

**Ge-conservación**  
Conservação | Conservation

**Año 2020**

**ISSN: 1989-8568**

<b>Dirección Editorial:</b>	Emma García Alonso
<b>Consejo de Redacción:</b>	Ana Bailão, Rocío Bruquetas Galán, Emilio Cano Díaz, Ana Carrassón, António João Cruz, Rafael Fort González, Silvia García Fernández-Villa, Marisa Gómez González, Ana Laborde Marqueze, Alfonso Muñoz Cosme
<b>Editores Invitados</b>	Sonia Santos Gómez
<b>Editores Invitados Monográfico</b>	Javier Becerra, Pilar Ortiz y Francisco S. Pinto
<b>Secretaria de Edición:</b>	M <sup>a</sup> Concepción de Frutos Sanz
<b>Maquetación:</b>	M <sup>a</sup> Concepción de Frutos Sanz
<b>Traducción portugués:</b>	Ana Bailão
<b>Imagen portada:</b>	“Once Módulo”, escultura de acero patinable del artista Amador Rodríguez, situada en el Museo de Escultura al Aire Libre de Leganés (Madrid). Autor de la fotografía: Juan Carlos Roldán.

**ISSN: 1989-8568**



Esta publicación utiliza una licencia Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/).

Se permite compartir, copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra con el reconocimiento expreso de su autoría y procedencia.

No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.

Esta revista utiliza Open Journal Systems, software libre de gestión y publicación de revistas desarrollando, soportado y libremente distribuido por el Public Knowledge Project bajo Licencia Pública General GNU.



Ge-conservación no se responsabiliza de la información contenida en los artículos ni se identifica necesariamente con ellas.

© La propiedad intelectual de los artículos pertenece a los autores, y los derechos de edición y publicación de este número son de Ge-conservación.

Rogamos que en la difusión libre de los contenidos queden patentes los créditos de los autores y la procedencia.

El Grupo Español de Conservación es una asociación independiente afiliada a *The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works*, inscrita en el Registro Nacional de Asociaciones, Sección 1ª, Nº 160.299. Sede: I.P.C.E. C/Greco, 4 28040 Madrid. Asociación Declarada de Utilidad Pública por Orden del Ministerio del Interior 3404/2009 (BOE 18-12-2009).

**Ge-conservación**  
Conservação|Conservation

[www.revista.ge-iic.com](http://www.revista.ge-iic.com)

E-mail: [revista@ge-iic.org](mailto:revista@ge-iic.org)

[www.ge-iic.com](http://www.ge-iic.com)

E-mail: [secretaria@ge-iic.org](mailto:secretaria@ge-iic.org)

Revista indexada en:



# Índice

<b>Artículos</b>	<b>Páginas</b>
<i>Una pincelada sobre la técnica de la laca europea</i> Cristina Ordóñez Goded	6
<i>Conservation of archaeological copper alloy artifacts from Al Ain National Museum collection: the role of desalination</i> Diego Lois, Eduarda Vieira, Eleonora Bosetto	18
<i>Análisis de la carga fúngica en el aire de la sala “Fragmentos de Historia a Orillas del Nilo” y del exterior del Museo de La Plata, Argentina</i> Andrea C. Mallo, Daniela S. Nitiu*, Lorena A. Elíades, Mauro García Santa Cruz, Mario C. N. Saparrat	33
<i>Diagnóstico de materiales y lesiones en las fachadas del centro histórico de Cuenca (Ecuador)</i> Maria del Cisne Aguirre Ullauri, Edison Maximiliano Castillo Carchipulla, Darío Miguel López León	47
<i>Processamento de imagem digital (PID) como meio de análise, documentação e monitorização da corrosão do aço de carbono aplicado na escultura de Gonçalo Jardim</i> Ana Sofia Alvarez, João Linhares, Ana Bailão	64
<i>Morteros históricos en las construcciones de Quito de los siglos XVI, XVII y XVIII</i> M. Lenin Lara Calderón, David Sanz Arauz, Inés del Pino Martínez	71
<i>Oficinas regionais, influências de muitas e desvairadas partes: o caso dos suportes de madeira das pinturas maneiristas de Belchior de Matos da ermida de Geraldês (Peniche, Portugal)</i> António João Cruz, Elisabete Ferreira, Alexandra Lauw, Carla Rego, Helena Pereira	82
<i>Influencia del método de aplicación en la consolidación con nanopartículas de sílice (SiO<sub>2</sub>): arenisca del claustro de la Catedral de Pamplona</i> Irene Samaniego Jiménez y Ainara Zornoza-Indart	100
<i>Aportaciones estructurales al estudio de la denominada, “ermita de San Jorge” (Cáceres): el aljibe de la torre medieval de Los Mogollones</i> Francisco Serrano Candela, José Carlos Salcedo Hernández	114
<i>Procesos de alteración y conservación de la escultura en vidrio</i> M <sup>a</sup> Ángeles Villegas Broncano, Jorge Alberto Durán Suárez	125
<i>Factores de alteración del retablo en madera policromada: una propuesta de terminología y clasificación</i> Francisco Serrano Candela, José Carlos Salcedo Hernández	137

## Suplemento:

### **TECHNOHERITAGE 2019 - Fourth edition of the International Congress on Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage**

#### **Presentación /Presentation**

Javier Becerra Luna, Pilar Ortiz Calderón, Francisco S. Pinto 151

#### **Electrochemical evaluation of the patina of the weathering steel sculpture "Once Módulo"**

Ana Crespo, Blanca Ramírez-Barat, Iván Díaz, Emilio Cano 153

#### **Conservation to overcome oblivion. New methods for the survival of lost heritage memory**

María José Merchán, Emiliano Pérez 160

#### **Analysis of urban vulnerability as a tool for cultural heritage preservation. The cases of the medium-sized historical ensembles in Andalusia**

Daniel Navas-Carrillo, Blanca del Espino Hidalgo, Juan-Andrés Rodríguez-Lora, Teresa Pérez-Cano 171

#### **Heritage monitoring and surveillance using Sentinel satellite data in the Lower Alentejo (Portugal)**

Steffan Davies, Martino Correia, Ricardo Cabral 186

#### **The performance of shelters for the conservation of archaeological sites in dry and warm climates: the case of Complutum**

Cristina Cabello Briones 193

#### **Coberturas sostenibles en excavaciones arqueológicas. Metodología de aplicación al caso de mosaicos en el Conjunto Arqueológico de Itálica (Santiponce, Sevilla)**

M. Ordóñez-Martín, J. C. Gómez de Cózar 202

#### **Evaluación de riesgos, monitorización y simulación de edificios patrimoniales**

C. M.ª Muñoz González, Á. L. León Rodríguez, J. Navarro Casas, J. Ruiz Jaramillo, C. Teeling 215

#### **Environmental degradation of Modern non-balanced glasses**

Teresa Palomar, Alexandra Rodrigues 226

#### **Laser-Induced Fluorescence mapping of pigments in a secco painted murals**

Auxiliadora Gómez-Morón, Rocío Ortiz, Francesco Colao, Roberta Fantoni, Javier Becerra, Pilar Ortiz 233

#### **Técnicas analíticas para la caracterización de documentos: una revisión bibliográfica**

Gemma Mª Contreras, Javier Becerra 251

#### **La incidencia de la opinión social en el grado de vulnerabilidad de los edificios patrimoniales. El caso del centro histórico de Popayán (Colombia)**

Mª Isabel Turbay Varona, Rocío Ortiz, María Arana, Pilar Ortiz 267

## Reseñas

#### **Reseña libro: Made in Malines. Les Statuettes Malinoises Ou Poupees de Malines de 1500-1540 : Etude Materielle Et Typologique**

Ana Carrassón, Marisa Gómez 283

## *Artículos*

---

## Una pincelada sobre la técnica de la laca europea

Cristina Ordóñez Goded

**Resumen:** El artículo describe someramente la técnica de la laca europea, contrastando la información extraída de la documentación histórica (material de archivo, de hemeroteca y tratadística), con los estudios directos y científicos efectuados en obras lacadas y con las publicaciones sobre la materia.

**Palabras clave:** laca, japanning, arte povera, sandáraca, goma laca, minio, chinerías

### A brushstroke on the European lacquer technique

**Abstract:** The article describes briefly the European lacquer technique contrasting the information extracted from the historical documentation (material of archiving, old newspapers and technical treatises), with direct and scientific studies carried out in lacquered works and publications on the subject.

**Keywords:** lacquer, japanning, arte povera, sandarac, gum lac, minium, chineries

### Uma pincelada sobre a técnica da laca europeia

**Resumo:** O artigo descreve sucintamente a técnica da laca europeia, comparando as informações extraídas da documentação histórica (arquivos, hemeroteca, tratados) com estudos diretos e científicos realizados em obras lacadas e com publicações deste assunto.

**Palavras-chave:** Laca, japanning, arte povera, sandáraca, goma-laca, minio, chinoiserie

---

### Introducción

La laca europea es un procedimiento destinado a la realización de una vasta tipología de obras que surge con la intención de imitar las lacas asiáticas. Los objetos de laca europea más antiguos que se conocen se elaboraron durante la segunda mitad del siglo XVI, a raíz de la llegada a Venecia de las lacas cercano orientales, sobre todo de Persia, Siria o Turquía. En ellos se combinaban los motivos decorativos de esta zona del mundo, como arabescos y vegetales muy estilizados, con elementos tardo- renacentistas. Esta clase de producción artística, que se extendió por Europa hasta mediados del siglo

XVII aproximadamente, consistía fundamentalmente en lujosos y delicados objetos de reducidas dimensiones como arquetas o escritorios. También se eligió esta técnica decorativa para la ejecución de instrumentos musicales como arpas, clavicordios o espinetas [figura 1].

Por su parte, durante la segunda mitad del siglo XVII surgen métodos de imitación de las lacas extremo orientales en distintos países europeos con sus características propias. Las obras así realizadas, mucho más estudiadas y conocidas que aquellas que se inspiraban en el Cercano Oriente, nacen del interés por las lacas procedentes de China y Japón que fueron llegando a Europa desde finales

del siglo XVI, gracias a los contactos comerciales entre ambos territorios. Sin embargo, cuando las importaciones de estas obras no consiguieron abastecer la intensa demanda de la clientela europea, unido a los precios desorbitados que llegaron a alcanzar y a la mediocre calidad que iban caracterizando a las lacas chinas de exportación, los artesanos europeos se dispusieron a imitarlas. A este segundo tipo de producción europea de lacas nos referiremos en las siguientes líneas.



**Figura 1.-** Arqueta de madera lacada de fondo oscuro con motivos florales dorados, cristal de roca, bronce y plata sobredorada. Venecia. 1600 c. Museo Saint Louis. Missouri. N° INV: 346: 1958. 47.9 x 70.8 x 44.5 cm. ©Museo Saint Louis. Missouri. Friends Fund.

### Objetivos

Tres son los principales objetivos del presente artículo: contribuir a la difusión del conocimiento de la laca europea, dado que son escasos los estudios publicados sobre dicho argumento en español; profundizar en los aspectos relativos a su tecnología de elaboración, pues, entre otras cosas, es imprescindible conocer los materiales y métodos utilizados en estas obras para acometer la adecuada conservación y restauración de las mismas y, por último; ofrecer información acerca de la producción española de laca, teniendo en cuenta que los escritos sobre laca europea hasta el momento han obviado su existencia.

La laca europea se aplicaba principalmente a los muebles, a otros elementos domésticos o de uso personal, así como a los carruajes. Con mucha frecuencia se elegía también esta técnica decorativa a la hora de elaborar instrumentos musicales como clavicordios, clavicémbalos, salterios o arpas. Encontramos asimismo laca europea en las salas de algunos de los más importantes interiores europeos, acompañando y completando la decoración parietal a base de lacas orientales, muy de moda desde el siglo XVII.



**Figura 2.-** Cómoda española de laca verde con chinerías. Siglo XVIII. Colección particular © Cristina Ordóñez Goded.



**Figura 3.-** Salterio italiano de laca rojiza con motivos chinoscos. Siglo XVIII. Colección particular. © Cristina Ordóñez Goded.

Para decorar estos objetos, los artesanos se inspiraron mayoritariamente, sobre todo en los primeros momentos, en los motivos propios de las lacas orientales. Con ellos cubrían las superficies del ajuar doméstico de representación y de los instrumentos musicales más lujosos, con el fin de conferirles un aspecto exótico [figuras 4a y 4b]. Pero también se recurría a asuntos de carácter local, motivos mitológicos o religiosos, escenas campestres, vistas de ciudades, etc. En los carruajes eran más habituales los temas mitológicos, los fondos con decoración heráldica u otros ornamentos alusivos a los propietarios de los vehículos. Solo ocasionalmente se aprecian chinerías en ellos.

A menudo las chinerías se copiaban o calcaban de las ilustraciones que circulaban por toda Europa en libros de viajes, como por ejemplo el publicado por el viajero holandés Johan Nieuwhof (1668), en los tratados de técnicas artísticas, como los diseños de Jean Pillement

entre 1728-1808 del tratado de Robert Sayer (1762, 1966) o los presentes en el de John Stalker y George Parker del año 1668, 1998). Los lacadores también se inspiraron en las imágenes de pintores y grabadores del momento como Nicolás Lancret 1690-1743, Louis Felix de la Rue 1730-1777 o François Boucher 1703-1770, así como en los motivos y escenas de las lacas y de otros objetos asiáticos.



**Figuras 4.-** 4a. Detalle de las chinerías de un *cabinet* inglés de laca negra. Siglo XIX. Colección particular. ©Cristina Ordóñez Goded. Figura 4b. Motivos chinoscos en una mesa española de laca verde. Siglo XVIII. Museo de Pontevedra. Nº INV: 4829. © Museo de Pontevedra.

Los procedimientos de lacado pretendían imitar la luminosidad, transparencia, brillo y profundidad de las lacas orientales, recurriendo a materiales de uso tradicional en Europa, entre otras cosas por los problemas de salud que sufren los occidentales con la manipulación del *urushi*, la resina que, como sabemos, constituye uno de los principales ingredientes de la laca china y japonesa.

Las lacas europeas eran obras estratificadas que se confeccionaban mediante procedimientos ejecutados con gran paciencia y meticulosidad según las recetas reflejadas en los numerosos tratados que se difundían por Europa desde el siglo XVII. En líneas generales, la técnica consistía en extender sobre el soporte capas sucesivas de materia que se iban puliendo esmeradamente antes de aplicar la siguiente, con el fin de obtener superficies muy lisas.

Aunque la aplicación de la laca podía realizarse sobre diferentes tipos de soporte como piel, metal, cartón piedra

o porcelana, la madera era el material más empleado. Por lo general, se recurría a maderas compactas tales como el cedro, el tilo o el haya e incluso a algunas tan apreciadas como el nogal, la caoba (Coelho 2012: 213) o el ébano (Ordóñez 2015: 329; Wolsperges 2000: 99). Cuando se hacía uso de esencias con grano menos fino, como el castaño <sup>[1]</sup> o el roble <sup>[2]</sup>, estas se solían chapear con madera más compacta (Ordóñez 2015: 265, 515; Ordóñez y Rodríguez Simón 2018: 25; Caró, Rizzo, Silverman 2019: 5-6).

Con frecuencia, sobre el soporte de madera se extendía un aparejo a base de sulfato o carbonato cálcico, disuelto en algún tipo de cola animal y, a menudo, con el añadido de albayalde como carga. En muchas ocasiones la madera recibía previamente una impregnación de cola o de barniz con el fin de conseguir una superficie lo más lisa y uniforme posible sobre la que recibir el aparejo y los sucesivos estratos de materia (Ordóñez 2015: 483, 496). Los adhesivos animales, como la cola de conejo o la de retazos, esta última confeccionada a partir de pieles de cordero o de cabrito (Castro y Velasco 1715, 1947: 1148; Bruquetas 2002: 472; Kroustallis 2008: 122), eran los preferidos por los lacadores y para su empleo debían disolverse al calor de una lumbre sobre carbón, cenizas, arena, etc. El aparejo se aplicaba al objeto en un número variable de estratos que se iban dejando secar, se lijaban y se pulían antes de aplicar el siguiente: *...Para usar de él ha de estar la pieza muy lisa, o aparejada, como si se hubiera de dorar de bruñido...*(Orellana 1755: 63). El carbonato cálcico se empleaba asiduamente entre los lacadores británicos, mientras que en otros países como España o Portugal se hacía mayor uso del sulfato cálcico (Ordóñez 2015: 336; Caró, Rizzo y Silverman 2019: 5, 6; Coelho 2012: 218). En el mobiliario lacado portugués o de charão, además del aparejo tradicional blanco, se ha constatado la presencia de otros de color verde, rojo, azul, naranja o marrón (Coelho 2012: 221) <sup>[3]</sup>.

El procedimiento de lacado del objeto proseguía con la coloración del fondo que se realizaba, principalmente a través de dos métodos: se aplicaban sobre el aparejo estratos de pintura o bien de barnices coloreados aunque, a menudo se combinaban ambos sistemas. La pintura destinada a conferir una determinada tonalidad a la laca se podía realizar al temple o al óleo. Por su parte, la ejecución del fondo mediante barnices se llevaba a cabo diluyendo distintos colorantes en barnices y, normalmente entre las capas coloreadas se extendían otras de barnices incoloros.

Los tonos más empleados en las lacas eran el rojo y el negro, seguidos del azul, el verde y el blanco. La laca roja, muy común en Inglaterra, es muy imitada en España y Portugal, debido a la ingente cantidad de objetos de laca británica, comúnmente llamada *japanning* que, principalmente durante el siglo XVIII, llegaba a la Península Ibérica (Ordóñez 2011: 15; Ordóñez 2015: 89; Ordóñez y Rodríguez Simón 2018: 18) [figura 5].



**Figura 5.-** Contador español de laca roja y negra con chinerías doradas. Colección particular. © Cristina Ordóñez Goded.

Para la tonalidad roja, era frecuente el uso del bermellón, y del minio. Son numerosas las recetas que encontramos en los tratados para la confección de lacas rojas que mencionan, como la que se transcribe a continuación, estos dos pigmentos combinados en una misma obra: ... *Se dan una o dos manos del color que se quiera el fondo. Lo mas general es que sea encarnado con bermellón y parte de minio al óleo* ... (Sánchez Caro 1866: 35).

En cuanto a los fondos de color negro se recurría asiduamente al negro humo, al carbón vegetal o al negro de huesos [figura 6]. Encontramos fórmulas en las que se citan estos materiales en los tratados de todas las épocas y países (Ordóñez 2015: 342,343). Así, Palomino aconseja el uso del negro humo en su receta *Modo de usar del Barniz de charol*: ... *y si el charol ha de ser negro, se hará con negro de humo, molido primero en seco en la losa, y desleído en el mismo barniz*... (Castro y Velasco 1715, 1947: 747).



**Figura 6.-** Cabinet inglés de laca negra. Siglo XIX. Colección particular. © Cristina Ordóñez Goded.

Entre los pigmentos más citados en los recetarios para conseguir el color azul en las lacas se encontraban el azul de Prusia y el azul esmalte (Ordóñez 2015: 489). El segundo de ellos gozaba de gran favor por parte de los artesanos británicos de los siglos XVII y XVIII para las obras de *japanning*, por los satisfactorios resultados que se conseguían con él. Así por ejemplo, Stalker y Parker aconsejan emplear exclusivamente este pigmento para

las lacas azules en la receta *To make blue Japan* (Stalker y Parker 1668, 1998: 22; Helwig 2001: 28). Dossie también lo recomienda aunque lo hace junto a otros pigmentos como el azul de Prusia o el azul verditer (Dossie 1758: 416; Helwig 2001: 28). Conviene señalar que el alto coste de este pigmento constituía un inconveniente para su uso <sup>[4]</sup>.

Otra tonalidad de las lacas fue el blanco, la documentación española nos ofrece numerosos ejemplos de objetos de este color, como el de la siguiente cita procedente del inventario postmórtem de Isabel de Farnesio, redactado en 1746: ... *Un Bufete de Charol<sup>[5]</sup> blanco, cortado en ocho porciones con pie de lo mismo, Matizado de varias figuras y ramos de Papel cortado*... <sup>[6]</sup>

Para la ejecución de esta clase de superficies se recurría a distintos colorantes o pigmentos, entre los que destaca el carbonato básico de plomo, también denominado blanco de plomo o albayalde. La intensa tonalidad blanca de esta sustancia, y su elevado poder cubriente, la hacía muy apropiada para los fondos de este color y era la preferida de ciertos artesanos y tratadistas del siglo XVIII como Dossie (Dossie 1758: 416).

Un testimonio del uso de este material en la laca española se localiza en unas memorias de febrero de 1736, firmadas por el aposentador de La Granja de San Ildefonso, Domingo María Sani, sobre los gastos causados para el Oficio de la Furriera de dicho palacio. En él se indica la utilización de cuatro arrobas de albayalde fino: ... *para azer una Mesa de Charol blanco para la Reyna N<sup>a</sup> S<sup>a</sup>*... <sup>[7]</sup>

Los fondos de las lacas también podían ir dorados, siendo estos muy frecuentes en los carruajes y las sillas de mano (Ordóñez 2015: 641-643) [figura 7]. A menudo se realizaban con panes metálicos dorados o de plata corlada. También se podían dorar los fondos con polvos o fragmentos de pan de oro a imitación de la técnica oriental *nashiji-ko*, según un sistema denominado en Europa *venturina* o *aventurina*. El procedimiento consistía en espolvorear el oro en la superficie húmeda de la laca mediante distintos útiles como pinceles o tubos de bambú cortados diagonalmente con una rejilla, a modo de filtro, en el extremo, cedazos, etc. Dicho método producía un efecto parecido al de la piedra dura denominada *venturina* <sup>[8]</sup>, de ahí su nombre [figuras 8a y 8b]. Esta técnica también podía realizarse a base de plata, bronce, cobre o estaño.

La documentación histórica da cuenta del gusto imperante por este recurso decorativo. Así, en 1750, el comerciante francés Lazare Duvaux vendió a Madame Pompadour tres pequeñas mesas lacadas con *aventurina*... *Trois petites tables vernies, en aventurine*... (Courajod 1878: 50, 135). Los distintos métodos de aplicación de la *venturina* se reflejan en determinados tratados europeos, como el de Bernardo Montón de 1734, en la receta titulada *Para dar a la madera color de venturina*: ... *Harás el fondo de color obscuro, compuesto de bermellón, sombra, y negro de humo, segun quieras el color mas negro, o mas obscuro, o colorado,*

etc. pondrás mas, o menos de estos colores: estando seco, lo bruñirás, después calentarás la pieza, y luego le pondrás los polvos de venturina passados por cedazo de seda, o por un cañuto, etc. Nota: la pieza debe estar humeda del barniz, para que los polvos se peguen, y después la pulirás... (Montón 1757: 122)



**Figura 7.-** Silla de manos, probablemente española, de laca de fondo dorado con pinturas alegóricas. Último cuarto del siglo XVIII. Museo de Bellas Artes de Bilbao. Nº INV: 82/2429. 152x78,5x109 cm. © Museo de Bellas Artes de Bilbao.



**Figura 8a.-** Detalle del fondo de venturina dorada de un carruaje alemán del siglo XIX. ©Cristina Ordóñez Goded.



**Figura 8 b.-** Venturina dorada en el fondo del cajón de un mueble. © Museo Nacional de Artes Decorativas.

Con la laca también podían emularse maderas como el palorosa (Santini 2003: 126) o el palosanto, otros materiales como el carey (Stalker y Parker 1668, 1998: 75-76; Huth 1972: 26; Santini 2003: 73-74)<sup>[9]</sup>, el jaspe, la porcelana<sup>[10]</sup>, el alabastro (Wolvesperges 2000: 111) e incluso técnicas decorativas como la marquetería Boulle (Huth 1972: 94; Santini 2003: 54, nota 143; Morazzoni 1925: 663; Cesari 2004 b: 67).

Con respecto a los barnices transparentes o coloreados que formaban parte de la composición de las lacs, estos consistían por lo general en gomas y/o resinas naturales disueltas en alcoholes, hidrocarburos o aceites. Entre las primeras sustancias se encuentra la goma laca, muy utilizada en España. Así, Palomino recomienda su uso en una receta titulada *Barniz de charol*, que figura en su tratado de 1715: *...se ha de tomar medio cuartillo de espíritu de vino, y a este se le han de echar tres onzas de goma laca molida, que sea la mejor y más limpia, que hubiere...* (Castro y Velasco 1715, 1947: 747)

Otra resina a la que se recurría con asiduidad era la sandáraca, tradicionalmente considerada como la principal materia prima de la laca veneciana<sup>[11]</sup> y a cuyo uso no faltan recomendaciones en las fuentes españolas, principalmente para las lacs claras. Así, en el volumen titulado *Secretos raros de artes y oficios*, publicado en 1806, se incluye una receta denominada *Otro barniz de la china* en la que se aconseja lo siguiente: *...Toma diez y ocho onzas de espíritu de vino, seis de sandáraca, dos de trementina fina, y dos de espíritu de trementina: ponlo todo en una botella al sol, removiéndola de hora en hora, y quando lo adviertas muy líquido, pásalo por un lienzo...* (Anónimo 1806: 150).

A las sustancias mencionadas habría que añadir otras como el copal, la colofonia<sup>[12]</sup>, el mástic, la trementina o el ámbar, estas dos últimas muy recomendadas por Watin para las lacs (Watin 1776: 293; Webb 2000: 107). Por su parte, el dammar se utiliza únicamente a partir del siglo XIX, que es cuando se inicia su empleo en las técnicas

artísticas occidentales. Las resinas solían combinarse entre sí para conseguir los resultados deseados. De hecho, es difícil encontrar una receta en la que no figuren varias de ellas. En relación a los materiales destinados a disolver las sustancias sólidas citadas, con el fin de confeccionar los barnices, se recurría a menudo al alcohol etílico o *espíritu de vino*. A este respecto cabe transcribir parte de una fórmula que recibe el nombre de *Barniz de Charol*, su uso en el *Tratado de barnices y charoles* de Orellana (Orellana 1755: 63)...*Echa tres onzas de gomalaca molida, limpia, y buena en medio quartillo de espíritu de vino...*

La esencia de trementina es otra de las sustancias empleadas en las lacas para diluir resinas, si bien era asimismo utilizada como aglutinante de colorantes y pigmentos. Las mismas funciones eran ejercidas por el aceite, que servía asimismo para el pulimento de los distintos estratos de las lacas o como mordiente para los motivos dorados. El aceite de linaza, que era uno de los más empleados, aparece asiduamente mencionado en la tratadística de los siglos XVIII y XIX. A él se refiere por ejemplo Palomino en una cita que reza así...*Síguese ahora el tratar de los secantes, que se pueden usar a el óleo, de éstos, el más común es el aceite de linaza, cocido con azacón, o litarge, que por otro nombre llaman almártega de dorar...* (Castro y Velasco 1715, 1947: 140). Otros aceites utilizados eran el de espliego, el de nueces, el de amapola o el de oliva. El primero de ellos se cita por ejemplo en el *Manual de curiosidades artísticas y entretenimientos útiles* de 1831, concretamente bajo el título *Barniz de charol que se seca con facilidad: ...Tómense dos onzas de trementina que se lavará muy bien en agua caliente muchas veces, y cuatro onzas de sandáraca; póngase esta al fuego en vasija de barro a propósito, y cuando empiece a humear añádasele la trementina y una onza de aceite de espliego...* (Munaiz y Millana 1831: 210). En lo tocante al aceite de oliva, Bonanni sugiere su uso principalmente para el pulimento de los distintos estratos de los barnices (Bonanni 1731: 119). En lo que respecta al aceite de nueces o amapolas, ambos aparecen referidos en recetas de barnices como la que expone a continuación Robert Dossie: *...A very good varnish, free entirely from all brittleness, may be formed by dissolving as much gum animi, as the oil will take, in old nut or poppy oil...* (Dossie 1758: 415).

Con frecuencia, los motivos decorativos, realizados entre los distintos estratos de barniz, eran ejecutados con pan de oro y de plata, según los métodos tradicionales de dorado; al agua y al aceite y solían combinarse en una misma obra panes metálicos de distintas tonalidades, en función de su aleación, al fin de conseguir contrastes de color. Lo mismo sucedía con los elementos bruñidos -que ofrecían un brillo similar al del oro molido- y aquellos sin bruñir o mates<sup>[14]</sup>. La conjugación entre zonas doradas de distinto color y de diferentes intensidades de brillo, permitía efectos estéticos muy logrados y aportaba profundidad a las escenas. Era habitual la combinación entre el oro y la plata en una misma obra, esta última fue muy empleada en las carnaciones de las figuras representadas [figuras 9a, 9b].



**Figura 9 a y b.**-Chinerías doradas y plateadas sobre fondo de laca roja. Siglo XVIII.

En el dorado al aceite la hoja metálica se adhería a los motivos, previamente dibujados, sobre la laca húmeda o bien mediante un mordiente aplicado exclusivamente en el motivo a dorar que podía consistir en un barniz, un aceite o un adhesivo como la goma arábiga o la cola de pescado. A la hora de dorar los motivos al aceite, ciertos autores recomendaban teñir el mordiente sobre el que se debían fijar los panes metálicos, con el fin de delimitar y reconocer el lugar concreto en el que esta acción debía llevarse a cabo. Watin y Salker y Parker sugerían hacerlo de rojo con bermellón (Watin 1776: 295; Stalker y Parker 1668, 1988: 37). Sin embargo, era asimismo habitual utilizar mordientes amarillos, negros (Caró, Rizzo y Silverman 2019:10) o blancos, estos últimos principalmente para el plateado<sup>[15]</sup>.

Para la ejecución de los motivos decorativos dorados y plateados podía asimismo recurrirse a un sistema que en algunos textos se denomina “pintura de oro” o “de plata”. Consistía en la aplicación, a pincel, de un líquido elaborado con polvos metálicos aglutinados en sustancias como la goma arábiga, distinto tipo de barnices, colas o aceites. Este procedimiento no debe confundirse con el de la venturina, a pesar de que en ocasiones recibía la misma denominación. Por su parte, se empleaba el término estañado cuando se aplicaban soluciones a base de estaño líquido. La pintura de oro o de plata se utilizaba con frecuencia para enriquecer determinadas superficies mediante perfiles dorados, plateados o estañados. Cuando el polvo metálico utilizado para aplicar la pintura de oro se confeccionaba con diferentes metales entre los que no se incluía el oro (cobre, aluminio, estaño, latón, bronce, cinc, plomo, etc), esta sustancia podía recibir el nombre de purpurina<sup>[16]</sup> y su uso en el dorado se cita en las fuentes históricas desde el siglo XVIII. Lo encontramos por ejemplo en Palomino, dentro de la definición del verbo “broncear”, que el autor incluye en el glosario de términos de su tratado de 1715: *...Imitar a el bronce con la purpurina, sobre mano de color mordiente, a el óleo...* (Castro y Velasco 1715, 1947: 1146).

Las superficies doradas se podían asimismo “broncear”, mediante veladuras de barniz de tonalidad parda o anaranjada, con el fin de que adoptaran el aspecto del bronce “dorado de molido” (Coelho 2012: 260; Bartolomé García 2004: 17; Munaiz y Millana 1831: 215), para producir

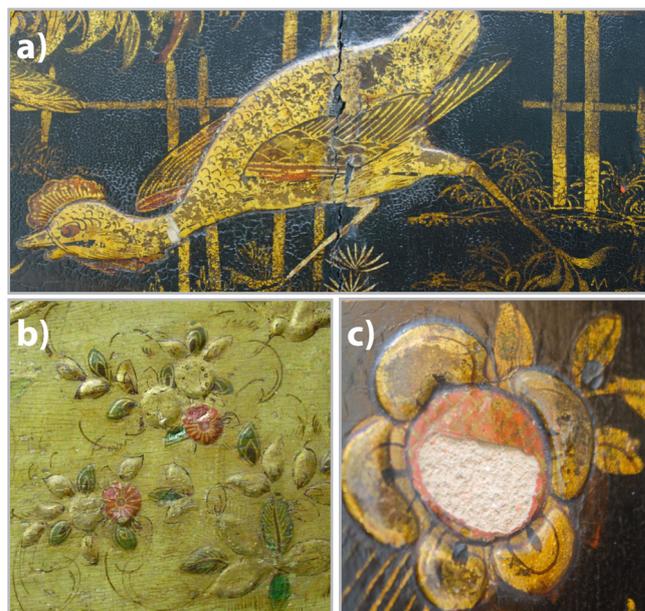
un efecto de profundidad (Caró, Rizzo y Silverman 2019:10), para dar color a las carnaciones de los personajes orientales, etc.

Las técnicas del estofado y del estarcido no son infrecuentes en las lacas europeas (Ordóñez 2015: 372; Coelho 2012: 237). Con ellas podía obtenerse una amplia gama de diseños, tanto abstractos como figurativos. Entre las decoraciones abstractas destacan las de *retícula*<sup>[17]</sup>, circunscritas en reservas de formas variadas e inspiradas en las de las lacas extremo orientales [figura 10]



**Figura 10.-** Retículas doradas realizadas según la técnica del estarcido.

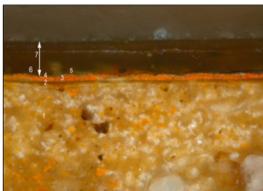
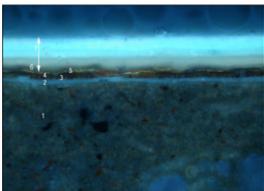
Los elementos decorativos podían perfilarse de negro<sup>[18]</sup> o de otros tonos como el verde oscuro, cuyo uso se ha constatado en lacas portuguesas (Coelho 2012: 257). A menudo se ejecutaban en relieve [figuras 11 a, b, c] y uno de los modos de conseguirlo era mediante la aplicación de estucos, confeccionados con sustancias de diferente naturaleza. Bonanni propone varias recetas para la ejecución de estos estucos o material de relleno, como aquel a base de blanco de plomo, bol de Armenia y minio



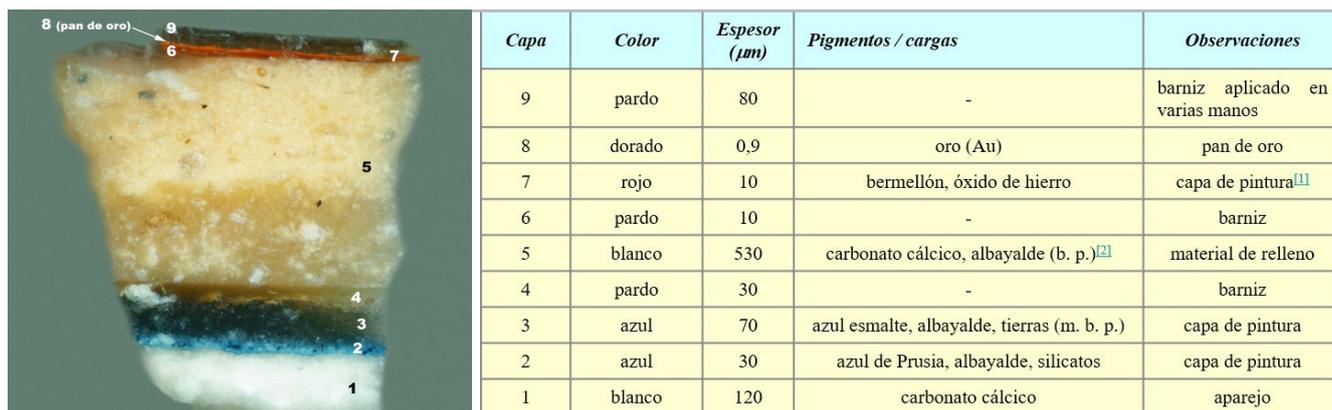
**Figura 11 a,b, c.-** Motivos con relieve en muebles lacados. El motivo de la fig.11c. presenta una laguna en la que se percibe el material de relleno.

aglutinados con cola animal (Bonanni 1731: 108). Por su parte, Watin recomienda la mezcla de carbonato cálcico, el pigmento tierra de sombra y un barniz graso (Watin 1776: 296)<sup>[19]</sup>. Stalker y Parker aconsejan el uso de una pasta confeccionada con goma arábiga, carbonato cálcico y bol de Armenia (Stalker y Parker 1668, 1998: 32, 34). Esta misma receta aparece en el tratado de Dossie (Dossie 1758: 422; Helwig 2001: 28). Según ciertos autores, a este tipo de estucos se podía añadir arena o polvo de madera (Edwards 1964: 329; Jacobson 1993: 46) [figuras 12, 13].

Capa	Color	Espesor (µm)	Pigmentos / cargas	Observaciones
7	traslúcido	85	-	barnices aplicados en varias manos
6	negro	5-10	negro de humo	capa de pintura
5	dorado	0.8	Cu 87,67 %	pan de oro falso
			Zn 12,33 %	
4	pardo	≈ 5	-	adhesivo del pan de oro falso
3	rojo	5-15	bermellón, carbonato cálcico (m. b. p.)	posible capa de pintura o asiento del pan de oro
2	traslucido	15	-	impregnación de cola de origen animal
1	amarillento	>350	carbonato cálcico, minio (m. b. p.), pigmentos de tierra de sombra (m. b. p.)	material de preparación


**Figura 12.** Toma de muestra del material de relleno de un motivo con relieve y estratigrafía en donde se ve la composición del mismo en el estrato 1: carbonato cálcico, minio y pigmentos de tierra de sombra. Debajo: imágenes obtenidas al microscopio óptico de la sección transversal de la muestra, la de la derecha iluminada con luz UV. *Cabinet* inglés. Siglo XIX (Fig. 6). Laboratorio Arte Lab (Madrid).



**Figura 13.**-Estratigrafía de la micromuestra del material de relleno de un motivo con relieve en un reloj inglés del siglo XVIII. Este material aparece en el estrato 5 y se compone de carbonato cálcico y albayalde, este último material en una baja proporción. Laboratorio Arte Lab ( Madrid).

Para la decoración de la laca se podía recurrir a otros materiales como el nácar, el metal macizo, el papel, o más raramente, la cáscara de huevo. Con respecto al nácar, las cualidades estéticas de este material lo hacían propicio para múltiples aplicaciones. A veces se utilizaban piezas irregulares de reducido tamaño que se esparcían sobre la superficie a imitación de una de las modalidades decorativas de la laca japonesa denominada *mijinmaki* (Kawamura 2013: 441). En ocasiones servía para configurar cenefas o franjas ornamentales que delimitaban reservas con escenas, elementos figurativos, retículas, etc. En el siglo XIX el nácar contribuyó a caracterizar un estilo de muebles II Imperio de laca negra con chinerías, flores y otras formas orgánicas doradas y pintadas sobre soportes de madera y/o de “cartón piedra”<sup>[20]</sup> [figura 14]. En este género de producción destacó la empresa británica Jennens & Bettridge, establecida en Birmingham entre 1815 y 1864.

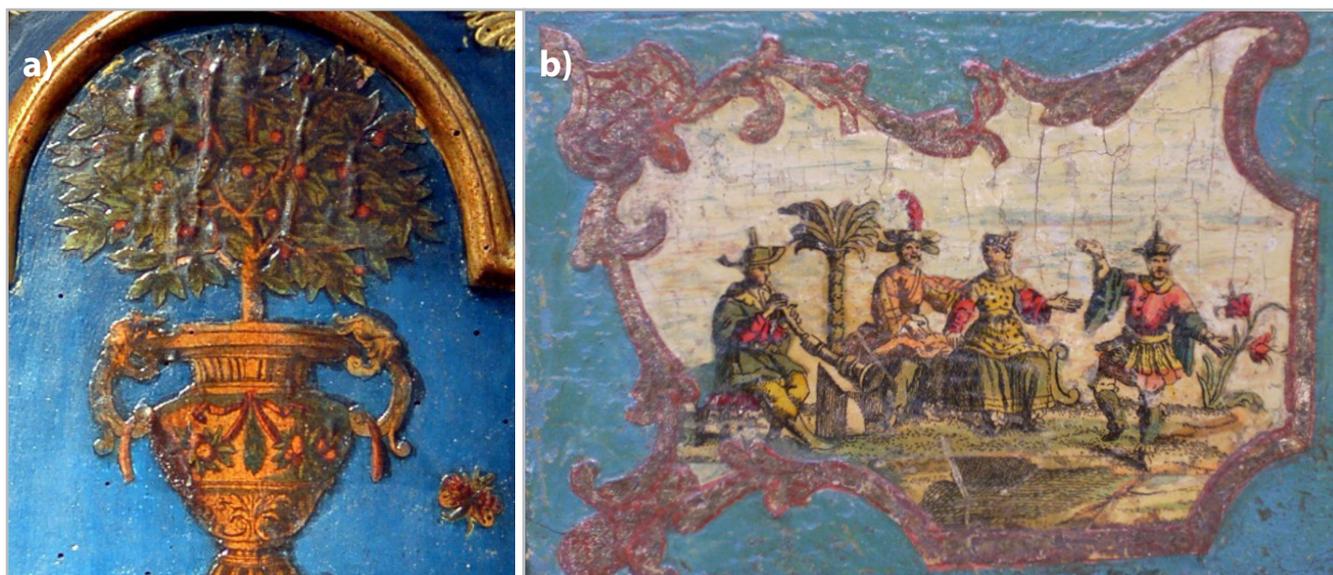


**Figura 14.**-Tablero de mesa lacada de fondo negro sobre soporte de “cartón piedra” y madera con aplicaciones de nácar y pintura al óleo. Siglo XIX. Museo Nacional de Artes Decorativas. N° INV 17787. © Museo Nacional de Artes Decorativas.

En cuanto a las decoraciones con cáscara de huevo, estas llegaron a tener gran fortuna en el siglo XX, dentro del movimiento Art decó y a imitación del *Tamago-no-mijinmaki* japonés, un método que consistía en esparcir, sobre la superficie de la laca, partículas irregulares de dicho material.

