROMÃO</p>	471

Ciudad de México: un entorno excepcional para la corrosión de metales arqueológicos. Estudio de caso

Mexico City: an exceptional environment for archaeological metal corrosion. Case study

ÁNGEL ERNESTO GARCÍA ABAJO

Coordinación Nacional de Conservación del patrimonio Cultural (CNCPC-INAH)
angel_garciaabajo@inah.gob.mx
<https://orcid.org/0000-0001-6471-0800>

TERESITA LÓPEZ ORTEGA

Coordinación Nacional de Conservación del patrimonio Cultural (CNCPC-INAH)
teresita_lopez@inah.gob.mx
<https://orcid.org/>

JOSÉ ANTONIO LÓPEZ PALACIOS

Coordinación Nacional de Conservación del patrimonio Cultural (CNCPC-INAH)
jlopez.cncpc@inah.gob.mx
<https://orcid.org/>

Resumen

La actual Ciudad de México fue construida sobre la antigua Tenochtitlan, que ocupaba una zona lacustre. Esto ha provocado que durante siglos la ciudad sufriera inundaciones, debido a que el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie y el subsuelo estaba frecuentemente anegado de agua.

En el último siglo, el aumento de la población ha provocado el hundimiento del suelo en varios metros, debido al descenso del manto acuífero, afectando a las edificaciones del casco histórico.

La naturaleza lacustre del suelo de la ciudad no solo perjudica al patrimonio arquitectónico. Las condiciones especiales de este suelo hacen que en él se den tipos de corrosión poco frecuentes, que afectan a los objetos arqueológicos metálicos.

En el 2018 se realizó una excavación de salvamento arqueológico en el número 23 del paseo de la Reforma, a solo 400 metros de la zona arqueológica de Tlatelolco. En este solar de 550 m² se localizaron 33 enterramientos y diversos objetos de cerámica y lítica. Solo se encontraron tres objetos metálicos de época colonial. Estos objetos presentaban tipos de corrosión no habituales, como el «pseudodorado», producido por la presencia de bacterias anaerobias, o la formación de piromorfita (PbCl)Pb₄(PO)₃, que se forma en condiciones muy específicas de enterramiento.

En el presente trabajo se estudian los entornos arqueológicos y las causas que producen estos tipos de corrosión.

Palabras clave: pseudodorado, piromorfita, anaerobio

Abstract

Mexico City was built on the old Tenochtitlan, which occupied a lake area. This has caused the city to suffer floods for centuries, because the water table is very close to the surface and the subsoil tended to be frequently flooded with water. In the last century, the increase in population has caused the ground to sink by several meters, due to the decrease in the aquifer, affecting the buildings in the historic center. The lacustrine nature of the soil of the city not only damages the architectural heritage. The special conditions of this soil cause rare types of corrosion, which affect archaeological metal objects.

In 2018 an archaeological rescue excavation was carried out at 23 of Paseo de la Reforma, only at 400 meters from the archaeological site of Tlatelolco. In an area of 550 square meters, 33 burials and various ceramic and lithic objects were located. Only three metal objects were found, all from the colonial period. These objects showed unusual types of corrosion, such as "pseudogilding", produced by the presence of anaerobic bacteria, or the formation of pyromorphite, (PbCl)Pb₄(PO)₃, which is formed under very specific burial conditions.

In the present work, archaeological environments and the causes that produce these types of corrosion are studied.

Key words: Pseudogilding, Pyromorphite, anaerobic

1. El valle de México

A la llegada de los españoles a Tenochtitlan, se estima que en la ciudad vivían unos 200 000 habitantes. La ciudad se encontraba en un entorno lacustre, formado por dos lagos: uno de agua salada y otro de agua dulce. Estos lagos se hallaban en un valle rodeado por volcanes y montañas; los ríos que bajaban desde estas montañas, desembocaban en los lagos de Tenochtitlan.

Tras la conquista de la ciudad, se procedió a desecar los lagos. La tarea no fue sencilla, ya que el agua de las montañas circundantes seguía llegando a los antiguos lagos, aunque estos ya se habían empezado a rellenar.

Durante siglos, los habitantes de la ciudad tuvieron que lidiar con inundaciones constantes y con un nivel freático que estaba muy próximo a la superficie. En 1555 se produjo la primera gran inundación de la ciudad, y en 1604 se acometieron las obras del «gran canal», una de las obras más grandes del mundo preindustrial, que pretendía desviar las aguas de los ríos que confluían en el valle de México. Aun con todo, los grandes proyectos de drenaje, y las inundaciones se han ido repitiendo hasta nuestros días.

Por otro lado, el espectacular aumento de población durante el siglo XX, hizo que la demanda de agua se incrementara considerablemente. Esta agua se extrae del acuífero del subsuelo, lo que ha producido que el nivel de este descienda, dando lugar al hundimiento del suelo que ha llegado a ser de más de 10 metros en algunas zonas de la ciudad.

Todo esto ha afectado al patrimonio arquitectónico. Los efectos producidos en los edificios de la ciudad son bien conocidos, sin embargo, no se ha estudiado tanto cómo influye este antiguo entorno lacustre en los objetos arqueológicos que se encuentran en el subsuelo.

2. Reforma 23, estudio de caso

En 2018, un equipo multidisciplinar del INAH realizó el salvamento y la conservación de bienes arqueológicos recuperados de un solar localizado en la avenida Reforma 23, en la Ciudad de México, en donde se pretendía construir un edificio de apartamentos.

Este solar se encuentra a menos de 500 metros de la zona arqueológica de Tlatelolco una de las más importantes de la ciudad, ya que allí se encontraba el gran mercado de Tenochtitlan, y frente al Tecpan. El Tecpan, era el lugar de gobierno de la «República de indios» del barrio de Santiago Tlatelolco. Este barrio era el lugar donde vivía la población indígena y estaba gobernada por sus propios caciques.

Durante la excavación se encontraron un total de 33 entierros humanos, 6 de ellos depositados en vasijas. La mayor parte del material pertenece al postclásico tardío (1 200-1 521 d. C.).

Entre la cerámica se recuperaron ollas, platos, comales y molcajetes que respondían a las necesidades domésticas, se encontraron sahumadores, anafres y figurillas, así como algunas ofrendas asociadas a entierros, lo que indica que el lugar tuvo uso ritual. Otros elementos encontrados fueron un cuchillo de obsidiana y dos esculturas de piedra.

También se localizaron conjuntos habitacionales, y lo que parece ser un taller donde se producían hojas de obsidiana (se encontraron más de una tonelada de hojas de obsidiana).

Así mismo se encontró material de época colonial, en especial cerámica. Los objetos metálicos hallados se reducen a tres, todos ellos de origen colonial.

A pesar de ser una muestra muy escasa, durante el estudio de estos objetos se pudo apreciar que eran poco comunes tanto por su tipología, como por el proceso de deterioro que habían sufrido durante el enterramiento.