El papel, además de utilizarse según la modalidad del “cartón piedra” antes descrita, se empleaba según el procedimiento del *arte povera* también denominado *laca povera*, *laca contraffata* o *decoupage*, que consistía en la decoración de los objetos lacados mediante recortes de grabados coloreados (Van Hauwermeiren-Echement 2008: 3,4). Dicha técnica, de tradición occidental, se desarrolló en las lacas europeas principalmente durante el siglo XVIII, con la intención de responder, con costes menores, a la enorme demanda europea de piezas lacadas y adquirió gran protagonismo en Venecia<sup>[21]</sup> [figuras 15a, 15b]. Los grabados para el *arte povera* se difundieron desde famosos talleres de grabado como el de la familia Remondini de Bassano o los de Marco Ricci 1676-1730, Giuseppe Zaiss 1709- 1784, Francesco Zucarelli 1702-1788, Teodoro Viero 1740-1819, Giuseppe Wagner 1706-1780 o Robert Sayers 1725-1794<sup>[22]</sup>, en ocasiones mediante la venta ambulante (Cesari 2004 a: 40; Cesari 2004 b: 67-71; Zotti Minci 1994: 91-111; Di Castro 1983: 755), por lo que es difícil establecer la nacionalidad de las obras así decoradas<sup>[23]</sup>.

En los siglos XVIII y XIX fueron muchos los diletantes que practicaron la *laca povera* (Huth 1972: 65, 72; Webb 2000: 140). De hecho, Sayers, en su publicación *The Ladies Amusement or the whole art of japanning made easy* de 1762, proporcionó diseños para aficionados (Sayers 1762, 1966: 25; Webb 2000: 140)<sup>[24]</sup>. Entre los motivos de los grabados destacan los orientales, los de tipo pastoril, y no faltan las escenas cinegéticas, teatrales, musicales, devocionales o aquellas en las que aparecen personajes desempeñando oficios variados. También encontramos representaciones aisladas de animales o flores. Los paisajes, las escenas y los personajes de la “Commedia dell’ Arte” italiana suelen ser asimismo habituales.



**Figura 15 a, b.-** Recortables de papel en muebles de *arte povera*.

Los recortables se fijaban a las superficies lacadas según distintos métodos: podía hacerse directamente sobre la laca húmeda o también mediante otras sustancias mordientes como aceites, barnices, adhesivos como la cola de pescado, gomas como la arábica, etc (AAVV 2006: 98-99; Watin 1776: 281-283; Lorenzetti 1938: 15). Finalmente, la obra recibía diversas manos de barniz lo que, además de aportar el lustre requerido, servía para proteger los grabados. En la documentación española, los ejemplares elaborados según esta técnica vienen descritos comúnmente con expresiones como “papeles cortados” u otras similares (Ordóñez 2015: 378-379). Sirva de ejemplo la siguiente cita extractada de una relación de bienes pertenecientes a la reina Isabel de Farnesio del Palacio de San Ildefonso de 1774...*Una Messa de Charol blanco con su Naveta, y llave con pies de Cabra, toda guarnecida de difer.<sup>tes</sup> Arvoledas Caserías, y Figuras de papeles cortados y guarniciones dor.<sup>das</sup> tiene dos pies y me.<sup>o</sup> de alto; dos de ancho y tres de largo...*<sup>[25]</sup>

Una vez aplicados todos los estratos de materia en las lacas y realizada la decoración, las capas finales de barniz se iban puliendo y dejando secar previamente a la extensión del siguiente, con el fin de conseguir una superficie perfectamente lisa, algo necesario para obtener el brillo final deseado. Los últimos estratos de barniz se pulimentaban con enorme meticulosidad, para lo cual se empleaban distintos materiales, como el trípoli o polvo de pizarra, la piedra pómez pulverizada, la raíz de alkanet, el cristal pulverizado, el polvo de esmeril, el abrasivo vegetal conocido como “cola de caballo” (Agricola 1789: 152-153)<sup>[26]</sup> o la piel de tiburón, unidos, en ocasiones, a determinados aceites. Otro producto abrasivo que se recomienda en la literatura técnica para esta tarea es la harina. Bonanni señala que dicho material contribuía a la eliminación del exceso de grasa, tras haberse tratado previamente la superficie, con trípoli y aceite de oliva (Bonanni 1731: 119).

## Conclusiones

A modo de conclusión podemos constatar que la metodología de estudio que concilia la investigación histórica y los análisis científicos, el conocimiento empírico y la incorporación progresiva de los resultados de las investigaciones que van surgiendo en torno a este tema, ofrece una valiosa información sobre las técnicas de ejecución de esta rica parcela de bienes culturales hasta ahora poco e inmerecidamente transitada en nuestro país. Con este artículo esperamos haber contribuido a despertar interés sobre ella y a incentivar su estudio. De hecho, el conocimiento en profundidad de estas obras, tan delicadas como complejas a nivel tecnológico, puede evitar tratamientos irreversibles como algunos que lamentablemente han recibido a través del tiempo.

## Agradecimientos

Museo de Saint Louis (Missouri); Museo de Pontevedra; Museo Nacional de Artes Decorativas (Madrid); Museo de Bellas Arte de Bilbao; Arte-Lab (Madrid)

## Notas

[1] Muy utilizado en Portugal, sobre todo en el Norte (Coelho 2012: 212).

[2] Madera autóctona de Inglaterra muy empleada en este país como soporte de las lacas.

[3] Conviene señalar que a menudo se eludía el aparejo por diversas circunstancias, algo que se refleja tanto en la documentación histórica como en los estudios científicos llevados a cabo en obras lacadas (Ordóñez 2015: 336; Caró, Rizzo y Silverman 2018: 5-6).

[4] De los treinta y siete estudios científicos llevados a cabo en mi tesis doctoral solo he encontrado este azul en las piezas correspondientes a dos relojes ingleses del siglo XVIII (Ordóñez 2015: 487-493).

[5] Se trata de uno de los términos más utilizados en España en el pasado para designar la técnica decorativa de la laca (Ordóñez 2015: 121-125).

[6] AGP. AP. San Ildefonso. Caja 13568. (*Inventario General de Pinturas, Muebles y otras Alhajas de la Reina Ntra. S.<sup>ra</sup> q<sup>e</sup> tiene en el Palacio del R. Sitio de San Ildephonso, ejecutado de orden del Rey Nuestro señor en el año de 1746*).

[7] AGP. AP. San Ildefonso. Caja 13554.

[8] Una variedad del cuarzo con placas de mica que producen unos reflejos brillantes dorados conocidos como efecto *aventurinado* (Kroustallis 2008: 413).

[9] Un ejemplo de imitación del carey, puede verse en un *cabinet* lacado inglés de hacia 1690-1700 del Museo Victoria & Albert de Londres. N<sup>o</sup> Inv: W. 20:1 a 16-1959. <http://collections.vam.ac.uk/item/O53113/cabinet-on-stand/> (consulta 20. 4. 2019).

[10] A principios del siglo XVIII el artífice alemán Schnell se especializó en realizar jarrones de madera lacada a imitación de los de porcelana (Huth 1972: 74; Ordóñez 2015: 98).

[11] Lo que está aún por ser verificado.

[12] Esta resina es la que aparece en mayor proporción formando parte de los barnices en los objetos de laca europea analizados (Ordóñez 2015: 550, 661).

[13] El término *goma anime* podía referirse a una variante del copal, también a una resina que exuda un árbol tropical americano llamado *Hymen[ae]a courbaril*, muy empleada en la confección de barnices (Kroustallis 2008: 247, 248).

[14] Watin aconseja combinar ambos sistemas en función de los elementos a representar (Watin 1776: 301-303).

[15] En el tratado de Sánchez Caro de 1866 se aconseja, además, dar una mano de cola de pescado sobre el estrato de barniz, previamente aplicado a la superficie del objeto, quedando excluidas de esta acción las zonas delimitadas para ser doradas. De esta manera, una vez seca la cola, se evitaría que el polvo o los fragmentos de metal espolvoreado cayeran fuera de las mismas (Sánchez Caro 1866: 36).

[16] La purpurina podía obtenerse tanto en estado sólido como líquido al aglutinarse con distintos barnices o adhesivos. En la actualidad también se denomina purpurina a determinadas sustancias sintéticas, sólidas, líquidas o pastosas (Kroustallis 2008: 366-367).

[17] Estas retículas, muy habituales en el *japanning*, solían conocerse como *latticework*, *strapwork* o *diapper pattern* entre otras denominaciones.

[18] Para ello se utilizaba frecuentemente el carbón vegetal (Ordóñez 2015: 510, 561) o el negro humo (Coelho 2012: 257).

[19] Este material de relleno es el que más se acerca al identificado en los estudios de determinados objetos lacados (Dundsmore 2007: 70; Ordóñez 2015: 481-482). Resultados similares se han evidenciado en la composición del material de relleno amarillento de un *cabinet* británico del siglo XIX restaurado recientemente en Arcas (2018). Tras el análisis de una micromuestra tomada del mismo se ha constatado la existencia de carbonato cálcico, minio y tierra de sombra, con un espesor de 270 micras.

[20] El "cartón piedra" o *papier maché* podía realizarse mediante pasta de papel que se dejaba secar y después se moldeaba, o bien con láminas superpuestas de papel. A veces este tipo de soporte descansaba sobre otro de madera.

[21] En Venecia los grabados eran realizados por los *miniadori*, los artesanos pertenecientes al *arte dei depentori* (Santini 2003: 25-54, nota 143; Morazzoni 1925: 663; Cesari 2004 b: 67).

[22] Calcografía de este artesano se localizaba en Londres. También se conocen los nombres de famosos artífices que individualmente ejecutaron grabados para el *arte povera* en distintos lugares, como el lorenés Jacques Callot en Florencia entre 1592-1635, Martin Engelbrecht 1684-1756 en Augsburgo, o Louis Crépy 1680-1746 en París (AAVV 2006: 98; Huth 1972: 65; Fernández Martín 2009: 6-7).

[23] Además, los Remondini plagiaron los diseños de ciertas calcografías de Augsburgo, Roma, el Tirol o Inglaterra y en 1780, varios artesanos abandonaron dicha tipografía, se dispersaron por Europa y, a consecuencia de ello, se multiplicaron las réplicas de sus grabados en varios países (Cesari 2004 b: 71; Infelisi 1999; Chiesura 2015: 5,13).

[24] Según Huth, en 1780 el cronista de Augsburgo Paul von Stetten señala a España y Alemania como los países en los que el *arte povera* era más común entre los aficionados (Huth 1972: 62).

[25] AGP. AP. San Ildefonso. Caja 13568.

[26] La cola de caballo es una pequeña planta denominada *equisetum hyemale*. Carece de hojas y se compone de una simple caña parecida al bambú. Crece en los suelos arenosos, de donde absorbe sílice que deposita en su superficie, con lo que se convierte en algo parecido a la lija. Fue muy utilizada para pulir las superficies de laca japonesa (Ordóñez 2004: 5).

## Referencias

AAVV. (2006). *European furniture in the Metropolitan Museum of Art. Highlights of the Collection*. The Metropolitan Museum of Art. Yale University Press. Londres.

AGRICOLA, F. (1788). *Trattenimenti Sulle Vernici, ed altre materie utili, e dilettevoli sparse nelle opere di molti accreditati autori, Particolarmente nel Trattato assai stimato del P. Filippo Bonanni,*

- Raccolti, ed ordinati da Francesco Agricola. In Ravenna nella Stamperia Roveri presso I Fratelli Fava.
- ANÓNIMO. (1806). *Secretos raros de artes y oficios*. Imprenta de Villapando. Madrid.
- BARTOLOMÉ GARCÍA, F. R. (2004). "Terminología básica de técnicas y materiales de la policromía". *Akobe: restauración y conservación de bienes culturales*, Zutabe: 17.
- BONANNI, F. (1731). *Trattato sopra la vernice detta comunemente cinese*. Roma.
- BRUQUETAS, R. (2002). *Técnicas y materiales de la pintura española en los siglos de oro*. Fundación de apoyo a la Historia del Arte Hispánico. Madrid.
- CARÓ, F., RIZZO, A., SILVERMAN, C. (2019). An Investigation of Eighteenth -Century English Red Japanned Furniture in the Collection of the Metropolitan Museum of Art". Nueva York. *Studies in Conservation*: 5-10. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00393630.2018.1563356> (consulta 1-3-2019)
- CASTRO Y VELASCO, A. A. P. (1715). *El museo pictórico y escala óptica. Índice de términos privativos de la pintura*. (Ed. cons. Aguilar. Madrid 1947). Vol 1.
- CESARI, P. (2004 a). "Storia del mobile Picto in Italia" en AAVV., *Mobili Dipinti. Ícaro edizioni*. Módena: 40.
- CESARI, P. (2004 b). "La lacca povera e la calcografía dei Remondini" en AAVV., *Mobili Dipinti. Ícaro edizioni*. Módena: 67, 71.
- CHIESURA, C. (2015). *Tra iconografía e comercio: i Remondini e le stampe devozionali*. Tesi di Laura. Università Ca' Foscari. Venezia.
- COELHO, D. (2012). *O mobiliário pintado em Portugal do século XVIII. Materiais, técnicas e estado de conservação*. Tesis Doctoral. Universidad Católica portuguesa.
- COURAJOD, L. (1878). *Livre Journal de Lazare Duvaux*. 1748-1758, Vol. 2. Société des Bibliophiles François. París.
- DI CASTRO, D. (1983). "Lacca" en AAVV., *Enciclopedia delle Arti Decorative*. Vol. 2. Coord. Álvarez González Palacios. Fabbri, Milán.
- DOSSIE, R. (1758). *The hand maid to the Arts*. J. Nourse. Londres.
- DUNSMORE, A. (2007). "The Giles Grendey Daybed in the National Gallery of Victoria". *Proceeding of the Inaugural Australian Furnishing History Symposium*, Canberra, Greg Peters and Jun Kennedy. Woodbridge, Suffolk: 7
- EDWARDS, R. (1964). *The shorter dictionary of English furniture from the middle ages to the late georgian period*. Spring book. Londres.
- FERNÁNDEZ MARTÍN, M. (2009). "A propósito de unos muebles de lacca povera en una colección sevillana". *Actas del Congreso Internacional Imagen Apariencia*. Murcia.
- JACOBSON, D. (1993). *Chinoiserie*. Phaidon. Nueva York.
- HELWIG, K. (2001). "Materials Analysis of a Japanned Long Case Clock". *Journal of the Canadian Association for Conservation* Vol. 26. Ottawa: 1-8. [https://www.cac-accr.ca/wp-content/uploads/2018/12/Vol26\\_doc4.pdf](https://www.cac-accr.ca/wp-content/uploads/2018/12/Vol26_doc4.pdf) (consulta 4. 5. 2018).
- HUTH, H. (1972). *Lacquer of the West*. The history of a craft and an industry 1550 -1950. The University of Chicago Press. Chicago/ Londres.
- INFELISE, M., MARINI, P. (1990). *Remondini. Un Editore del Settecento*. Electa. Milán.
- KAWAMURA, Y. (2013). "Laca japonesa *urushi* de estilo *namban* en España. Vías de su llegada y destinos en AAVV., *Lacas Namban. Huellas de Japón en España. IV Centenario de la Embajada Keicho*, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte/ Fundación Japón. Madrid.
- KROUSTALLIS, S. K. (2008). *Diccionario de materias y técnicas*. Ministerio de Cultura. Madrid.
- LORENZETTI, G. (1938). *Lacche veneziane del Settecento*. Cat. Exp. Carlo Ferrari. Venecia.
- MONTÓN, B. (1757). *Secretos de Artes Liberales y mecánicas recopiladas y traducidas de varios y selectos autores, que tratan de phisica, pintura, arquitectura, óptica, chimica, doradura y charoles con otras varias curiosidades ingeniosas*. Oficina de los Herederos de Martínez, Pamplona.
- MORAZZONI, G. (1925). *Lacche veneziane del secolo XVIII*. Dédalo. Milán, Roma.
- MUNAIZ y MILLANA, R. (1831). *Manual de curiosidades artísticas y entretenimientos útiles*. Impresor Francisco Sánchez. Reus.
- NIEUHOF, J. (1668). *Legatio batavica ad magnum Tartariæ chamum Sungteium, modernum Sinæ imperatorem*. Jacob Van Meurs. Amsterdam.
- ORDÓÑEZ, C. (2004). "Dos maestros de la talla en madera. Grinling Gibbons y Andrea Brustolon" en AAVV., *Curso sobre mobiliario antiguo*. GEIIC. Madrid: 5. [http://www.geiic.com/files/Publicaciones/Dos\\_maestros\\_talla\\_madera.pdf8](http://www.geiic.com/files/Publicaciones/Dos_maestros_talla_madera.pdf8) (consulta 1. 12. 2018).
- ORDÓÑEZ, C. (2011). "Japanning en España. Un lote de muebles de lacca color escarlata realizado por Giles Grendey", *Estudi del moble*, nº 14: 15.
- ORDÓÑEZ, C. (2015). *De lacas y charoles en España. Siglos XVI-XIX*. Tesis doctoral. UCM.

ORDÓÑEZ, C., RODRIGUEZ SIMÓN, L. R. (2018). "Análisis estilístico y técnico científico de un *cabinet* inédito de laca británica del siglo XVIII conservado en España". *Ge- conservación* nº 13: 18-25.

ORELLANA, F. V. (1755). *Tratado de barnices y charoles*. Imprenta de Joseph García. Valencia.

PAOLINI, C. (2005). *Glossario delle tecniche artistiche e del restauro*. Edizioni Palazzo Spinelli. Florencia.

SÁNCHEZ CARO, I. (1866). *El artista práctico. Manual que trata de pintura, dorado y plateado*. Tipografía de don Juan Oliveres. Barcelona.

SANTINI, C. (2003). *Le lacche dei Veneziani*. Artioli. Módena.

SAYERS, R. (1762). *The Ladies Amusement, or the Whole Art of Japanning Made Easy*. Londres, (Ed. cons. Newport, 1966): 25.

STALKER, J., PARKER, G. (1998) *A treatise of japanning and varnishing*. 1668. Ed. cons. Alec Trianti. Reading.

VAN HAUWERMEIREN – ECHEMENT, C. (2008). "La découverte d' une porte en lacca povera du XVIII<sup>e</sup> siècle vénitien. Quand restauration s'associe avec dégradation". *Ceroart*, nº 2, <http://ceroart.revues.org/495?lang=en> (consulta 13. 4. 2 019).

WATIN, J.F. (1766). *L'art de faire et d'employer le vernis ou L'art du vernisseur*, Durand París, 1772.

WEBB, M. (2000). *Laquer: Technology and Conservation*. Butterworth--Heinemann. Oxford.

WOLVESPERGES, T. (2000). *Le meuble français en laque au XVIII<sup>e</sup> siècle*. Editions Racine. Bruselas.

ZOTTI MINCI, C. A. (1994). *Le stampe popolari dei Remondini*. Neri Pozza. Vincenza.

Artículo enviado el 01/10/2019  
Artículo aceptado el 17/12/2019



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.691>

## Autor/es



**Cristina Ordóñez Goded**  
[cristina@arcaz.com](mailto:cristina@arcaz.com)  
Arcaz Restauración S.L

Doctora en Historia del Arte por la Universidad Complutense de Madrid con la tesis doctoral: *De lacas y charoles en España. Siglos XVI-XIX*. Premio extraordinario de doctorado 2017. Investigadora independiente. Conservadora-Restauradora de mobiliario. Socia fundadora de Arcaz Restauración S.L. Madrid.

[www.arcaz.com](http://www.arcaz.com)

<https://ucm.academia.edu/CristinaOrdo%C3%B1ez>

# Conservation of archaeological copper alloy artifacts from Al Ain National Museum collection: the role of desalination

Diego Lois, Eduarda Vieira, Eleonora Bosetto

**Abstract:** Al Ain National Museum is in the city of Al Ain, within the Emirate of Abu Dhabi, United Arab Emirates. This museum preserves an excellent collection of copper alloy archeological objects from different archeological sites around Al Ain all dated from the Neolithic era. We have observed a high concentration of chloride salts in most objects, which favors their corrosion. We conjecture that this may be the case for most sites located in arid zones near the coast.

This paper aims to highlight the desalination treatments used during the conservation project of these artifacts. Desalination was the central treatment to achieve their stabilization and to promote their preservation for as long as possible. While the B70 desalination system has proven to be quite effective; salts still remain on the objects. Therefore, relative humidity and temperature monitoring are required to avoid variations that could reactivate sealed chlorides inside the objects.

**Keyword:** Copper alloy, stabilization, chloride, passive layer, minimal treatment

## Conservación-restauración de las colecciones arqueológicas de aleación base cobre del Museo Nacional de Al Ain: la importancia de la desalación

**Resumen:** El Museo Nacional de Al Ain se halla en la ciudad de Al Ain en el Emirato de Abu Dhabi (Emiratos Árabes Unidos). Este Museo preserva una importante colección de objetos neolíticos de aleación base cobre procedentes de diferentes yacimientos localizados en las cercanías de la misma ciudad. Durante el proceso de conservación-restauración de las piezas, se notificó la presencia acusada de iones cloro en la mayoría de los objetos procedentes de los ecosistemas áridos cercanos a la costa donde se encontraron.

Este artículo hace hincapié en los procedimientos de desalación realizados durante el proyecto por ser fundamentales para alcanzar la estabilización de los objetos garantizando su preservación por el mayor tiempo posible. El proceso conocido como B70 ha resultado ser efectivo a pesar de no eliminar todas las sales de los objetos, lo que exige un control de los parámetros ambientales para asegurar la salvaguarda de las colecciones.

**Palabras clave:** Aleación base-cobre, estabilización, cloruro, capa de pasivación, mínima intervención

## Conservação-restauração das coleções arqueológicas em liga de cobre do Museu Nacional de Al Ain: a importância da dessalinização

**Resumo:** O Museu Nacional de Al Ain localiza-se na cidade de Al Ain, nos Emiratos Árabes Unidos. Este museu preserva uma importante coleção de objetos arqueológicos neolíticos em liga de cobre provenientes de jazidas localizadas na periferia da mesma cidade. Durante o processo de conservação e restauro das peças foi detetada a presença de iões cloreto na maioria dos objetos oriundos de ecossistemas áridos da zona costeira onde foram encontrados.

Este artigo reforça a importância dos procedimentos de dessalinização realizados durante o projeto por se revelarem fundamentais para se alcançar a estabilização dos objetos assim uma preservação mais duradoura dos mesmos. O processo conhecido por B70 foi eficaz apesar de não eliminar a totalidade dos sais dos objetos, o que exige um controlo dos parâmetros ambientais para se assegurar a salvaguarda das coleções.

**Palavras-chave:** Liga de cobre, estabilização, cloretos, camada passivante, intervenção mínima

## Introduction

Restoration and conservation works are not novelty in United Arab Emirates. In fact, Al Ain National Museum holds reports dating back to the 1970s about conservation applied during that decade by French and German cultural conservators –restorers at this Museum. However, no conservation reports from this institution have been published, despite the great historical value and technical quality of the treated artifacts.

Al Ain Oasis displays remnants dating back to Late Stone Age and settlements from the Neolithic until present, though not in the Late pre-Islamic or Late Antique periods, which is relatively rare in the Arabian Peninsula and may reflect its favorable location at the foothills of the Hajar Mountains, with available water and copper sources (Yildirim and El Masri, 2010; Powers, 2015). The relevance of these settlements has prompted an active conservation policy (Muhamad and Chabbi 2013).

Copper objects are particularly important for the reconstruction of the pre-history of Arabian Peninsula (Magee, 1998) as well as elsewhere (Paterakis, 1999). Accordingly, a conservation project was conceived concerning copper alloy objects at Al Ain National Museum, with the primary goal of stabilizing the artifacts and later protecting them for display or storage. Mineralized organic materials were also present in the objects, especially in daggers and knives handles.

Copper alloy objects are particularly sensitive to corrosion, because marine aerosol provides a rich source of chloride, which is abundant in the Al Ain soil. Therefore, desalination was an essential process for the metal conservation and its preservation over time (Logan 2007).

Contrary to widespread belief, copper chlorides do not participate directly in the corrosion process, which is electrochemically driven (Tait, 2012), but they precipitate as highly soluble salts, which are highly hygroscopic. The presence of these salts favors the condensation of water at relative humidity levels well below saturation. Condensation of water leads to brine films, whose high ionic strength favors the dissolution of Cu and other metals and electrochemical redox processes. This has been long understood by the archeologists and archeological conservators (Scott, 1990, 2002). The problem is particularly severe at coastal areas such as those in the Arabian Peninsula where there are high marine aerosol loads combined with a moderate relative humidity during the day, which can increase (higher than the deliquescence humidity of chloride salts) during the night. These conditions favor copper corrosion (Lin and Frankel 2013).

The archaeological science literature is rich regarding metallic objects treatment (Dillmann 2014). Cleaning, inhibition, consolidation, adhesion, reintegration or

protections are common procedures in the field of metal conservation. Treatments include laser (Diaz and Garcia 2015), cryogenic cleanings, electrolytic reductions with potentiostats, gaseous plasma, bioprotection (Joseph, 2012) or nanotechnology (Faraldi, 2017) to get punctual and less aggressive cleanings over the metal surface.

However, dechlorinating is poorly addressed in publications related to the metal conservation field and data about this topic is quite scarce. Some of the published works highlight the cleaning of the objects and the metal finishing, inhibition or protection directly without previous desalinations (Pasies 2005).

Specifically, salinity stabilization methods such as the B70 system (also known as Thouvenin method) (Bertholon and Relier 1990) or the Organ method (Organ, 1977) are the standard, but their effectiveness and limitations are rarely discussed. Chlorides vaporization by the use of laser through the artifact surface is also a common process. Sometimes this procedure is adopted for copper alloys along with 2-amino-5-mercapto-1,3,4-tiadiazol (AMT) (Ganorkar 1988), because this product can be used both as an inhibitor and a dechlorinator. Desalination is also frequently performed by immersion in deionized water where electrical conductivity is measured in order to calculate chloride concentration.

We think that the lack of literature favors the absence of adequate treatment protocols for the desalination phase. Nevertheless, this treatment is the longest and the most important when it comes to the conservation of archaeological metals. In fact, previous treatments performed on few objects have hindered the effectiveness of the treatment, probably due to lack of knowledge about active corrosion.

This paper aims to highlight the achievements within the conservation process of the archaeological artifacts from Al Ain National Museum collection, with emphasis on desalination procedures. We think that this can be an adequate solution for the more critical problem of coastal areas in arid countries such as the Arabian Peninsula, than in other environments.

## Materials and methods

### —The artifacts and the local conditions

This conservation project concerns copper alloy objects displayed inside the showcases 140, 141, 148, 151 and 152 in the Archaeological Room at Al Ain National Museum. These objects come from Qattara dated in 1800 B.C.; Hili North and Garn Bint Saud dated in 900-600 B.C; and Rumailah dated in 1000-500 B.C. In addition, a number of relevant objects located in the Archaeological warehouse inside the Museum were also included in the project.

These artifacts come from Qattara dated in 1800 B.C. and Hili garden, dated in 2400-2000 B.C.

Al Ain environmental conditions are characterized by a moderate relative humidity (average 60%) and high temperature (27°C) throughout the year. While these average conditions appear to be good for metal preservation, daily temperature fluctuations cause significant increases in relative humidity. Thus, even though the climate is generally dry during the day, relative humidity is generally above 75% (at which point water condensates on NaCl crystals) during the night. Furthermore, the soil where the objects were once buried is rich in mineral salts, especially iron salts and chlorides, mostly coming from marine aerosol and groundwater evaporation at the oasis. As mentioned in the introduction, chloride salts are known to favor corrosion, albeit indirectly, and are thus an undesirable for metal preservation.

During this conservation project <sup>[1]</sup> 95 copper alloy archaeological objects were restored, 38 during the first phase, 24 during the second phase and 33 during the third phase [table 1].

Artifacts were generally in fair condition; most of them were complete and still contain a high percent of metal core. The objects' surfaces were usually covered by dust, inorganic deposits, and concretions belonging to the burial environment where the objects were excavated. Artifacts showed physical damage such as scratches, fissures and fractures due to their utility in life and/or their burial environment. Bumps are also common due to the chlorides presence. A few of them were fragmented as well.

Corrosion products deformed the artifact's surface. The most common precipitates in corrosion layers were copper oxides formed by cuprite (Cu<sub>2</sub>O) visible as red-brown and, less frequent, tenorite (CuO) typified by black. A large range of carbonates was also frequent. As possible compounds that can be found, we emphasize malachite Cu<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub> green, and azurite (Cu<sub>3</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>) blue among the most common. Oxides and carbonates form a passivation layer or "patina", a natural protective cover that protects the metal core against deterioration agents. Unfortunately, chloride salts were quite frequent. Several different types of chlorides were found, such as nantochite (CuCl), which is waxy and grey and paraatachamite ((Cu<sup>2+</sup>)<sub>3</sub>(Cu Zn)(OH)<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub>), a green-blue powdery deposit that causes pitting corrosion.

In addition, few artifacts exhibited old conservation treatments, such as over cleanings, adhesions and protective layers made by thermoplastic or thermostable resins painted in order to imitate metal colors. Volumetric reintegrations made with colored epoxy resins and acrylic paint coatings covering the surface were also frequent. Paradoxically, over cleaning may have been predominately responsible for active corrosion on the objects. Weapons

**Table 1.-** Copper alloy artifacts restored during three campaigns.

ARCHAEOLOGICAL SITE	MUSEUM LOCATION	OBJECTS
<i>1st conservation phase</i>		
Qattara tomb 1800 B.C.	Showcase 141	17 Swords
		6 Daggers and knives
		9 Spearheads
Hili North 2200-2000 B.C.	Showcase 140	6 Spearheads
<i>2nd conservation phase</i>		
Qattara tomb 1800 B.C.	Archaeological Storage	2 swords
		1 knife
		1 Dagger
		1 spearhead
		7 bracelets
		2 rings
Hili 8 2200-2000 B.C.	Showcase 151	1 Axe
Garn Bint Saud 900-600 B.C.	Showcase 151 and 152	2 Spearheads
		4 Swords
		3 Bowls
<i>3rd conservation phase</i>		
Rumailah 1000-500 B.C.	Showcase 148	4 anklets
		1000-500 B.C.
		2 farm tools
		1 needle
		2 dagger
Garn Bint Saud 1000-500 B.C.	Showcase 148	1 chisel
		6 arrowheads
Qattara tomb 1800 B.C.	Archaeological Storage	3 rings
		2 bracelets
		3 arrowheads
		3 swords
		1 spearhead
Hili garden 2400-2000 B.C.	Archaeological Storage	2 rods
		1 razor

from Garn Bint Saud or anklets from Rumailah settlement are a good example of this undesirable condition. In these cases, old cleaning processes removed passivation metal layers exposing artifacts' metal cores to the deteriorating agents for long time (Diaz and Garcia 2011).

### —The conservation process

The present treatment consisted of the following steps:

1) In the absence of a database, a conservation report datasheet was created for each object to document all the information regarding the conservation treatment. This report contains relevant information to identify each artifact inside the Museum, as well as the object condition (type of surface deposits and corrosion, corrosion products identification, old treatments and physical damages) and treatments proposal (conservation procedures and products).

2) Once the artifact condition was known and treatment had been decided, each object was photographed; this documentation register involved the production of general and details photos before and during all the conservation phases until the end of the procedure.

3) Prior to cleaning, a number of objects were pre-consolidated with acrylic resins because of the fragility of some areas. Traces of mineralized wood or probably bone or horn badly adhered to the surface and fragile borders, which could not support a mechanical cleaning, were also consolidated in order to avoid their loss.

4) Furthermore, qualitative chemical analyses were performed whenever any doubt came up about the nature of corrosion products. Accordingly, samples were often taken and put in contact with acid drops to identify the corrosion products throughout spot tests before the cleaning procedure.

5) The cleaning consisted in removing dust, inorganic and organic concretions from the object's surface. The process started with dry mechanical systems: scalpels, brushes and micro drills helped by wet mechanical methods. Whenever more attention was required, the process was done under microscope to avoid scratching or removing important areas such as wood remains. Samples of organic components, sand or corrosion products were saved often in polyethylene bags for possible future analysis.

Objects showing old treatments like adhesions and protective coatings were treated by the total or near-total removal of the old glue and acrylic resin layers. Mechanical procedures were supported with heat specifically to remove these treatments.

6) Once the cleaning was finished, the objects were desalinated. This is probably the most important step to

reach the metal stabilization and guarantee their future protection.

The stabilization of chloride salts is essential to achieve this goal. Details are explained below.

B70 system consists in the application of two baths; the first one (90% methanol + 6.8% deionized water + 3.2% ammonia), removes chlorides [figure 7a] and the second (90% methanol + 10% hydrogen peroxide), forms an oxide layer on crops holes [figure 7b]. The procedure is repeated several times before testing its effectiveness in the humidity chamber.

The process known as the Organ Method consists in mechanical removal of the chlorides (paratachamite) and introducing silver oxide mixed with ethanol into the outcrop holes. Then, objects are placed in a humidity chamber for 24 hours in order to form silver chloride, a stable component.

Almost half of the objects presented active corrosion inside the fissures and under bumps on their surface. The process began with several baths following the B70 system when the chloride concentration was very high. However, if the concentration of these ions was low, silver oxide was applied in the outcrops

The desalination success was determined by inspecting them under a microscope after removing the objects from the humidity chamber to verify the presence of active chlorides (paraatachamite). When new outcrops appeared, the desalination process was repeated until stabilization.

7) Once the artifacts were stabilized, the inhibition process was performed. Inhibitors are substances that help to preserve metals stability by inhibiting and delaying the formation of corrosion products (Cano and Lafuente 2013). Inhibition was done in a dynamic warm bath (60°C) of benzotriazole in ethanol.

8) After inhibition, metals were protected with an acrylic warm resin bath (40° C) diluted in an aromatic hydrocarbon.

9) When the objects were fragmented, fragments were bonded. Adhesion involved the application of an acrylic resin with an organic solvent. When a structural adhesion was necessary, a thermoplastic resin was used and a previous protection of the fragments borders with an acrylic resin was made.

10) Volumetric reintegration was considered in just one case (3877/402) because structural adhesion to support a fragile and fragmented area was needed. The volume reintegration was carried out with color putty composed by a thermoplastic resin and natural pigments and, once again, the artifact borders had been previously protected with an acrylic resin.

11) Finally, a warm coating of microcrystalline wax diluted in an aliphatic hydrocarbon was applied in order to ensure that the metal surface became water-repellent and to remove the brightness caused by previous treatment.

12) Once the conservation process was finished, objects were placed inside of museum showcases with silica gel and vapor-phase corrosion inhibitors for an appropriate preservation. Artifacts that could not be displayed at the moment were conveniently stored in the Museum's archaeological storage. These objects were wrapped in polyester sheets and placed in high-density polyethylene foam with the objects shape. Additionally, this foam is filled in polyethylene hermetic containers with silica gel for an optimal metal conservation.

For optimal preservation, metals were stored in an environment where temperature is around  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  and relative humidity parameters no higher than 35-40%. Additionally, the protective coating system may require lower light levels, between 150-200 lux with a radiation component of less than 75 m W / lumen and restricted display periods (Diaz and Garcia 2015).

### — Desalination

As mentioned, copper alloy object desalination is an essential process for its proper preservation; however, it can be long and tedious. The main reason is the high chlorine ions concentration on the objects, which requires countless repetitions of procedures, particularly in case of the artifacts that were previously over cleaned.

The desalination protocol evolved two desalination systems: the Organ method and the B70 system.

The Organ method was used occasionally on objects that showed very specific outcrops. Its use was limited because it leaves silver compounds remains (Martinez 2016) and black coloration on the artifact surface, despite of its usefulness.

On the other hand, the B70 system was most commonly used on objects that maintained a high concentration of chlorine ions, and showed good results. The treatment was repeated several times according to the active corrosion evidences on the artifacts before testing its effectiveness in the humidity chamber.

During the third conservation phase, stainless-steel containers were used to improve the effectiveness of B70 system. These containers allowed to make warm dynamic baths in an atmosphere without oxygen, increasing the effectiveness of the treatment. Moreover, most of the baths were individual for each object and each B70 bath was measured with the conductivity meter at the end of the procedure.

In those circumstances where stabilization was more complicated to achieve, the B70 system and the silver oxide method were combined. Firstly, the B70 system was performed several times as usual, and later silver oxide was added in those most vulnerable areas before testing the treatment effectiveness in the humidity chamber.

### — Results and discussion

The main goal of this paper is to highlight and to evaluate dechlorinating treatments carried out during three conservation phases. Simultaneously, the effectiveness and the harmlessness of desalination systems have been evaluated and improved as well as the damage these processes could cause on these artifacts.

Throughout the first phase [figure 1], artifacts stabilization was more complicated than initially expected because of high salts concentration. The Organ Method previously used, was inappropriate since its recurrent use could produce silver chloride visible as dark spots on the artifacts surface. Consequently, the B70 system began to be used with good results. Once the treatment was finished, its effectiveness was tested in the humidity chamber.

During the second phase [figure 2], the same B70 bath system was applied with good results except for those objects over-cleaned before that required more immersions. In those cases whenever stabilization became quite difficult (more than 25 baths) to achieve, B70 system was complemented by Organ Method but with a smaller number of applications than in the first phase.

During of these two phases, a post validation of the stability thought the humidity chamber test was performed. Therefore, those artifacts treated under the B70 system procedure were grouped in plastic containers, where the treatment was repeated intuitively before testing its effectiveness in the humidity chamber test. Despite the successful stabilization of metals this chloride removal procedure was not very precise. Furthermore, it required the submission of artifacts to the humidity test without a proper knowledge of chloride concentration of the baths. This test presents a high risk for these kind of metal objects due to their vulnerability to such high relative humidity ranges.

Regarding to the third phase, we aimed to solve the problem of introducing objects into the humidity chamber without proper knowledge of the chlorides concentration. Besides, we already knew those objects over-cleaned before were more difficult to stabilize, so we also tried to improve dechlorinating effectiveness as well. So that, individual baths were carried out, mostly for the objects in the hermetic stainless-steel containers. The

duration between each bath was 30 minutes with an initial transparent coloration. As immersions were repeated, the first bath (90% methanol + 6.8% deionized water + 3.2% ammonia) color turned increasingly blue because of its saturation. Therefore, a new solution was necessary to keep the baths effectiveness, particularly with those objects that were recently treated. These objects needed a change of the solution more regularly than those that had not been restored previously since their stabilization was more problematic. Moreover, after each bath, the conductivity was measured. All baths carried out were recorded in a data table indicating their conductivity as well whenever a change of solution was made according

to the bath saturation. The results obtained during the third phase are shown in figures 3 and 4. These graphics include measurements of each B70 bath. The compilation of these data was useful for determining the optimal time to test the objects in the humidity chamber avoiding unnecessary damage.

Those objects that did not contain chlorides after finishing of the cleaning process were additionally tested in the humidity chamber as a preventive measure, mainly because similar objects from the same archaeological sites presented chlorine ions on their surface before or during the conservation procedures.

— *Statistic study of desalination treatments during 1<sup>st</sup> phase*

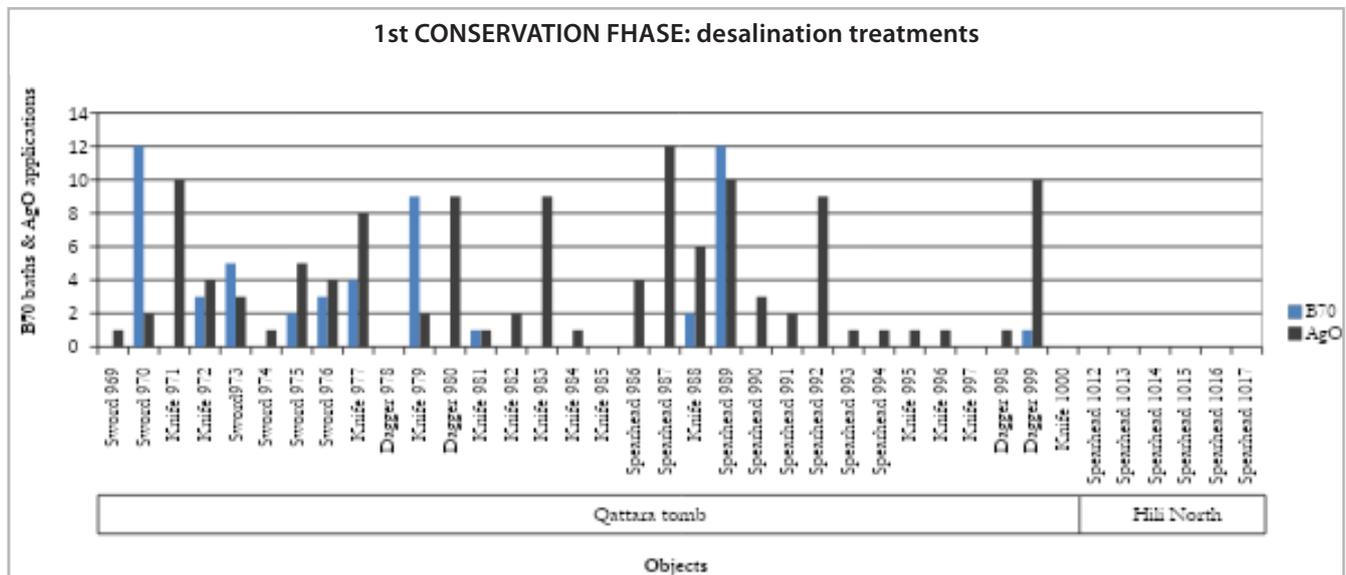


Figure 1.- Desalination progress of some artifacts from Qattara tomb and some over cleaned artifacts before from Hili North.

— *Statistic study of desalination treatments during 2<sup>st</sup> phase*

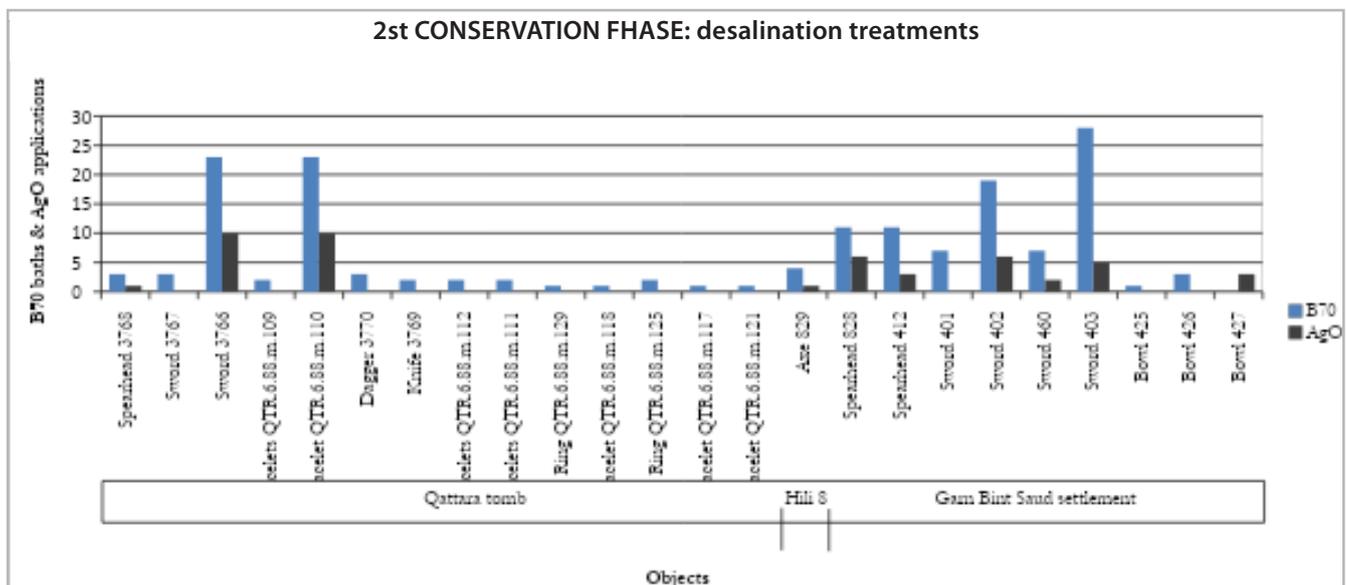
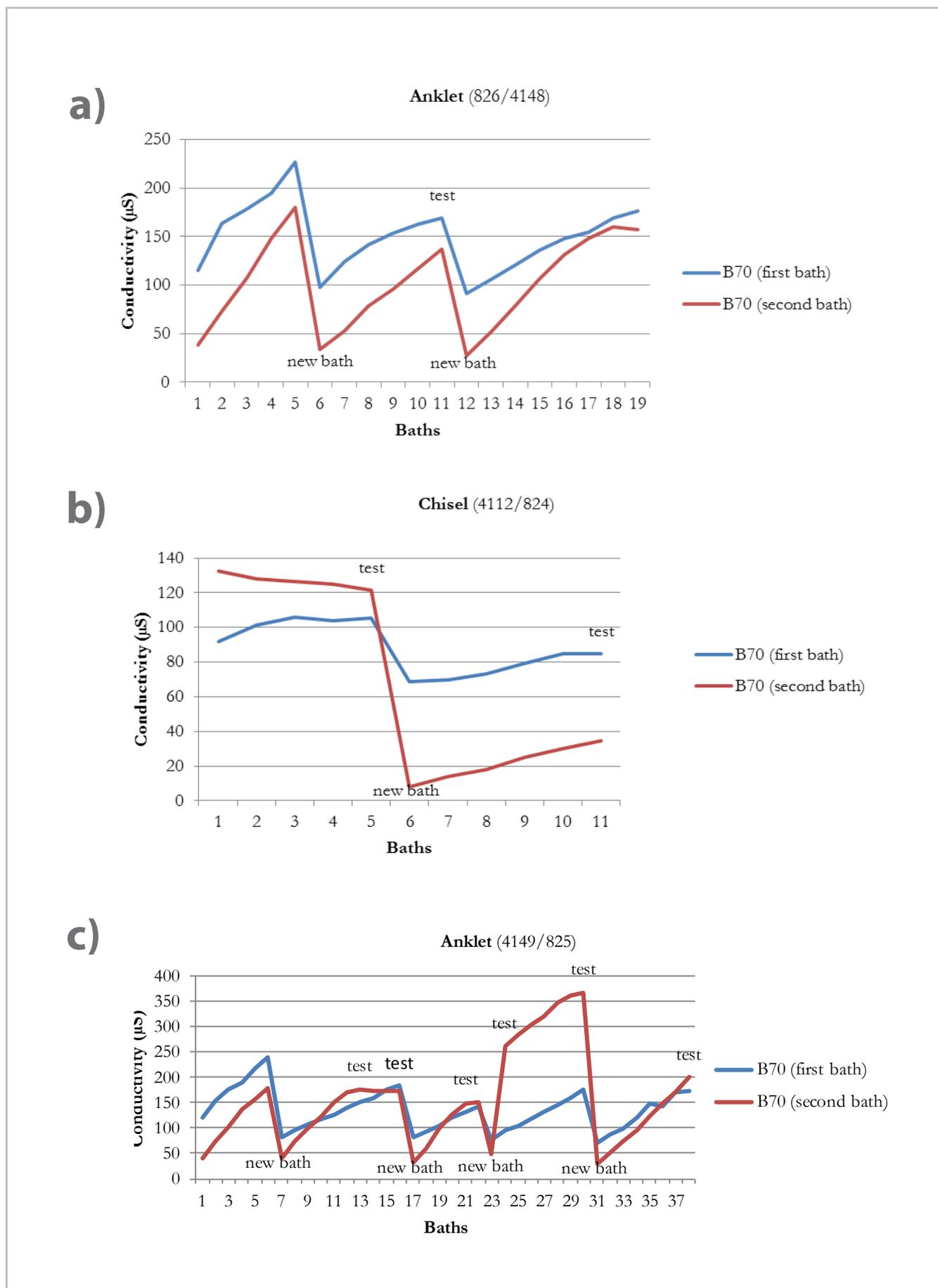
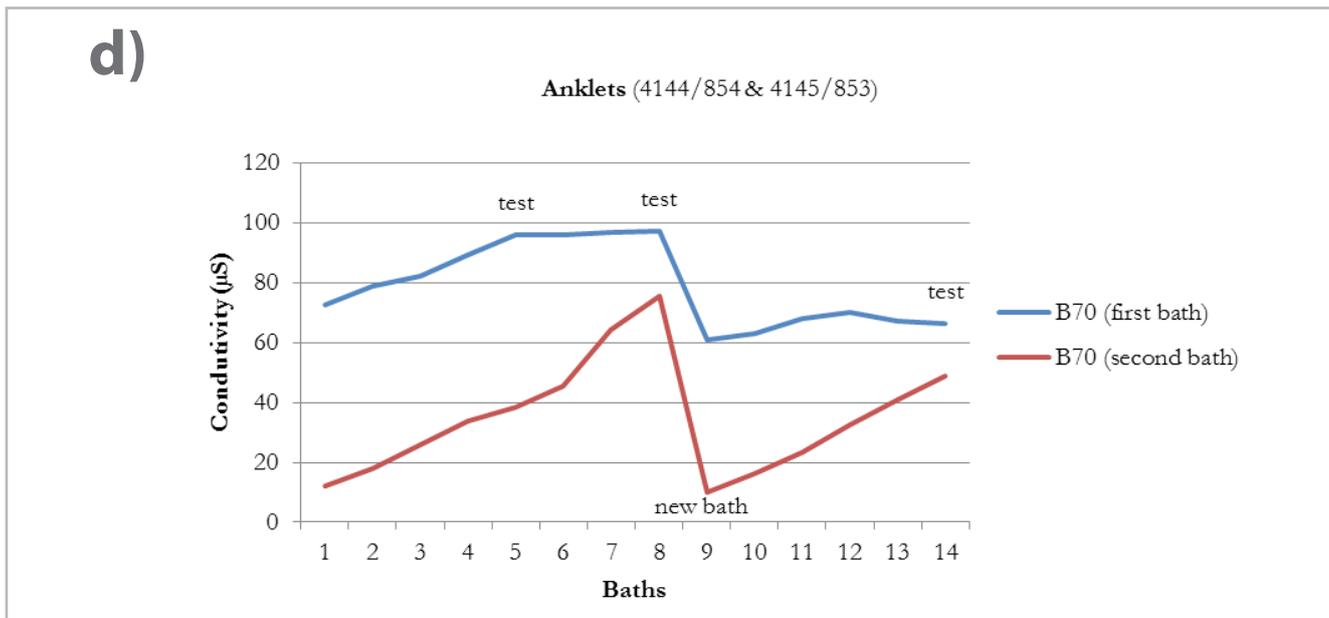


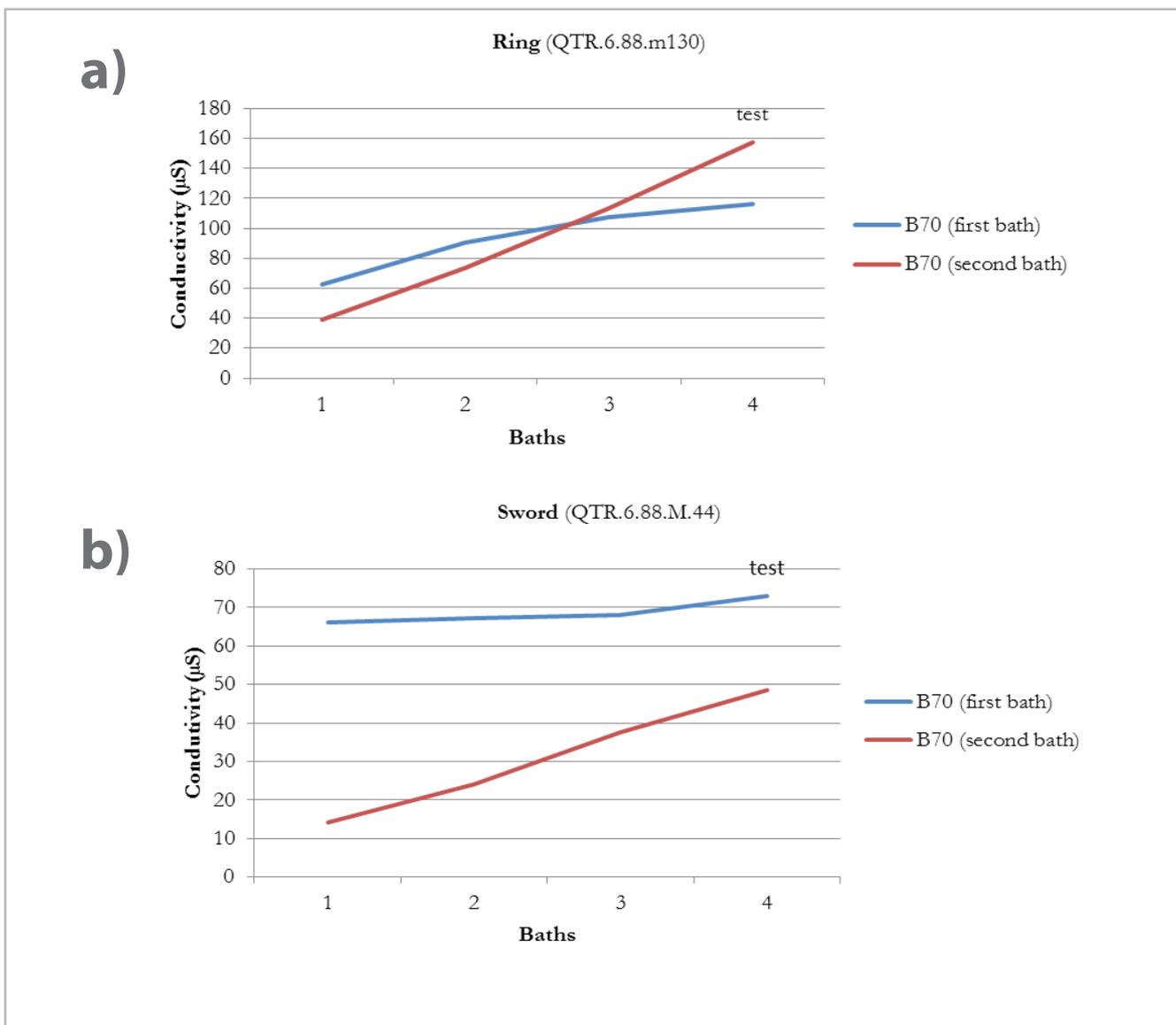
Figure 2.- Desalination progress of some artifacts from Qattara tomb and some over cleaned artifacts before from Hili North and Garn Bint Saud settlement.

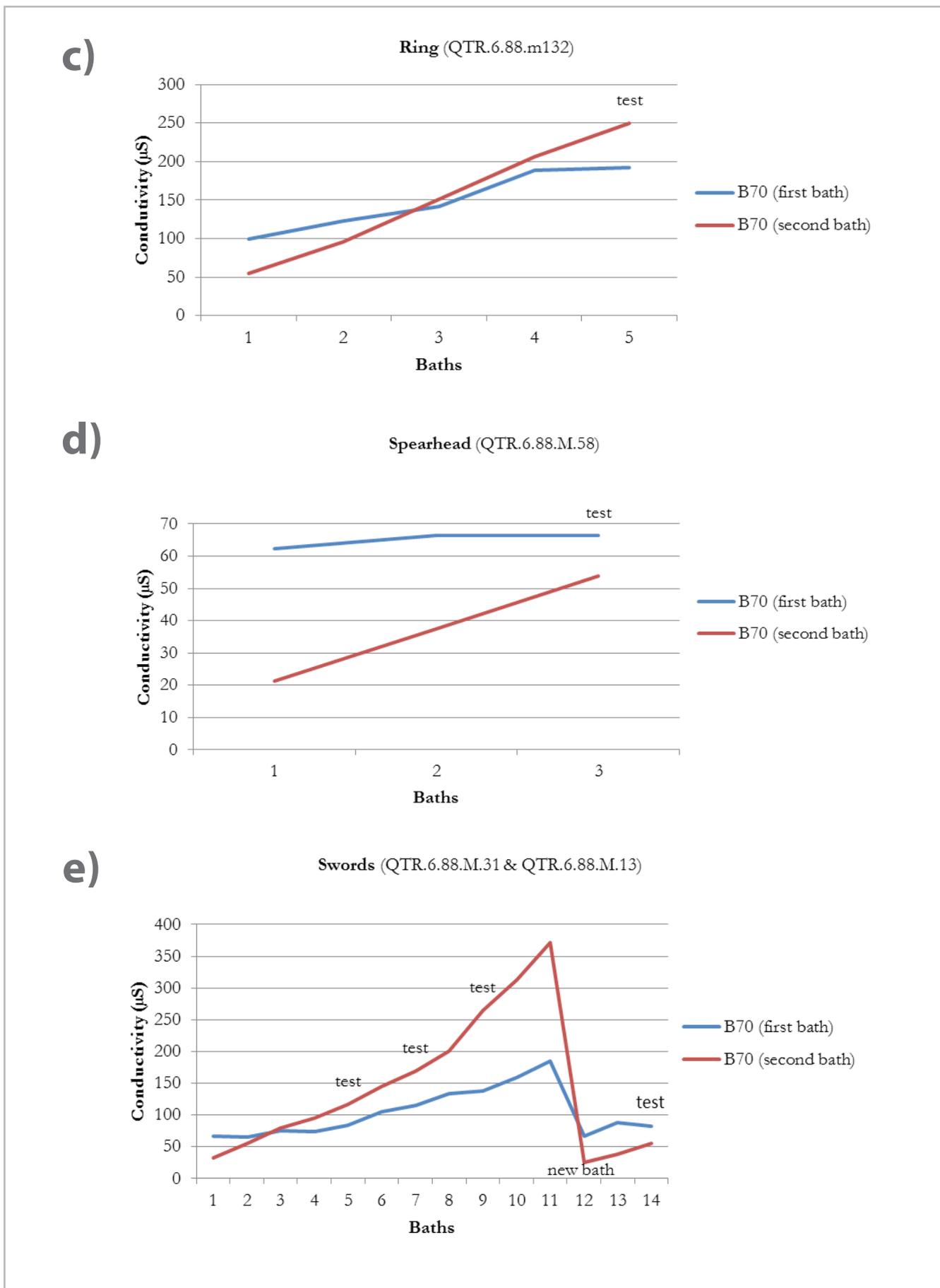
— *Statistic study of desalination treatments during 3<sup>rd</sup> phase*<sup>[2]</sup>



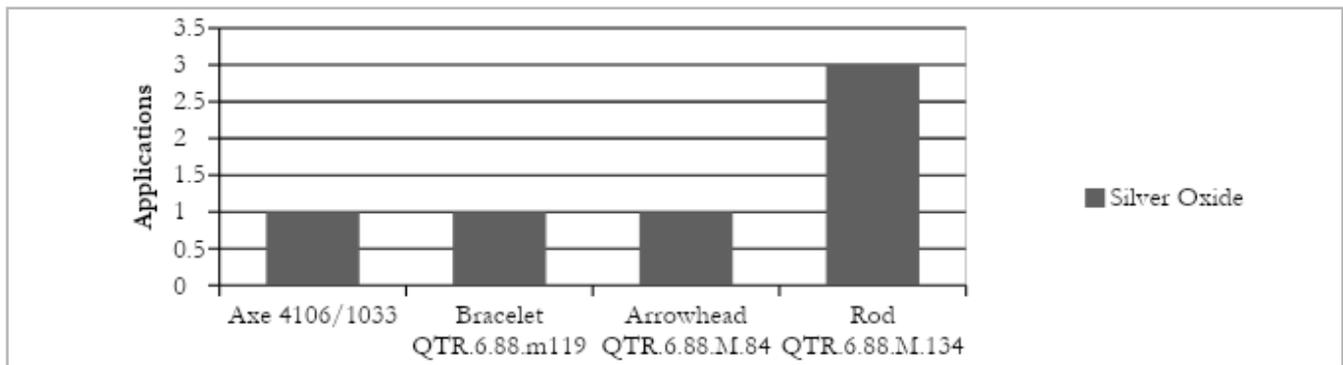


**Figure 3.-** Desalination progress of some over cleaned artifacts before from Rumailah settlement. a) Anklet (826/4148); b) Chisel (4112/824); c) Anklet (4149/825); d) Anklets (4144/854 & 4145/853).





**Figure 4.-** Desalination progress of some artifacts from Qattara tomb. a) Ring (QTR.6.88.m130); b) Sword (QTR.6.88.M.44); c) Ring (QTR.6.88.m132); d) Spearhead (QTR.6.88.M.58); e) Swords (QTR.6.88.M.31 & QTR.6.88.M.13).



**Figure 5.-** Metal stabilization with silver oxide procedure carried on the artifacts from Rumailah (axe) and Qattara tomb (bracelet, arrowhead and rod)

— *Desalination treatments results of each phase*

1st conservation phase			
Objects from Qattara tomb			
Desalination system	Applications <sup>ner</sup>	Objects <sup>ner</sup>	Average
B70 system	54	11	4.9
AgO	122	27	4.51

2nd conservation phase				
Objects from Qattara tomb, Hili 8 and Garn Bint Saud settlement				
Desalination system		Applications <sup>ner</sup>	Objects <sup>ner</sup>	Average
B70 system	All the objects	159	24	6.6
	Objects not restored before from Qattara tomb	81	15	5.4
	Over-cleaned objects from Garn Bint Saud and Hili 8	78	9	8.6
AgO		47	10	4.7

3rd conservation phase				
Objects from Qattara tomb and Rumailah settlement				
Desalination system		Applications <sup>ner</sup>	Objects <sup>ner</sup>	Average
B70 system	All the objects	112	11	10.18
	Objects not restored before from Qattara tomb	30	6	5
	Over-cleaned objects from Rumailah settlement	82	5	16.4
AgO		6	4	1.5

		TOTAL		
Desalination system		Applications ner	Objects ner	Average
B70 system	All the objects	325	46	7.06
	Objects not restored before	165	32	5.15
	Over-cleaned objects	160	14	11.42
AgO		175	31	5.64

**Figure 6.-** Desalination treatment results achieved during three restoration phases. a) First restoration phase; b) Second restoration phase; c) Third restoration phase; d) Total results from three restoration phases.

According to the final results [figure 6] obtained from the desalination processes [figures 1, 2, 3, 4 and 5], we can conclude that during the three conservation phases, those objects which have not been treated before needed an average of 5 baths each to stabilize them. However, those objects that have been restored previously needed more baths, around 11 baths. Objects from Garn Bint Saud [figure 14 and 18b] required 8.6 average baths while artifacts from Rumailah [figures 2 and 6b] reached a much higher average with 16.4 baths. As an example, one anklet (4149/825) from Rumailah [figues 3c] received the biggest number of B70 baths, specifically 38 baths to reach its stabilization.

Such a large number of baths was required because of a deeper penetration of corrosion. Despite the high presence of chlorides in Al Ain soil because of marine aerosol, we think that this deeper corrosion may have been also caused by previous treatments, which removed the passivation layer that protects the weapon naturally, thus exposing the metal core to deterioration agents.

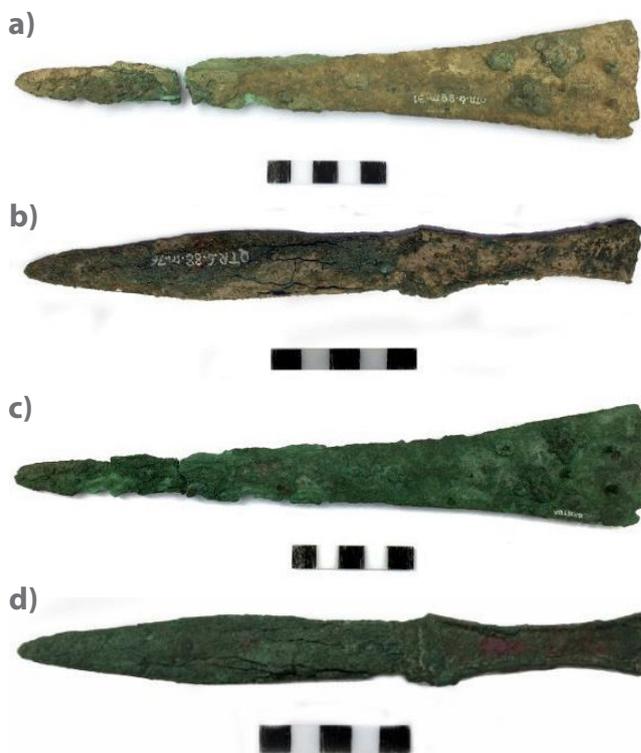
B70 treatment was quite effective on objects with higher salt concentration, particularly those not treated before and those that had lost the passivation layer during old treatments as well. Moreover, a soft cleaning is essential to guarantee the stabilization of the objects throughout the conservation procedure.

The Thouvenin method, also known as the B70 method has recently become a subject of criticism (Schmutzler *et al.*, 2017) because ammonium generates highly alkaline conditions that may favor the formation of copper hydroxides, which may turn to copper oxide under heating.

Although, the high number of baths we did not notice color changes in objects not restored before. In fact, comparing two recently treated objects where one received desalination treatment [figue 7a and figure 7c] and another that did not [figure 7b and figure 7d], both show a similar visual result. Furthermore, there are no color changes when comparing objects that were recently treated with those that had been treated during the first phase two years ago. All the artifacts preserved the same natural green patina typical of the copper carbonate. Indeed, the formation of

copper hydroxides can be discarded and the objects remain stable, without copper chlorides in their surface.

However, in case of the anklet (4149-825) from Rumailah, which was over-cleaned before and received 38 baths to attain its stabilization, we noticed a color change of the metal core to green-blue, probably because of the high number of baths. New case studies and characterization analysis would be suitable to confirm this hypothesis in order to know if this copper hydroxides formations could be a limitation of this treatment. Nevertheless, this was the only exception in 46 desalted objects with this system during three conservation campaigns.



**Figure 7.-** Two restored artifacts from Qattara tomb: a) Sword before treatment; b) Knife before treatment; c) Sword treated during third phase with the B70 system which does not show color changes after desalting process; b) Knife restored during first phase which was not desalted during restoration treatment..

On the other hand, system of sealing chlorides with silver oxide was barely used after the first phase because of the silver remains on the surface and on the dark spots that were typically found after its use. We started using this procedure during the first phase, when we were unaware of the spreading of active corrosion. Once we understood that chlorides concentration was very high on most objects and the treatment had to be repeated regularly to reach their stabilization, we decided to change to the B70 desalination system.

Both desalination systems were considered due to the limited resources of the laboratory in that moment, and mainly because the short duration of each project didn't allow to execute longer treatments. Once the cleaning procedure was performed, stabilization was often necessary since this process activated the corrosion due of the high concentration of salts inside the artifacts and lack the environmental control in the laboratory.

Although the desalination procedure was successful, according to these results, preventive conservation is crucial to guarantee the objects long-term stabilization. Dechlorinating is not a definitive treatment; relative humidity and temperature control inside the museum and adequate storage are essential to avoid the chlorides reactivation on the objects. Moreover, these desalination treatments require monitoring of its effectiveness as well as possible side effects these procedures could cause on these collections in the long-term

Even when the intervention was completed with success, there were some processes that could have been carried out in a different way in order to improve the results of the restoration. A localized B70 method application (Martinez 2016) when the chlorides presence is not too evident could be considered. This may prevent desalination by immersion, which could chemically or visually modify the object. Additionally, this procedure could replace silver oxide treatment.

On the other hand, measurement systems such as a titrator (Raskova 2007) or a colorimeter would be interesting because it can provide more accurate results to identify and measure the chlorides concentration in a solution.

It is well known that lasers would help to increase the quality of work without any risk of damaging the object surface. However, in some occasions, they also can provide a good result against salts (Atanassova 2019) when laser beam fall upon and vaporize them.

The search for an adequate system that guarantees correct preservation of these collections with our scarce resources was our concern and priority and the results are offered here.

## Conclusions

Despite such a large number of baths, we can confirm that the desalination procedure was successful. All of the objects were successfully stabilized, even those that were previously over-cleaned.

In conclusion, baths measurement was a remarkable improvement, which allowed to significantly improve the B70 desalination system by increasing the effectiveness of the treatment and with better achievements, making it possible to eliminate unnecessary damages for the objects during humidity tests. These results can be verified by examining the small number of desalination baths received by those objects restored during third conservation phase from Qattara tomb. In addition, no treatment side effects have been detected typified by color changes in the form of hydroxides. B70 system was carried out on 78 objects with active corrosion during the three conservation phases and all of them were stabilized, including those that had been over cleaned previously. Furthermore, at the end of each conservation phase, aesthetic results obtained over all the objects have been always the correct one.

However, despite of the treatment's effectiveness on objects without previous interventions, and even considering the different archaeological sites of their provenance, we would like to highlight the role that the loss of patina caused by old cleanings might have had in the stabilization procedures. In fact, these objects required a large number of baths to reach stabilization, and this increased number of baths can cause color changes on its surface as occurred with one object from Rumailah. On the other hand, due to the lack of specific bibliography about the use of this method, it is difficult to compare the results obtained in our study with those obtained by other authors.

Despite their stabilization, there are some objects that still are vulnerable to the humidity. To face this problem, preventive conservation is essential to ensure the collection's preservation with special emphasis on the relative humidity and temperature control to avoid sudden variations that could reactivate sealed chlorides inside the copper alloy objects.

Monitoring of collections condition is essential in order to evaluate the dechlorinating effectiveness as well as side effects these processes may have on the objects. Techniques such as neutron and X-ray tomography –still under study- (Jacot-Guillarmod 2019) can be used for this purpose.

Metal desalination is rarely considered but was an essential phase for the correct metal preservation in this case due to the high chlorine ion concentration inside the objects. We think that this could be a frequent problem in most extremely arid conditions, especially in coastal areas

or near oases. In these environmental conditions, chloride salts in the soil either from evaporation of groundwater discharge or by deposition of marine aerosol. Moreover, moderate humidity may favor water condensation on hygroscopic salts during the night, when temperature falls causing relative humidity to increase. Condensation and the ensuing brine formation enable metal corrosion. Therefore, conservation projects in these types of environments should emphasize desalination.

## Notes

[1] This conservation project was divided in three campaigns due to the other commitment of the team with the general survey of Al Ain National Museum collections and to the need of setting priorities within the artifacts condition during our visa stay.

[2] As mentioned above, two immersions are involved in the B70 system, the first one removes chlorides (blue color) and the second forms an oxide layer on crops holes (red color). Each bath (indicated on the X axis) is made up of these two immersions to complete the desalination procedure. This process was repeated until the conductivity was low enough in order to pass the humidity chamber test. However, a few objects previously restored needed to continue with the desalination process but the duration of our project disallowed to extend the treatment. Therefore the humidity chamber test was carried out sooner than recommended.

## Acknowledgements

We would like to thank the generous support of Dr. Walid Yashin Al Tikriti, Head of Archaeology Section; Susana Marecos, Associate Conservator; Ibrahim AlLababidi, Laboratory Supervisor; Aysha Al Ghaithi and Amna AlMehairi, Register Department, and the rest of the Al Ain National Museum staff including Daniel Suarez, Principal Conservator from Abu Dhabi Department of Culture & Tourism Authority and Hermann Pertzborn Managing director UAE and his staff from Hasenkamp for their involvement during the project.

## References

ATANASSOVA, V., PENKOVA, P., KOSTADINOV, I., AVDEEV, G. (2019). "Laser removal of chlorine from historical metallic objects". Proceedings Volume 11047, *20th International Conference and School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*. Event: International Conference and School on Quantum Electronics "Laser Physics and Applications": ICSQE 2018, 2018, Nessebar, Bulgaria. <https://doi.org/10.1117/12.2516813>

BERTHOLON R.; RELIER, C. (1990). Les métaux archéologiques. La Conservation en archéologie. Berducou, M. C. Paris, Masson, p. 163-221.

BERTHOLON, R. (2001). "Characterisation and Location of Original Surface of Corroded Metallic Archaeological Objects". *Surface Engineering* 17: 240-246.

CANO, E., LAFUENTE, D. (2013): "Corrosion inhibitors for the preservation of metallic heritage artefacts". Woodhead Publishing. EFC book nº 65, *Corrosion and conservation of cultural heritage artefacts*.

DÍAZ, S., GARCÍA, E. (2011): *Técnicas metodológicas aplicadas a la conservación-restauración del patrimonio metálico*. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Publicaciones, Información y Documentación. Ministerio de Cultura, Educación y Deporte, España.

DÍAZ, S., GARCÍA, E. (2015): Proyecto COREMANS. Criterios de intervención en materiales metálicos. Ed. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Publicaciones, Información y Documentación. Ministerio de Cultura, Educación y Deporte, España.

DILLMANN, P., BERANGER, G., PICCARDO, P., MATTHIESSEN, H. (2014). *Corrosion of Metallic Heritage Artefacts: Investigation, Conservation and Prediction of Long Term Behaviour*. Volumen 48 de European Federation of Corrosion (EFC) Series.

FARALDI, F., CORTESE, B., CASCHERA, D., DI CARLO, G., RICCUCCI, C., DE CARO, T., INGO, G.M. (2017). "Smart conservation methodology for the preservation of copper-based objects against the hazardous corrosion". *Thin Solid Films*. Volume 622, 31 January 2017, 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.12.024>

GANORKAR, M.C., PANDIT RAO, V., GAYATHRI, P., SREENIVASA RAO, T.A. (1988). "A novel method for conservation of copper-based artifacts". *Studies in Conservation* 33(2): 97-101. <https://doi.org/10.1179/sic.1988.33.2.97>

GILBERG, M. (1987). "Friedrich Rathgen: The father of modern archaeological conservation". *Journal of the American Institute for Conservation*. Volume 26. <https://doi.org/10.1179/019713687806027843>

HERRÁEZ, J. A., DE SALAMANCA, G., PASTOR, M<sup>a</sup>. J., GIL, T (2014). *Manual de seguimiento y análisis de condiciones ambientales. Plan nacional de conservación preventiva*. Secretaría General Técnica. Subdirección general de Documentación y Publicaciones. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, España.

JACOT-GUILLARMOD, M., SCHMIDT-OTT, K., MANNES, D., KAESTNER, A., LEHMANN, E., GERVAIS, C. (2019). "Multi-modal tomography to assess dechlorination treatments of iron-based archaeological artifacts". *Heritage Science* 7, number 29. <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0266-x>

JOSEPH, E., CARIO, S., SIMON, A., WÖRLE, M., MAZZEO, R., JUNIER, P., JOB, D. (2012). "Protection of metal artifacts with the formation of metal oxalates complexes by *Beauveria bassiana*". *Frontiers in Microbiology*. Ed. Weiwen Zhang, Tianjin University, China. Volume 2, article 270. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2011.00270>

LIN, H., FRANKEL, G. S. (2013). "Atmospheric corrosion of Cu during constant deposition of NaCl". *Journal of The Electrochemical Society*, 160(8), C336-C344. <https://doi.org/10.1149/2.030311jes>

LOGAN, Y. (2007). *Recognizing Active Corrosion - Canadian Conservation Institute (CCI) Notes 9/1 part of CCI Notes Series 9 (Metals)*. Minister of Public Works and Government Services, Canada.

MAGEE, P. (1998). "The chronology and regional context of late prehistoric incised arrowheads in southeastern Arabia". *Arabian Archaeology and Epigraphy*, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0471.1998.tb00108.x>

MARTINEZ, I. (2016). *Estudios integrados de procesos analíticos y conservativos de bronce arqueológico. Aplicación a un casco Montefortino y materiales afines*. Universitat Politècnica de Valencia.

MUHAMAD, S. A., CHABBI, A. (2013). "Documentation and recording for the conservation of built heritage in Abu Dhabi Emirate". *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W2, 2013, 437-442. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-437-2013>

OMID, O. (2018). "A methodological approach to estimate soil corrosivity for archaeological copper alloy artefacts". *Heritage Science* 6, n°2. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0167-4>

ORGAN, M. (1977). "The current status of the treatment for corroded metal artifacts". *Corrosion and Metal Artifacts*. National Bureau of Standard Publication 479. Washington: 107-142.

PASÍES, T. (2005). "Los trabajos de conservación y restauración del patrimonio metálico". *Boletín del Centro Arqueológico Saguntino*. ARSE 39. 57-62.

PATERAKIS, A. B. (1999). "The hidden secrets of copper alloy artifacts in the Athenian Agora". In *Metals 2001: Proceedings of the International Conference on Metals Conservation*. 232-236.

POWER, T. (2015). "A First Ceramic Chronology for the Late Islamic Arabian Gulf". *Journal of Islamic Archaeology*, 2(1), 1-33. <https://doi.org/10.1558/jia.v2i1.27011>

RASKOVA, Z., KRCMA, F. (2007). *Plasmachemical reduction for the conservation of archaeological artefacts*. Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade, vol. 82, 159-170.

RODGERS, BA (2004). "Archaeological Copper (Cu) and Copper Alloys". *The Archaeologist's Manual for Conservation*. 105-122. [https://doi.org/10.1007/0-306-48613-X\\_5](https://doi.org/10.1007/0-306-48613-X_5)

SCHMUTZLER, B., EGGERT, G., KUHN-WAWRZINEK, C. F. (2017). "Copper (II) hydroxide on artefacts: Corrosion, conservation, colourants". *Studies in Conservation*, 62(2), 61-67. <https://doi.org/10.1080/00393630.2016.1215591>

SCOTT, D. A. (2002). *Copper and bronze in art: corrosion, colorants, conservation*. Getty publications.

SCOTT, D. A. (1990). "Bronze disease: a review of some chemical problems and the role of relative humidity". *Journal of the American Institute for Conservation*, 29(2), 193-206. <https://doi.org/10.1179/019713690806046064>

TAIT, W.S. (2012). *The role of chloride ions in spray package corrosion*. <https://www.spraytm.com/the-role-of-chloride-ions-in-spray-package-corrosion.html>

YILDIRIM, E., EL MASRI, S. (2010). "Master planning for heritage conservation in Al Ain Oasis", UAE. In *46th ISOCARP Congress*, Nairobi, Kenya. 19-23

### Author/s

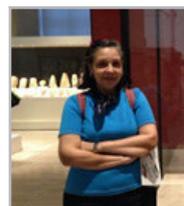


#### Diego Lois Carrera

[diegoloisca@gmail.com](mailto:diegoloisca@gmail.com)

Objects Conservator at National Research Centre of Human Evolution (CENIEH)

Diego Lois has a university degree in Archaeological Conservation (Heritage Conservation High School of Galicia, Pontevedra, Spain) and two Masters, one of Archeology and Heritage (Autonomous University of Madrid, Spain) and other on New Technologies for Cultural Heritage Immovable Conservation (University of Vigo, Spain). He is currently an objects conservator at National Research Centre of Human Evolution (CENIEH), Spain. He has worked as a conservator in national and international cultural institutions.



#### Eduarda Vieira

[evieira@porto.ucp.pt](mailto:evieira@porto.ucp.pt)

Researcher at Universidade Católica Portuguesa, Research Centre of Science and Technology of Arts (CITAR, Porto, Portugal)

Eduarda Vieira holds a PhD in Conservation and Restoration of Historic and Artistic Heritage by the Polytechnic University of Valencia (Spain), and a Master degree in Architectonic Conservation by the Évora University (Portugal). She is currently Assistant professor at the School of Arts of the Portuguese Catholic University (Conservation of Inorganic Materials), where she coordinates de PhD of Conservation and Restoration of Cultural Goods program. She is the Director of the Research Center of Science and Technology of the Arts (CITAR) and coordinator of the research focus area of Heritage, Conservation and Restoration and editor of the *Studies in Conservation and Restoration - ECR - Estudos de Conservação e Restauo* journal. She is also a member of ICOMOS and ICOM and researcher in several projects related with Preventive Conservation and Green Conservation besides supervising several PhD and master thesis.



**Eleonora Bosetto**  
[eleonora.bosetto@gmail.com](mailto:eleonora.bosetto@gmail.com)  
Conservator-restorer, Italy

Eleonora Bosetto is a cultural heritage conservator. She gained a Bachelor degree in Technologies for Conservation and Restoration of Cultural Heritage and a Master degree in Art History and Conservation of Cultural Heritage at Bologna University. Currently, she is in charge of conservation projects for national and international public institutions.

Artículo enviado el 13/04/2019  
Artículo aceptado el 26/11/2019



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.660>



## Análisis de la carga fúngica en el aire de la sala “Fragmentos de Historia a Orillas del Nilo” y del exterior del Museo de La Plata, Argentina

Andrea C. Mallo, Daniela S. Nitiu\*, Lorena A. Elíades, Mauro García Santa Cruz, Mario C. N. Saparrat

\* co-primer autor

**Resumen:** Se realizó un estudio aerobiológico de esporas fúngicas en el aire, su dinámica estacional y el análisis de la incidencia de los factores ambientales en el riesgo de biodeterioro en la sala Egipcia del Museo de La Plata. Se detectaron 18 tipos de unidades fúngicas de dispersión (esporas y otros elementos vegetativos) en la carga microbiana. El promedio anual de UFC/m<sup>3</sup> aire para los 3 sitios de la sala mostró 31158,90 elementos, comparado con 28046 en el sitio exterior. *Aspergillus niger*, *Beauveria*, *Fusarium oxysporum* y *Penicillium* fueron los tipos más abundantes. El análisis de la variación diaria de temperatura y humedad en el interior de la Sala, indicó que la variable fuera de rango fue la humedad relativa. Las estrategias combinadas de monitoreo aerobiológico proporcionan nuevas herramientas para la evaluación y predicción del tiempo de vida de los diferentes materiales.

**Palabras clave:** Sala egipcia, Museo de La Plata, aeromicobiota, carga fúngica, biodeterioro, parámetros ambientales

### Analysis of the fungal load in the air of the hall “Fragments of history at the shores of the Nile” and of the outside of the La Plata Museum, Argentina

**Abstract:** An aeromicrobiological study of fungal spores in the air, its seasonal dynamics and the analysis of the incidence of environmental factors on the risk of biodeterioration were carried out in the Egyptian room of the Museum of La Plata. Eighteen types of fungal propagules were detected. The annual average of CFU/m<sup>3</sup> air for the 3 sites of the room showed 31158.90 elements, compared to 28046 in the external site. *Aspergillus niger*, *Beauveria*, *Fusarium oxysporum* and *Penicillium* were the most abundant types. The analysis of the daily variation of temperature and humidity inside the room indicated that the out of range variable was relative humidity. The combined strategies of aerobiological monitoring provide new tools for the evaluation and prediction of the life time of the different materials.

**Keyword:** Egyptian Hall, La Plata Museum, aeromicobiota, fungal load, biodeterioration, environmental parameters

### Análise da carga fúngica no ar da sala “Fragmentos da história das margens do Nilo” e do exterior do Museu de La Plata, Argentina

**Resumo:** Foi realizado um estudo aerobiológico dos esporos de fungos no ar, a sua dinâmica sazonal e a análise da incidência de fatores ambientais no risco de deterioração biológica na sala egípcia do Museu de La Plata. Foram detetados 18 tipos de unidades de dispersão fúngica (esporos e outros elementos vegetativos) na carga microbiana. A média anual de UFC/m<sup>3</sup> de ar para os três locais da sala apresentou 31.158,90 elementos, em comparação com 28046 no local externo. *Aspergillus niger*, *Beauveria*, *Fusarium oxysporum* e *Penicillium* foram os tipos mais abundantes. A análise da variação diária de temperatura e humidade no interior da sala indicou que a variável fora do intervalo foi a humidade relativa. As estratégias combinadas de monitoração aerobiológico proporcionam novas ferramentas para a avaliação e previsão do tempo de vida de diferentes materiais.