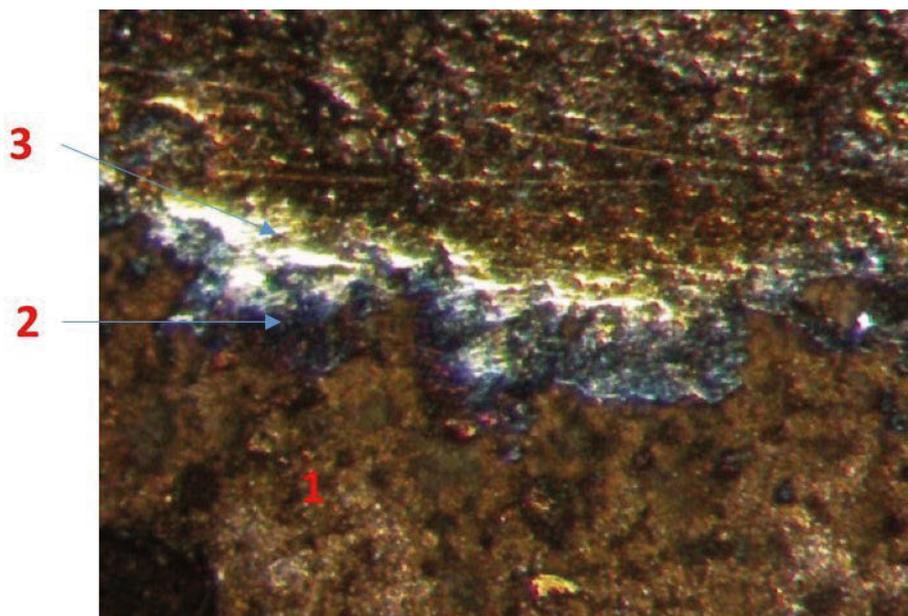


Figura 1. Capas apreciadas en el objeto 1. Matriz de bronce (1), capa de estaño-plomo (2), capa dorada de calcopirita (3)

Figure 1. Layers seen in object 1. Bronze matrix (1), tin-lead layer (2), golden chalcopyrite layer (3)

3. Los objetos metálicos

Para el estudio de los objetos metálicos encontrados en la excavación se realizaron análisis metalográficos con microscopía óptica y electrónica y análisis composicional mediante espectroscopia de energía dispersiva (EDS). Los resultados para cada objeto son los siguientes:

Objeto 1. Consiste en una pequeña medalla de aproximadamente 20 mm de diámetro, que presenta un grabado en una de sus caras.

Se procedió a limpiar, desbastar y pulir una pequeña área de la superficie de la moneda (4×2 mm), para realizar los análisis.

Una vez limpia el área de análisis, se pudo apreciar que la medalla estaba formada por una matriz de color cobrizo, una primera capa de color plateado y en la superficie lo que parecía ser un recubrimiento dorado (figura 1).

La hipótesis inicial era que se trataba de una medalla de cobre, a la que se le había aplicado un recubrimiento de plata, y sobre este uno de oro. Sin embargo, los análisis mostraron algo completamente diferente.

El interior de la medalla consiste en un bronce con un elevado contenido de plomo (84 % Cu, 11 % Sn, 5 % Pb).

Sobre esta se aplicó un recubrimiento rico en estaño y plomo (peltre o *pewter*), cuya finalidad sería simular la plata. Desde la Edad Media es frecuente el uso del peltre para simular la plata y elaborar adornos, botones, broches y «bisutería» de bajo costo (Berger, 2014).

Por último, los análisis mostraron que la capa dorada que se observa en superficie, está formada por calcopirita (CuFeS_2 , conocida como «oro de los tontos»). Esta capa de calcopirita no es un recubrimiento intencional (figura 2). Se trata de una capa de corrosión, que se da en unas condiciones muy especiales y que en la bibliografía se ha llamado «pseudogilding» o «pseudodorado».

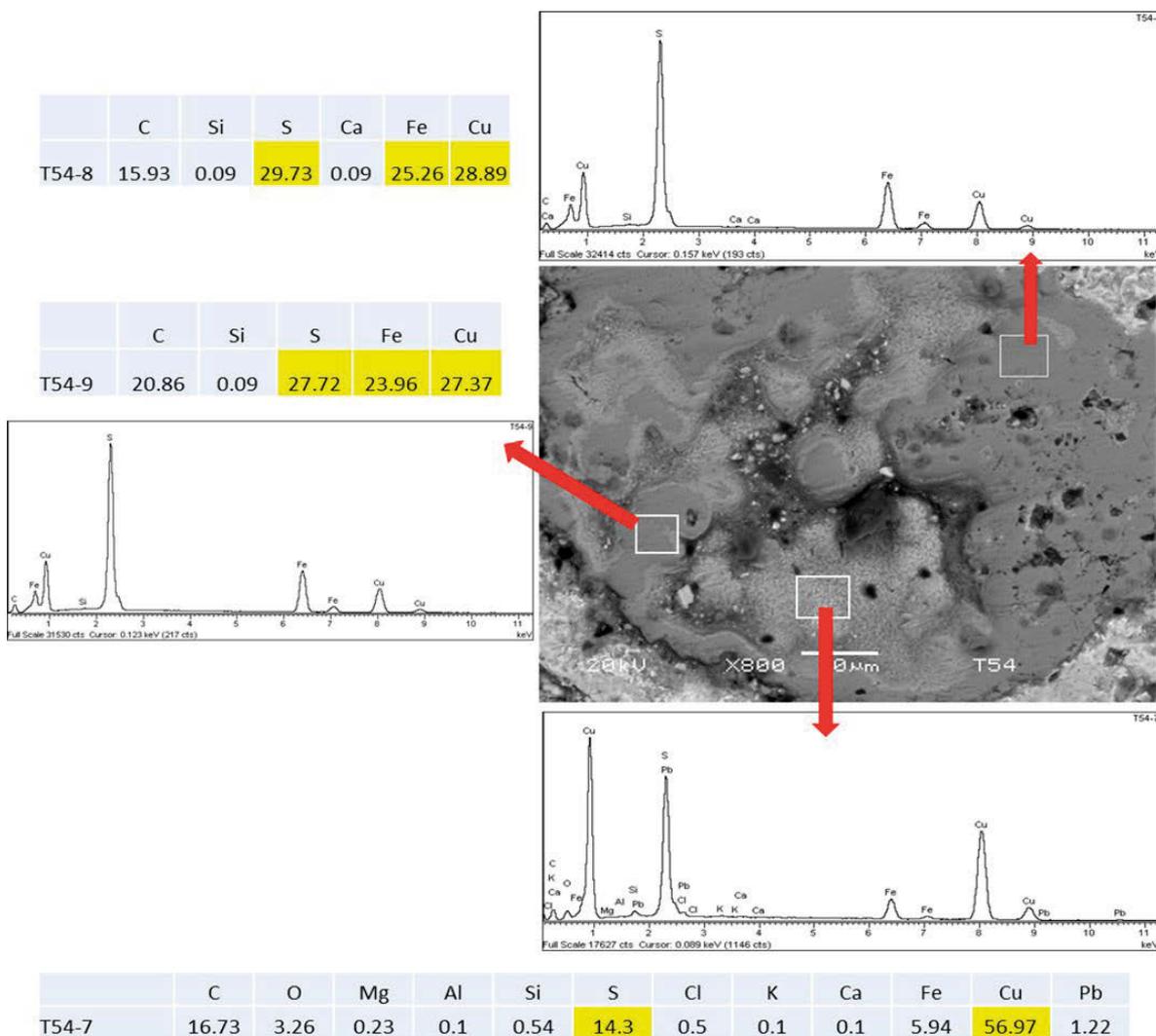


Figura 2. Análisis de la capa dorada que presenta el objeto 1. Esta capa está formada por calcopirita (CuFeS_2)
Figure 2. Analysis of the golden layer presented by object 1. This layer is formed by chalcopirite (CuFeS_2)

Las referencias a objetos arqueológicos que presentaban una capa de calcopirita que asemejaba a un dorado, se remonta a mediados del siglo XIX (McNeil y Mohr, 1993) y se ha encontrado en metales y cerámicas. Algunos ejemplos referentes a metales que presentan pseudodorado son las de unas monedas encontradas en la Cloaca Máxima, del río Tíber (Italia) (Mezzi *et alii*, 2013), o la de algunos objetos de bronce localizados en el río Támesis (Inglaterra) (McNeil y Mohr, 1993), o las figuras de peltre encontradas en Magdeburgo (Alemania), cerca del cauce del río Elba.

En todos los casos parece haber una serie de factores coincidentes:

- Siempre hay presencia de estaño y plomo, ya sea un bronce con cantidades importantes de estos elementos, o bien una aleación de ambos como el peltre.
- Por otro lado, estos objetos siempre se encuentran en una zona anegada por el agua, o en un lugar próximo que permite que el subsuelo este encharcado casi permanentemente y donde hay materia orgánica.

Estas dos condiciones también se dan en el caso de la medalla estudiada.

3.1. ¿Cómo se forma la película de calcopirita?

La formación de la calcopirita tiene lugar mediante un proceso de corrosión biológica en la que intervienen bacterias anaerobias.