**Palavras-chave:** Sala egípcia, Museu de La Plata, aeromicobiota, carga fúngica, biodeterioração, parâmetros ambientais

## Introducción

La presencia de esporas y otros tipos de elementos fúngicos en el aire interior de museos y otros sitios donde se custodian colecciones de piezas de importancia histórica y su potencial germinación sobre materiales asociados, constituye una amenaza para la conservación del patrimonio natural y cultural (Harvey 1977). Ello se debe a la variedad de sustratos que lo componen y a la capacidad degradadora que poseen los hongos (Sterflinger & Piñar 2013). La contaminación aeromicológica impacta negativamente en las colecciones que se custodian en los museos afectando la conservación de los ejemplares, soportes, la calidad del aire así como la salud del personal y los visitantes. La mayor parte de las colecciones que se preservan y/o exhiben en los museos son de naturaleza orgánica (Sterflinger & Piñar 2013), caracterizándose incluso por su higroscopicidad, esto es, la alta capacidad de retención de agua, siendo a la vez una fuente secundaria de inóculo fúngico. A la vez ello puede implicar que un significativo incremento del contenido de humedad en el material y su soporte, especialmente cuando los objetos están sometidos a una ventilación insuficiente y a una humedad relativa superior al 65%, pueden tornarlos más vulnerables al biodeterioro. Además, el fenómeno de "subtropicalización" del clima provocado por el Cambio Climático ha modificado el régimen de lluvias en la región incidiendo en los factores críticos de temperatura y humedad que condicionan la alteración de los materiales por la actividad biológica (Gómez 2009).

El Museo de Ciencias Naturales de La Plata, Argentina (34° 55' S, 57° 57' O), dispone de una sala denominada "Fragmentos de historia a orillas del Nilo", un recinto que alberga una exposición permanente que presenta fragmentos de arenisca que pertenecieron al Complejo de Aksha ubicado a orillas del río Nilo en la frontera entre Sudán y Egipto. Específicamente se trata del resguardo de parte de las piezas egipcias que fueron donadas por Dardo Rocha, en el siglo XIX y la colección rescatada por una expedición arqueológica franco-argentina subsidiada por UNESCO con motivo de la construcción de la represa de Aswan Sadd el-Ali entre los años 1960 y 1970. Se trata del templo egipcio Aksha, cementerios de diferentes culturas nubias, una

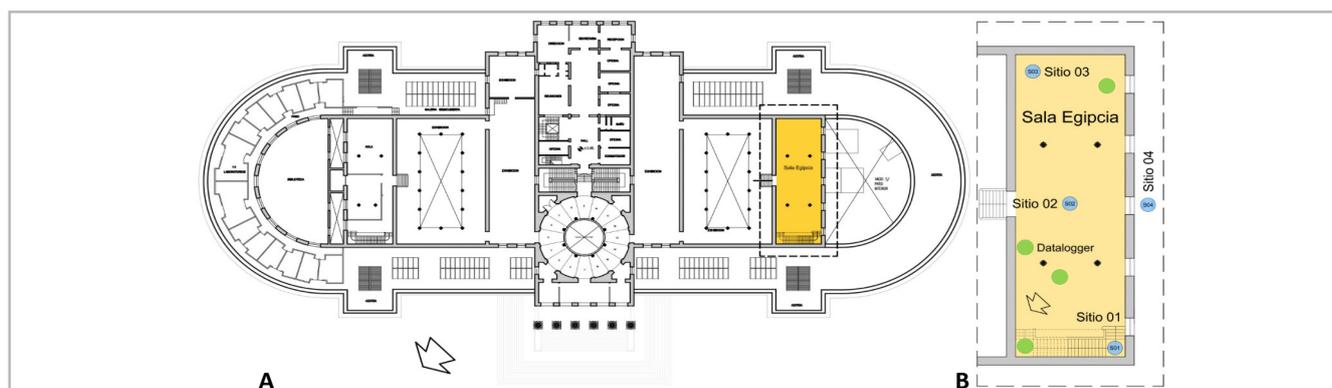
tumba en Beidir y otro templo construido por los pueblos prehistóricos. Las piezas conservan inscripciones jeroglíficas cuya interpretación, junto a otras evidencias, permite recuperar diversos aspectos de la vida en el antiguo Egipto ([http://www.museo.fcnym.unlp.edu.ar\\_egipcia](http://www.museo.fcnym.unlp.edu.ar_egipcia)). Aunque esta colección está bien conservada en vitrinas especiales en la sala, recientemente reinaugurada en el 2013 luego de un intenso trabajo de restauración y puesta en valor en coordinación con la Unidad de Conservación y Exhibición del Museo de La Plata, no hay información disponible sobre la carga fúngica del aire interior de la sala y su variación estacional.

El objetivo de este trabajo fue proporcionar información acerca de la calidad del aire interior de la Sala "Fragmentos de Historia a Orillas del Nilo" instalada en el Museo de Ciencias Naturales de La Plata, Argentina, en relación con la carga fúngica en el aire, su dinámica estacional y el análisis de los factores microambientales que son claves en el riesgo potencial de biodeterioro de las piezas en exposición.

## Materiales y métodos

### —Sitio de estudio

La sala posee una superficie de 300 m<sup>2</sup> y se encuentra en la planta alta del Museo [figura 1]. Se seleccionaron 3 áreas representativas: sitio 1: correspondiente a un área que expone más de 300 piezas que incluyen bloques de arenisca pertenecientes a dinteles, frisos, jambas de puertas con inscripciones de jeroglíficos, cerámicas y dos ataúdes con sus respectivas momias; sitio 2: un área que tiene una puesta museográfica que incluye una maqueta del complejo y otra del templo de Aksha, incluyendo un libro digital que relata el hallazgo y las distintas expediciones que se sucedieron desde el siglo pasado y ficheros interactivos que amplían la información sobre el Nilo y la escritura egipcia; sitio 3: zona de la sala que exhibe cerámicas que pertenecieron a cementerios de otras culturas de la misma región egipcia, como una gárgola meroítica y un capitel de la época cristiana; y sitio 4: entorno exterior del Museo con una variada vegetación implantada [figura 2].



**Figura 1.-** A: Plano del Museo de Ciencias Naturales, planta alta, localización de la sala "Fragmentos de Historia a Orillas del Nilo" (amarillo). B: detalle de la ubicación de los dataloggers (verde) y puntos de muestreo microbiológico (azul).



**Figura 2.-** Vista general de los sitios estudiados. A- Sitio 1 (ala Norte); B- Sitio 2 (zona ingreso), C- Sitio 3 (ala Sur), D- Sitio 4 (exterior)

#### —Muestreo micológico del aire

Se llevó a cabo el muestreo del aire asociado a los 4 sitios indicados 2 veces en cada estación del año desde mes de julio del 2015 (invierno y primavera), hasta junio de 2016 (verano y otoño) a las 9:30 de la mañana, utilizando un método volumétrico con un muestreador tipo HirstZefon Z-Lite IAQ Air Sampling Pump®. Esta metodología se llevó a cabo basada en el principio de impacto inercial de las partículas y adaptado para el posterior cultivo de las muestras sobre un medio estándar para el crecimiento de hongos ambientales.

1- Se tomaron muestras por triplicado en cada sitio, utilizando portafiltros Millipore equipados con papel de filtro estéril. El sistema resultante se aplicó a la bomba de succión de aire durante 5 minutos a una velocidad de 0,015 m<sup>3</sup> por minuto.

2- En el laboratorio, cada filtro se trituró y se homogeneizó en 20 ml de agua estéril bajo condiciones asépticas, obteniendo una suspensión que se utilizó como fuente de inóculo.

3- Un mililitro de alícuotas decimales seriadas de cada suspensión de partida se sembró en placas conteniendo un medio agarizado con Rosa de Bengala x % (Biopack, C. I.45440 artículo 947.901; Miller, *et al.* 2000) suplementado

con sulfato de estreptomicina (0,5 %) y cloramfenicol (0,25%). Se realizaron tres réplicas de siembra por dilución de la suspensión analizada.

4- Las placas se incubaron a 25 °C y 63 % de humedad relativa en la oscuridad hasta desarrollo de colonias, las cuales fueron identificadas taxonómicamente y cuantificadas como unidades formadoras de colonias (CFU) y convertidas en unidades volumétricas (Baxter 2006).

5- La identificación de los géneros y especies fúngicas se realizó sobre la base de características morfológicas y culturales, utilizando bibliografía de referencia (Barron 1968; Carmichael *et al.* 1980; Domsch *et al.* 1993; Ellis 1971, 1976).

#### — Análisis de datos

Se calculó la densidad relativa (RD) de los géneros fúngicos en las muestras según Smith (1980) utilizando la siguiente fórmula:

$$RD (\%) = \frac{\text{Número de colonias de un determinado taxa en una muestra}}{\text{Número total de colonias fúngicas contabilizadas en la muestra}}$$

Donde *taxa* alude a las distintas categorías taxonómicas (especie, género o familia) que se pudieron determinar en el cultivo

Se estimó la frecuencia relativa (FR) de cada género fúngico de acuerdo a Esquivel (2003), que distingue 5 categorías: abundante (81 – 100 %); común (61 – 80%); frecuente (41– 60 %); ocasional (21 – 40%) y raro (0,1 - 20 %); (Borrego & Perdomo 2016), empleando la fórmula:

$$FR (\%) = \frac{\text{Número de veces que un género es detectado en un sitio}}{\text{Número de veces que el género es detectado en todos los sitios}}$$

Se utilizó el cociente de similitud de Sørensen (1957) (QS) para comparar la similitud de la composición de géneros fúngicos de dos muestras según la siguiente fórmula:

$$QS = \frac{2a}{2a+b+c}$$

Donde a es el número de géneros comunes en ambas muestras; b el número de géneros hallados solo en una muestra y c el número de géneros detectados solo en la otra muestra.

Para detectar las diferencias significativas en las comparaciones de las concentraciones fúngicas entre los sitios y entre estaciones, se utilizó el test de Student, previa comprobación de la bondad de ajuste de dos distribuciones mediante el test de Kolmogorov - Smirnov.

También se calculó el índice interior/exterior (I/O) siguiendo a Levetin *et al.* (1995) que considera que cuando la concentración de microorganismos en el aire interior es similar al aire exterior y el índice Indoor/Outdoor es inferior a 1,5; el ambiente puede considerarse apropiado.

#### —Evaluación de los parámetros ambientales

Para la evaluación del edificio se utilizó la metodología desarrollada por el Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable de la FAyU, UNLP en el Proyecto "Evaluación de las necesidades de control del entorno para la conservación de los museos de la Red de Museos de la UNLP. Adecuación del procedimiento del Getty Conservation Institute (GCI)". En este proyecto se adaptó a nuestra región la metodología publicada por el GCI en el documento "Modelo propuesto para evaluar las necesidades de control del entorno museístico" (Avrami *et al.* 1999).

Se estimaron los valores de temperatura y humedad relativa de diferentes puntos en cada sitio utilizando microadquisidores de datos (dataloggers) durante

todo el periodo del monitoreo (desde el 1 de julio del 2015 hasta junio del 2016) con una frecuencia de 10 minutos (García Santa Cruz & Gómez 2014). Siguiendo la Norma UNI10829:1999 (Wills *et al.*, 2014) [figura 1b]. Los datos registrados fueron comparados con los valores de referencia recomendados para la conservación de diferentes objetos ubicados en el sitio de análisis de la sala (correspondientes a las categorías "momias", "madera pintada", "cerámica", y "piedras"), que están representados dentro de un rango de tolerancia y que son variables según la composición química de los mismos [tabla 3].

## Resultados

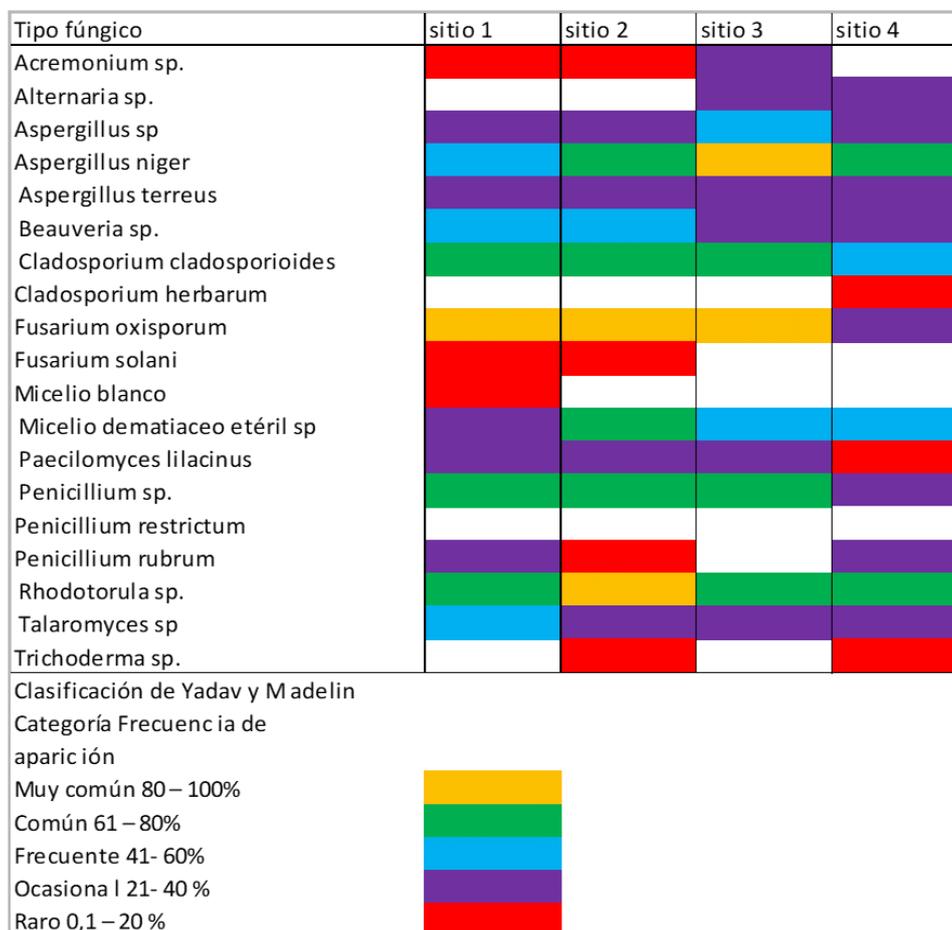
La tabla 1 muestra los tipos fúngicos identificados cuando diferentes muestras de aire de los 4 sitios se utilizaron como inóculo fúngico sobre un medio agarizado correspondientes a las 8 campañas evaluadas. Aunque se distribuyeron varias diluciones decimales de hasta 1: 10 en placas de agar, solo se obtuvieron datos informativos en el muestreo de su propio filtro y la suspensión no diluida ( $\leq 40$  UFC por placa). Durante el período total monitoreado se detectaron 18 tipos fúngicos, 17 de los cuales pertenecen al phylum Ascomycota y uno al phylum Basidiomycota (*Rodothorula* F. C. Harrison). Nueve de ellos fueron identificados hasta el nivel genérico mientras que los 9 restantes fueron determinados a nivel específico. Adicionalmente se recuperaron dos tipos de elementos fúngicos vegetativos que solo diferenciaron un "micelio hialino" y un "micelio dematiáceo" cuando fueron incubados en el medio agarizado. La figura 3 muestra la frecuencia de aparición de los tipos fúngicos hallados en el aire de los 4 sitios estudiados. Con excepción de *Acremonium* Link., *Alternaria* Nees., *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. y *Trichoderma* Pers., los tipos fúngicos identificados se detectaron en las 8 campañas, aunque revelaron distinta frecuencia. El promedio anual de UFC/m<sup>3</sup> aire de carga fúngica para los 3 sitios de la sala mostró 31158,90 elementos, comparado con 28046 en el sitio exterior. El análisis del índice RD estimado para los tipos predominantes en todo el período en los 4 sitios indica que *Aspergillus niger* Tiegh. representó el 12,94 % de la concentración total, *Beauveria* Vuill. el 21,23 %, *Fusarium oxysporum* Schltdl. 13,77 % y *Penicillium* Link el 17,64 %.

Analizando cada sitio de la sala, en el sitio 1 se registró un total anual de 37607 UFC/m<sup>3</sup> aire con un promedio mensual de 4700,85 ( $\pm 3283,83$ ), con la mayor concentración en el primer muestreo de invierno (11810 UFC/m<sup>3</sup> aire) y la menor en el primero de verano (2220 UFC/m<sup>3</sup> aire) [figura 4]. La aeromicobiota de este sitio estuvo representada por 16 tipos, con *Penicillium sp.* como dominante (11396 UFC/m<sup>3</sup> aire) y una densidad relativa de 30,3 %; [figura 5 a].

En el sitio 2 se registró un total anual de 28652 UFC/m<sup>3</sup> aire con un promedio mensual de 3581,60 ( $\pm 1978,41$ ); la mayor concentración se registró en el primer muestreo de invierno (7104 UFC/m<sup>3</sup> aire) y la muestra de febrero registró

**Tabla 1.-** Géneros y especies fúngicas recuperadas en los sitios según el momento de muestreo.

Tipo fúngico	Phylum	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
<i>Acremonium sp.</i>	Ascomycota				1, 2, 3
<i>Alternaria sp.</i>	Ascomycota	3, 4	3		
<i>Aspergillus sp.</i>	Ascomycota		2, 3	1, 2, 3, 4	
<i>Aspergillus niger</i>	Ascomycota	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	4	1, 2, 4
<i>Aspergillus terreus</i>	Ascomycota	1, 3, 4			1, 3, 4
<i>Beauveria sp.</i>	Ascomycota	1, 2, 4			1, 2, 4
<i>Cladosporium sp.</i>	Ascomycota	1, 2	2	2	2
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	Ascomycota	1, 3, 4	3		1, 3, 4
<i>Cladosporium herbarum</i>	Ascomycota	4			
<i>Fusarium oxisporum</i>	Ascomycota	2, 3	1, 2, 3, 4	1, 2, 3	1, 2, 3, 4
<i>Fusarium solanii</i>	Ascomycota	2			1
<i>Micelio blanco</i>	Indeterminado	1			
<i>Micelio dematiaceo estéril</i>	Indeterminado	1	1, 2, 3	2, 3	1, 2, 3
<i>Paecilomyces lilacinus</i>	Ascomycota	1, 3			1, 2, 3
<i>Penicillium sp.</i>	Ascomycota	1, 2, 3	1, 2, 3	1	1, 2, 3
<i>Penicillium restrictum</i>	Ascomycota	4			
<i>Penicillium rubrum</i>	Ascomycota	1, 2		1, 4	1, 4
<i>Rhodotorula sp.</i>	Basidiomycota	1, 2	1, 2, 3, 4	2, 3, 4	1, 2, 3, 4
<i>Talaromyces sp</i>	Ascomycota	1, 3		1, 3	1, 2
<i>Trichoderma sp.</i>	Ascomycota	2, 4			



**Figura 3.-** Frecuencia de aparición de los tipos fúngicos aislados en los distintos sitios en el total de muestras tomadas por sitio.

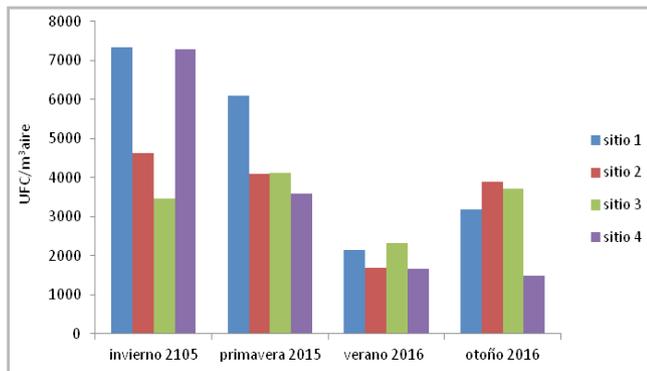
el mínimo (947 UFC/m<sup>3</sup> aire) [figura 4] La aeromicobiota estuvo representada por 15 tipos fúngicos con *Beauveria* predominando en todo el período (7341UFC/m<sup>3</sup>aire) y una densidad relativa de 25,62% [figura 5b].

El sitio 3 registró un total anual de 27217,2 UFC/m<sup>3</sup> aire y un promedio mensual de 3402,15 (±746) la mayor concentración total se obtuvo en el recuento de noviembre (4144 UFC/m<sup>3</sup> aire) y febrero registró el mínimo (2012 UFC/m<sup>3</sup>) [figura 4]. La aeromicobiota estuvo representada por 12 tipos fúngicos siendo *Fusarium oxysporum* el tipo predominante con 6630 UFC/m<sup>3</sup> y una densidad relativa de 24,36% [figura 5c].

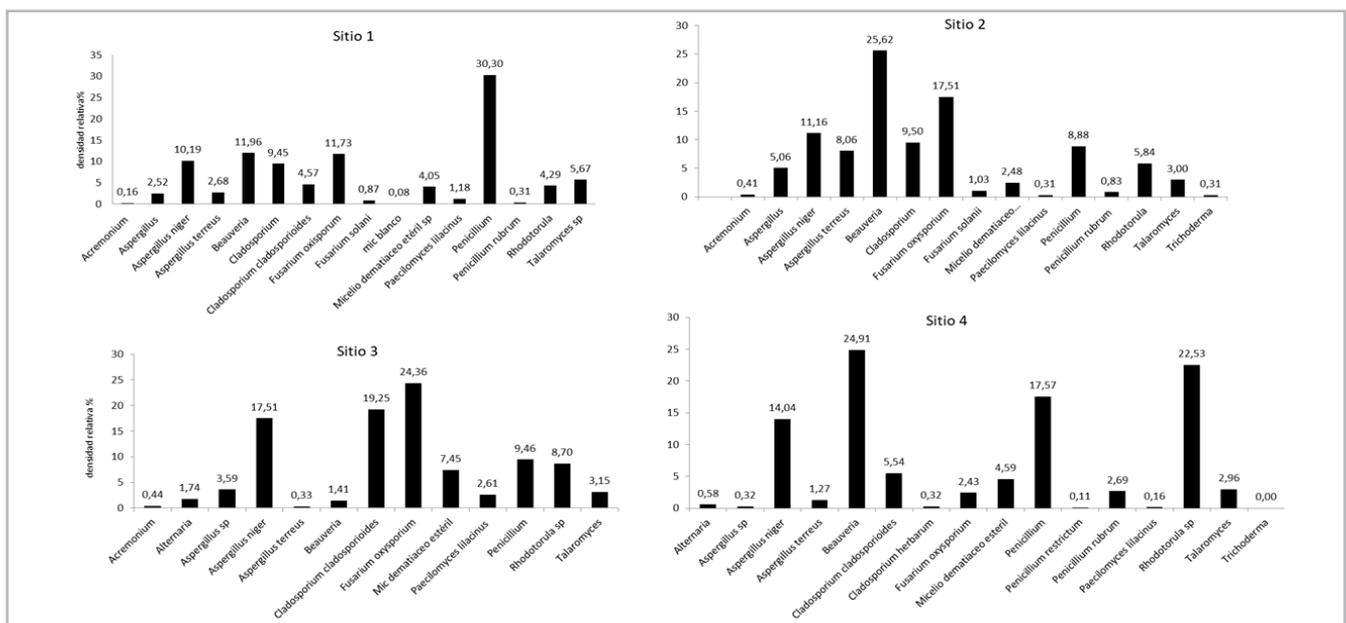
El sitio 4 presentó un total anual: 28046 UFC/m<sup>3</sup>; con un promedio de 3509,45 UFC/m<sup>3</sup> (±3728,30); el mes de mayor concentración total fue junio con 12461 UFC/m<sup>3</sup> aire y febrero registró el mínimo (1465 UFC/m<sup>3</sup>) [figura 4]. Se detectaron 16 tipos fúngicos, *Cladosporium cladoporoides* (Fresen.) G.A. de Vries fue el tipo predominante con 6985 UFC/m<sup>3</sup> aire y una densidad relativa de 24,36% [figura 5d].

Analizando las concentraciones registradas en las 4 estaciones en el interior de la sala, se detectaron diferencias significativas entre las muestras de invierno/verano, primavera/verano, primavera/otoño y otoño/verano (T de Student, p <0,05; [tabla 2]. Sin embargo, no se detectaron diferencias en ninguna de las concentraciones de las muestras correspondientes a cada sitio cuando fueron comparadas entre sí. En este sentido, el análisis de la riqueza promedio de géneros fúngicos de los sitios interiores comparado con el exterior, utilizando el índice de similitud, mostró una alta superposición y/o constante intercambio de la carga fúngica lo largo del año (QS Sitios 1-4 = 0,55; QS Sitios 2-4 = 0,55; QS Sitios 3-4: 0,53). *Beauveria* y *Rhodotorula* son típicos del ambiente exterior mientras que *Fusarium* y *Penicillium* son característicos en el interior de la sala.

Cuando se aplicó el índice I/O entre los sitios 1, 2 y 3 y el ambiente exterior los resultados arrojaron valores debajo de 1,5 (1,33, 1,02 y 1,05 respectivamente). Asimismo, el análisis de la densidad relativa entre los sitios 1 (ala Norte), 2 (zona de ingreso) y 3 (ala Sur) con el sitio 4 (ambiente exterior) [figura 6] evidenció un fuerte intercambio que se manifestó en la similitud en la diversidad. Los sitios interiores compartieron altos porcentajes de coincidencia en los tipos fúngicos. Se registró un 73 % de coincidencia entre los sitios 1 y 4 con predominio de *Aspergillus* y *Penicillium* en el interior y *Beauveria* y *Rhodotorula* en el exterior. En el sitio 2 hubo un 60 % de coincidencia en la riqueza fúngica y los tipos que predominaron fueron *Aspergillus*, *Beauveria* y *Fusarium*. Analizando el sitio 3 se registró un 68 % de coincidencia predominando *Aspergillus*, *Cladosporium* y *Fusarium*. Por otra parte, el análisis de la riqueza en función de la estacionalidad [figura 7], puso en evidencia que el otoño fue la estación en la cual hubo mayor cantidad de tipos fúngicos en todos los sitios, seguida por la primavera, el invierno y la estación más pobre, el verano. [figura 7].



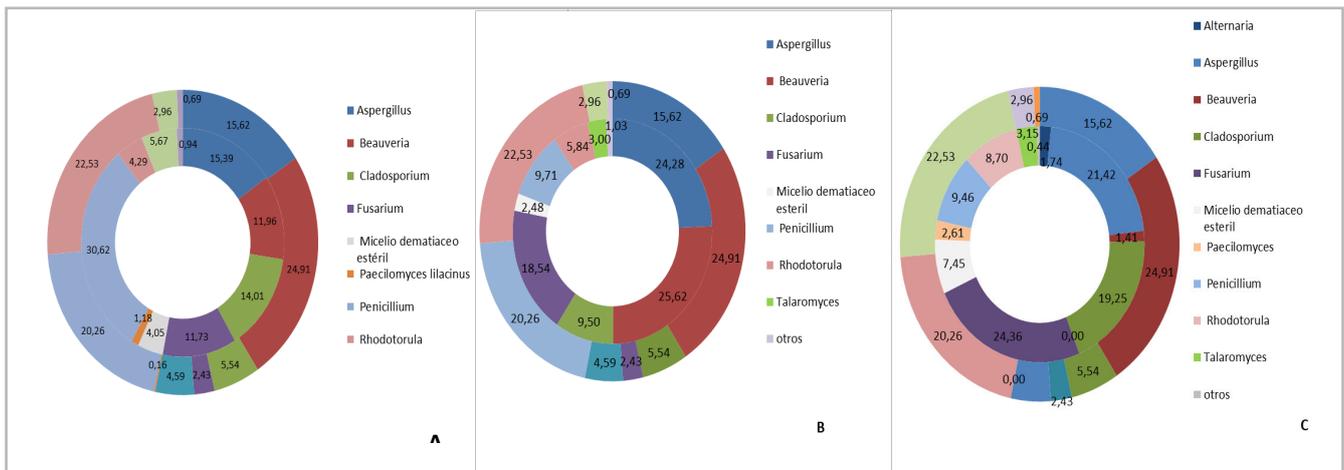
**Figura 4.-** Comportamiento estacional en términos de concentración total de UFC/m<sup>3</sup> de aire en los 4 sitios estudiados. Sitio 1, ala Norte; sitio 2, zona ingreso; sitio 3, ala Sur; sitio 4, exterior.



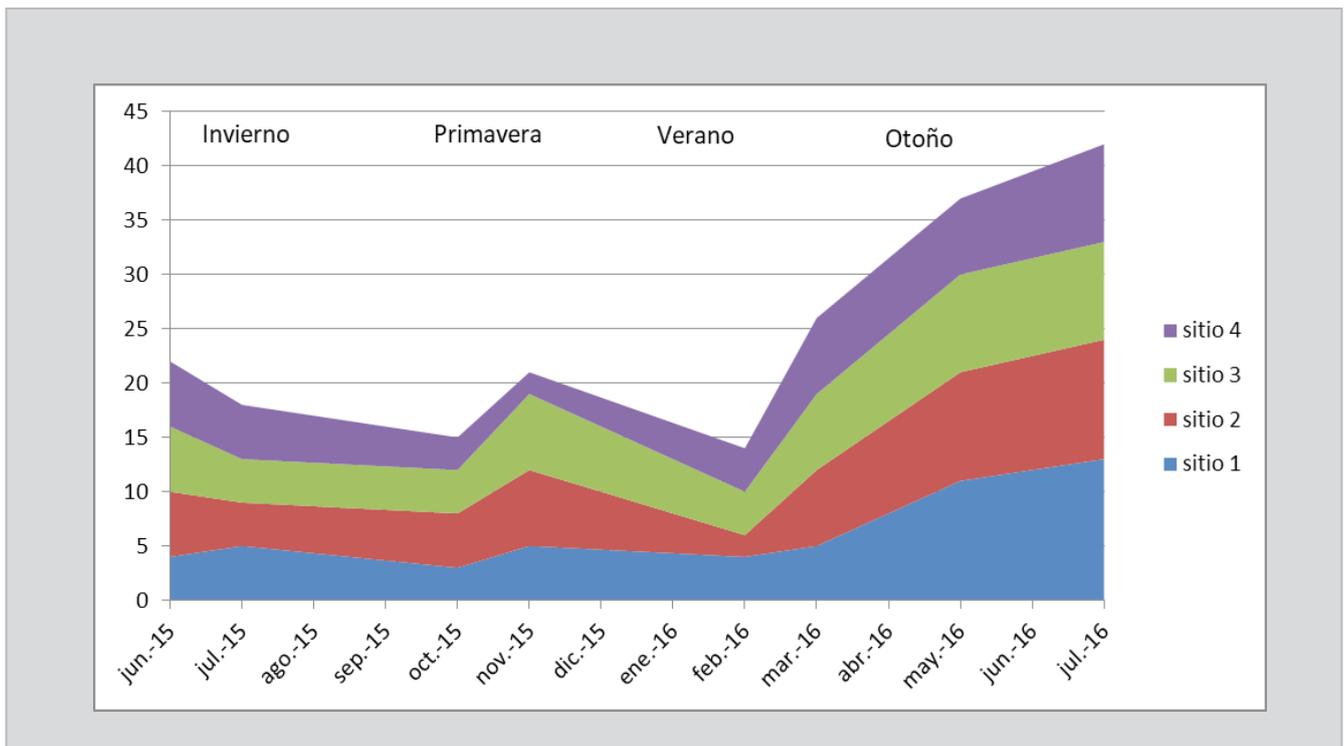
**Figura 5.-** Densidad relativa porcentual de los tipos fúngicos hallados en los cuatro sitios estudiados.

	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	T	p <0,05	T	p <0,05	T	p <0,05	T	p <0,05
Invierno								
Primavera	0,23	0,41						
Verano	<b>2,02</b>	<b>0,04</b>	<b>5,19</b>	<b>0,00</b>				
Otoño	0,99	0,17	<b>2,02</b>	<b>0,04</b>	<b>-3,68</b>	<b>0,00</b>		

**Tabla 2.-** Análisis estadístico de las concentraciones de UFC/m3 en las 8 campañas realizadas (en negrita, diferencias significativas).



**Figura 6.-** Comparación cuali-cuantitativa del espectro aerobiológico entre los sitios de la Sala Egipcia (círculos interiores de los gráficos) con el exterior (círculo exterior de los gráficos). A- sitio 1 vs sitio 4; B- sitio 2 vs sitio 4; C- sitio 3 vs sitio 4.



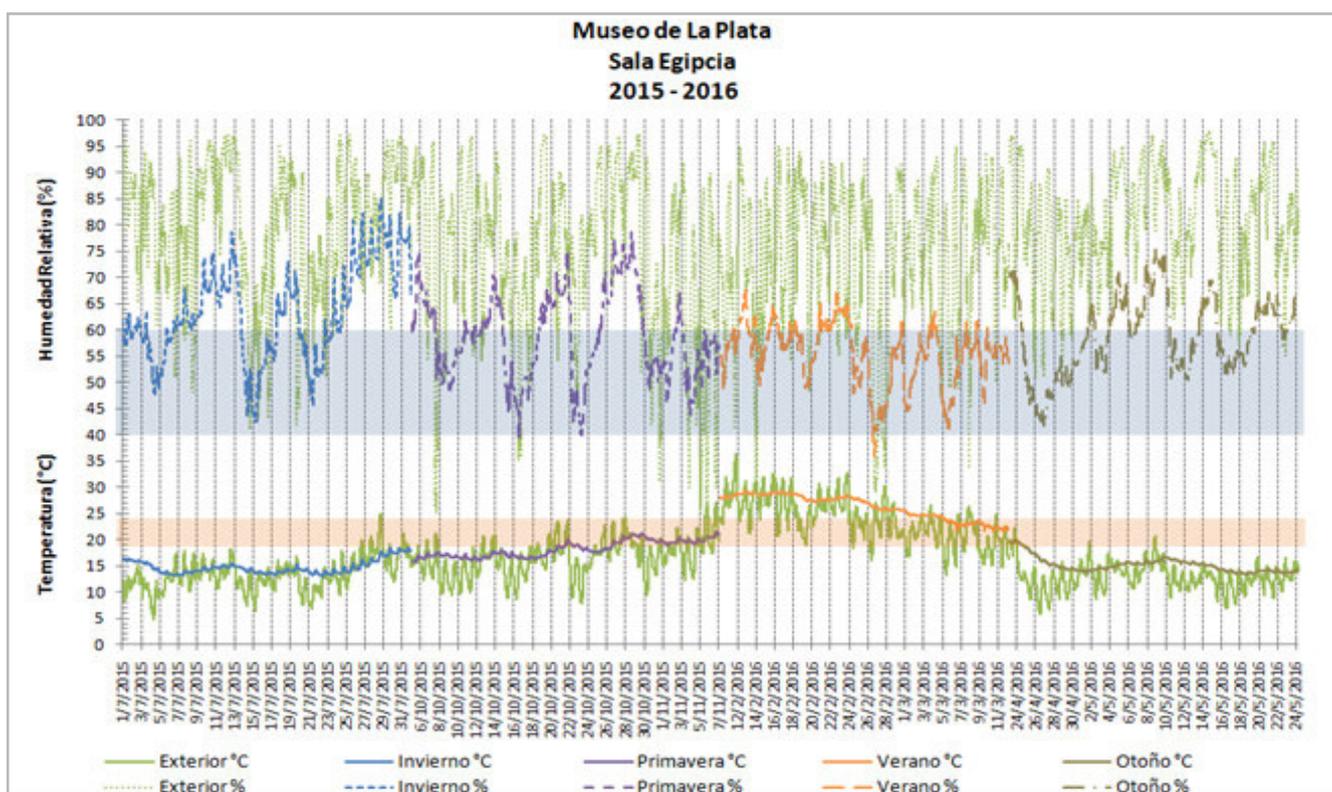
**Figura 7.-** Número de tipos fúngicos registrados cada estación del muestreo.

### Análisis de los parámetros ambientales

El comportamiento de los parámetros de temperatura y humedad relativa (HR) en los sitios estudiados puede analizarse a partir del histograma que se presenta en la figura 8. La temperatura se comportó de forma similar en todos los casos y la mayor dispersión se dio en los valores de humedad relativa.

Considerando las características de los objetos que alberga la Sala Egipcia y analizando la bibliografía específica se determinaron los valores de referencia recomendados

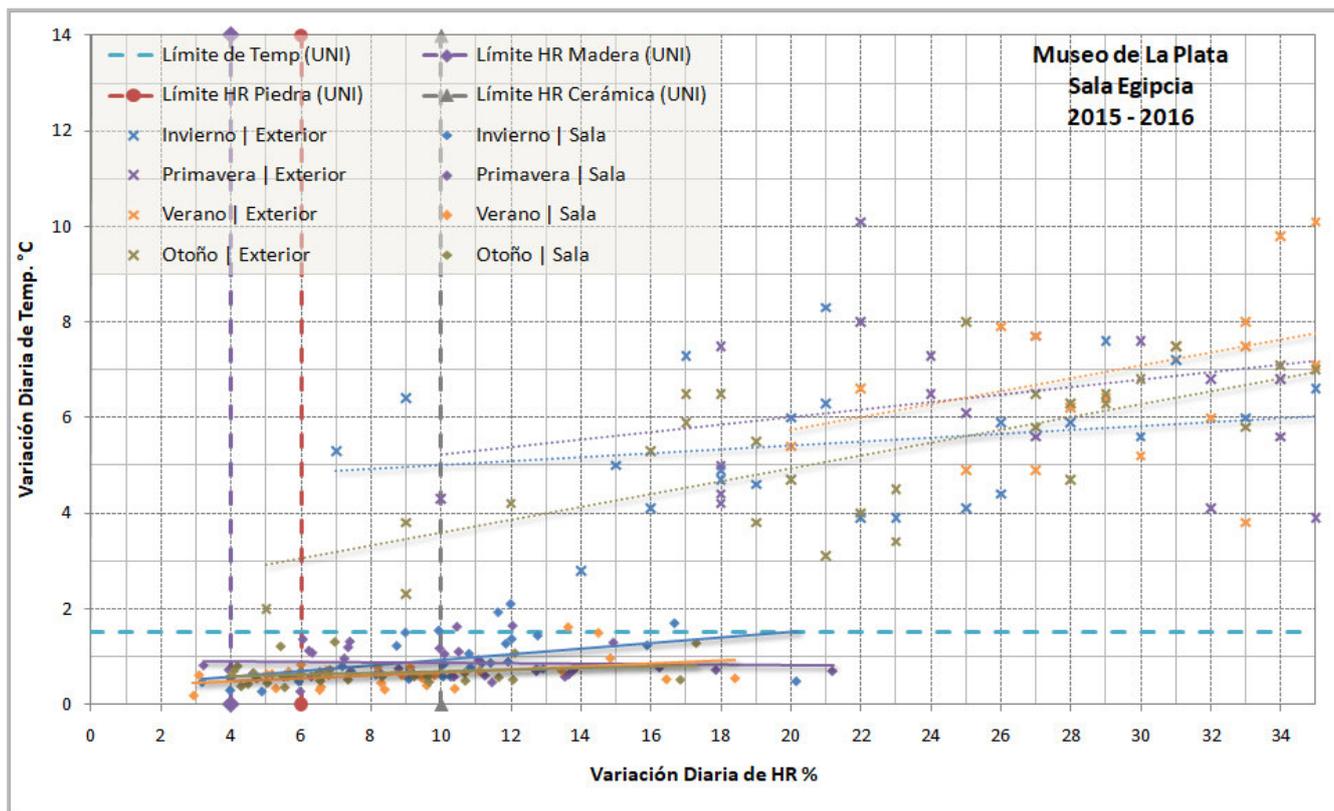
para su conservación, correspondientes a las categorías “momias”, “madera pintada”, “cerámica”, “piedras” (Norma UNI10829:1999; Wills *et al.* 2014). Dependiendo de las categorías, se cuenta con valores óptimos de conservación y valores de tolerancia, estos últimos constituyen un rango ampliado sobre los primeros [tabla 3]. A partir del análisis de la variación diaria de temperatura y humedad en el exterior e interior de la Sala Egipcia durante las cuatro estaciones de muestreo y la comparación con la tabla de referencia para los principales tipos de materiales que se hallan en la sala se puede verificar que la variable fuera de rango fue la humedad relativa [figura 9].



**Figura 8.-** Histograma de la evolución de los parámetros de temperatura y humedad relativa (HR) durante el período 2015- 2016 en la Sala Egipcia del Museo de La Plata.

BIENES DE INTERÉS HISTÓRICO O ARTÍSTICO	ΘT	ΔΘTmax	HR0	ΔHRmax
MATERIALES / OBJETOS DE NATURALEZA ORGÁNICA				
Animales, órganos anatómicos disecados, momias	21 a 23	1.5	20 a 35	-
Colecciones etnográficas, máscaras, cuero, indumentaria de cuero	19 a 24	1.5	45 a 60	6
Esculturas de madera policroma, madera pintada, pintura sobre madera, iconos	19 a 24	1.5	50 a 60	4
MATERIALES DE NATURALEZA INORGÁNICA				
Porcelana, cerámica, gres, terracota, tejas , tejas de extracción	NR	-	NR	10
Piedras, rocas, minerales, meteoritos (porosos) estables	19 a 24	-	40 a 60	6

**Tabla 3.-** Valores de referencia recomendados (Norma UNI10829:1999).ΘT Rango aceptable de temperatura, ΔΘTmax, variación máxima aceptable de temperatura; HR0, rango aceptable de humedad relativa; ΔHRmax, variación máxima aceptable de humedad relativa; Norma UNI10829:1999 (Wills, *et al.*, 2014).



**Figura 9-** Variación diaria de temperatura y humedad en el exterior e interior de la Sala Egipcia durante las cuatro estaciones de muestreo: Límites recomendados de temperatura y humedad relativa para los distintos materiales. Puntos que marcan la variación diaria de T y HR en el interior de la sala; puntos que marcan la variación diaria de T y HR en el exterior del edificio.

### Discusión y conclusiones

Durante el período total monitoreado se detectaron 18 tipos de géneros y especies fúngicas, siendo en su mayoría pertenecientes a anamorfos de Ascomycota (17) y solo uno con talo unicelular correspondiente a Basidiomycota. Estos resultados coinciden con los datos obtenidos por otros autores analizando contextos similares (Anaya *et al.* 2016; Borrego *et al.* 2010, 2012; Borrego & Perdomo 2012, 2014, 2016; Borrego & Molina 2014; Rojas *et al.* 2012). Con excepción de *Acremonium*, *Alternaria*, *Fusarium solani*, y *Trichoderma*, los restantes tipos fúngicos identificados se detectaron en las 8 campañas, aunque con distinta frecuencia. En el interior de la sala, *Penicillium*, *Beauveria* y *Fusarium oxysporum* fueron los tipos dominantes, mientras que en el exterior lo fue *Cladosporium cladosporioides*.

El análisis del índice RD estimado para los tipos fúngicos predominantes en todo el período en los 4 sitios indica que *Aspergillus niger*, *Beauveria*, *Fusarium oxysporum* y *Penicillium* fueron los tipos mejor representados.

Los resultados obtenidos aplicando el índice I/O dan valores por debajo de 1,5 lo que indicaría que la ventilación está diluyendo los contaminantes internos o hay escasas fuentes de contaminación en el ambiente general, coincidiendo con estudios similares en sitios de guarda de bienes patrimoniales (Flores *et al.* 2014,

Kadaifciler 2017, Stryakowska-Sekuska *et al.* 2007). El análisis estadístico de las variaciones estacionales de las concentraciones fúngicas reveló diferencias significativas entre invierno/verano; primavera/verano; primavera/otoño y otoño/verano. Invierno fue la estación en que se registraron los valores más altos en los sitios 1, 2 y 4. Cuando se compararon los sitios entre sí, las diferencias en términos de concentración, no fueron significativas, con lo que se podría inferir que las variaciones dentro y fuera de la sala se mantienen constantes durante todo el año.

El análisis de la dinámica estacional de la biota fúngica muestra estabilidad cuali- cuantitativa entre los 3 sitios de la Sala y el exterior, considerando la calidad del aire exterior como un factor decisivo que influye en los niveles de contaminación en interiores (Kanaani *et al.* 2008; Lee 2006), además de los procesos de remoción e intercambio de aire propios de una Sala de exposición (Nayar & Jothish 2013).

En coincidencia con nuestros estudios, la prevalencia de *Aspergillus*, *Penicillium* y *Cladosporium* ha sido frecuentemente registrada en estudios previos en otras salas de este Museo (Nitiu *et al.* 2015, 2016; Mallo *et al.*, 2017) y en museos y archivos estudiados por otros autores (Anaya 2016; Čavka *et al.* 2010; Borrego & Perdomo 2016; Flores *et al.* 2014; Göksay-Kadaifciler & Demirel 2017; Halem

Khan & Mohan Karuppaiyil 2012; Rojas *et al.* 2012; Shabir *et al.* 2007; Skóra *et al.* 2015; Unković *et al.* 2018). Este tipo de infecciones fúngicas en contextos de conservación, son causados por especies de lento crecimiento como los hongos mitospóricos xerofílicos pertenecientes a Ascomycota como *Aspergillus*, *Paecylomyces*, *Penicillium* y *Cladosporium* (Pinzari & Montanari 2011; Sterflinger & Piñar 2013). Además, es importante considerar que géneros con mayor representatividad en el espectro interior como *Penicillium* y *Aspergillus* desarrollan esporas que contienen proteínas relacionadas con la inmunoglobulina G (Ig G) y producen reacciones alérgicas (Knutsen *et al.* 2011; Shi & Miller 2011). Asimismo, hongos muy presentes en el interior de la sala de los géneros *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium* son importantes debido a su capacidad de producción de micotoxinas.

La presencia del género *Beauveria* tiene una alta incidencia en la concentración total de la sala y reviste importancia debido a su notable habilidad proteolítica, en parte asociada a su papel como entomopatógeno (Saranraj & Javaprakash 2017). Además, la disponibilidad de materiales con alto contenido proteico en momias y pergaminos, provee un sustrato rico en nitrógeno orgánico que podría promover la colonización por microorganismos y explicaría la carga de esporas de *B. bassiana*. Numerosos autores han destacado la importancia de muchos de los hongos identificados en este estudio como agentes de degradación de otros materiales debido a su variada actividad enzimática (Mallo *et al.* 2017; Robledo 1991; Ross & Hollis 1976). Otro factor a tener en cuenta, se relaciona con el atractivo turístico de la sala que convoca a la mayoría de los visitantes, pudiendo ser éste también, un factor condicionante del ingreso de flujo contaminante. En referencia a la presencia de *Rhodotorula*, varios autores describen el aislamiento de este hongo de diferentes ecosistemas, incluidos los sitios con condiciones desfavorables. Previamente consideradas no patógenas, algunas especies de este género han emergido como patógenos oportunistas que tienen la capacidad de colonizar e infectar pacientes susceptibles (Wirth & Goldani 2012). Su presencia en los 4 sitios, asociada a otros hongos proteolíticos presentes sugiere que la fuente principal procedería de materiales proteicos y derivados disponibles en los cuerpos momificados (Nitiu *et al.* 2018).

Para los ejemplares de las colecciones biológicas, los extremos de la temperatura y la humedad relativa en el ambiente de almacenamiento no son tan importantes al comparar estos valores con las fluctuaciones que pueden tener estos ambientes. Por lo tanto, se recomienda enfocarse en controlar especialmente las fluctuaciones de estas variables más que los valores extremos (Simmons & Muñoz Saba 2005). Teniendo en cuenta el clima templado húmedo de la zona de La Plata y las características edilicias del Museo consideramos que es complejo alcanzar los valores óptimos a un costo energético y ambiental razonable, por este motivo cuando están disponibles se

recomienda utilizar los valores de tolerancia.

Asimismo, el Cambio Climático ocasionado por la actividad antrópica se refleja también la inestabilidad de las variables ambientales que condicionan fuertemente la preservación del Patrimonio Cultural. Por ello, es prioritario realizar una evaluación continua de estos parámetros en Museos y Depósitos de resguardo para un manejo adecuado de estrategias de conservación.

El control de la temperatura y la humedad relativa (HR) simultáneamente con estrategias combinadas de monitoreo aerobiológico proporciona nuevas herramientas para la evaluación y predicción del tiempo de vida de los diferentes materiales y la estructura del edificio. Consideramos que para poder establecer una estrategia de control ambiental adecuada debemos evaluar los diversos factores que pueden afectar la conservación y cuidado de las colecciones, con el propósito de desarrollar las soluciones apropiadas.

### Agradecimientos

Este estudio fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) PIP 112-201101-00087; Agencia Foncyt PICT 2013-0418, Agencia Foncyt PICT 2015-1620 y el Proyecto de Incentivos a la Investigación (N/897) de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM), Argentina. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Argentina. Se agradece el apoyo del Área de Conservación y Exhibición del Museo de Ciencias Naturales y Museo.

### Referencias

- ANAYA, M., BORREGO, S.F., GÁMEZ, E., CASTRO, M., MOLINA, A. & VALDÉS, O. (2016). "Viable fungi in the air of indoor environments of the National Archive of the Republic of Cuba". *Aerobiologia*, 32, 513-527. <https://doi.org/10.1007/s10453-016-9429-3>
- AVRAMI, E., DARDES, K., DE LA TORRE, M., HARRIS, S., HENRY, M., JESSUP, W. (1999). Evaluación para la Conservación: Modelo Propuesto para evaluar las Necesidades de Control del Entorno Museístico. Los Angeles: Getty Conservation Institute. [http://www.getty.edu/conservation/última\\_consulta\\_mayo\\_2019](http://www.getty.edu/conservation/última_consulta_mayo_2019).
- BARRON, G.L. (1968). *The genera of Hyphomycetes from soil*. Williams & Wilkins, Baltimore. Pp 1-364
- BAXTER A. (2011). *On line document Air O Cell Interpretation guide* (consulta enero 2019) Environmental Analysis Association.
- BORREGO, S., GUIAMET, P., GÓMEZ DE SARAVIA, S., BATTISTONI, P., GARCIA, M., LAVIN, P. & PERDOMO, I. (2010). "The quality of air at archives and the biodeterioration of photographs". *International Biodeterioration and Biodegradation*, 64(2), 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.12.005>

- BORREGO, S., LAVIN, P., PERDOMO, I., GÓMEZ DE SARAVIA, S. & GUIAMET, P. (2012). Determination of indoor air quality in archives and the biodeterioration of the documentary heritage. *ISRN Microbiology*, 680598. <https://doi.org/10.5402/2012/680598>.
- BORREGO, S., PERDOMO, I. (2012). "Aerobiological investigations inside repositories of the National Archive of the Republic of Cuba". *Aerobiologia*, 28(3), 303-316. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9235-x>
- BORREGO, S. & MOLINA, A. (2014). "Comportamiento de la aeromicrobiota en dos depósitos del Archivo Nacional de Cuba durante 7 años de estudio". *AUGMDOMUS*, 6, 1-24.
- BORREGO, S.F. & PERDOMO, I. (2014). "Caracterización de la micobiota aérea en dos depósitos del Archivo Nacional de la República de Cuba". *Revista Iberoamericana de Micología*, 31(3), 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.riam.2013.09.004>
- BORREGO, S. & PERDOMO, I. (2016). Airborne microorganisms cultivable on naturally ventilated document repositories of the National Archive of Cuba. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23: 3747-57. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5585-1>
- CARMICHAEL, J. W., KENDRIK, W. B., CONNER, E. L., SIGLER, L. (1980). *The genera of Hyphomycetes*. Univ. Of Alberta Press, Edmonton. Pp 1- 386.
- ČAVKA, M., GLASNOVIČ, A., JANKOVIČ, I., ŠIKANJIÉ, P. R., PERIÉ, B., BRKLAJČIÉ, B., MLINARIČ-MISSONI, E., ŠKRILIN, J. (2010). "Microbiological analysis of a mummy from the archaeological museum in Zagreb". *Coll. Antropol.* 34: 803 -805.
- DOMCH, K. H., GAM, W., ANDERSON, T. H. (1980). *Compendium of soil Fungi*. Vol. 1, Academic Press, London. p. 860.
- ELLIS, M. B. (1971). *Dematiaceous Hyphomycetes*. CMI Kew.
- ESQUIVEL, P.P., MANGIATERRA, M., GIUSIANO, G., SOSA, M.A. (2003). "Microhongos anemófilos en ambientes abiertos de dos ciudades del nordeste argentino". *Boletín Micológico* 701: 21-8. <https://doi.org/10.22370/bolmicol.2003.18.0.376>.
- FLORES, M. E. B., MEDINA, P. G., CAMACHO, S. P. D., de JESÚS URIBE BELTRÁN, M., del CARMEN DE LA CRUZ OTERO, M. C.; RAMIREZ, I. O., HERNÁNDEZ, E. T. (2014) "Fungal spore concentration in indoor and outdoor air in university libraries, and their variations in response to changes in meteorological variables". *Int J Environ Health Res.* 2014 24(4):320-40. <https://doi.org/10.1080/09603123.2013.835029>
- GARCÍA SANTA CRUZ, M. & GÓMEZ, A. (2014) "Antecedentes y objetivos del Programa de Evaluación para la Conservación y Monitoreo Ambiental Edilicio". *Actas del Encuentro Museos en Edificios Patrimoniales*. Buenos Aires: CICOP Argentina, ICOM Argentina, Museo Banco Provincia de Buenos Aires.
- GÖKSAY- KADAIFCILER, D. & DEMIREL, R. (2017). "Fungal biodiversity and mycotoxigenic fungi in cooling-tower water systems in Istanbul", Turkey. *J Water Health* 15 (2): 308-320. <https://doi.org/10.2166/wh.2017.274>
- GÓMEZ, A. (2009). *Una aproximación al diseño ambientalmente consciente en espacios de guarda. Estudio de casos*. Seminario de Investigación en Museología de los países de habla portuguesa y española. Porto: Universidade do Porto, Faculdade de Letras, Biblioteca Digital. ISBN: 978-972-8932-61-9.
- HALEM KHAN, A.A. & MOHAN KARUPPAYIL, S. (2012). "Fungal pollution of indoor environments and its management". *Saudi Journal of Biological Sciences* 19: 405-426. <https://doi.org/10.2166/wh.2017.274>
- KADAIFCILER, D. G. (2017) "Bioaerosol assessment in the library of Istanbul University and fungal flora associated with paper deterioration". *Aerobiologia* 33:151-166. <https://doi.org/10.1007/s10453-016-9457-z>
- KANAANI, H., HARGREAVES, M., RISTOVSKIA, Z., MORAWSKA, L. (2008) "Deposition rates of fungal spores in indoor environments, factors affecting them and comparison with non-biological aerosols". *Atmospheric Environment* 42(30):7141-7154. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.059>
- KNUTSEN, A.P, BUSH, R.K., DEMAINE, J.G., DENNING, D.W., DIXIT, A., FAIRS, A., GREENBERGER, P.A., KARIUKI, B., KITA, H., KURUP, V.P., MOSS, R.B., NIVEN, R.M. PASHLEY, C.H., SLAVIN, R.G., VIJAY, H. M., WARDLAW, A.J. (2011). "Fungi and allergic lower respiratory tract diseases". *Clin. Rev. All. Immunol.* 129: 280-91. 101016/j.jaci.2011.12970. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2011.12.970>
- LEE, T., GRINSHUPUN, S.A., MARTUZEVICIUS, D., ADHIKARI, A., CRAWFORD, C.M., REPONEN, T. (2006). "Culturability and concentration of indoor and outdoor airborne fungi in six single family homes". *Atmospheric Environment* 40: 2902-2910. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.01.011>
- LEVETIN E., SHAUGHNESSY R., FISHER E., LIGMAN B., HARRISON J., BRENNAN, T. (1995). "Indoor Air Quality in schools: exposure to fungal allergens". *Aerobiologia* 11:27-34. <https://doi.org/10.1007/BF02136141>
- MALLO, A.C., ELÍADES, L.A., NITIU, D.S., SAPARRAT, M.C.N. (2017). "Monitoring indoor air status in the Museo de La Plata Herbarium (LP) Argentina". *Revista Iberoamericana de Micología*, 34(2):99-105.
- MALLO, A.C., NITIU, D.S., ELÍADES, L.A., SAPARRAT, M.C.N. (2019). Fungal degradation of cellulosic material used as support of Cultural Heritage. *International Journal of Conservation Science IJS* 8 (4)
- MILLER, D.J., HAISLEY, P.D., REINHARDT, J.H. (2000). "Air sampling result in relation to extent of fungal colonization of building materials in some water-damaged buildings". *Indoor Air*, 10: 145-151. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2000.010003146.x>
- NAYAR, T.S., JOTHISH, P.S. (2012). "An assessment of the air quality in indoor and outdoor air with reference to fungal spores and

- pollen grains in four working environments in Kerala, India." *Aerobiologia* 29(1): 131 – 152. <https://doi.org/10.1007/s10453-012-9269-8>.
- NITIU, D.S., MALLO A.C., ELÍADES, L.A., SAPARRAT, M.C.N (2015). "Monitoreo de la carga fúngica ambiental y de otros bioaerosoles asociados a un depósito de restos momificados del NOA del Museo de la Plata (Argentina): un estudio de caso". *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 50 (4): 427- 436.
- NITIU, D. S., MALLO A. C, ELÍADES, L. A., SAPARRAT. M .C. N, SANTA CRUZ, M. (2016). "Survey of the state of conservation of the *Myiodon listai* (XenarthraMylodontidae) skin fragment from the Pleistocene of Argentina kept at the Museum of La Plata (Argentina)". *Ge conservación* 10: 44 – 53. <https://doi.org/10.37558/gec.v10i0.367>
- NITIU, D.S., MALLO, A.C., ELÍADES, L.A., GARCIA SANTA CRUZ, M., SAPARRAT, M.C.N. (2018). "Fungal monitoring in an exhibition room with Egyptian mummies in the Museum of Natural Sciences of La Plata, La Plata, Argentina". *International Journal of Conservation Science* (IJCS) 10 (2): 291-306.
- NORMA UNI10586 (1997) *Documentazione: Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche de gli alloggiamenti*. Milano Ente Nazionale di Unificazione
- NORMA UNI10829 (1999) *Beni di interesse storico e artistico: Condizioni ambientali di conservazione, misurazione e analisi*. Milano Ente Nazionale di Unificazione
- PINZARI, F. & MONTANARI, M. (2011). "Mold growth on libraries material stored in compactus-type shelving units". En S. A. Abdul-Wahab Eds. *Sick Building Syndrome: in Public Buildings and Workplaces*. Pp 193 -206. Springer Verlag, Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17919-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17919-8_11)
- PIÑAR, G., PIOMBINO- MASCALI, D., MAIXNER, F., ZINK, A., STERFLINGER, K. (2013). "Microbial survey of the mummies from Capuchin Catacombs of Palermo, Italy: biodeterioration risk and contamination of the indoor air" *FEMS Microbiol Ecol*. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12165>.
- ROBLEDO, M.S.(1991) *Caracterización taxonómica, distribución y algunos aspectos fisiológicos de Aspergillus spp. que deterioran documentos en el Archivo General de la Nación*. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. México. UNAM. (1991) <http://oreon.dgbiblio.unam.mx>.
- ROJAS, T.I., AIRA, M.J., BATISTA, A., CRUZ, I.L., GONZÁLES, S. (2012). "Fungal biodeterioration in historic buildings of Havana, Cuba". *Grana*, 51(1), 44-51. <https://doi.org/10.1080/00173134.2011.643920>
- ROSS, A.C. HOLLIS, B. "Microbiological deterioration of pulp wood, paper, and paint". In "*Industrial Microbiology*" (B. M. Miller and W. Litsky, eds.) (1976), pp 309-354. Mc. Graw-Hill, New York.
- SARANRAJ, P., JAYAPRAKASH, A. BHAVANI, L. (2017). "Commercial production and application of bacterial alkaline protease: a review". *Indo- Asian Multidisciplinary Research* (IAJMR) 3 (5): 1228- 1250. <https://doi.org/10.22192/iajmr.2017.3.5.2>.
- SHABIR, A., KAHN, M. A., KAHAN, A.M., IQBAL; MAHMAD, F. (2007). "Fungal biodeterioration: a case of study in the Zoological Museum of Punjab University". *J. Anim. Pl. Sci* 17 (3-4): 90 – 92.
- SHI, C., MILLER, J. D. (2011) "Characterization of the 41 kDa allergen AspV 13, a subtilisin-like serine protease from *Aspergillus versicolor*". *Mol. Immunol.* 48:1827 -34.
- SIMMONS, J. E., MUÑOZ SABA, Y. Eds. (2005). *Cuidado, Manejo y Conservación de las Colecciones Biológicas*. Conservación Internacional. Serie de Manuales para la conservación. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- SKÓRA, J., GUTAROWSKA, B., PIELECH-PRZYBYLSKA, K., STĘPIEŃ, Ł., PIETRZAK, K., PIOTROWSKA, M. & PIETROWSKI, P. (2015). Assessment of microbiological contamination in the work environments of museums, archives and libraries. *Aerobiologia*, 31, 389-401. <https://doi.org/10.1007/s10453-015-9372-8>
- SMITH, G. (1980). *Ecology and field biology*. Harper and Row. New York. 850 pp.
- SØRENSEN, T. (1957). "A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons". *Kongelige Danske Videnskabernes Selskab* 5(4): 1-34.
- STERFLINGER, K. & PIÑAR, G. (2013). "Microbial deterioration of cultural heritage and works of art- tilting at windmills?" *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 97: 9637 – 9046. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5283-1>
- STRYJAKOWSKA-SEKUSKA, M., PIOTRASZEWSKA-PAJAK, A., SZYSZKA, A., NOWICKI, M., FILIPAK, M. (2007). "Microbiological quality of indoor air in university rooms". *Polish Journal of Environmental Studies*. 16(4): 623-632.
- UNKOVIĆ, N., DIMKIĆ, I., STANCOVIĆ, S., JELIKIĆ STANOJEVIĆ, D., POPOVIĆ, S., STUPAR, M., VUKOJEVIĆ, J., LJALJEVIĆ GRBIĆ, M. (2018) "Seasonal diversity of biodeteriogenic, pathogenic, and toxigenic constituents of airborne mycobiota in a sacral environment. *Arh Hig Rada Toksikol*; 69:317-327. <https://doi.org/10.2478/aiht-2018-69-3194>.
- WILLS, B., WARD, C., SÁIZ GÓMEZ, V. (2014). "Conservation of Human Remains from Archeological Contexts" en Fletcher, A, Daniel, A., Hill, J. D Eds. *Regarding the Dead: Human Remains in the British Museum*. London: The British Museum.
- WIRTH, F., GOLDANI, L. Z. (2012). "Epidemiology of *Rhodotorula*: an emerging pathogen". *Interdiscip Perspect Infect Dis*. 2012; 2012:465717. <https://doi.org/10.1155/2012/465717>

**Autor/es****Andrea Cecilia Mallo**
[malloa2001@yahoo.com.ar](mailto:malloa2001@yahoo.com.ar)

 Facultad de Ciencias Naturales y Museo,  
 Universidad Nacional de La Plata,  
 Argentina.

Licenciada en Biología, orientación Botánica, Universidad Nacional de La Plata. Se desempeña como Personal de Apoyo a la Investigación, categoría Principal CIC - PBA en la temática de Aerobiología y Aeromicrobiología desde el año 2006 en la Cátedra de Palinología de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Docente en la Cátedra de Introducción a la Botánica en la Facultad de Cs Naturales y Museo, Categoría de Docente Investigador IV. Ha participado en 9 Proyectos de Investigación de la Universidad Nacional de la Plata y Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y en la actualidad es integrante de Proyectos de Incentivos, UNLP; PIP CONICET, y ANPCyT. Ha sido Miembro de Comisiones Asesoras, Consejo Consultivo Departamental de Botánica de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) evaluador de Proyectos de Investigación para la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y ha realizado arbitrajes en revistas nacionales e internacionales. Posee múltiples trabajos publicados en revistas científicas indexadas, capítulos de libro, trabajos completos en Actas de Congreso y presentaciones en congresos nacionales e internacionales. Ha realizado informes técnicos de distintas Salas del Museo de La Plata y del Archivo del Senado de la Provincia de Buenos Aires, Legislatura de la Provincia de Buenos Aires. Ha sido Codirectora de Pasantías y Becas en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo.

**Daniela Sivana Nitiu**
[danielanitiu@yahoo.com.ar](mailto:danielanitiu@yahoo.com.ar)

 Facultad de Ciencias Naturales y Museo,  
 Universidad Nacional de La Plata,  
 Argentina.

Licenciada en Biología con Orientación Botánica y Doctora en Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de La Plata. Investigadora del CONICET. Docente Investigador de la Cátedra de Palinología de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo con Categoría de Docente Investigador II. Desarrolla investigación en el campo de la Aerobiología y la Aeromicrobiología desde el año 1996. Directora de Proyectos de Investigación en la Universidad Nacional de La Plata. Evaluador de Proyectos de Investigación a nivel nacional e internacional. Ha realizado arbitrajes en revistas nacionales e internacionales. Directora de Tesis Doctoral (CONICET) y de pasantes para estudiantes de la FCNYM (UNLP). Posee numerosos antecedentes en Reuniones y Publicaciones en distintos ámbitos científicos nacionales e internacionales. Posee numerosos trabajos publicados en revistas científicas indexadas, capítulos de libro, trabajos completos en Actas de Congreso y presentaciones en congresos nacionales e internacionales. Ha recibido premios a trabajos científicos en diversos eventos científicos. Es miembro

editor de la Revista Timisoara (Polonia). Es evaluador de diversas revistas científicas indexadas. Ha realizado Informes Técnicos para el Museo de La Plata y la Legislatura de la Provincia de Buenos Aires. Ha codirigido pasantías en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo.

**Lorena Alejandra Elíades**
[lorenaeliades@yahoo.com](mailto:lorenaeliades@yahoo.com)

 Instituto Spegazzini . Facultad de Ciencias  
 Naturales y Museo, Universidad Nacional  
 de La Plata. Argentina

Licenciada en Biología orientación Ecología y Doctora en Ciencias Naturales, Títulos obtenidos en la Facultad de Cs Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (UNLP) Argentina. Se desempeña como Investigador Adjunto CONICET. Es Docente- Investigadora en la Cátedra de Botánica Sistemática I de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo, con Categoría de Docente Investigador III. La labor desarrollada por la Dra Elíades se ha plasmado en 32 trabajos científicos de relevancia y dan cuenta de la diversidad de comunidades de hongos en el suelo, hongos como agente de deterioro de materiales de importancia histórica para la cultura humana y hongos como agentes solubilizadores de nutrientes conjuntamente con enzimas asociadas a la patogénesis de insectos. Desarrolla proyectos vinculados a diversidad y capacidades enzimáticas de interés biotecnológico, de hongos saprófitos de suelos forestales y alcalinos. Ha presentado 37 trabajos en Congresos Nacionales, Latinoamericanos e internacionales. Ha concursado y obtenido diferentes subsidios para el financiamiento de su investigación en FONCyT Agencia de Promoción Científica y Tecnológica PICT y CONICET, PIP. Ha realizado análisis micológicos para diversas empresas y horticultores. Dirigió 6 estudiantes alumnos en pasantías entre 2014-2019. Es directora de dos tesis doctorales de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la UNLP. Se desempeña como evaluador de trabajos científicos de revistas internacionales y de resúmenes de presentaciones a congresos.

**Mauro Gabriel García Santa Cruz**
[mggarciasc@gmail.com](mailto:mggarciasc@gmail.com)

 Facultad de Arquitectura y Diseño,  
 Universidad Católica de La Plata (FAD  
 UCALP). Argentina.

Arquitecto (FAU UNLP) y Especialista en Planeamiento Paisajista y Medio Ambiente, (FCyF UNLP). Profesor adjunto de Arquitectura, Paisaje y Patrimonio (FAD UCALP), Investigador en Instituto de Investigación en Arquitectura y Territorio (INISAT FAD UCALP). Además es Investigador en Facultad de Bellas Artes, Universidad Nacional de La Plata (FBA UNLP) y Alumno del Doctorado en Arquitectura y Urbanismo (FAU UNLP). Obtiene Beca de Entrenamiento FAU UNLP (2007-2010) y Beca Doctoral CONICET (Abril 2014 - Marzo 2019). Luego obtiene Beca Iberoamérica, Jóvenes Profesores e Investigadores, Santander Universidades (Abril - Junio 2019), FAD UCALP (Argentina) y PUC Minas (Brasil). Por último Beca a la Formación (2019), Fondo Nacional de las Artes (FNA Argentina). Desde 2007 participa en proyectos de investigación con financiamiento de ANPCyT, CONICET,

UNLP y UCALP sobre arquitectura sustentable, conservación preventiva y gestión del patrimonio cultural. es autor y coautor de artículos publicados en revistas científicas con referato, capítulos de libros y trabajos publicados en las actas de eventos científicos. Actualmente es Miembro de International Council on Monuments and Sites (ICOMOS), International Scientific Committee on Energy, Sustainability and Climate Change (ICOMOS ISCES + CC), International Council of Museums (ICOM), International Committee for University Museums and Collections (UMAC ICOM), International Building Performance Simulation Association (IBPSA).



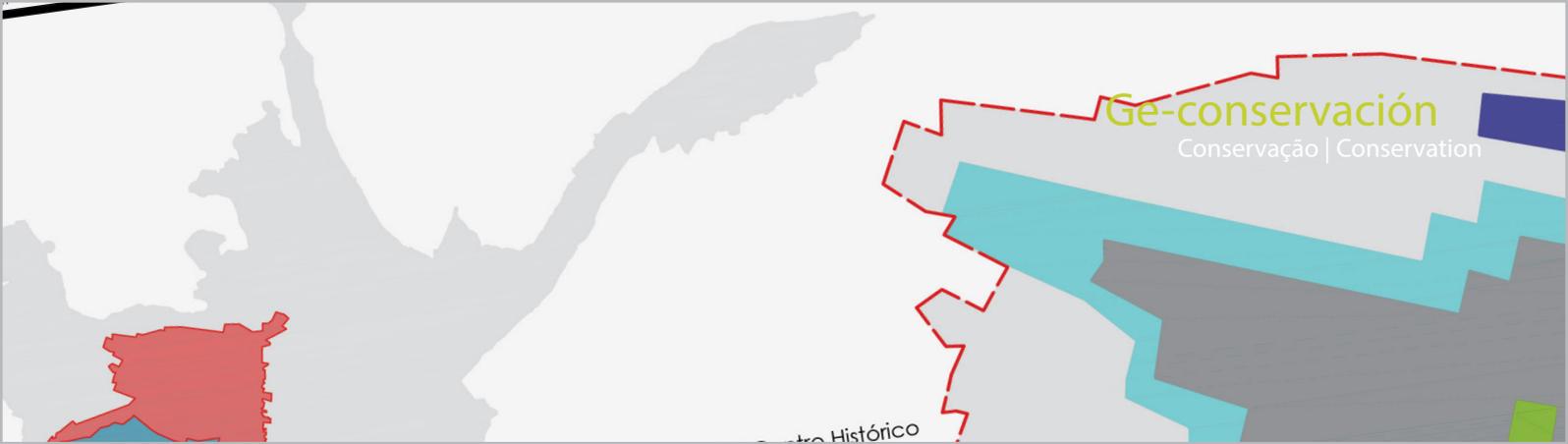
**Mario Carlos Nazareno Saparrat**  
masaparrat@fcnym.unlp.edu.ar  
Facultad de Ciencias Naturales y Museo,  
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales,  
Universidad Nacional de La Plata. Argentina

Licenciado en Biología orientación Botánica. Doctor en Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de La Plata. Investigador Independiente CONICET en el Instituto de Fisiología Vegetal de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Profesor Titular UNLP en la Cátedra de Botánica Sistemática I (Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP) y Profesor Adjunto UNLP en la Cátedra Microbiología agrícola (Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP) y Vicepresidente de la Asociación Micológica Carlos Spegazzini. Desarrolla investigación en el campo de la fisiología de hongos y su rol en la transformación de materiales orgánicos y los pigmentos de los hongos, específicamente melaninas. Participa del Programa de Incentivos a los Docentes-Investigadores, Secretaría de Política Universitaria del Ministerio de Educación de la Nación en la Categoría II. Posee financiamiento para su investigación PICT como Investigador responsable (grupo en formación). Ha realizado diversas estancias y pasantías posdoctorales en el exterior. Ha recibido 4 distinciones. Ha sido docente expositor en numerosos cursos de postgrado. Ha sido coordinador y expositor en numerosos y diversos eventos científicos. Es director de varios becarios y tesistas en diferentes centros del país. Evaluador de Comisiones Científicas, Tesis y concursos docentes. Tiene en su haber numerosos arbitrajes de publicaciones científicas nacionales e internacionales y es Editor de sección sobre Plantas avasculares en la Revista Nacional “Darwiniana Nueva Serie”. Ha participado en numerosos congresos y eventos científicos y presenta un alto número de publicaciones como primer autor, autor responsable (último) y en coautoría.

**Artículo enviado el 10/07/2019**  
**Artículo aceptado el 19/02/2020**



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.682>



# Diagnóstico de materiales y lesiones en las fachadas del centro histórico de Cuenca (Ecuador)

María del Cisne Aguirre Ullauri, Edison Maximiliano Castillo Carchipulla y Darío Miguel López León

**Resumen:** Los materiales utilizados en envolventes y fachadas cumplen un papel sustancial en la constitución de los edificios a nivel estético y funcional. La sinergia de agentes climáticos, actividades antrópicas relacionada al uso, intervenciones nocivas, vandalismo y otros factores evidencian deterioro. En el caso del Centro Histórico de Cuenca (Ecuador) este panorama ha sido poco estudiado, por lo que la presente investigación expone una aproximación desde a) el análisis arquitectónico de 35 envolventes, b) la tipificación de lesiones, c) la evaluación de impacto ambiental y, d) la propuesta de aplicación normativa para estudios analíticos previos a la intervención. Se identifican 14 materiales de uso histórico con afecciones en niveles severo y moderado; los más usados y afectados son los cerámicos, térreos y vítreos, además de la madera y el travertino a nivel particular. Se expone la sensibilidad de los materiales frente al ambiente y la demanda de políticas técnicas para su conocimiento y tratamiento. Por su capacidad inferencial se consideran 5 envolventes como el punto de partida para el estudio analítico conforme normativa internacional.

**Palabras clave:** materiales, lesiones patológicas, aplicación normativa, estudios analíticos, estado de conservación

## Material and damage diagnosis on the facades of the Historic Center of Cuenca (Ecuador)

**Abstract:** The materials used in architectural envelopes and facades are essential in building construction both, aesthetically and in terms of usefulness. The synergy of climatic agents and human activities related to the use, damaging actions, vandalism, and other issues, evidence their deterioration. In the case of the Historical Center of Cuenca (Ecuador) this panorama has not been amply studied, which is why the present research approaches it from a) the architectural analysis of 35 architectural envelopes, b) the categorization of damages, c) the environmental impact analysis, and d) the normative application proposal for prior intervention analytical studies. This way, 14 historically used materials presenting severe to moderate damages are being identified; the most used and damaged are ceramics, earthen, and glass, as well as wood and travertine in a particular level. It reveals the materials' reaction to the environment and the need for their study and treatment technical policies. Due to their characteristics, five architectural envelopes will be considered as the starting point for the analytical study since international standards.

**Keyword:** materials, pathological damage, normative application, analytical studies, state of conservation

## Diagnóstico de materiais e danos nas fachadas do centro histórico de Cuenca (Equador)

**Resumo:** Os materiais utilizados em envolventes e fachadas desempenham um papel essencial na constituição de edifícios a nível estético e funcional. A sinergia de agentes climáticos, atividades antrópicas relacionadas com o uso, intervenções prejudiciais, vandalismo e outros fatores originam deterioração. No caso do centro histórico de Cuenca (Equador), esse panorama foi pouco estudado e por isso esta pesquisa apresenta uma abordagem que envolve: a) análise arquitetónica de 35 envolventes, b) tipificação dos danos, c) avaliação do impacto ambiental e d) proposta de aplicação normativa para estudos analíticos anteriores à intervenção. Identificaram-se 14 materiais de uso histórico com danos severos ou moderados; os mais utilizados e afetados são os cerâmicos, térreos e vítreos, além da madeira e do travertino a um nível particular. Foram expostas a sensibilidade dos materiais ao meio ambiente e a necessidade de políticas técnicas para o seu conhecimento e tratamento. Devido à sua capacidade inferencial, consideraram-se 5 envolventes como ponto de partida para o estudo analítico de acordo com a normativa internacional.

**Palavras-chave:** materiais, danos patológicos, aplicação normativa, estudos analíticos, estado de conservação

## Introducción

El Centro Histórico de Cuenca (CHC) situado en la región austral del Ecuador constituye uno de sus asentamientos patrimoniales destacados. Producto de la sucesión histórica entre pueblos prehispánicos e hispánicos, la definición urbana y arquitectónica incluye diversas condiciones de utilización de materiales, sistemas constructivos y conocimientos ancestrales. La arquitectura como el componente tangible más representativo expone problemáticas históricas y tipológicas ampliamente estudiadas, mientras que las asociadas a los materiales, factores y lesiones, son limitadas. El estudio de las últimas tiene aportes específicos en el *Atlas de Daños. Edificaciones patrimoniales de Cuenca* (Achig Balarezoe et al. 2016) basado en el *Monument Damage Diagnosis System* desarrollado por KU Leuven y otras universidades europeas (Van Balen y Verstryng 2016) para clasificar lesiones de bienes patrimoniales e ilustrar condiciones semejantes en otras entidades. Su antecedente es el *Damage Atlas Historical Cuenca, Ecuador* (De Jongh, Van Wijnenndaele, Cardoso y Van Balen 2009). Otro aporte es la *Metodología de Manuales de Conservación Preventiva* (Cardoso 2009) que identifica y valora afecciones y riesgo. En lo nacional, la contraparte de la administración pública son la *Propuesta de mapa de riesgos de bienes patrimoniales inmuebles expuestos a amenazas de origen natural* (Rueda 2014), y la *Guía de medidas preventivas para amenaza sísmica, seguridad, protección y manejo de bienes culturales* (INPC 2011).

Esta falencia superada en escenarios internacionales, no es más que la constante nacional. Los mayores alcances son advertibles y se posicionan en Quito, e incluyen ejercicios de caracterización de materiales (Aguirre Ullauri y Sanz Arauz 2017). En otras ciudades se recurre a estudios arquitectónicos de documentación para contextualizar la relación materiales - lesiones; las últimas si acaso se analizan y evalúan. En el CHC el diagnóstico patológico es paralelo al relevamiento arquitectónico y como complemento a la actividad proyectual, sin embargo, tampoco alcanza el estudio de la triada material - lesión - factor (es) de incidencia. Por ello, ante los efectos físicos, socio - culturales y ambientales sobre los edificios patrimoniales se plantea el estudio de 35 envolventes desde el análisis arquitectónico y la evaluación de impacto ambiental (EIA).

## Antecedentes

La degradación de la envolvente o fachada de los edificios preocupa reiteradamente; en general es el indicador de la conservación monumental y con frecuencia la causa de las acciones de rehabilitación (Balaras et al. 2005). Las lesiones se agravan con el tiempo; mientras algunas se atenúan, otras se transforman o surgen por cambios antrópicos, generando rechazo social y detrimento del paisaje urbano histórico. Esta condición latente en los

centros patrimoniales a escala mundial, también se avista en el CHC que concentra en 224,14 ha actividades de administración, intercambio, vivienda, educación y recreación, y la presión de los desplazamientos transitorios de la ciudad dispersa. Aunque no ha motivado reacciones su acentuación proyecta afecciones en la calidad, durabilidad y funcionalidad (Balaras et al. 2005; Rodrigues, Teixeira y Cardoso 2011).

En 1998 la formulación del expediente para la candidatura de Patrimonio Mundial, identifica la incidencia de los gases de combustión vehicular como una amenaza potencial en la conservación de la arquitectura del CHC (Cardoso 2017: 86). Pero, no es hasta el 2008 que Fundación Natura<sup>[1]</sup> implementa el primer sistema de seguimiento y diagnóstico ambiental; esta práctica permanente en Quito y Cuenca permite conocer y evaluar la calidad ambiental, sin embargo, no ha logrado medidas conjuntas de conservación. En el caso de los edificios históricos, sensibles al deterioro por uso, abandono, factores ambientales impredecibles, entre otros, los procesos de intervención y mantenimiento también trastocan las propiedades físicas, químicas y mecánicas, en búsqueda de recuperar el *dov'era e com'era*.

### —Fachadas o envolventes: características y gestión en el CHC

Los materiales recurrentes de las fachadas del CHC se vinculan a factores culturales. Para Muñoz (2015) la tradición es el aglutinante formal de los edificios populares y, el móvil seguro para la conservación de los rasgos arquitectónicos. Así, la cultura modelada por los factores ambientales, responde a las características funcionales de adaptación conforme el empleo de soluciones constructivas y estilos, y a las fluctuaciones socio económicas, por tanto y según Rodas, Astudillo y Rodas (2018) la transformación de la arquitectura puede ser un indicador en la mejora en la calidad de vida. En este concierto, estilos como el neoclásico y materiales como el mármol, travertino, metales y semejantes, se asumen como la envoltura significativa del CHC. Con ello la noción teórica de fachada, no envolvente, ratifica el soporte efectivo de la forma, función y tecnología.

Entre 1890 y 1940 <sup>[2]</sup> los ejercicios de proyección arquitectónica tienen connotaciones particulares; la arquitectura de obra nueva se yergue como el modelo de modernización social aunque predominan las adaptaciones. Espinoza y Calle (2002) pioneros en el estudio indican que, por un lado se *bordan* paramentos exteriores, y por otro se insertan *epidermis*. En ambos casos se contraponen realidades; la definición histórica progresiva de los modelos arquitectónicos con una inconsciente posibilidad de liberación de la fachada de toda referencia funcional, espacial o estructural. Además, a pesar de que la definición de los recursos teóricos no se conjuga conforme la visión de Albertalli (2009), el cambio entre fachada y envolvente encaja en la dinámica

edificatoria del CHC. Desde lo vernáculo, popular o colonial y moderno, la tierra, madera, pétreos y fibras vegetales, lo propio evoca la flexibilidad de la noción de envolvente a partir de su versatilidad, es así que, en el proceso de transición, tanto su articulación como desarticulación podría no identificarse.

Al tratarse de edificios preexistentes estas condiciones atribuidas al material y al entorno exponen incidencias sinérgicas sobre la envoltura, denotando deterioro individual y urbano paulatino. Sin embargo, y pese al reconocimiento de esta problemática en el CHC, desde el siglo XVII se exponen casos de intervención monumental que alcanzan relevancia a inicios del siglo XXI sin considerar dicha dimensión, y únicamente enfocados en recuperar las condiciones de ocupación edilicia al tiempo de ennoblecer la envoltura. En ningún caso se inserta como demanda propia para la conservación la actividad de mantenimiento en lo arquitectónico y ambiental, es decir, la *gestión de la intervención* (Querol 2010). En el caso de bienes públicos, básicamente arquitectura monumental, la gestión supone un despliegue particular de recursos materiales y económicos, pero también excluye el binomio material – lesión. Por su parte, el Plan de Conservación Preventiva articulado al Plan Especial de Centro Histórico del año 2010 pretendía programar acciones de mantenimiento de los bienes patrimoniales y prevenir posibles amenazas, a través de la planificación e intervención profiláctica o paliativa (GAD de Cuenca 2010). Al no concretarse a la fecha, en el camino ordenanzas, reglamentos y normativas con espíritu paliativo han quedado obsoletos. Lo disponible indica que, *las edificaciones catalogadas como pertenecientes al Patrimonio Cultural Edificado de la ciudad (VHIAR 1, 2 y 3) [categorías no vigentes en la actualidad], cuyos paramentos frontales sean de materiales vistos (piedra, ladrillo, cerámica, etc.), obligatoriamente deberán mantener sus características naturales, por tanto es prohibido pintarlos, barnizarlos o cubrirlos con cualquier otro material que distorsione su expresión y presentación* (Ilustre Consejo Cantonal 2000). Por consiguiente, ante la inexistencia de parámetros técnicos para incluir o tratar materiales, y aunque no se ha constatado de manera fáctica algún nivel de agresión específico<sup>[3]</sup>, el tiempo, ambiente y sociedad, conforman un entorno hostil para la envolvente arquitectónica.