Estas bacterias forman diferentes sulfuros de hierro como la pirita (FeS), la pirrotina (Fe_{1-x}S) y la calcopirita (CuFeS₂).

Se ha propuesto un mecanismo de formación de estas capas de corrosión (McNeil y Mohr, 1993). El primer paso consiste la formación de una biopelícula de bacterias consumidoras de oxígeno (aerobias), que se depositan en la superficie del metal y que necesitan además del oxígeno, materia orgánica para su metabolismo. Este biofilm tiene un espesor de 50 a 200 µm.

Por debajo de este biofilm, disminuye la cantidad de oxígeno disponible, disminuyendo a su vez el potencial redox, lo que hace que estas regiones se vuelvan más anódicas que el resto del metal. Por otro lado, la ausencia de oxígeno, hace que empiecen a proliferar bacterias anaerobias sulfato-reductoras.

En las primeras etapas de la corrosión por bacterias sulfato-reductoras se forman sulfuros de cobre, que posteriormente incorporan aniones de hierro para transformarse en calcopirita.

Tanto el cobre como el hierro provienen del medio acuoso en el que se encuentra el metal, en el que hay iones cobre y hierro en disolución. La calcopirita se forma incluso con concentraciones Fe²⁺ de 10⁻⁶ M.

Se ha descartado el mecanismo que proponía que el cobre llegaba por difusión desde el interior del objeto metálico, ya que debería haber un gradiente de concentraciones de cobre desde el interior al exterior, gradiente que no existe (Ingo *et alii*, 2006).

Esto explicaría por qué se da la formación de calcopirita en aleaciones de estaño-plomo, donde la cantidad de cobre es muy pequeña.

Parece ser que el plomo y el estaño juegan un papel muy importante en el metabolismo de las bacterias sulfato-reductoras, ya que en todos los casos están presentes. Su papel en el proceso de formación de la calcopirita no está claro, aunque es posible que exista algún tipo de intercambio de cationes de estaño y plomo por los de hierro y el cobre que se encuentran en disolución.

La medalla encontrada en la excavación de Reforma 23 cumple con todos los requisitos para que se dé corrosión bacteriana, y el metal es idóneo para la formación de calcopirita.

La calcopirita que se observa en superficie, no es homogénea. Está constituida por una capa más profunda, de sulfuros de cobre, y sobre esta se encuentra la calcopirita (figura 2). Este fenómeno también se observa en los otros ejemplos mencionados (McNeil y Mohr, 1993). Parece ser que se debe a que inicialmente se forman sulfuros de cobre, que posteriormente se transforman en calcopirita al incorporar cationes de hierro.

Por último, cabe mencionar que la formación de la calcopirita es extremadamente lenta, debido a la dificultad de difusión de los cationes de hierro a través de la capa de sulfuro de cobre.

Objeto 2. El segundo objeto metálico localizado en la excavación, fue una especie de roseta de hierro de aproximadamente 6 cm de diámetro, que aparentemente presentaba un buen estado de conservación. El objeto se encontraba muy próximo a unos fragmentos de madera y se pudo identificar el objeto como parte del llamador de una puerta (figura 3).

Se tomó una muestra de este objeto para su análisis, pudiéndose determinar que se trataba de una lámina de hierro recubierta con estaño. Este material se conoce como hojalata. La hojalata no se fabricaba en España y era importada de Europa.

El análisis también mostró que, por debajo de la capa de estaño, el hierro que se encuentra en el interior presenta una fuerte corrosión, estando mineralizada aproximadamente un 50 % de la lámina de hierro interna (figura 4).



Figura 3. A la izquierda vista posterior y anterior del objeto 2. A la derecha ilustración de llamador estañado de una hacienda de Puebla. (Tomado de Bartlett, 1990: 119)

Figure 3. On the left, posterior and anterior view of object 2. On the right, illustration of a tinned caller from a hacienda in Puebla. (Taken from Bartlett, 1990: 119)

Se realizó un análisis estadístico, aplicando un análisis de componentes principales (ACP) de las impurezas presentes en el resto de hierro que aún permanece sin corroerse, determinándose que el hierro de la lámina fue obtenido por reducción indirecta en alto horno, proceso utilizado para el beneficio de hierro en Centroeuropa.

Si bien el recubrimiento de estaño se encontraba en buen estado de conservación, se pudo detectar la presencia de pequeñas «pústulas» de forma semiesférica aisladas, de calcopirita. Lo que indica, como en el objeto 1, la actividad de corrosión de bacterias sulfato-reductoras de tipo anaerobio.

El hecho de que se trate de hojalata, material donde no hay cobre, corrobora el que el cobre presente en la calcopirita proviene de los cationes de este metal que se encuentran diluidos en el medio.

Objeto 3. Este objeto consiste en un pequeño fragmento (3,5 cm de largo × 1 cm de diámetro) de forma cilíndrica, probablemente un fragmento de varilla o punzón.

Este objeto se encontraba severamente corroído y tenía adheridas a la capa de corrosión partículas del terreno y depósitos de sulfato de calcio.

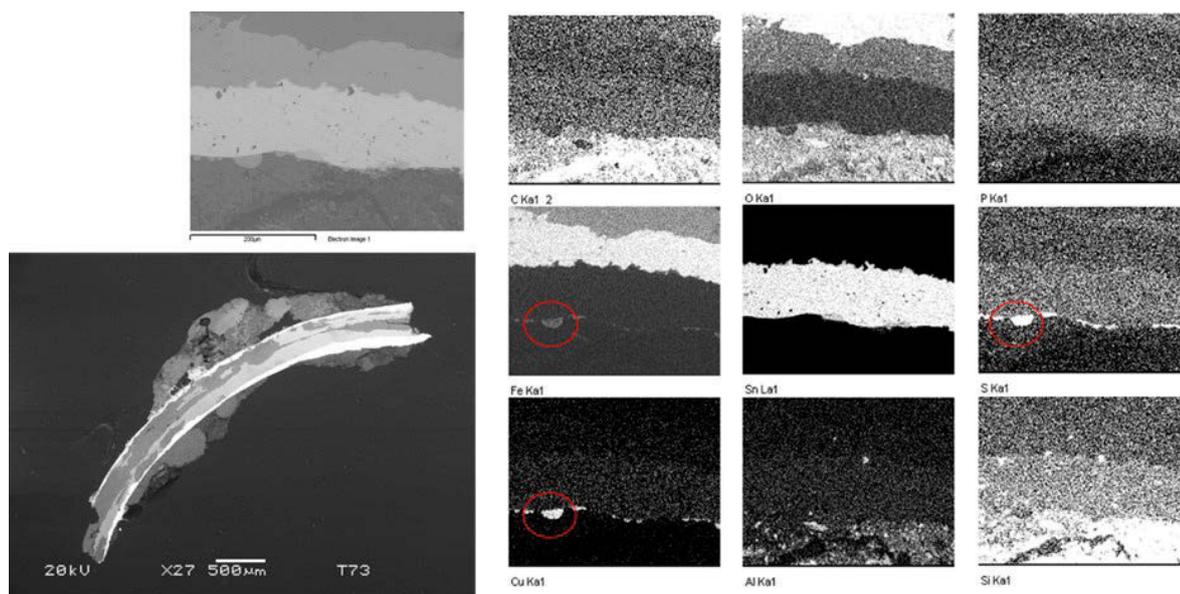


Figura 4. Mapeo de composición química realizado sobre el objeto 2. Se aprecia el recubrimiento de estaño y el interior de la lámina de hierro parcialmente corroído. En el círculo rojo «pústula» de calcopirita

Figure 4. Chemical composition mapping carried out on object 2. The tin coating and the interior of the partially corroded iron sheet can be seen. In the red circle "pustule" of chalcopyrite

El análisis del pequeño resto metálico, determinó que se trataba de un latón (84,2 % Cu, 14,6 % Zn), con trazas de estaño y plomo (0,76 % Sn, 0,46 % Pb).