## Metodología

La investigación toma los instrumentos del proyecto *Los materiales en el estudio histórico – constructivo – ambiental de los conjuntos históricos. El caso de Cuenca*, financiado por la Universidad Católica de Cuenca. De tal suerte incluye; a) análisis arquitectónico de la fachada de 35 edificios patrimoniales [figura 1 y 2], b) tipificación de lesiones [figura 4, 6 y 7], c) evaluación de materiales frente al impacto ambiental [tabla 3], y d) propuesta de aplicación normativa para estudios analíticos previos a

la intervención [tabla 4]. El primer segmento considera que el Área Histórica y Patrimonial de Cuenca se divide en 178,23 ha de CHC o Área de Primer Orden, así como 30,12 y 15,70 ha de áreas especiales y arqueológicas. En este escenario coexisten 9338 edificaciones, de las cuales un tercio son patrimoniales en diferentes categorías (Heras 2015: 30; Cardoso 2017: 47) [figura 1]. Acometer el estudio de toda el área o los edificios supone una empresa poco factible a corto o mediano plazo, por lo que se incluyen las siguientes variables para definir el alcance concreto:

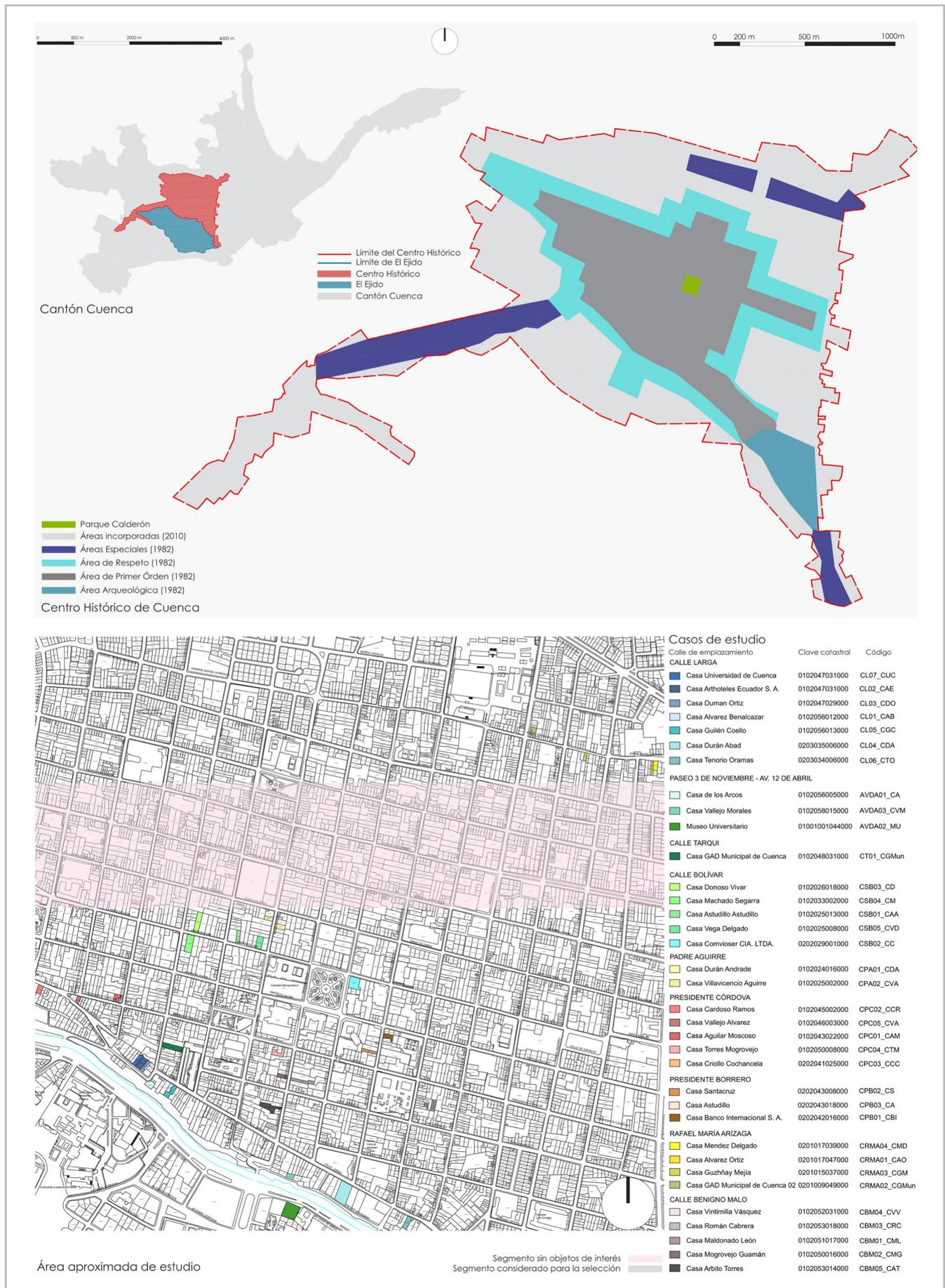
a) *Representatividad patrimonial*, es decir, estudiar edificios en todas las categorías de valor, a excepción de las denominadas *Sin valor* e *Impacto negativo*, por su significado intrínseco; en el caso de la categoría *Emergente*, máxima posible, se limita de antemano toda vez que sobrepasa el espectro de intervenciones o análisis convencionales. Por tanto, las categorías de interés son *Valor Arquitectónico A (VAR A)*, *Valor Arquitectónico B (VAR B)* y *Valor Ambiental (VA)*, como elementos de definición temporal<sup>[4]</sup> y significancia histórica en la urbe<sup>[5]</sup>, al incluir la diversidad de materiales característicos de la práctica arquitectónica, y propender a la evaluación inferencial

b) *Representatividad en la definición histórica de la ciudad*, al considerar el CHC como el núcleo fundacional y polifuncional, el conjunto de edificaciones a él asociadas representa desde las instancias estilísticas y constructivas el primer espacio de interés. Desde él, la definición progresiva de la ciudad ha dado lugar a situaciones que, en lo material y su relación con el ambiente, son desconocidas. Bajo esta consideración los casos de estudio promueven la definición de un marco de referencia para proyectar acciones de conocimiento científico desde la aplicación de normativas internacionales. Incluye como variables específicas de selección:

1. Localización en el Área de Primer Orden conforme las ordenanzas (1983 y 2010) y desde las declaratorias nacional (1982) y mundial (1999).
2. Representatividad en área y uso de materiales.
3. Uso histórico y contemporáneo de materiales.

c) *Representatividad en el contexto inmediato*, es decir, relevancia en términos de emplazamiento, ya sea en tramo, eje vial o barrio [figura 2]. Además, se considera que:

1. El caso seleccionado no necesariamente corresponde al edificio de mayor escala, sino a aquel de condiciones materiales concomitantes con la práctica arquitectónica de Cuenca.
2. La selección corresponde a ejemplos que eventualmente han sido estudiados por su relevancia individual y por tanto sería factible contrastar información.
3. La selección corresponde a edificios que definen la identidad material en su contexto inmediato, ya sea por la armonía con el conjunto, o relación arquitectónica, urbana y paisajística.



**Figura 1.-** Cartografía de los casos de estudio. Fuente: Dirección de Áreas Históricas y Patrimoniales 2017. Elaboración: Aguirre Ullauri 2019.

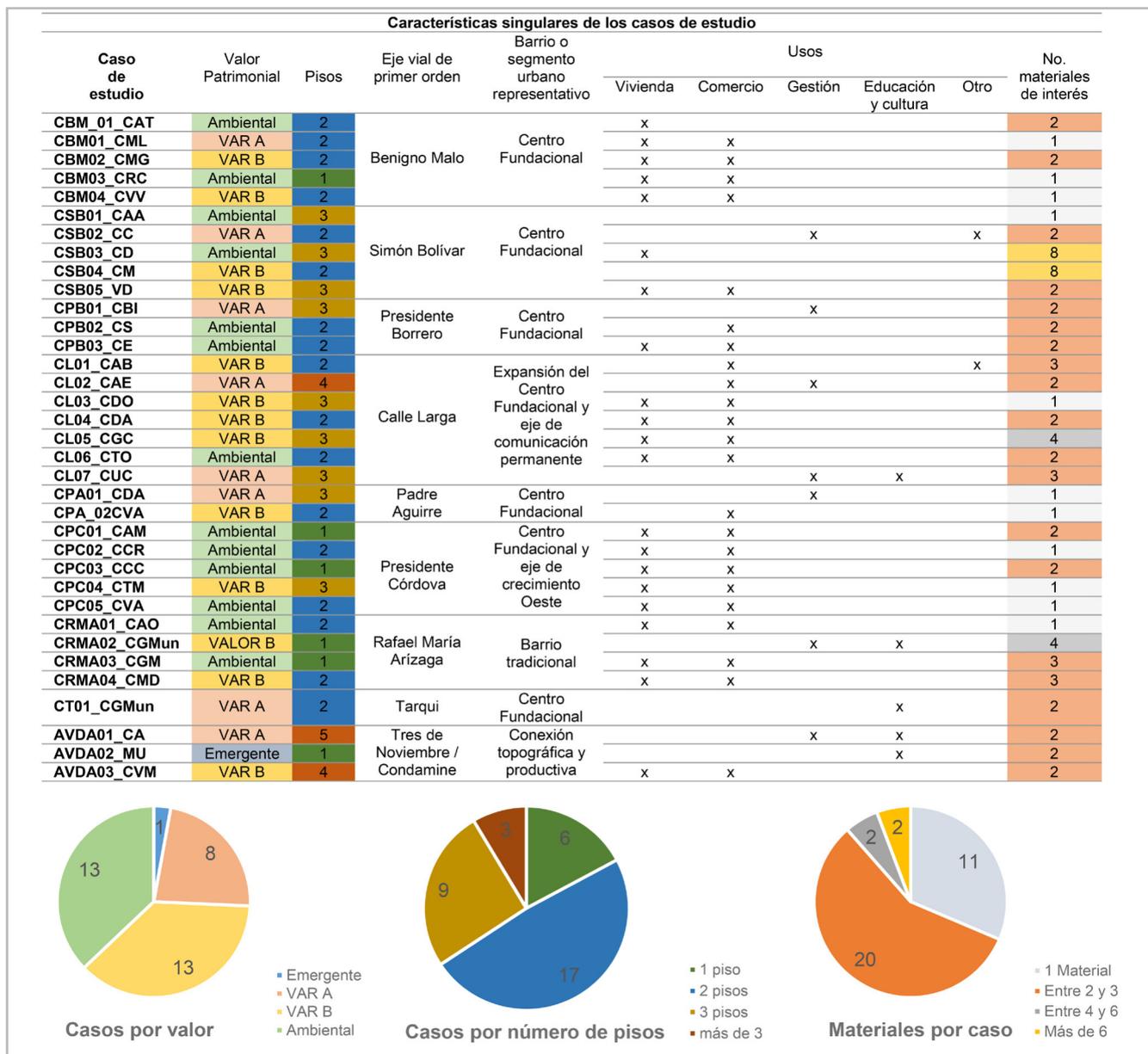


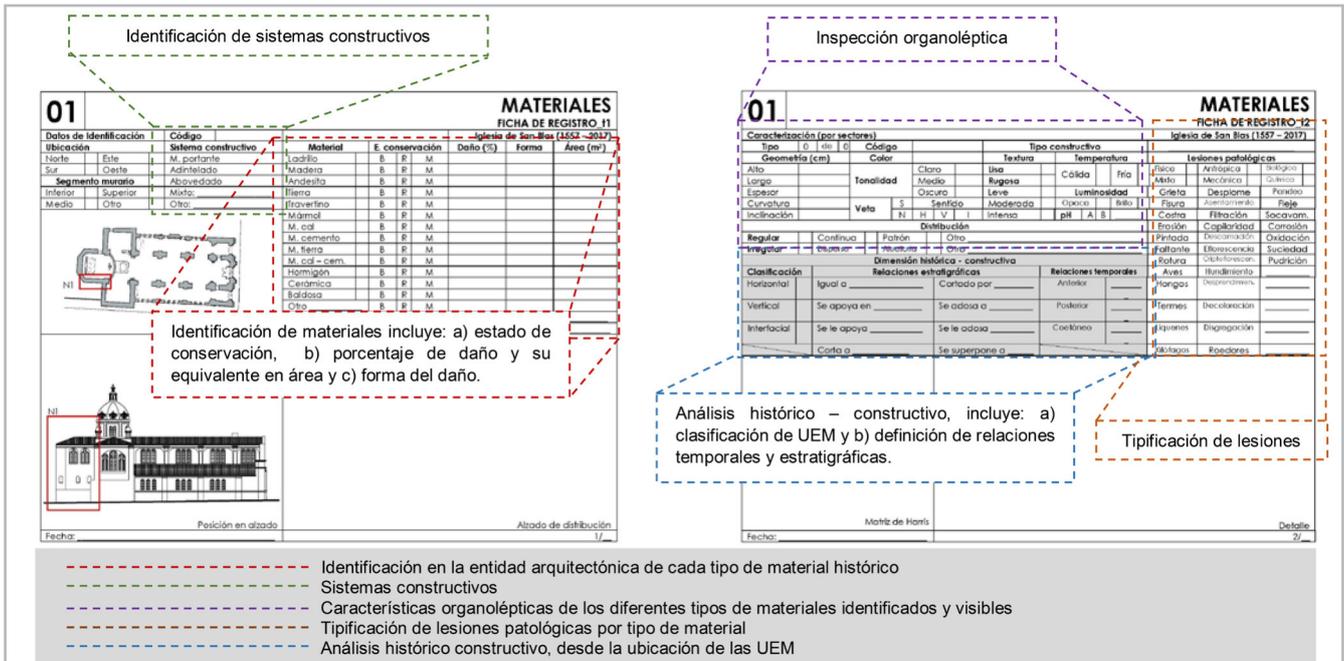
Figura 2.- Características de los casos de estudio. Fuente: Aguirre Ullauri *et al.* 2018. Elaboración: Aguirre Ullauri 2019

La estrategia para la selección de casos busca reconocer a precisión la importancia de las edificaciones, cuya tendencia a pasar desapercibidos es frecuente, sin embargo, constituyen segmentos de relevancia a la inmutabilidad y/o transformación de la ciudad y el paisaje urbano histórico. Así se orienta a aquellas que en el marco de los literales a), b) y c), representen formas tradicionales de ocupación y por tanto permiten mantener la vitalidad ciudadana. En relación a los parámetros de exclusión del literal a), no se analizan obras nuevas, arquitectura del movimiento moderno o contemporáneo, culto y asistencia social. Tampoco se considera la existencia o no de intervenciones potencialmente nocivas.

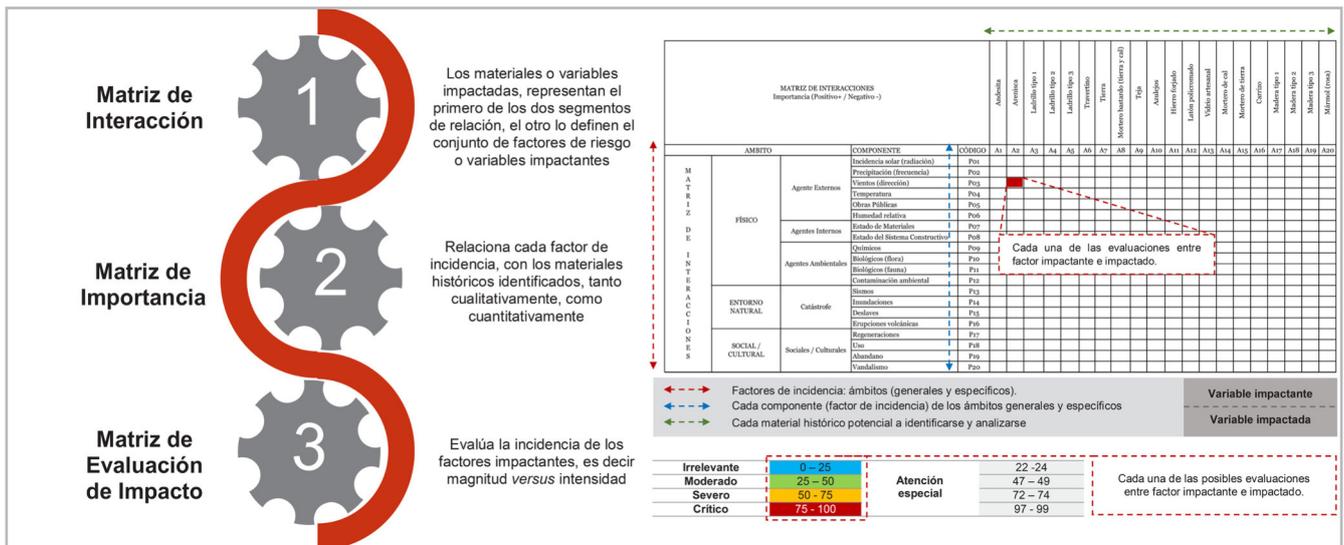
Seguidamente, el levantamiento arquitectónico y fotográfico asistido por aeronaves no tripuladas de las fachadas y la aplicación de las fichas técnico -

documentales elaboradas por Aguirre Ullauri, Solano Peláez, García, López, Carrión y Yamunaqué (2018) permiten identificar materiales, sistema constructivos, características organolépticas y lesiones patológicas según Rodríguez (2004) [figura 3].

Finalmente, la propuesta analítica de aplicación normativa y caracterización de materiales toma como base la EIA definido por Aguirre Ullauri, Solano Peláez, Segarra Villacís y Carrión Cabrera (2018); esto es 1) identificar interacciones entre materiales y factores del medio, así como la actividad antropogénica y el estado de conservación del edificio, 2) cuantificar y cualificar la importancia de las interacciones y, 3) determinar la EIA [figura 4]. Con ello se orienta el proceso de estudios analíticos desde el contexto europeo, estadounidense y peruano.



**Figura 3.-** Modelo de ficha de levantamiento arquitectónico. Fuente: Aguirre Ullauri *et al.* (2018). Elaboración: Aguirre Ullauri 2019



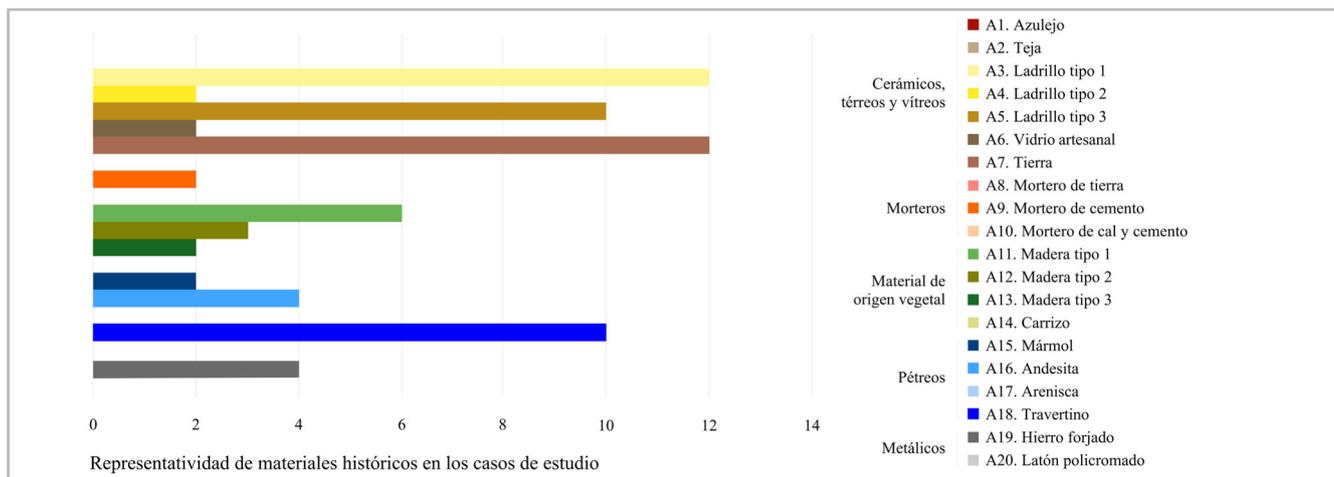
**Figura 4.-** Metodología de EIA. Fuente: Aguirre Ullauri *et al.* 2018. Elaboración: Aguirre Ullauri 2019

**Resultados y discusión**

Sobre el levantamiento de información se determina que en las 35 fachadas se depositan 14 de 20 materiales definibles como históricos [tabla 1]. Es decir, no se estudian azulejos, teja, vidrio artesanal, carrizo, arenisca y latón policromado. En casos como el ladrillo y la madera se reconocen al menos tres variaciones, según aparejo, geometría y características organolépticas [figura 6]. Esta situación evidencia la inexistencia de insumos técnicos de discriminación de materiales, y posiciona como escenario investigativo a la identificación de especies y los estudios de mensiocronología, arqueometría y cronotipología<sup>[6]</sup>.

Otros segmentos de interés es el comportamiento de los materiales frente a la radiación y presencia de agua, variaciones térmicas, de humedad relativa, entre otros.

Los cerámicos, térreos y vidrios predominan, aunque también reportan representatividad pétreos como el travertino. El resto de materiales tienen uso menor al promedio [figura 5]. Consecuentemente, la lógica edificatoria indica que el sistema constructivo portante prevalece, ya sea a partir de tierra, ladrillo o estructuras mixtas lineales o abovedadas. También se ratifica al adobe como soporte por excelencia de las envolventes del CHC (Achig Balarezo *et al* 2013).



**Figura 5.-** Representatividad por material. Fuente y Elaboración: Autores

Características organolépticas de materiales constructivos								
Clasificación	Cód.	Material	Untuosidad	Color	Tono	Luminosidad	Textura	Rugosidad
Cerámicos, térreos y vitreos	A01	Azulejo	nula	verde	claro	brillante	lisa	nula
	A02	Teja	nula	anaranjado	medio	opaco	lisa	nula
	A03	Ladrillo tipo 1	nula	anaranjado	claro	opaco	rugosa	leve
	A04	Ladrillo tipo 2	nula	anaranjado	medio	opaco	rugosa	leve
	A05	Ladrillo tipo 3	nula	anaranjado	mixto	opaco	rugosa	media
	A06	Vidrio artesanal	nula	transparente	claro	brillante	lisa	nula
	A07	Tierra	leve	café	oscuro	opaco	rugosa	leve
Morteros	A08	Mortero de tierra	leve	café	oscuro	opaco	rugosa	nula
	A09	Mortero de cal	leve	blanco	claro	opaco	rugosa	leve
	A10	Mortero cal-cemento	leve	gris	claro	opaco	rugosa	leve
Material de origen vegetal	A11	Madera tipo 1	nula	marrón	claro	opaco	lisa	nula
	A12	Madera tipo 2	nula	marrón	medio	opaco	lisa	nula
	A13	Madera tipo 3	nula	marrón	oscuro	opaco	lisa	nula
	A14	Carrizo	nula	mostaza	claro	brillante	lisa	nula
Pétreos	A15	Mármol	nula	blanco	claro	brillante	lisa	nula
	A16	Andesita	nula	gris	oscuro	opaco	lisa	nula
	A17	Arenisca	nula	gris	claro	opaco	lisa	nula
	A18	Travertino	nula	rosado	claro	brillante	lisa	leve
Metálicos	A19	Hierro forjado	nula	negro	oscuro	opaco	lisa	nula
	A20	Latón policromado	nula	policromía	medio	brillante	rugosa	media
Simbología			Materiales analizados			Materiales no analizados		

**Tabla 1.-** Características organolépticas. Fuente y Elaboración: Autores

Las características organolépticas como aproximación al material sin ayuda de instrumentos de medición evidencian que, tanto el acabado como el color, las variaciones de tono o la untuosidad constituyen escenarios propicios para el deterioro progresivo o particularmente agresivo del medio, más cuando convergen [tabla 1]. Las prácticas locales de obtención, transporte, comercialización y coexistencia sincrónica en el edificio, las condicionan. De ello el mantenimiento y/o intervención juegan un segmento de relevancia para reconocer el impacto ambiental a través de los síntomas del proceso patológico. Además, exponen la inmediatez correctiva y su contraproducente acción catalizadora de síntomas y cambios cualitativos (Douglas-Jones, Hughes y Yarrow 2016). En el último escenario, bajo orientaciones mixtificadas entre el *Restauo Estilístico* y la *Notoriedad*, prácticas típicas de la urbe, la esencia

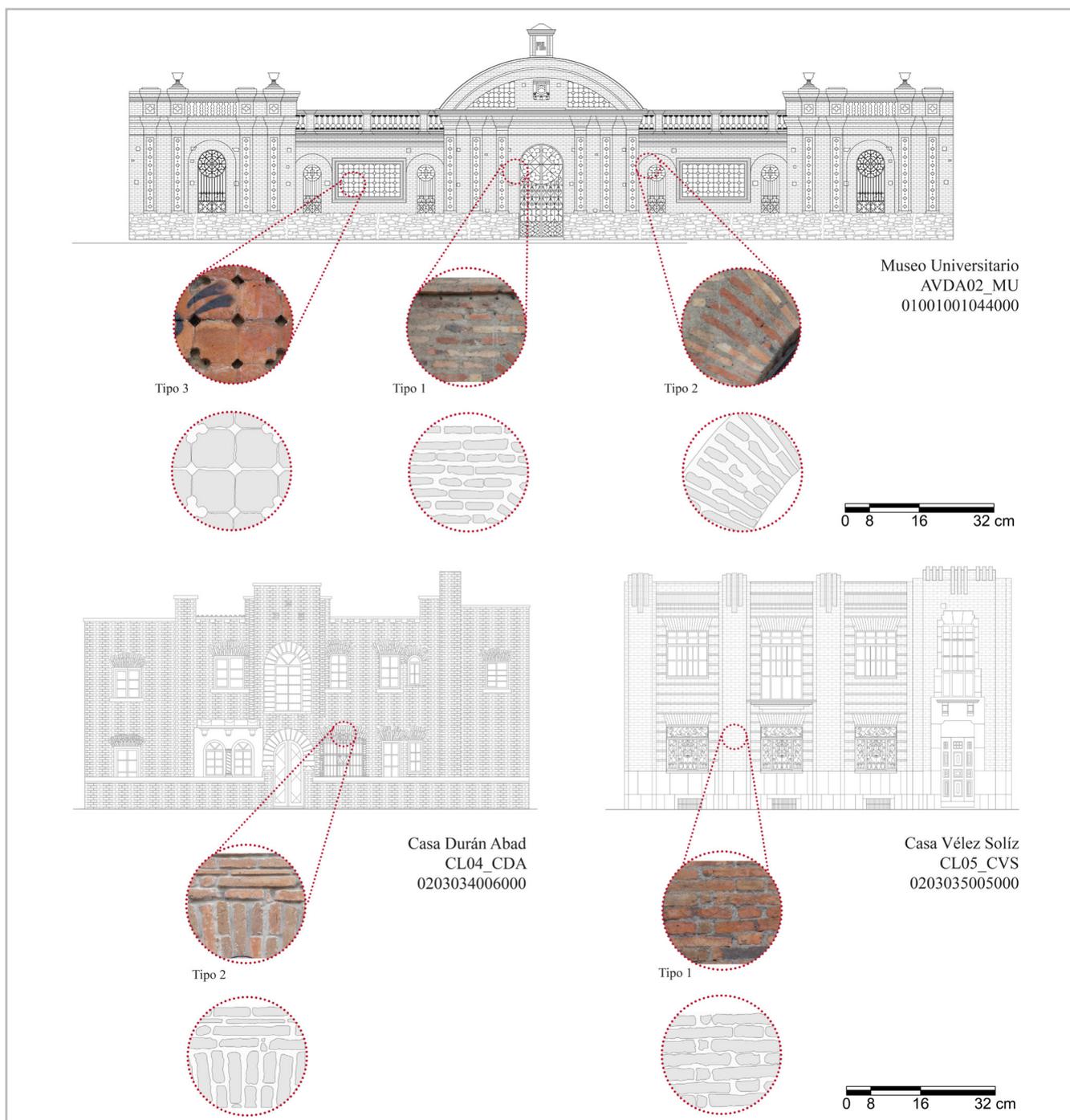
material e histórica entendida como proceso natural en la edificación refleja *neofilia* (Lorenz 2004). Por tanto, la evidencia del paso del tiempo como determinante de la transformación no tiene cabida, y deriva en estructuras arquitectónicas atemporales y vulnerables al deterioro por incompatibilidades; puede entonces pendular el deterioro entre la degradación total y el ennoblecimiento superlativo con todos sus matices (Sahady Villanueva y Gallardo Gastelo 2009). En ambientes como el CHC se acentúa, al reflejar las condiciones más pendencieras de la urbe (Orellana Samaniego, Sellers Walden y Martínez Gavilánez 2017).

En el campo de las lesiones patológicas si bien no se puede hablar de un patrón de comportamiento físicos o temporales, ante la inexistencia de datos previos, se determina que las características organolépticas más

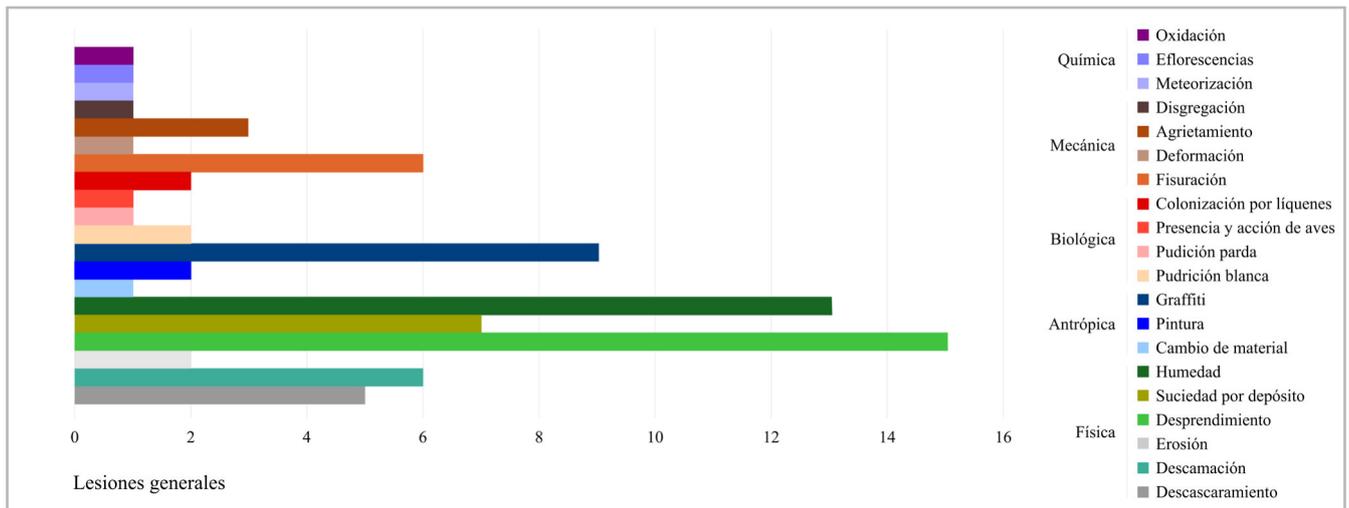
desfavorables elevan la vulnerabilidad del material al medio, pero a su vez facilitan la visibilidad de la lesión [tabla 1]. En los casos, el deterioro físico (desprendimientos, suciedad por depósito y humedad), antrópico (graffitis) y estructural (fisuras y grietas) describe el cuadro patológico general [figura 7]. Lo propio se ratifica desde el análisis por material [figura 8]. A excepción del mortero de tierra, los materiales presentan suciedad por depósito y graffitis como incidencias alarmantes; mientras que las fisuras, grietas y humedad sin llegar a ser despreciables, son menos significativas. Por su parte, las afecciones químicas no son representativas a simple vista, no así

el estado de conservación de materiales como el hierro forjado, colado o fundido.

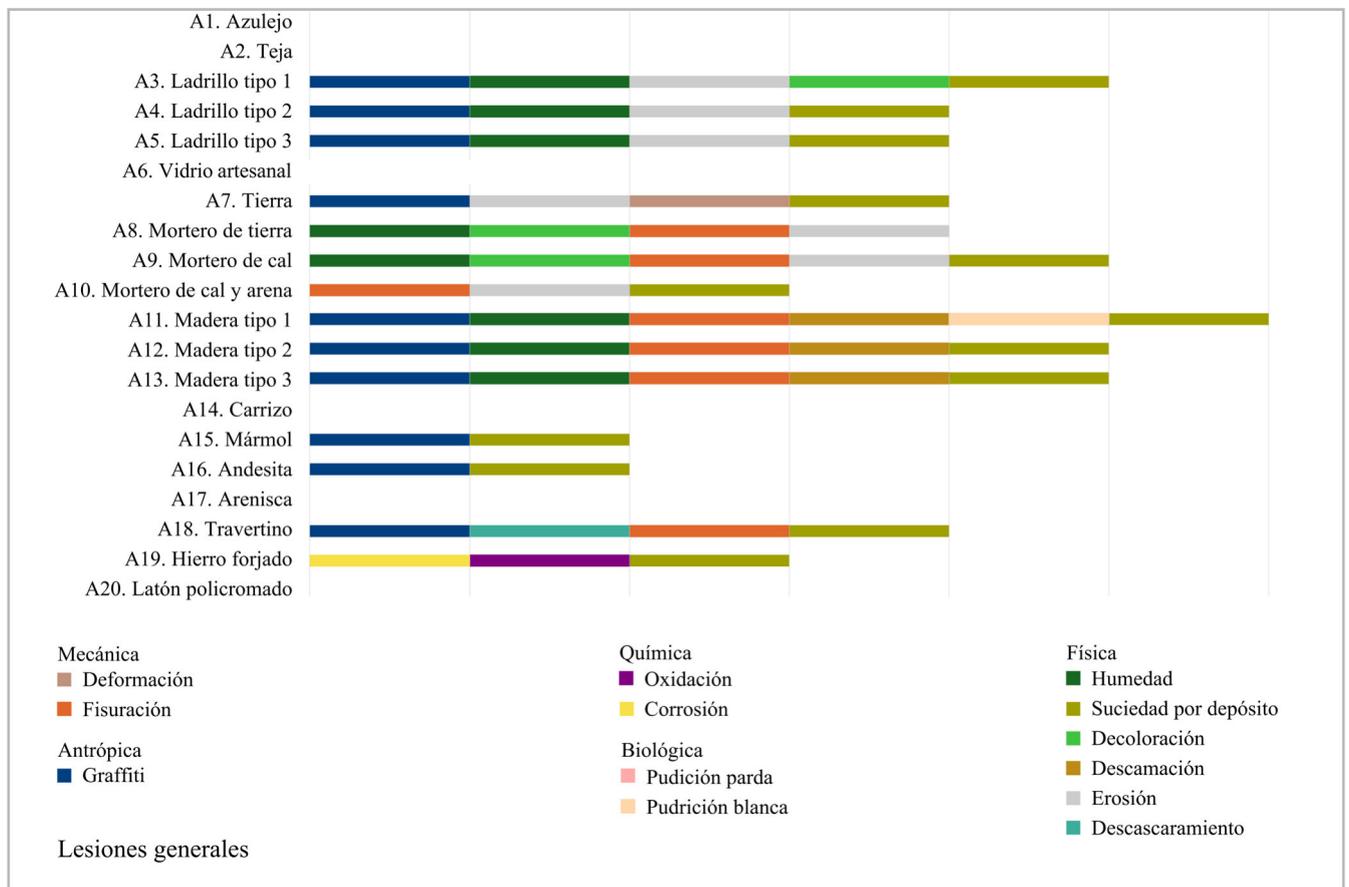
Sobre la descripción general y desde la EIA [tabla 2] se confirma que los materiales más afectados son la tierra, ladrillo, hierro forjado y madera, así también que las condiciones ambientales reportan incidencias de corrección y mitigación, que se corresponden con los niveles *Severo* y *Crítico* de la Matriz de Leopold [figura 4]. Adicionalmente, el nivel de *Atención Especial* toma protagonismo como complemento para orientar las prioridades de intervención, ya que supone vulnerabilidad potencial ante la agresividad del ambiente.



**Figura 6.-** Tipos de ladrillos: reconocimiento preliminar. Fuente y Elaboración: Autores



**Figura 7.-** Lesiones generales. Fuente y Elaboración: Autores



**Figura 8.-** Lesiones generales por material. Fuente y Elaboración: Autores.

Al considerar la EIA desde valoraciones parciales la premura de medidas de intervención disminuye. Un caso reporta incidencia en nivel *Severo*, mientras 3 en *Atención Especial* y 31 en *Moderado* [figura 9]. En los casos más frecuentes, coinciden la valoración patrimonial significativa e intensidad de uso. Asimismo, la adaptación con o sin proceso de intervención acentúa el detrimento, y por tanto el mal estado de conservación y vulnerabilidad a la acción de factores de deterioro. Este hecho ratifica que las

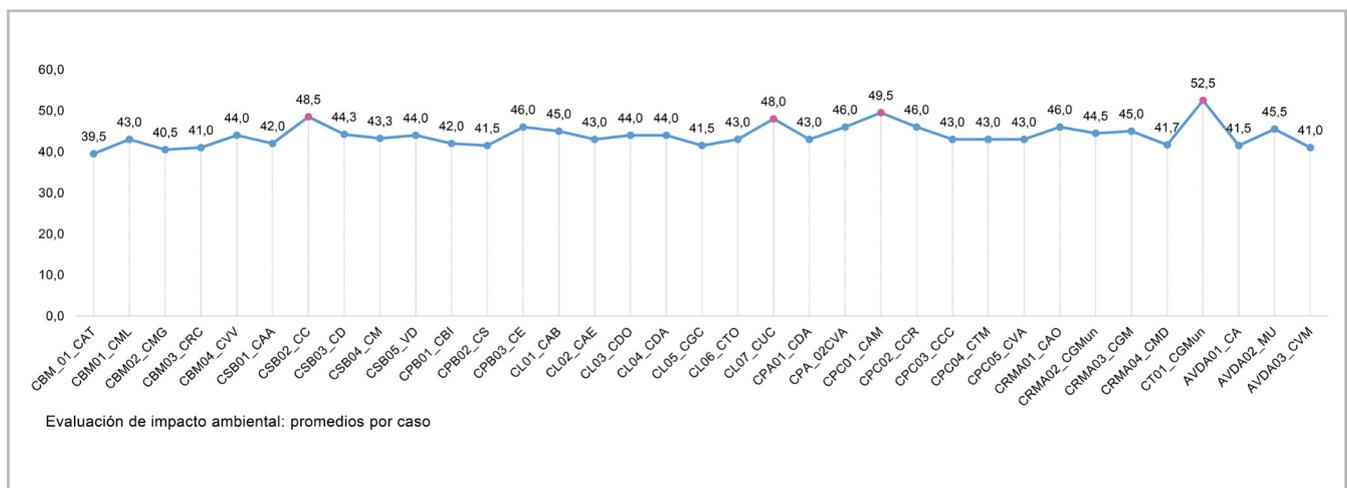
condiciones particulares de los casos son concomitantes en sus afecciones; la naturaleza, acabado y exposición al medio, suponen un grupo de los factores de impacto, cuya acción sinérgica determina en *máxime* la condición patológica de cada material. De otro lado, si la valoración se produce por impacto acumulado y material [figura 10] el panorama es menos emergente aún, ya que solo el mortero de cal y cemento demanda *Atención Especial*; el resto de materiales se enmarcan en el nivel *Moderado*.

CASO	Materiales																			
	Cerámicos, térreos y vítreos							Morteros			M. de origen vegetal				Pétreos				Metálicos	
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20
CBM05_CAT							44	38												
CBM01_CML			43																	
CBM02_CMG								40			41									
CBM03_CRC							41													
CBM04_CVV			44																	
CSB01_CAA																			42	
CSB02_CC							49				48									
CSB03_CD								44	43	46	46	46	47					46		
CSB04_CM								44	44	47	43	43	43					46		
CSB05_CVD							44								44					
CPB01_CBI								43											41	
CPB02_CS					44											39				
CPB03_CA								47			45									
CL01_CAB					44														48	43
CL02_CAE								44											42	
CL03_CDO					44															
CL04_GDA			43																45	
CL05_CGC			38	49															42	37
CL06_CTO				41	45															
CL07_CUC			49																43	52
CPA01_CDA								43												
CPA02_CVA															46					
CPC01_CAM										52	47									
CPC02_CCR								46												
CPC03_CCC			41					45												
CPC04_CTM																43				
CPC05_CVA								43												
CRMA01_CAO								46												
CRMA02_CGMun			38					51	53		39									
CRMA03_CGM								42	46		47									
CRMA04_CMD								40			45					40				
CT01_CGMun								56												49
AVDA01_CA					38						45									
AVDA02_MU			46													45				
AVDA03_CVM					40						42									

Simbología							
Irrelevante	0-25	Moderado	25-50	Severo	50-75	Crítico	75-100
<b>Atención especial: límite hacia el nivel inmediato superior</b>							

**Tabla 2.-** EIA por material. Fuente y Elaboración: Autores.



**Figura 9.-** EIA: promedios por caso. Fuente y Elaboración: Aguirre Ullauri 2019.

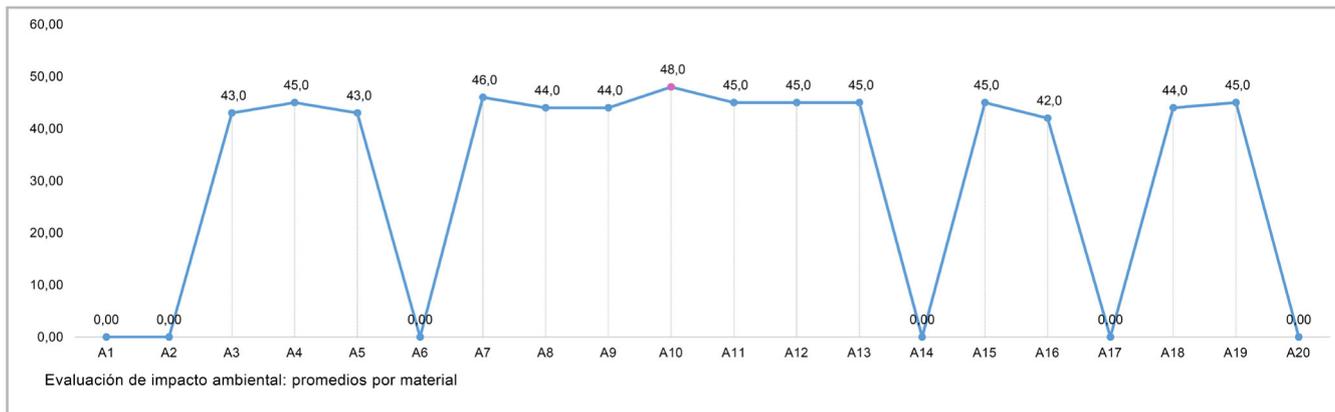


Figura 10.- EIA: promedios por material. Fuente y Elaboración: Aguirre Ullauri 2019.