El análisis de los productos de corrosión presentes en el objeto (figura 5), mostraron que de dentro hacia afuera, se encontraba cuprita (CuO), y una capa de color negro formada por sulfuro de cobre (CuS). Había un tercer producto de corrosión, de color verde esmeralda, localizado tanto en el interior, mezclada con la cuprita, como en el exterior, por encima de la capa de sulfuro de cobre. El análisis de esta capa de corrosión verde, mostró que había una alta concentración de plomo (48 %), oxígeno (19 %), cobre (14 %), fósforo (5 %) y cloro (2 %)

Este producto de corrosión ha sido ya descrito por otros autores (Mezzi *et alii*, 2013), y se ha identificado como Piromorfita ($\text{PbClPb}_4(\text{PO})_3$).

La piromorfita, mineral de color verde, se da en medios donde hay materia orgánica en abundancia, por lo que existen elevadas concentraciones de fósforo. También es necesaria la presencia de cloruros y de cationes de plomo en el medio. Su formación está relacionada con la actividad antropogénica. La piromorfita es un producto de corrosión muy poco frecuente en objetos arqueológicos, debido a que debe darse la presencia de los elementos anteriormente citados. Aun así, ha sido reportada su presencia en objetos de la dinastía Han (China) y en artefactos encontrados en San Polo d'Enza (Italia) (Mezzi *et alii*, 2013). El mecanismo propuesto de corrosión se inicia con la formación de cloruro de cobre al combinarse los cationes de plomo con los aniones de cloro. Posteriormente, el cloruro de plomo reacciona con el ion fosfato, para formar la piromorfita (Mezzi *et alii*, 2013).

Otros investigadores han informado que la formación de piromorfita en tuberías de plomo se debe también a corrosión de tipo bacteriano (Menor-Salván, 2012). Salvan propone el siguiente mecanismo para la formación de la piromorfita:

El mecanismo biológico de formación de la piromorfita se inicia cuando se forma la capa pasiva del plomo, formada por óxidos o carbonatos de plomo (cesurita). Sobre esta capa pasiva, se forma un biofilm que metabolitos ácidos o complejantes que movilizan los minerales formados inicialmente. El plomo