Como contraparte del estudio patológico, y para su cualificación es indiscutible considerar que en contextos urbano - arquitectónicos deteriorados, los sentimientos de empoderamiento ciudadano disminuyen, contribuyendo a posicionar la vulnerabilidad de las preexistencias frente a la acción antropogénica destructora. Sectores como El Barrial Blanco o El Vado se definen como inseguros, insalubres y desordenados en el imaginario ciudadano. Por ello, la tipificación de lesiones y descripción de interacciones describen además los sentimientos de reconocimiento y estima ciudadana, articulados a visiones productivas y turísticas. En última instancia, el deterioro conforma un indicador de habitabilidad y de ello, la necesidad de propender hacia el *buen vivir*.

En este punto conviene la evaluación retrospectiva. En general, la distribución de los materiales de uso histórico no tiene relación directa, ya sea con el valor patrimonial vigente, a su vez con estilos y la EIA. Los materiales predominantes presentan impactos *Moderados*, aun cuando se han detectado múltiples afecciones, lo que ratificaría sus cualidades resistentes; por su parte el material más vulnerable, también reporta incidencia *Moderada*, aunque expone menores lesiones que los anteriores [figura 8], ya que su uso es menos frecuente en edificaciones al definirse como el material por excelencia de las vías del CHC. Desde la singularidad de los casos analizados es advertible la continuidad en el nivel de afección de los materiales, pues las mayores variaciones, entre 15 y 16 puntos son escasas. Igual particular se evidencia al considerar cada edificación; el promedio oscila entre 4 y 6 puntos. Por ello, las condiciones descritas invitan a investigar sobre los materiales y sus condiciones intrínsecas a fin de discriminar los pormenores de su vulnerabilidad y/o resistencia.

Metodológicamente, la EIA es un planteamiento efectivo, aunque pueden generarse incordios, permite orientar la toma de decisiones priorizada a la hora de la aplicación normativa y estudios analíticos. Asimismo al considerar las variables a), b) y c) de la selección de casos en estricto orden, se evidencia que a) y c) podrían ser irrelevantes

si b) presenta mayores efectos multiplicadores. Por ello, se asume la importancia de la ubicación de los casos y prevalece a) y 3 de b), es decir, la presencia de los materiales de interés. Insertando las condiciones acumuladas de la EIA asociadas al uso, tipo e intensidad, se conforma el primer escenario a nivel introductorio, emergente y corto plazo. A mediano y largo plazo tiene visión de constituirse como recurso para la conservación integral.

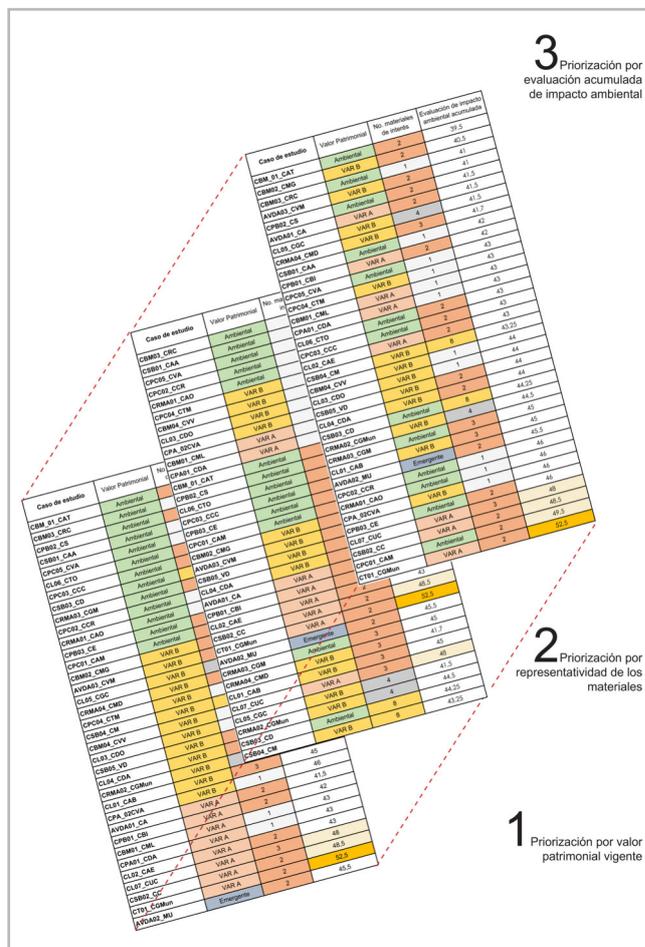


Figura 11.- Priorización de casos para el estudio analítico. Fuente y Elaboración: Aguirre Ullauri 2019.

Consideraciones previas				
Estudio	Caso de estudio	Norma Aplicable		Descripción
		Nacional	Otra	
Ámbitos		-	UNE-EN 15898:2012 UNE-EN 16096:2016 UNE-EN 16095:2016 UNE-EN 16853:2018 UNE-EN 16085:2014	La implementación normativa permite la aproximación al objeto; es decir, inspección e informe técnico que orienten la toma de decisiones a nivel de estudios y en adelante a otros niveles. Como primera decisión se establece el diseño del plan de muestreo.
Toma de muestras		-	UNE-EN 16085:2014	Conocer la norma y aplicar de manera conforme las condiciones del caso de estudio y la demanda técnica el plan de muestreo, priorizando las menores cantidades y las menores afecciones.
Limpieza	El total de las edificaciones	-	UNE 41806-2:2009 IN	El desarrollo teórico / práctico se considera como acciones iniciales la limpieza, ya sea como medio de conservar o no la pátina y/o mitigar procesos patológicos.
Color		-	UNE-EN 15886:2011	Como procedimiento de intervención consiguiente de la limpieza de fachadas, se sugiere la medición de coloración, para que la intervención deje registros y oriente propuestas.
Temperatura		-	UNE-EN 15758:2011	Los materiales se encuentran en entornos geográficos diferentes, por lo que conocer este parámetro permite aproximarse a las características intrínsecas del material, y apoyar los planteamientos técnicos subsiguientes.

**Tabla 3.-** Consideraciones previas para la intervención en fachada. Fuente: Normas UNE. Elaboración: Castillo Carchipulla 2019

Finalmente, los estudios analíticos se enmarcan en la EIA y consideran que las prioridades de diseño de los edificios están conformadas por paradigmas y sistema de valores de la sociedad, la cultura y contexto dentro del cual emergen (Rapoport 1969; King 2004; Du Plessis 2012; Cole 2012). De esta manera la normativa da soporte técnico a valoraciones y procesos para intervenciones de edificios y fachadas patrimoniales.

Se parten de ensayos generales de identificación, hasta los específicos de caracterización [tabla 4]. Se recurre a las normas del Instituto Nacional de Normalización (INEN) que planifican, organizan, dirigen, controlan y evalúan los parámetros de la calidad, inocuidad y seguridad de los productos y servicios que se comercializan en el país, entre ellos los materiales de construcción. Estas normas se basan en otras provenientes de entidades como la *American Society for testing and Materials* (ASTM), la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) o el Comité Europeo de Normalización (CEN). Un ejemplo es el ensayo para determinar el límite líquido y límite plástico, que recurre a las normas ASTM D 4318 - 17 y NTE INEN 0691, pero la INEN recurre a la primera. Sin embargo, en otros casos sucede lo contrario.

Por estos hechos, y las consideraciones particulares de los materiales del patrimonio arquitectónico, como la mínima intervención, respeto por la autenticidad, integridad, entre otros, es necesario hacer un alcance

mayor a la aplicabilidad de normativa internacional, ya sean ASTM, AENOR, CEN o semejantes. Por su parte, las normas INEN o NEC se descartan por su orientación a la obra nueva, carácter destructivo y constante referencia a normas internacionales. En este contexto, las normativas CEN del segmento español (UNE), francés (*Commission 25-PEM* o RILEM 1980) e italiano (UNI) se definen como las apropiadas. A su vez, a efectos propositivos se consideran las primeras, y define el escenario formado por dos momentos; el primero de *Consideraciones Previas*, y b) *Propuesta de aplicación normativa internacional*.

En el primer caso mientras las normas UNE-EN 16096, 16095, 16853 y 16085 definen el proceso. Las normas UNE-EN 15898 y 16515 deben considerarse por añadidura [Tablas 3]. En el segundo las normas aplicables son UNE-EN 12407, 14066, 15886, 13755, 1936, 12372, 13161, 1926, 1925, 15801, 12370, 12371, 16455, 13919, 16682, 15803, 14581, 16140 y 14158. Ante este amplio panorama, pero por limitaciones técnicas, el espectro analítico se reduce, e incluye la Norma Peruana, ASTM y técnicas particulares factibles de aplicarse con mínimas variaciones técnicas. A efectos inferenciales se consideran los casos CSBO2\_CC, CPC01\_CAM, CL07\_CUC, CSB05\_VD y CT01\_CG Mun, como la muestra significativa para desentrañar los particulares físicos, químicos y biológicos de los 14 materiales identificados en los 35 casos de estudio, y con ellos potencialmente el 98,69% de las fachadas de edificaciones patrimoniales del CHC.

Propuesta de aplicación normativa				
Materiales				
Cerámicos, téreos y vítreos	Morteros	Material de origen vegetal	Pétreos	Metálicos
A 03 Ladrillo tipo 1 A 04 Ladrillo tipo 2 A 05 Ladrillo tipo 3 A 07 Tierra	A 08 Mortero de tierra A 09 Mortero de cal A 10 Mortero de cal-cemento	A 011 Madera tipo 1 A 012 Madera tipo 2 A 013 Madera tipo 3	A 015 Mármol A 016 Andesita A 018 Travertino	A 19 Hierro forjado
Normativa				
UNE-EN 16302:2016.  UNE-EN 772-1:2011 + A1:2016.  UNE-EN 1052-2:2000  Normativa Peruana E 80 <b>Aplicar</b> ensayos de límites de Atterberg. Análisis Químico (espectrofotometría de absorción atómica).	Normativa Peruana E 80 UNE-EN 16682:2018  Aplicar ensayos de límites de Atterberg. Análisis Químico (espectrofotometría de absorción atómica).	UNE-EN 384:2016  UNE 56535:1977  UNE 56537:1979  UNE-EN 927-5:2007  UNE-EN 350:2016	UNE-EN 1936:2007. UNE-EN 16302:2016. UNE-EN 1926:2007. UNE-EN 12372:200. UNE-EN 16306:2013. UNE-EN 15801:2010 UNE-EN 12407:2007 UNE-EN 14066:2014 UNE-EN 13755:2008 UNE-EN 1936:2007 UNE-EN 12372:2007 UNE-EN 13161:2008 UNE-EN 1926:2007 UNE-EN 1925:1999 UNE-EN 15801:2010 UNE-EN 12370:1999 UNE-EN 12371:2011 UNE-EN 16455:2016 UNE-EN 13919:2003 UNE-EN 16682:2018 UNE-EN 15803:2010 UNE-EN 14581:2006 UNE-EN 16140:2019 UNE-EN 14158:2004 ASTM C-295-03	ASTM C-262-15 (óxidos)
Casos de estudio				
CBM05_CAT	CBM05_CAT	CSB02_CC	CSB01_CAA	CL01_CAB
CBM01_CML	CBM02_CMG	CBM02_CMG	CSB03_CD	CL 05_CGC
CBM03_CRC	CSB03_CD	CSB03_CD	CSB04_CM	CL07_CUC
CBM04_CVV	CSB04_CM	CSB04_CM	CSB05_CVD	CT01_CG Mun
CSB02_CC	CPB01_CBI	CPB03_CA	CPB01_CBI	
CSB05_VD	CPB03_CA	CPC01_CAM	CPB02_CS	
CPB02_CS	CL02_CAE	CRMA02_CGMun	CL01_CAB	
CL01_CAB	CPA01_CDA	CRMA03_CGM	CL02_CAE	
CL03_CDO	CPC01_CAM	CRMA04_CMD	CL04_CDA	
CL04_CDA	CRMA02_CGMun	AVDA01_CA	CL05_CGC	
CL05_CGC	CRMA03_CGM	AVDA03_CVM	CL07_CUC	
CL06_CTO	CBM03_CRC		CPA02_CVA	
CL07_CUC	CSB02_CC		CPC04_CTM	
CPC02_CCR	CSB05_VD		CRMA04_CMD	
CPC03_CCC	CPC02_CCR		AVDA02_MU	
CRMA02_CGMun	CPC03_CCC			
AVDA02_MU	CPC05_CVA			
	CRMA01_CAO			
	CRMA04_CMD			
	CT01_CGMun			
Prioridad de aplicación por nivel de impacto ambiental acumulado				
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
Atención especial	Crítico	Severo	Moderado	Irrelevante

**Tabla 4.-** Normativa internacional para análisis de los materiales identificados en cada caso de estudio. Fuente: Normas UNE, Norma Peruana y ASTM. Elaboración: Castillo Carchipulla y Aguirre Ullauri 2019.

## Conclusiones

En el Centro Histórico de Cuenca por su singularidad temporal y cualidad de mosaico constructivo sobresalen tramos y edificaciones a partir a partir de la envoltura, como elemento artístico y estético por excelencia. Este reflejo del paso del tiempo ha colocado y descolocado estilos, tendencias y singularidades, a costa de la bondad constructiva primigenia que devela procesos de deterioro y describe nuevas dinámicas. No menos incidentes han sido los factores socio culturales, económicos y políticos, o el mantenimiento e intensidad de uso, las características intrínsecas del material, la técnica y proceso constructivo como catalizadores de síntomas y cambios. Por ello, esta apariencia sobrevalorada define al bien patrimonial como *resiliente*.

A partir del diagnóstico patológico de los materiales en la fachada de edificios patrimoniales del CHC es factible colegir que, si bien el estado de conservación de los 14 materiales no llega a ser crítico, el deterioro es notable y potencial. Lo previo se consolida desde los ejercicios analíticos entre material, lesión patológica y evaluación ambiental, por ello la necesidad de ampliar su conocimiento, valoración y tratamiento técnico hacia niveles más complejos, si bien el planteamiento metodológico, conforma una ruta inicial, y el escenario de caracterización una propuesta.

La diversidad de lesiones patológicas identificadas en tipo y nivel de desarrollo elevan el entendimiento de la fachada o envolvente desde lo estético, hasta su desempeño como barrera ante los factores perjudiciales exteriores. Por ello, ha sido significativo evidenciar a través de 35 casos de estudio, la relación indisoluble entre arquitectura patrimonial, conservación y ambiente. De hecho, proyectar posibles vínculos con el declive salubre habitacional, resulta interesante, y seguro reunirá más adeptos que el diagnóstico patológico exclusivamente arquitectónico. Por su parte, las políticas locales aplicadas a la prevención de incidencias no han trascendido a las particularidades del contexto histórico enfocándose en la salud pública, aunque con limitaciones, y relegando el ámbito patrimonial, habitacional y de recursos del territorio. En ambos casos, urge debatir y desarrollar instrumentos de gestión del hábitat patrimonial.

## Notas

[1] Organización no gubernamental que operó en Ecuador entre 1977 y 2012. Se orientaba hacia el cuidado de la naturaleza a partir de proyectos de gestión de residuos sólidos, biodiversidad, áreas protegidas, desarrollo sostenible y más. Actualmente mantiene actividad en Colombia, Bolivia y Europa.

[2] Define al periodo entre 1890 y 1940 cuando la ciudad experimenta incrementos sustanciales de producción cuyos excedentes se revierten en la modernización. La arquitectura

juega un rol renovador de la imagen a través de la influencia francesa, propia de la vinculación al mercado mundial.

[3] Actualmente se trabaja a partir de la aplicación del método de lectura estratigráfica para determinar a través de las acciones físicas y las nociones de anteroposterioridad, las relaciones de deterioro existentes en los materiales de interés.

[4] La realización de cuatro inventarios ha derivado en tres esquemas de clasificación. El básico o por grupos, 1, por escala y 2, de arquitectura civil (Washima Tola 2014: 85-87) según el inventario de 1978; el intermedio del año 99 o de categorías, VHIAR (Valor Histórico Arquitectónico) I para inmuebles de valor emergente, uso colectivo y con características que sobresalen en la trama urbana; VHIAR II para inmuebles con características sobresalientes y de uso residencial; y VHIAR III, para aquellos que presentan rasgos notables que resaltan la calidad del contexto urbano (Jaramillo s/f: 10-11). Finalmente se encuentran las del 2009 y recogidas en la ordenanza vigente y utilizadas en la presente investigación.

[5] Según la ordenanza vigente al primer caso se corresponden las edificaciones que cumplen *un rol constitutivo en la morfología del tramo, de la manzana o del área en la que se insertan por sus características estéticas, históricas, o por su significación social*; el segundo refiere a edificaciones cuyo rol es el de consolidar un tejido coherente con la estética de la ciudad o el área en la que se ubican y pueden estar enriquecidas por atributos históricos o de significados importantes para la comunidad local. Desde el punto de vista de su organización espacial expresan con claridad formas de vida que reflejan la cultura y el uso del espacio de la comunidad. En el último caso, las edificaciones que se caracterizan por permitir y fortalecer una legibilidad coherente de la ciudad o del área en la que se ubican. Son edificaciones cuyas características estéticas, históricas o de escala no sobresalen de una manera especial, cumpliendo un rol complementario en una lectura global del barrio o de la ciudad. Sus características materiales, la tecnología utilizada para su construcción y las soluciones espaciales reflejan fuertemente la expresión de la cultura popular.

[6] Dichos estudios no se han emprendido en el medio pese a la representatividad de los materiales en la arquitectura histórica e influencia en la moderna y contemporánea. En el caso de la madera el aporte más reciente hace referencia al inventario de especies madereras para indicar que aquellas comunes de encontrar son; Mara, Motilón, Eucalipto, Capulí, Nogal, Colorado, Cedro, Laurel, Sei que, Romerillo y Pino (Reyes & Zaruma 2017); sin embargo, no diferencian entre nativas e introducidas. El Pino presente en el país desde 1850 (Farley 2008), o el Eucalipto, a partir 1865 (Acosta Solís 1949). Esto mantiene la incertidumbre de la utilización de ciertas especies y cómo su presencia representa valores agregados. Por su parte al hablar del ladrillo es preciso indicar que su producción se mantiene artesanal, y su estudio alcanza en máxima instancia los productos contemporáneos desde las características físicas y mecánicas.

[7] La problemática se enmarca en la disponibilidad de instrumentación específica conforme el estado de los laboratorios locales, por lo que la actividad se desplazaría a entidades como

la Escuela Politécnica del Litoral (Guayaquil), la Universidad Regional Amazónica (Tena) o el Laboratorio de Investigación y Análisis del INPC (Quito).

## Referencias

ACHIG BALAREZO, M. C., ZÚÑIGA LÓPEZ, M., BALEN, K. V., y ABAD RODAS, M. L. (2013). "Sistema de registro de daños para determinar el estado constructivo en muros de adobe". *Maskana*, Vol. 4, No. 2. 71–84. <https://doi.org/10.18537/mskn.04.02.06>

ACHIG BALAREZO, M., ZÚÑIGA, M., GARCÍA, G., AGUIRRE, A., GALÁN, N. BARSALLO, G. y BRIONES, J. (2016). "Altas de Daños. Edificaciones Patrimoniales de Cuenca". *Proyecto vliirCPM*. Universidad de Cuenca.

ACOSTA SOLÍS, M. (1949). *El Eucalipto en el Ecuador*. Instituto Ecuatoriano de Ciencias Naturales. Departamento Forestal del Ecuador. Quito: Editorial Ecuador.

AGUIRRE ULLAURI, M. y SANZ ARAUZ, D. (2017). "Caracterización de materiales históricos para el conocimiento y la conservación del Patrimonio Arquitectónico: revisión y proyección en el caso de Cuenca (Ecuador)". En Traversa, L. (com.). *Actas del V Congreso Iberoamericano y XIII Jornada Técnica de Restauración y Conservación del Patrimonio*. La Plata: Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario y Tecnológico, 48 – 64.

AGUIRRE ULLAURI, M., SOLANO PELÁEZ, J. GARCÍA C., A., LÓPEZ L.D., CARRIÓN C, P., YAMUNAQUÉ A., L. (2018). "Evaluación del impacto ambiental en la Arquitectura Patrimonial a través de la aplicación de la Matriz de Leopold como un posible sistema de monitoreo interdisciplinar". *ASRI. Arte y Sociedad*. Revista de Investigación. 14, 17 – 34.

AGUIRRE ULLAURI, M., SOLANO PELÁEZ, J., SEGARRA VILLACÍS, C. y CARRIÓN CABRERA, P. (2018). "El impacto ambiental sobre los materiales históricos: Evaluación de Niveles de Incidencia en el caso de Cuenca (Ecuador)". En *Quinto Congreso Internacional de Medio Ambiente Construido y Desarrollo Sustentable*. MACDES 2018. La Habana (Cuba).

ALBERTALLI, M. (2009). "Blanco sobre negro. La dimensión artística de la superficie" en A. M. Rigotti, S. Pampinella (ed.) *Una cosa de vanguardia: Hacia una Arquitectura* (Rosario, UNR ed.), 68-81.

BALARAS C., DROUTSA K., DASKALI, E., KONTOYIANNIDIS, S. (2005). "Deterioration of European apartment buildings". *Energy Build*, 37, 515–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.010>

CARDOSO, F. (2012). *Metodología de Manuales de Conservación Preventiva*. Universidad de Cuenca. Ecuador.

CARDOSO, F. (ed.) (2017). *Propuesta de inscripción del Centro Histórico de Cuenca, Ecuador en la lista de patrimonio mundial*. Edición Comentada. Cuenca: Grafisum.

CONSEJO CANTONAL DE CUENCA. (2010). *Ordenanza para la Gestión y Conservación de las Áreas Históricas y Patrimoniales del Cantón Cuenca*. Cuenca. Ecuador.

COLE, R. J. (2012). "Transitioning from green to regenerative design", En *Building Research & Information*, 40(1), 39–53. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.610608>

DE JONGH, S., VAN WIJNENDDAELE, M., CARDOSO y VAN BALEN. K. (2009). *Damage Atlas of historical Cuenca, Ecuador. Damage patterns found in the (mainly earthen) building materials*. Katholieke Universiteit Leuven. VLIR – IUOS. Consultado en <https://es.slideshare.net/mvanwijnendaele/damage-atlas-historical-cuenca> (2017-10-18).

DU PLESSIS, C. (2012). "Towards a regenerative paradigm for the built environment". *Building Research & Information*, 40(1), 7–22. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.628548>

DOUGLAS-JONES, R., HUGHES, J. y YARROW, T. (2016). "Science, value and material decay in the conservations of historic environments". *Journal of Cultural Heritage*, 21, 823 – 833. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.03.007>

ESPINOZA, P., CALLE, M. (2002). *La cité cuencana: el afrancesamiento de Cuenca en la época republicana (1860-1940)* (Tesis de Pregrado). Universidad de Cuenca, Ecuador.

FARLEY, K. (2008). "Grasslands to Tree Plantations: Forest Transition in the Andes of Ecuador". *Annals of the Association of American Geographers*, 97:4, 755-771. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.2007.00581.x>

GAD DE CUENCA (2010). *Pliegos para la contratación de la Elaboración del Estudio del Plan de Conservación incluido en el Proyecto Plan Especial de Centro Histórico – Segunda Etapa*. Secretaría General de Planeamiento. Dirección de Áreas Históricas y Patrimoniales. Cuenca.

HERAS, V. (2015). "Cuenca, quince años como patrimonio mundial: evaluación de procesos de documentación y monitoreo". *ESTOA. Revista de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca*. 6: 27-35. <https://doi.org/10.18537/est.v004.n006.06>

INSTITUTO NACIONAL DE PATRIMONIO CULTURA –INPC (2011). *Guía de medidas preventivas para amenaza sísmica, seguridad, protección y manejo de bienes culturales*. Serie Normativas y Directrices. Quito: Ediecuatorial.

ILUSTRE CONSEJO CANTONAL (2000). *Reglamento para el uso del color y materiales en las edificaciones del Centro Histórico*. Cuenca.

JARAMILLO PAREDES, D. (s/f). *Estado de los inventarios del patrimonio cultural edificado en la ciudad de Cuenca-Ecuador*, Cuenca-Ecuador, Universidad de Cuenca. (Manuscrito Inédito).

KING, A. (2004). *Spaces of Global Cultures: Architecture Urbanism Identity*, Routledge, London.

LORENZ, K. (2004). *Los ocho pecados mortales de la humanidad civilizada*. Buenos Aires: Gráficas Guadua. S. A.

MATARAN ANGUELA, J.A. (1996). *Normativa sobre el patrimonio histórico cultural*. Madrid: EGRAF, S.A.

MUÑOZ, P. (2015). *Arquitectura popular en Azuay y Cañar. 1977-1978*. Cuenca: CIDAP.

ORELLANA SAMANIEGO, M. SELLERS WALDEN, CH., MARTÍNEZ GAVILÁNEZ, J. (2017). "Índice de calidad ambiental urbana de Cuenca". *Universidad y Verdad*. 73, 66 – 77.

QUEROL, M. (2010). *Manual de gestión del patrimonio cultural*. Madrid: Ediciones Akal.

RAPOPORT, A. (1969). *House Form and Culture*, Prentice. Hall, Englewood Cliffs, NJ. <https://doi.org/10.1126/science.167.3916.274>

REYES, J., ZARUMA, L. (2017). *Patologías de la madera. Identificación y solución de las principales patologías presentes en estructuras de madera de edificaciones patrimoniales localizadas en el Centro Histórico de Cuenca – Ecuador*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca. Cuenca.

RODAS V. C., ASTUDILLO, S. y RODAS, J. (2018). "En busca del equilibrio entre la transformación y conservación. Inserción de proyectos contemporáneos en ciudades Patrimonio de la Humanidad. El caso de Cuenca, Ecuador". *ASRI: Arte y Sociedad*, 14, 215 – 235.

RODRIGUES, M., TEIXEIRA, J., CARDOSO, J. (2011). "Building envelope anomalies: A visual survey methodology" *Constructions and Building Materials*, 25, 2741 – 2750. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.029>

RODRÍGUEZ, V. (coord.). (2004). *Manual de Patología de la Edificación*. Tomo I, II y III. Departamento de Tecnología de la Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.

RUEDA, E. (2014). "Propuesta de mapa de riesgos de bienes patrimoniales inmuebles expuestos a amenazas de origen natural", *Enfoque UTE*. 5(1), 30-48.

SAHADY VILLANUEVA, A., GALLARDO GASTELO, F. (2009). "En edificios de ayer, funciones de hoy. La vivienda: una constante histórica". *Revista INVI*, 17(45), 69 – 81.

VAN BALEN, K., VERSTRYNGE, E. (eds). (2016). *Structural Analysis of Historical Constructions. Anamnesis, diagnosis, therapy, controls*. Actas y Monografías de Ingeniería, Agua y Ciencias de la Tierra. Londres: Taylor & Francis Group.

WASHIMA TOLA, S. (2014). *El concepto de intervención en la normatividad para la conservación patrimonial en Cuenca-Ecuador*, (Tesis de Maestría). Instituto Nacional de Antropología e Historia. México.

## Autor/es



**María del Cisne Aguirre Ullauri**  
[cisne222@hotmail.com](mailto:cisne222@hotmail.com) – [maguirreu@ucacue.edu.ec](mailto:maguirreu@ucacue.edu.ec)  
Universidad Politécnica de Madrid.  
Universidad Católica de Cuenca

Arquitecta por la Universidad de Cuenca (2010), Máster Universitario en Conservación y Restauración del Patrimonio Arquitectónico (2014) y Estudiante del Programa de Doctorado en Patrimonio Arquitectónico por la Universidad Politécnica de Madrid (2015-2020). Docente Titular Auxiliar y Coordinadora del Centro de Investigación de Ingeniería, Industria, Construcción y TIC en la Universidad Católica de Cuenca (Ecuador). Directora del Proyecto de Investigación Los materiales en el estudio histórico – constructivo – ambiental de los conjuntos históricos. El caso de Cuenca., desde el 2017. Miembro de los Grupos de Investigación CAT –Ciudad, Ambiente y Tecnología- y C&D –Ciencia & Diversidad- de la Universidad Católica de Cuenca (2017 y 2019), la Red Ecuatoriana de Mujeres Científicas –REMCI- (2017), y la Organization for Women in Science for the Developing World –OSDW- (2018).



**Edison Maximiliano Castillo Carchipulla**  
[em.castillo@alumnos.upm.es](mailto:em.castillo@alumnos.upm.es)  
Universidad Politécnica de Madrid -  
Universidad Católica de Cuenca

Doctorando del Programa en Innovación Tecnológica en Edificación en la Universidad Politécnica de Madrid. Docente Ocasional de la Universidad de Cuenca (Ecuador). Miembro del American Concrete Institute (ACI) capítulo Ecuador. Director del Laboratorio de Aplicaciones Constructivas y Bioclimáticas de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca (Ecuador). Participación con un grupo de estudiantes en el concurso ECO Concrete Quebec (Canadá) en marzo 2018, organizado por el ACI, con el objetivo de promover la idea del desempeño ambiental en el diseño de mezclas de concreto, obteniendo el 2do premio. Por su parte, en el laboratorio se realizan diversas actividades de investigación que corresponden al análisis de materiales (hormigón y morteros) y sus aplicaciones a nivel local.



**Darío Miguel López León**  
[dariomiguellopez@gmail.com](mailto:dariomiguellopez@gmail.com)  
Universidad Católica de Cuenca

Arquitecto por la Universidad Católica de Cuenca (2019). Durante los últimos años de preparación profesional se ha vinculado a proyectos investigativos como: Los materiales en el estudio histórico-constructivo – ambiental de los conjuntos históricos. El

caso de Cuenca, y Prefabricación de elementos de mampostería con fibra de totora. Como investigador independiente ha desarrollado indagaciones de carácter científico en el campo de la conservación patrimonial e innovación de materiales destinados a la construcción.

---

**Artículo enviado el 24/07/2019**  
**Artículo aceptado el 22/02/2020**



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.680>

# Processamento de imagem digital (PID) como meio de análise, documentação e monitorização da corrosão do aço de carbono aplicado na escultura de Gonçalo Jardim

Ana Sofia Alvarez, João Linhares, Ana Bailão

**Resumo:** O presente artigo pretende dar a conhecer um método de monitorização não invasiva do processo de corrosão da escultura de aço de Gonçalo Jardim, através do sistema de processamento de imagem digital. Esta investigação teve como principal objetivo desenvolver um algoritmo que faça o tratamento da informação de várias funções locais da morfologia da corrosão, através da extração de parâmetros quantitativos da imagem que exprimam essa informação. Para este efeito foi calculado o valor médio absoluto da entropia das imagens, que avalia a evolução da morfologia da corrosão da obra a longo prazo, de modo a documentá-la e analisar se há manutenção ou aumento da corrosão com o decorrer do tempo e, neste último caso, em que proporção

**Palavras-chave:** processamento de imagem digital, entropia, monitorização, corrosão, escultura em aço

## Procesamiento de imagen digital (PID) como medio de análisis, documentación y monitorización de la corrosión del acero de carbono aplicado en la escultura de Gonçalo Jardim

**Resumen:** El presente artículo pretende dar a conocer un método de monitorización no invasiva del proceso de corrosión de la escultura de acero de Gonçalo Jardim, a través del sistema de procesamiento de imagen digital. Esta investigación tiene como principal objetivo desarrollar un algoritmo que trate la información de varias funciones locales de la morfología de la corrosión, a través de la extracción de parámetros cuantitativos de la imagen que expresan esa información. Para este efecto se ha calculado el valor medio absoluto de la entropía de las imágenes, que evalúa la evolución de la morfología de la corrosión de la obra a largo plazo, para documentarla y analizar si se mantiene o aumenta de la corrosión con el transcurso del tiempo y, en este último caso, en qué proporción.

**Palabras clave:** procesamiento de imagen digital, entropía, monitoreo, corrosión, escultura en acero

## Digital image processing (DIP) as a means of analysis, documentation and monitoring of the corrosion of the carbon steel applied in the sculpture of Gonçalo Jardim

**Abstract:** This article aims to present a non - invasive monitoring of the corrosion process of Gonçalo Jardim 's steel sculpture through the digital image processing system. This research had as main objective to develop an algorithm that treats the information of several local functions of the morphology of the corrosion, through the extraction of quantitative parameters of the image that express this information. For this purpose, the absolute mean value of the entropy of the images was calculated, which evaluates the evolution of the morphology of the corrosion of the sculpture in long term, in order to document it and to analyse if there is maintenance or increase of the corrosion with the passage of time and, in the latter case, in what proportion.

**Keywords:** digital image processing, entropy, monitoring, corrosion, steel sculpture

## Introdução

Este artigo apresenta um método de monitorização da corrosão de uma escultura de aço do artista Gonçalo Jardim. Com o intuito de analisar e controlar a evolução da deterioração material no tempo desenvolveu-se um sistema de processamento de imagem digital (PID) baseado na caracterização morfológica de imagens fotográficas.

Para a generalidade dos metais, a corrosão resulta da tendência do material em voltar ao seu estado de energia mais baixo, sob a forma de óxido de ferro hidratado, que ocorre quando este é combinado com o oxigénio e a água, presentes nos ambientes naturais (AMS International 2000:1). No estudo desenvolvido pela NACE International (2016) ficou patente que os custos globais da corrosão contribuem para cerca de 2,5% a 4% do PIB de cada país, dependendo do grau de industrialização, e que cerca de 50% destes custos são provocados pela corrosão atmosférica. A necessidade de detetar e acompanhar esta deterioração torna-se então importante, uma vez que possibilita prever a durabilidade do material e definir estratégias de manutenção mediante os valores registados.

O sistema PID é conhecido pela manipulação de imagens digitais onde se convertem imagens visuais em dados numéricos organizados em matrizes. A organização em matriz permite ordenar os pixéis da imagem mantendo a sua posição espacial associada à correspondente informação cromática. A partir destes dados numéricos e através de processamento digital e algoritmos computacionais é possível extrair informações ou atributos característicos da imagem (Esquef *et al.* 2003:1). É um sistema que faz um pré-tratamento digital da imagem, segmenta a informação – extrai os “objetos” do “fundo” da imagem – e determina a grandeza de cada “objeto” (área, perímetro, forma, descrição estrutural, topologia, entre outros). Além disso, permite reconhecer os “objetos” e fazer uma análise quantitativa, que associa as grandezas ao problema, sendo capaz de determinar funções de correlação espacial ou temporal e de analisar sequências de imagens (Albuquerque 2001:4). Trata-se de uma técnica eficaz e de baixo custo, de características não invasivas e de rápida resposta, que tem sido aplicada como uma alternativa para a avaliação da corrosão, a partir das características morfológicas da cor, da textura e da forma.

Este sistema, associado a processos de análise matemática, foi utilizado por Choi e Kim (2004) como um método automatizado e probabilístico para classificar e detetar a corrosão de uma superfície. Partindo de uma descrição cromática HSI (formado pelos atributos *Hue* – matiz; *Saturation* – saturação; *Intensity* – intensidade) calculou a cor da corrosão utilizando como base um modelo pré-definido. Foi ainda utilizada a matriz de coocorrência para a descrição das características da textura da corrosão, obtida pela relação tridimensional entre os graus de luminosidade (*I*) da imagem analisada. Por fim, para agrupar e identificar

as regiões afetadas pela corrosão fizeram uso do processo de escalonamento multidimensional (*MultiDimensional Scaling – MDS*). Semelhante a esse estudo, Bento *et al.* (2009) aplicaram a matriz de coocorrência utilizando níveis cinza, para a deteção de mudanças de textura nas superfícies metálicas, e recorreram ao método de mapeamento auto-organizável (*Self-Organized Map – SOM*) para classificar as imagens como oxidadas e não oxidadas.

Com a possibilidade de calcular automaticamente a percentagem da corrosão numa determinada imagem de superfície, Ghanta *et al.* (2011) introduziram a ferramenta de transformada de *Wavelet* como método de deteção da corrosão, para reunir as propriedades de textura de uma imagem. Nesse estudo, o algoritmo proposto consistiu numa fase de ensaio e numa fase de deteção, que fez uso de imagens com e sem oxidação, onde a técnica de correlação cruzada foi aplicada para determinar as áreas de potencial corrosão. O programa utilizado apresentou apenas 52% de eficácia na classificação de imagens corroídas. Esta limitação foi posteriormente resolvida pela técnica apresentada por Diaz *et al.* (2017) com uma taxa de 90% de sucesso, recorrendo à função de *thresholding*, à segmentação da textura e ao reconhecimento de contornos no processamento da imagem.

Na presente investigação, o sistema PID foi utilizado com o propósito de monitorizar, analisar e documentar a deterioração do material da escultura de aço de Gonçalo Jardim. O processo foi fundamentado nos métodos de deteção e de quantificação da corrosão propostos por Diaz *et al.* (2017) e por Yidong *et al.* (2017).

## Aplicação de PID

### – Software

O software *MatLab*<sup>®</sup> (MatWorks, Natick, MA, USA) foi o selecionado para a elaboração do algoritmo. Trata-se de um sistema interativo de programação, cujo elemento de dados é uma matriz. É capaz de efetuar cálculos numéricos, construir gráficos, bem como analisar e processar estas informações (MathWorks 2005:1.2).

### – Aquisição de imagens

No que importa à recolha de imagem da superfície morfológica da camada de corrosão, é necessário que seja feita em diferentes zonas da superfície, com períodos de tempo variados entre capturas, e que obedeça a condições físicas idênticas. Assim, os resultados serão mais eficazes se as imagens forem capturadas com a mesma câmara, fixada num tripé e sob as mesmas condições fotográficas, e se a distância destes equipamentos para o objeto analisado for a mesma em todos os momentos. Além disso, idealmente, a iluminação deve ser sempre igual e uniforme, de maneira a facultar todas as características da morfologia das superfícies.

### – Algoritmo

O algoritmo proposto permite detetar alterações morfológicas, traduzidas em corrosão, e quantificar a sua evolução. A entropia associada a cada imagem é estimada medindo as alterações espaciais locais, calculando o VAM (valor de alteração morfológica), que calcula o valor médio absoluto da entropia de cada imagem a partir das variações locais:

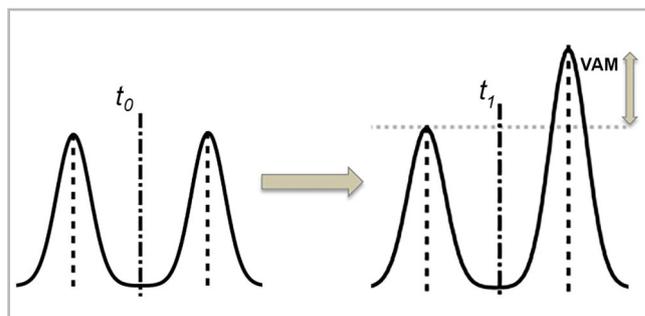
$$VAM = \frac{1}{c \cdot l} \sum_{\substack{i=1:c \\ j=1:l}} |J_{ij} - I_{ij}|$$

Em que  $J$  é a imagem a analisar,  $I$  é a imagem inicial de referência assumindo o tempo inicial ( $t = \text{ano } 0$ ),  $c$  o número de colunas e  $l$  o número de linhas da imagem transformada em matriz. A evolução da peça através do tempo pode então ser calculada mediante as variações das alterações espaciais locais, partindo da imagem inicial ( $t = \text{ano } 0$ ) utilizada como referência para outras de períodos temporais, permitindo a comparação entre elas. O passar do tempo irá provocar alterações morfológicas localizadas, sendo de esperar um aumento da entropia (variações das alterações espaciais locais) com o passar do tempo e, portanto, um aumento do VAM (ver figura 1). Para além de fornecer essas alterações em valores numéricos, o algoritmo proposto permite ainda visualizar a entropia de cada imagem através da delineação de um diagrama tridimensional (3D).

### – Entropia da imagem

A entropia associada à teoria da informação foi desenvolvida por Claude Shannon (1948), com o intuito de estudar a quantidade de informação transmitida numa mensagem [figura 1]. Este conceito tem vindo a ser explorado por diferentes áreas de investigação científica, nomeadamente: no sector financeiro, para verificar o nível de informação de indicadores aplicados a demonstrações financeiras para o sector público de um país (Almeida-Santos, Rocha, Hein 2014); nas ciências atmosféricas, com o estudo da precipitação pluvial (Medeiros *et al.* 2015); no âmbito da medicina, para o estudo de padrões de oscilações do cérebro (Baravalle, Rosso, Montani 2018); entre outros. É entendido como a medida da incerteza existente numa variável aleatória, em que valores altos dessa incerteza resultam no aumento da entropia (Pavão 2011:158). Numa imagem, a entropia pode ser calculada de várias formas, através da distribuição estatística dos pixels, isto é, por exemplo pelo seu histograma de luminância, que consiste na contagem dos níveis cinza da imagem, fornecendo informação acerca da distribuição dos pixels de acordo com os possíveis níveis de luminância, ou a partir do resultado de transformadas de Fourier (Esquef *et al.* 2003:5).