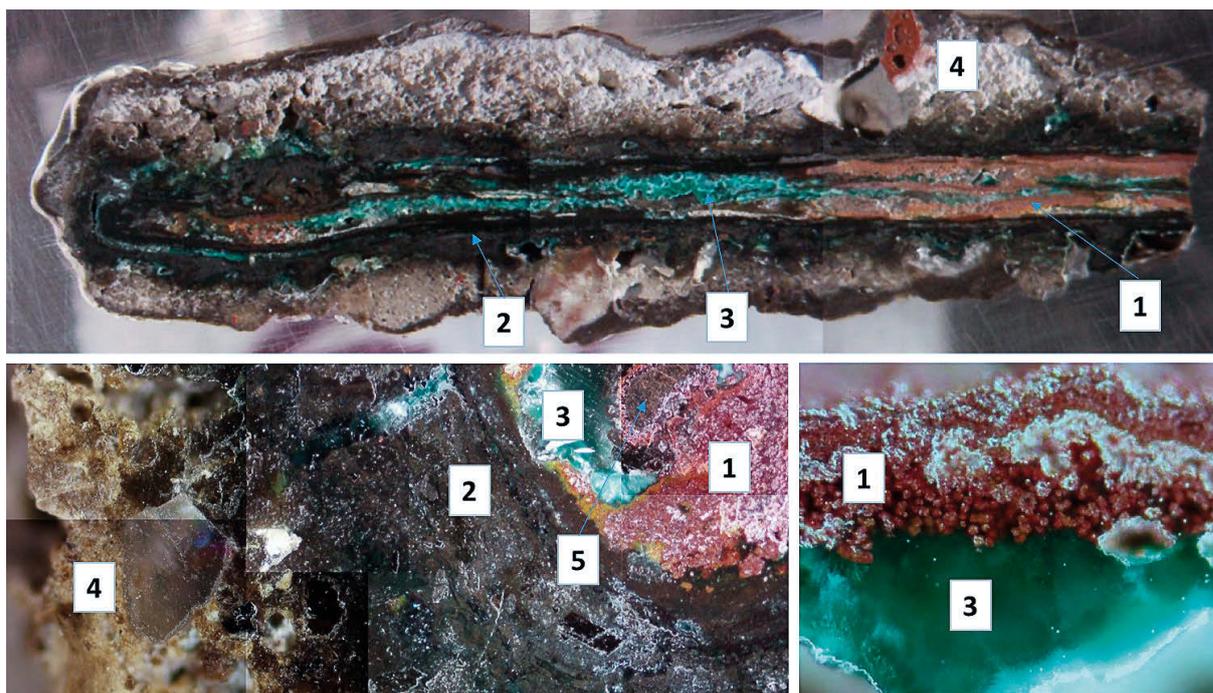


Figura 5. Imágenes del objeto 3. (1) cuprita (CuO), (2) sulfuro de cobre, (3) piromorfita, (4) sulfato de calcio y partículas del terreno, (5) resto metálico

Figure 5. Images of object 3. (1) cuprite (CuO), (2) copper sulfide, (3) pyromorphite, (4) calcium sulfate and ground particles, (5) metallic residue

queda fijado en la matriz de polímeros extracelulares y/o forma gránulos intracelulares de fosfatos. Estos gránulos pueden actuar como gérmenes para el desarrollo cristalino posterior, que puede incluir fenómenos de disolución y recristalización que incrementen el tamaño de los cristales formados. La insolubilidad de la piromorfita puede ser un factor clave, pues puede prevenir la dispersión de plomo soluble como resultado de la actividad biológica sobre el metal (Menor-Salván, 2012: 159).

Efectivamente, la piromorfita es muy insoluble ($K_s = 10^{-84.4}$), lo que hace que precipite con facilidad, incluso con concentraciones extremadamente bajas de plomo, cloro y fósforo).

En el caso del objeto 3, no es necesario que el objeto sea de plomo para que se forme la piromorfita. Al igual que en la formación de la calcopirita, el plomo proviene de los cationes de este metal que se encuentran en disolución.

4. Conclusiones

El carácter lacustre del subsuelo de la Ciudad de México, es ideal para que se den tipos de corrosión debido a bacterias anaerobias, poco frecuentes en los metales arqueológicos. Esta corrosión biológica da lugar a la formación de productos de corrosión como la calcopirita (pseudodorado) y a la formación de piromorfita.

En ambos casos están presentes bacterias anaerobias, de carácter sulfato-reductor en el caso de la formación de la calcopirita.

Para que se produzca este tipo de corrosión se debe dar una serie de factores: zonas anegadas de agua, presencia de metales en disolución, como el hierro el cobre y el plomo, y de fosfatos en el caso de la formación de la piromorfita.

El papel que juegan metales como el plomo o el estaño en estos procesos de corrosión biológica no está todavía bien estudiado, aunque parece que su presencia es indispensable para la actividad de las bacterias anaerobias.

Bibliografía

- Bartlett, P.A. (1990): *The Haciendas of Mexico An Artist's Record*. Colorado University. Denver.
- Berger, D. (2014): "Composition and decoration of the so-called *zinnfigurenstreifen* found in Magdeburg, Saxony-Anhalt, Germany". *Restaurierung und Archäologie*, 7: 65-80.
- Ingo, G.M., de Caro, T., Riccucci, C. y Khosroff, S. (2006): "Uncommon corrosion phenomena of archaeological bronze alloys". *Applied Physics*, 83: 581-588.
- McNeil, M.B. y Mohr, D.W. (1993): "Formation of Copper-Iron Sulfide Minerals during Corrosion of Artifacts and Possible Implications for Pseudogilding". *Geoarchaeology: An International Journal*, Vol. 8,1: 23-33.
- Menor-Salván, C. (2012): "Biomineralización de Piromorfita en Tuberías de Plomo". *macla. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 16: 158-159.
- Mezzi, A., de Caro, T., Riccucci, C., Faraldi, F., Veroli, C. y Caschera, D. (2013): "Unusual surface degradation products grown on archaeological bronze Artefacts". *Applied Physics*, 113: 1121-1128.



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).