No algoritmo proposto, a função *thresholding* é usada para determinar o limite a partir do qual se considera existir uma alteração na variação morfológica,



**Figura 1.-** Esquema ilustrativo do cálculo do valor de alteração morfológica (VAM) da entropia das imagens, onde o VAM representa a distância das alterações de picos do diagrama 3D, das imagens  $t_0$  e  $t_1$ , correspondentes às alterações localizadas de luminância que se correlacionam com alterações morfológicas. Diagrama com menor entropia (esquerda) e com maior entropia (direita). ©Ana Alvarez

permitindo estimar o valor de entropia. A imagem é transformada numa escala de cinzas e os valores de *threshold* das alterações de variações espaciais locais (entropia), superiores aos valores *threshold* da imagem de referência, são indicadores de áreas de potencial de corrosão. Assim, a entropia traduz-se na irregularidade que uma imagem pode apresentar durante o processo de medição da distribuição da variação dos tons cinza, provocada pelo relevo da textura da corrosão. Como representado na figura 2, quanto maior for a regularidade associada à variação dos tons cinza, variações abaixo do *threshold*, menor é a entropia indicando uma maior regularidade na distribuição da corrosão da superfície. Assim, mesmo existindo corrosão generalizada e uniforme, a comparação com a imagem original permitirá obter valores de *threshold* superiores ao permitido em toda a área de análise e, por isso, a corrosão generalizada pode ser detetada, apesar de localmente existir pouca variação de corrosão.



**Figura 2.-** Esquema do aumento da entropia de uma imagem de corrosão, conforme a irregularidade da corrosão. ©Ana Alvarez

### Caso de estudo

Como estudo de caso, a escultura de aço carbono de Gonçalo Jardim (ver figura 3) foi analisada pelo sistema PID, no contexto da Conservação e Restauro, para analisar, documentar e monitorizar a evolução da morfologia da corrosão do material no decorrer do tempo. Numa entrevista realizada com o artista, em Março de 2017, compreendeu-se que essa oxidação natural da liga é considerada fundamental no conceito da obra, uma vez que a questão da autenticidade e da veracidade dos materiais é lhe absolutamente determinante. A

obra, datada de 2014, tem de dimensões 202x35x19cm, encontra-se exposta às condições climáticas da zona de São Miguel de Machede (Évora, Portugal) e apresenta corrosão uniforme no material. Évora classifica-se como uma zona parda, submaritima, pertencente a uma região atlântica com influência mediterrânica que se traduz num clima temperado seco, com a temperatura do mês mais quente do verão superior a 20°C (Almeida, Elisabete e Ferreira 1998:265). No gráfico 1, estão registados os valores médios da temperatura máxima e mínima do ar (°C) e da humidade relativa do ar (%), do ano de 2018, para a zona de Évora. De acordo com os registos, trata-se de uma zona que apresenta valores de temperatura e de humidade relativa variáveis que, segundo a normalização ISO 9223 (2010), classifica-se como um ambiente seco e frio, que expressa um grau de corrosividade atmosférica baixo (C2).



**Figura 2.**- Escultura em aço (2014) de dimensões 120x35x30cm (esquerda), com pormenor da pátina (direita). ©Gonçalo Jardim e Ana Alvarez.

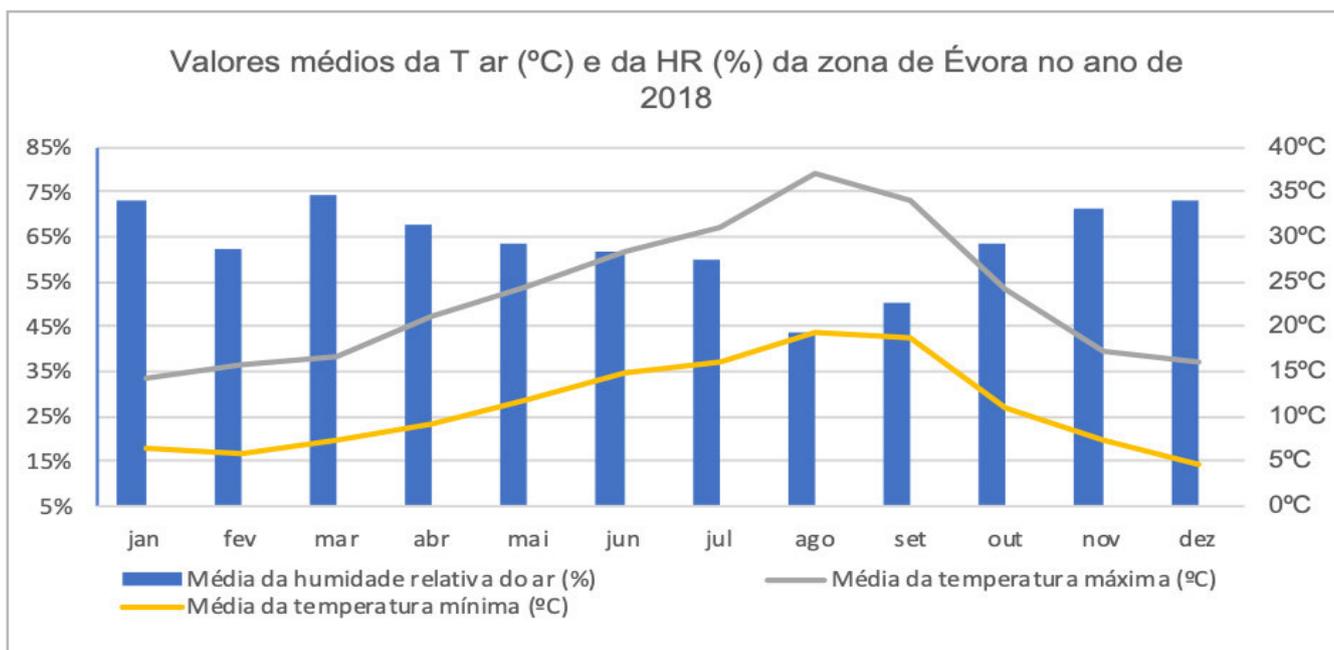
### Metodologia

Para testar a veracidade do algoritmo, realizou-se uma simulação através de fotografias de uma das superfícies de uma amostra, de substrato metálico, recolhida da obra.

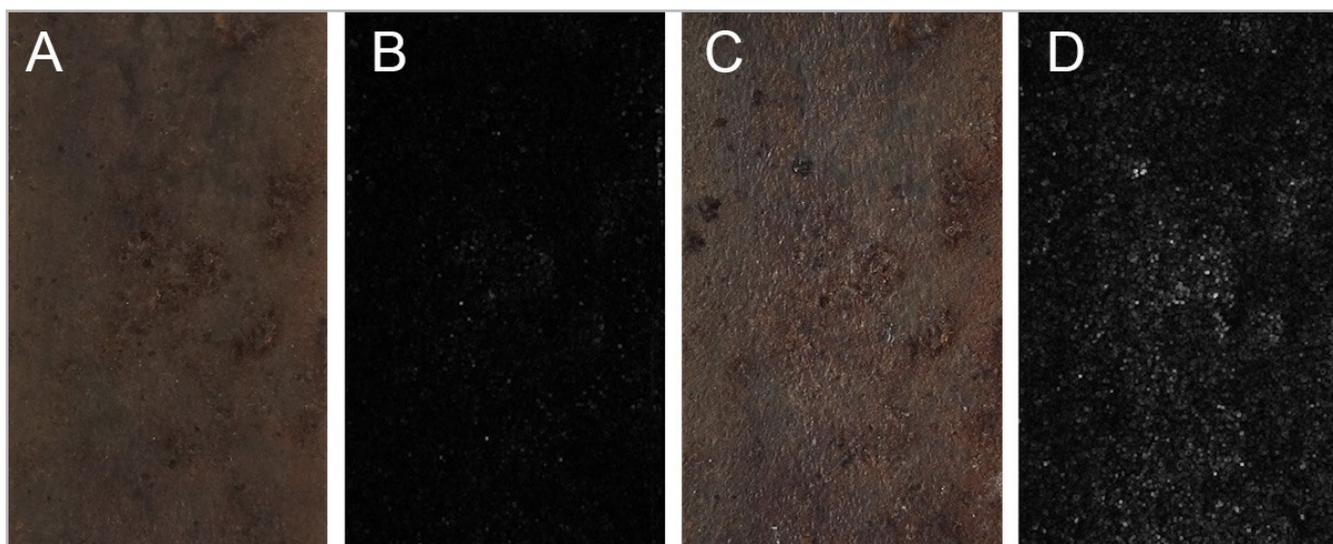
Para o processamento do algoritmo foi utilizado um Macbook Pro (13-inch, late 2011) de 64 bits com um processador Intel Core i5 a 2,4 GHz, uma placa gráfica Intel HD Graphics 3000 com 512 MB, uma memória de 8 GB de SDRAM DDR3 a 333MHz e um sistema operativo *MacOS El Capitan* (10.11.4). A versão do *MatLab*® foi a R2017b (9.3.0) de 64 bits.

No que concerne ao registo fotográfico da morfologia da corrosão, foram recolhidas duas imagens, da mesma zona de análise, em Junho de 2017 (t = ano 0) e em Setembro de 2018 (t = ano 1), por meio de uma câmara digital *Panasonic DMC-TZ7*, a uma distância focal de 8.5 mm, com ISO 320 e tempo de exposição 1/40 em f/3.8. Estas foram adquiridas no laboratório, num espaço interior fechado, com a câmara em suporte manual e utilizando a iluminação artificial da sala (lâmpada *PHILIPS*® fluorescente TL-D 36W/840 de cor branco frio) a que a amostra estava sujeita.

As imagens foram sobrepostas e ajustadas proporcionalmente no tamanho, através da opção 'Restringir proporções' da ferramenta 'Tamanho de Imagem' do programa *Adobe Photoshop*® CC 2017. As duas imagens foram alinhadas, de forma a corresponder os pixéis, para confirmar a coincidência da representação fotografada, sendo posteriormente gravadas em formato *JPEG*, com as dimensões 825 x 1469 pixéis.



**Gráfico 1.**- Valores médios da temperatura máxima e mínima do ar (°C) e da humidade relativa do ar (%), do ano de 2018, para a zona de Évora



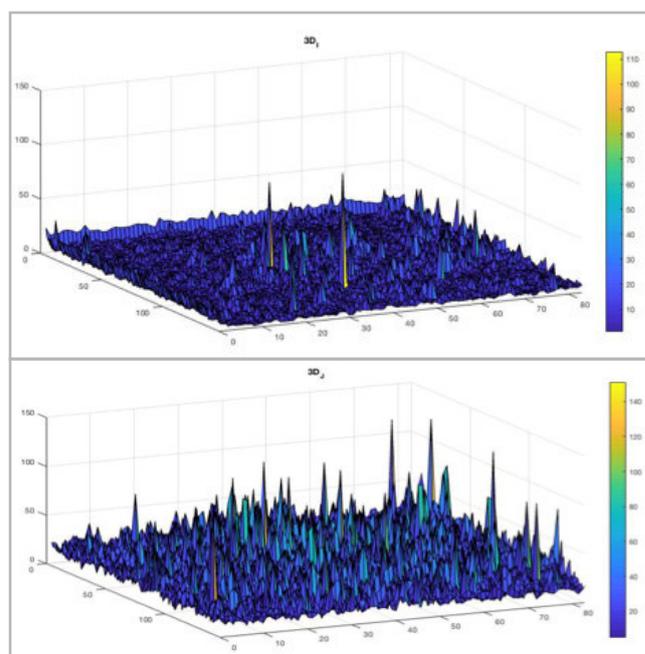
**Figura 4.-** Imagem da superfície corroída de Junho de 2017 (A), da zona mais exposta às condições climáticas, com a respetiva imagem binária à direita (B), e imagem da superfície corroída de Setembro de 2018 (C), com a respetiva imagem binária à direita (D), onde a entropia é representada pelos tons mais claros das imagens B e D.

No algoritmo proposto, o cálculo do VAM dividiu-se em dois momentos: 1) análise da aquisição fotográfica de referência e 2) análise comparativa entre o registo fotográfico de referência e o de após um ano de exposição. As imagens foram introduzidas no algoritmo e processadas em imagens de escala de níveis cinza. Foram transformadas em imagens de textura, onde os valores de entropia de cada *pixel* foram calculados em função dos *pixéis* adjacentes, numa área de  $9 \times 9$  *pixéis*. A opção por utilizar uma pequena área para comparação em detrimento da utilização de *pixéis* individuais, deve-se à irregularidade da corrosão do aço, onde, por comparação com a original seria impossível garantir a correspondência entre *pixéis* equivalentes. A utilização de uma pequena área permite comparar a média da área com a área equivalente, o que facilita a comparação. A partir destas, procedeu-se ao *thresholding* das imagens, que foram convertidas em escala binária (ver figura 4, B e D). Posteriormente, o algoritmo delineou diagramas tridimensionais da representação da entropia de cada imagem e calculou o VAM a partir das imagens binárias. Ou seja, para cada área comparou-se o  $J$  e o  $I$  e calculou-se o valor médio absoluto da entropia de cada imagem, sendo que a variação deste valor significa que há diferença nas imagens e, conseqüentemente, mudanças na irregularidade da corrosão.

### Resultados e discussão

No cálculo do valor de alteração morfológica da imagem de referência, introduziu-se a imagem de  $t = \text{ano } 0$  no algoritmo desenvolvido em *MatLab*<sup>®</sup>, onde  $J_{r_i}$  e  $I_{r_i}$  foram a mesma imagem, e, tal como previsto, não revelou nenhuma alteração morfológica, resultando num  $VAM = 0$ . No estudo comparativo da imagem de referência ( $t = \text{ano } 0$ ) e da imagem de após um ano de exposição ( $t = \text{ano } 1$ ), analisou-se a entropia de cada imagem, no qual

verificou-se que as imagens são diferentes, havendo uma maior irregularidade dos tons cinza da imagem  $t = \text{ano } 1$  (ver figura 4, D), e calculou-se o valor médio absoluto da entropia das duas imagens, que resultou num  $VAM = 0.0898$ . Isto significa que, no espaço de um ano, e de acordo com as imagens obtidas, houve alteração na morfologia da corrosão e, portanto, um aumento da entropia que, ao representar a variação da imagem binária no diagrama 3D, resultou num aumento do ruído (variação e intensidade) dos picos (ver figura 5).



**Figura 5.-** Representação tridimensional da entropia da imagem de referência (acima) e da imagem de após um ano de exposição (em baixo), onde quanto maior é a entropia, maior é o ruído (variação e intensidade) dos picos do diagrama. ©Ana Alvarez João Linhares.

Com base nos resultados obtidos com o algoritmo proposto, verificou-se que o PID é uma ferramenta que possibilita o acompanhamento da deterioração do material no decorrer do tempo. Através do cálculo do VAM podemos constatar que, após um ano de exposição às condições climáticas, houve alterações da morfologia e, portanto, um aumento da entropia, que se traduz em maior irregularidade dos tons de cinza da imagem. Este resultado pode ser correlacionado com a superfície analisada, permitindo avaliar alterações localizadas e generalizadas da área corroída.

Pelo fato deste algoritmo ainda não ter sido aplicado, anteriormente a esta investigação, para a monitorização dos produtos de corrosão, não existem escalas onde se possa quantificar o grau de alteração com base nos valores VAM. Nesta fase, embora o VAM seja um valor numérico, esta variável fornece uma informação mais qualitativa do que quantitativa, uma vez que qualquer que seja o valor acima de zero significa que há alteração da morfologia (VAM = 0 – sem alteração; VAM > 0 – com alteração). Serão necessários mais ensaios para se conseguir traçar intervalos numéricos em relação ao VAM.

Tendo em consideração que os resultados foram obtidos no período académico afeto à dissertação, de um ano letivo, apenas se percebe que houve alteração morfológica. Pretende-se explorar este tema em projetos futuros.

## Conclusão

Esta investigação está em curso. Os resultados obtidos através do método testado de processamento de imagem digital revelaram que, após um ano, houve alteração da morfologia e, portanto, um aumento da entropia, que se traduziu em maior irregularidade dos tons de cinza e consequentemente da superfície corroída.

A metodologia empregue neste estudo e os resultados são um estudo piloto, e como tal há várias tarefas do processo a serem melhoradas, nomeadamente na fase de registo fotográfico. Pelo mesmo motivo, também não é possível apresentar dados comparativos que indiquem o grau de corrosividade da liga da obra de Gonçalo Jardim.

A continuação deste estudo passaria por uma aquisição fotográfica mais controlada, recorrendo a calibração ou correção colorimétrica das imagens obtidas de acordo com a iluminação e uma monitorização anual da corrosão através do valor VAM, de modo a verificar se há estabilização ou aumento de VAM das imagens entre os anos, e, neste último caso, em que proporção, e criar uma escala que quantifique o grau de alteração da corrosão com base nos valores VAM.

A utilização de condições ótimas e reprodutíveis de aquisição de imagem poderão potenciar o registo digital e posterior análise do VAM, assim como a sua parametrização e escalonamento para obtenção de uma futura escala comparativa.

No caso de ser feita alguma intervenção de conservação e restauro para reduzir ou prevenir o avanço do processo de corrosão da obra, esta metodologia pode servir ainda para testar a eficácia desse tratamento, fazendo várias análises temporais da morfologia da corrosão após a realização dessa ação.

Poderá ser feito ainda um estudo paralelo, em que a mesma amostra é submetida a diferentes atmosferas, calculando para cada uma delas os respetivos VAM's, de modo a confirmar o tipo de atmosfera mais aconselhável, consoante o artista pretenda um eventual atraso ou aceleração da corrosão. Outra finalidade importante, deste último ponto mencionado, é a oportunidade de compreensão do comportamento da mesma obra em ambientes diferentes.

Embora o estudo esteja centrado na monitorização da evolução da corrosão, este algoritmo também permite avaliar alterações de outras superfícies além das metálicas.

## Referências

- ALBUQUERQUE, M. P., ALBUQUERQUE, M. P. (2001). *Processamento de Imagens: Métodos e Análises*. Rio de Janeiro: FACET
- ALMEIDA-SANTOS, P. S., ROCHA, I., HEIN, N. (2014). "Utilização da entropia informacional na seleção de indicadores financeiros mais relevantes para a tomada de decisão no sector público: o caso dos estados brasileiros". *Perspectivas em Ciências da Informação*, 19:83-105. <https://doi.org/10.1590/1981-5344/1780>. [Consult. 7/12/2018]
- ALMEIDA, M. E. M., FERREIRA, M. G. S. (1998). *Corrosão Atmosférica: Mapas de Portugal*. Lisboa: INET/IMP/LTR.
- ASM International (2000). *Corrosion: Understanding the Basics*. Ohio: ASM International.
- BARAVALLE, R.; ROSSO, O.A.; MONTANI, F. (2018). "Casual Shannon-Fisher Characterization of Motor/Imagery Movements in EEG", *Entropy*, 20:660-678. <https://doi.org/10.3390/e20090660>. [Consult. 7/12/2018]
- BENTO, M. P. et al. (2009). *Image processing techniques applied for corrosion damage analysis*. [https://www.researchgate.net/publication/228937062\\_Image\\_processing\\_techniques\\_applied\\_for\\_corrosion\\_damage\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/228937062_Image_processing_techniques_applied_for_corrosion_damage_analysis). [Consult. 3/12/2018]
- CHOI, K. Y., KIM, S. S. (2004). "Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing", *Corrosion Science*, 47:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.05.007>. [Consult. 3/12/2018].
- DIAZ, J. et al. (2017). "Rust detection using processing via Matlab". En *Conference TENCON*. Malaysia: Tencon, 1327-133. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2017.8228063>. [Consult. 9/12/2018]
- ESQUEF, I.A. et al. (2003). *Processamento Digital de Imagens*. Brasil: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 1-12, <http://www.cbpf.br/cat/pdsi/pdf/cap3webfinal.pdf>. [Consult. 9/12/2018]

GHANTA, S. et al. (2011). "Wavelet domain detection of rust in steel bridge images". En *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Prague: ICASSP, 1033-1036. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2011.5946583>. [Consult. 3/12/2018]

ISO/DIS 9223 (2010). "Corrosion of metals and alloys" En *Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation*, Geneva: ISO/TC 156 WG4.

MATHWORKS, INC (2005). *MATLAB: The language of technical Computing. Getting started with MATLAB*, 7, Natick MA: MathWorks. <https://www.csd.uoc.gr/~hy215/tutorials/GetStartWithMATLAB.pdf>. [Consult. 9/9/2018]

MEDEIROS, R.M. et al. (2015). "Aplicação da teoria da entropia no estudo da precipitação pluvial em Teresinha-Pi", *Revista de Geografia (UFPE)*, 32:2:206-218. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229164/23565>. [Consult. 7/12/2018].

PAVÃO, R. (2011). *Entropia informacional e aprendizagem de sequências*. São Paulo: Tese de Doutorado, USP/ Instituto de Biociências. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41135/tde-21092011-135012/pt-br.php>. [Consult. 9/9/2018]

SHANNON, C. E. (1948). "A Mathematical Theory of Communication", *The Bell System Technical Journal*, 27:3:379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>. [Consult. 9/9/2018]

YIDONG, Z. et al. (2017). "A non-destructive approach using MatLab software for morphology analysis of ancient mural deterioration", *Studies in Conservation*, 62:7:384-392. <https://doi.org/10.1080/00393630.2016.1183864>. [Consult. 7/9/2018]

## Autor/es



**Ana Sofia Alvarez**  
[ana\\_alvarez\\_279@hotmail.com](mailto:ana_alvarez_279@hotmail.com)  
 Faculdade de Belas Artes da  
 Universidade de Lisboa, FBAUL/CIEBA

Licenciatura em Artes Visuais – Multimédia, na vertente de escultura, com especialização em metais, pela Escola de Artes da Universidade de Évora, Évora, Portugal (2014). Mestrado em Ciências da Conservação, Restauro e Produção de Arte Contemporânea, pela Faculdade de Belas Artes da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal (2018). A pesquisa de mestrado foi sobre a monitorização da corrosão atmosférica de ligas ferrosas, através do método de processamento de imagem digital.



**João Linhares**  
[jlinhares@fisica.uminho.pt](mailto:jlinhares@fisica.uminho.pt)  
 Universidade do Minho, Centro de Física e  
 Visão das Cores

Licenciatura em Optometria e Ciências da Visão pela Universidade do Minho, Braga, Portugal (2002). Em 2006 obteve o grau de MPhil em Optometria e Neurociência pela Faculty of Life Sciences of the University of Manchester, Manchester, Reino Unido. De volta à Universidade no Minho, continuou a sua investigação e formação, obtendo o Doutoramento em Ciências pela Escola de Ciências da Universidade do Minho em 2011. De Março de 2011 a Julho de 2012 foi Lecturer, e de Agosto de 2012 a Agosto de 2013 foi Senior Lecturer, no departamento de Vision and Hearing Sciences, na Anglia Ruskin University, Cambridge, Reino Unido. Em Julho de 2013 obteve o estatuto de Fellow da Higher Education Academy após a conclusão com sucesso da pós-graduação em Learning and Teaching (Higher Education) atribuída pela Anglia Ruskin University, Cambridge, UK. Atualmente é Professor Auxiliar no Departamento de Física da Universidade do Minho.



**Ana Bailão**  
[ana.bailao@gmail.com](mailto:ana.bailao@gmail.com)  
 Faculdade de Belas Artes da Universidade  
 de Lisboa, FBAUL/CIEBA; (CITAR) da  
 Universidade Católica, C. R. do Porto

Licenciatura em Conservação e Restauro pelo Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, Portugal (2005) e mestrado em Pintura Conservação pela Universidade Católica Portuguesa, Porto, Portugal (2010). A pesquisa de mestrado foi sobre metodologias e técnicas de retoque. Doutoramento em Conservação de Pinturas na mesma universidade, em colaboração com o Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia das Artes (CITAR) e com o Instituto do Património Cultural de Espanha (IPCE), em Madrid. A pesquisa de doutoramento foi sobre os critérios e metodologias que podem ajudar a melhorar a qualidade do retoque da pintura. Desde 2004 que realiza trabalhos de conservação e restauro. Desde de 2008 que tem trabalhado como docente de conservação e restauro, trabalhando atualmente na Faculdade de Belas Artes da Universidade de Lisboa, como docente do Departamento de Ciências da Arte e do Património.

Artículo enviado el 09/12/2018  
 Artículo aceptado el 08/03/2020



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.614>

# Morteros históricos en las construcciones de Quito de los siglos XVI, XVII y XVIII

M. Lenin Lara Calderón, David Sanz Arauz e Inés del Pino Martínez

**Resumen:** Este artículo tiene como objetivo profundizar en la caracterización de los morteros de revestimiento en la arquitectura colonial de Quito de los siglos XVI, XVII y XVIII. Se parte del supuesto que durante la colonización hubo aportes locales y europeos en la construcción de la arquitectura religiosa de esta ciudad, los resultados que hoy están a la vista son testimonios de este proceso. El análisis de las características compositivas de los morteros, cuyas muestras provienen de los edificios que hoy conocemos, contribuyen a perfeccionar de alguna manera el rompecabezas de la historia, todavía incompleta, ya que las destrucciones producidas por terremotos, y sobre todo intervenciones de restauración o ampliación edilicia han dejado sus huellas en estos edificios.

**Palabras clave:** morteros de revestimiento, Quito, construcción vernácula, conventos católicos, historia de los morteros

## Historic mortars in the constructions of Quito of the 16th, 17th and 18th centuries

**Abstract:** The objective of this article is to deepen the characterization of the coating mortars in the colonial architecture of Quito in the 16th, 17th and 18th centuries. It is assumed that during the colonization there were local and European contributions to the construction of the religious architecture of this city, the results that are now in sight are testimonies of this process. The analysis of the compositional characteristics of the mortars, whose samples come from the buildings that we know today, contribute to somehow perfect the puzzle of history, still incomplete, since the destruction caused by earthquakes, and especially restoration or building enlargement have left their traces on these buildings.

**Keyword:** Coating mortars, Quito, vernacular construction, catholic convents, history of the mortars

## Argamassas históricas dos edifícios de Quito dos séculos XVI, XVII e XVIII

**Resumo:** O objetivo deste artigo é aprofundar a caracterização das argamassas de revestimento na arquitetura colonial de Quito nos séculos XVI, XVII e XVIII. Considera-se que durante a colonização houve contribuições locais e europeias para a construção da arquitetura religiosa desta cidade, como testemunham os resultados que estão à vista. A análise das características composicionais das argamassas, cujas amostras provêm dos edifícios que conhecemos hoje, contribui de alguma forma para aprofundar o conhecimento da história, que continua incompleta devido às marcas deixadas por terremotos e, principalmente, o restauro e a ampliação desses edifícios.

**Palavras-chave:** argamassas de revestimento, Quito, construção vernacular, conventos católicos, história das argamassas

### Introducción

El *homo faber* expresión latina que significa el “hombre que construye”, expresa la necesidad ancestral del ser humano por abrigarse para soportar las condiciones agrestes de la naturaleza; genera la necesidad de un espacio simple y habitable donde la materialidad de su entorno inmediato determinó algunas características específicas para representar su habitat con armonía, es

así cómo esta arquitectura sin arquitectos demuestra que su “naturaleza áspera estimula la capacidad artística del hombre anónimo que la edificó” (Rudofsky 1968: 58). En su composición existen algunos elementos que Celia Barahona describe como “los revestimientos continuos constituyen la piel de los edificios y como tal su principal misión es la de proteger las fábricas resistentes” (La Spina 2012: 24), dichos revestimientos no son la solidez o soporte de la edificación, son elementos constructivos

que se enfrentan a las condiciones atmosféricas y antrópicas del ambiente.

La elaboración de estos morteros de revestimiento ha llegado hasta nuestros días cual dogma de fe y se han asumido sin el más mínimo cuestionamiento; no nos hemos preguntado si funcionan bien, si poseen la dosificación necesaria, si pueden aplicarse como mortero de sustitución sobre superficies patrimoniales, entre otras; Ruiz de Santayana (1922: 284) mencionó con gran determinación “quienes no pueden recordar el pasado están condenados a repetirlo”. Actualmente, estas intervenciones para salvaguardar el patrimonio se encuentran enmarcadas en la historia de los hechos en sus antecedentes, sus rasgos sociales, su cosmovisión, etc. Sin embargo, el pasado histórico y constructivo, su materialidad y las características particulares de sus componentes llegan a plasmarse en un informe mas no en una investigación a profundidad, no obstante, el documento es un punto de partida para análisis comparativos e información histórica de elementos que en algunos casos ya no existe. En el caso de Quito se han aplicado técnicas empíricas, analíticas y academicistas en la restauración de las edificaciones, se ha investigado poco y las publicaciones son escasas. Este no es un hecho aislado o una interpretación personal ya que Galeano (1998: 181) lo comentó en su escrito *Mapamundi* “La geografía tradicional roba el espacio, como la economía imperial roba la riqueza, la historia oficial roba la memoria y la cultura formal roba la palabra”; nace ahí una inquietud, ¿qué pasa con nuestra memoria constructiva? Las intervenciones modernas en edificaciones patrimoniales han roto la concepción de salvaguardar el bien inmueble en correspondencia con las técnicas utilizadas durante siglos, actualmente se recurre al uso combinado de materiales utilizados en el pasado o técnicas vernáculas, a las que se añaden materiales actuales que se comercializan en el mercado, sin un análisis previo, cuidadoso y respetuoso de bien patrimonial. En otros casos, el informe cumple con los requisitos para la aprobación del proyecto de intervención arquitectónica que es el principal interés; por otra parte, los contratos de estudios tienen duración corta y presupuestos bajos, lo cual genera un resultado incompleto que no contempla la consolidación íntegra del bien inmueble, ni de sus componentes, es decir, la caracterización de los mampuestos, revestimientos, etc. Sólo se repara y a veces se mal repara, es por esto que la preocupación sobre el mortero de revestimiento es imperceptible ya que a menudo se lo remedia con materiales incompatibles y de fácil solución, es una cadena de enseñanza mal engranada entre la teoría y la práctica. Aplicaría aquí lo que Eric Arthur Blair decía “para hacer cumplir las mentiras del presente, es necesario borrar las verdades del pasado” (Orwell 1984: 29,141). El proyecto investigativo trata de delinear el perfil constructivo del mortero de revestimiento utilizado en las construcciones de Quito durante los siglos XVI, XVII y XVIII, apoyándose en la caracterización de los materiales. Se dará un detalle físico, mecánico, químico y mineralógico de los morteros originales extraídos del sitio, en este sentido, los estudios de caracterización de los materiales,

“proporcionarán resultados que servirán para establecer la datación relativa de las muestras” (Rojo 2015: 42), y así poder generar una correlación entre la historia disciplinar y la historia constructiva de los casos de estudio, tomando en cuenta que esta arquitectura es parte de un proceso de colonización procedente del viejo mundo y de saberes constructivos locales.

Como base metodológica se ha tratado de reunir todos los insumos necesarios diferenciando aquellas fuentes primarias de las secundarias u otras evidencias que han contribuido a la investigación, tratando de no alterar el objetivo de la investigación que es determinar el tipo de mortero de revestimiento que se utilizó en las construcciones del Quito colonial. La fuente primaria es el edificio mismo, ya que las muestras son tomadas en el sitio, previo un análisis de los lugares menos intervenidos, este material es sometido al análisis y composición de los morteros partiendo de la macro a la micro localización. Las fuentes secundarias son textos sobre la historia del edificio, información de periódicos y revistas; este material es confrontado con el análisis científico de materiales extraídos en el laboratorio y los resultados son confrontados con investigaciones similares sobre la caracterización de morteros, con la finalidad de argumentar mejor sobre los problemas planteados en un principio.

### El uso de los morteros en la historia

Sobre los morteros históricos hay múltiples investigaciones, tanto desde el punto de vista descriptivo como el analítico. Como preámbulo, vale decir que esa combinación simple a base de tierra cruda mezclada con ceniza volcánica o coprolitos que se evidencian en la construcción de muros, suelos y pavimentos en el Neolítico son la base compositiva de un mortero, o aquella argamasa de arcilla que al añadir agua permite su manipulación adquiriendo gran dureza al secarse (Sersale 1991: 259); o por qué no enunciarlo, el uso de los morteros de cal que se remontan a un terrazo excavado en Canjenu, actual Turquía, que posee un mortero de cal fechado entre 12.000 a.C. y 5.000 a.C. Sin embargo, en el desarrollo de la historia antigua, tanto de Asia como de Europa es más habitual el uso de morteros de cal y yeso (Elsen 2006: 1417). El uso exclusivo sólo de mortero de cal se remonta a la Máscara de Jericó 7.000 a.C., actual Palestina, donde el empleo de enlucidos y empastes a base de cal les permitió experimentar con áreas pulidas y de gran acabado superficial (Malinowski 1981: 342), y si describimos con más detalle debemos enunciar la aldea Catl Hüyük 6.000 a.C., actual Turquía, donde se recubren muros con un pequeño empaste que va desde la tierra mezclada con elementos orgánicos e inorgánicos hasta conglomerantes de yeso y cal (Álvarez, Pérez y García 1995: 52).

Si nos referimos a la adaptación de materiales de la localización, los pueblos que se asentaron en la antigua Mesopotamia, humedecidos por los márgenes del Tigris

y Éufrates, dada su ubicación geográfica optaron por una argamasa rica en arcillas y betumen enunciada ya en el Génesis "... y se dijeron unos a otros: Vamos, hagamos ladrillo y cozámoslo con fuego. Y les sirvió el ladrillo en lugar de piedra, y el asfalto en lugar de mezcla. Y dijeron: Vamos, edifiquémonos una ciudad y una torre..." (Varela 1869) que no sólo les sirvió para el uso de elementos edificados, sino para realizar construcciones de gran envergadura como el templo de Ishtar, Ninni-Zaza, 1800 a.C. donde se resalta el uso cromático del betún y la cal e incluso el yeso; o la Torre de Babel 800 a.C. con la construcción de ladrillos y betún que se usó como mortero de junta, entre otros (Alejandre 2002: 12-13).

Se puede afirmar que en el antiguo Egipto fue donde se desarrolló el mayor conocimiento constructivo con yeso. Las piezas megalíticas de roca de las pirámides tuvieron un empaste de yeso que les permitía generar su decoración pictórica; este pueblo también lo utilizó como una lechada que servía como deslizante y lubricante de las grandes superficies rocosas en sus construcciones (Furlan y Bissegger 1975: 166), e incluso dicho conocimiento les permitió usar el yeso como ligante en los intersticios de sus juntas constructivas (Martinet, Deloye y Golvin 1992: 40).

Son los griegos los que viven una arquitectura evolucionada justificada en la filosofía, ciencia y técnica, y exponen los elementos arquitectónicos y constructivos con gran equilibrio y sensatez; siendo así que las primarias construcciones de piedra estaban unidas por un mortero hecho simplemente de tierra o de arcilla (Orlandos 1966: 135-148). Ya Vitrubio escribió el gran trabajo sobre los elementos constructivos por la selección de materiales, elaboración y técnica de aplicación. Con el transcurso del tiempo y la mejora de la técnica, en los griegos predominó el uso de los morteros de cal tanto como ligante como para acabado superficial. Esta técnica en la cumbre de su cultura constructiva logró generar morteros pulidos: establecieron acabados superficiales por la sucesión de tres a seis capas hasta lograr un estuco consolidado a base de cal de alta resistencia que aumentaba la impermeabilidad del material, la misma que se incorporaba visualmente con la superficie del mármol (Furlan y Bissegger 1975: 167; Malinowski y Garfinkel 1991: 62). Incluso las investigaciones manifiestan que los griegos conocían los ligantes artificiales, lo que corrobora la hipótesis del origen neolítico del mortero de cal. Alejandre describe en sus investigaciones que la arqueología clásica evidenció la utilización de morteros de cal al exterior "revocos" o al interior "enlucido" en restos de construcciones como Cadmos en Tebas, el Megaron de Pylos, el Palacio de Micenas así como el Palacio de Tirinto, que se encuentran datadas aproximadamente en el 1.400 a.C. con la caída de Cnosos (Alejandre 2002: 15). La experimentación fue tal que debido a la falta de rocas volcánicas en el sitio utilizaron puzolánico artificial extraído de los tejuelos, ladrillo triturado o la ceniza de la cáscara de arroz; esta experimentación de añadir nuevos

componentes les permitió fortalecer y generar morteros de resistencia hidráulica (Válek, Hughes y Groot 2012: 130).

El Imperio Romano, en todos sus periodos de expansión, se nutrió del conocimiento constructivo de sus pueblos conquistados, "aunque la cal tuvo un profuso empleo con anterioridad a los romanos, podemos afirmar que fue la civilización romana la que mejoró los procesos de fabricación de la cal y las técnicas de la puesta en práctica de los morteros, y supo explotar todas las posibilidades de este material y además popularizó y expandió esta técnica por todo el imperio" (Gárate 1993: 59). Refleja con mayor fuerza la herencia de la tecnología constructiva griega en el empleo de mortero de cal *Opus Caementitium*, dejando a un lado los primarios sistemas como el de gruesos bloques hilados sin morteros *Opus Quadratum* o los de ladrillo seco *Opus Latericium* y desarrollaron el uso frecuente del mortero multicapa en obras monumentales como el Panteón, Coliseo y sus acueductos (Malinowski y Garfinkel 1991: 62). Se llegaron a mejorar los morteros romanos perfeccionando la argamasa desde la selección de la piedra de cantera hasta la cocción, sin olvidarse del uso de diversas sustancias como escoria, carbón, etc.; lo que les facultó tener una mezcla con mejor consistencia, durabilidad, impermeabilidad denotando con esto que su mortero hidráulico posee mejores características que su antecesor griego (Válek, Hughes y Groot 2012: 133; Morgan 1992: 11-15). Mientras tanto, esto les permitió mejorar los procesos de fabricación de la cal y las técnicas de aplicación de su mortero, bien por el empleo de cal como por la adición de otro tipo de áridos: pétreos, cerámicos e incluso puzolánicos, como fue la tierra volcánica (Rassineux, Petit y Meunier 1989: 1027). El desarrollo de la técnica del mortero romano fue tal que permitió desarrollar nuevos parámetros de acabados constructivos para ser aplicados sobre las superficies de los muros; así se tiene un recubrimiento impermeable multicapas con espesor decreciente llamado *Opus Signinum* que se aplicaba sobre grandes rocas que se exponían a la intemperie como es el caso de las cloacas, o el estuco compuesto por cal hidráulica y polvo de mármol *Opus Marmóreum* el mismo que se empleaba sobre superficies irregulares para aplomar y emporar, sin olvidar aquel empaste fino de cal grasa con el cual se blanqueaban las paredes y se pintaban sobre las mismas los frescos o murales el *Opus Abarium* (Ortega 1994: 48-51).

En el intervalo de esta etapa de la historia están los morteros bizantinos, visigodos e islámicos: los morteros bizantinos, de entre el siglo III al XIII se caracterizaron por tener morteros de cal cuya mezcla era tosca y gruesa aplicados sobre la construcción de sus muros, vale añadir que en el proceso de aplicación de los morteros sobre la superficie se incorporaba polvo de ladrillo o cerámico antes del fraguado como una idea burda de mejorar la consolidación y durabilidad del material; mientras que la generalidad de los morteros visigodos era mantener la línea y técnica constructiva de la arquitectura romana tardía donde el ligamento de cal es imprescindible para

las juntas y superficies de sus sillares (Alejandre 2002: 22-27). Los morteros islámicos diferencian bien el uso y el trabajo de cada uno de los elementos constructivos, mezclas de tierra, cal y yeso; es más, lo tenían registrado en su Ordenanza de oficios y mercados o reglamento del Zoco, siglo XIV, el *hisba* o la *sharia* que prohibía el uso de materiales inadecuados, baratos, e incluso, todo tipo de comercialización que ponga en tela de juicio la calidad del pétreo a utilizar (Michell y Grube 1985: 174-185). Con respecto al uso de la cal se puede manifestar que desarrollaron tres usos comunes con este material, estos fueron el tapial monolítico de cal, el tapial real y el tapial calicestrado, en los que se determina el uso con respecto a la cantidad y espesor de capas de mortero y su dosificación, esta caracterización en la tapia es lo que determina su eficacia, sin olvidar la decisión del uso de la cal para impermeabilización de superficies como arranque de muros, drenajes, canales de agua y techumbres; en este período era habitual el uso de paja como aditivo para mejorar la resistencia de las argamasas de mortero (Ontiveros-Ortega, Sebastián-Pardo, y Valverde-Espinosa 1999: 49). Respecto al yeso se puede manifestar que en la época islámica este material fue el componente ideal para las argamasas de morteros de junta y revestimiento, el motivo principal, la abundancia del mismo en oriente medio del norte de África y el sur de la Península Ibérica así como la menor temperatura de cocción comparada con la cal (Alejandre 2002: 23); el mismo se prefería para estucos de gran precisión y acabado fino. Los primeros usos del yeso se registran como enlucido interior de las casas colmena del norte de Siria; la utilización del mismo representa un impulso interesante en la Península Ibérica islamizada donde la edificación religiosa se nutrió de esta aplicabilidad del material entre los siglos VIII al XV, con ejemplos de elegancia arquitectónica como la Mezquita de Córdoba bajo el Emirato de Abderramán I, el Palacio de la Aljafería de Zaragoza, Alcazaba de Balaguer en Mérida, o el esplendor constructivo de la Alhambra de Sevilla, básicamente toda aquella riqueza estética en yesería del periodo al-Andalus (Sanz 2009: 16-20).

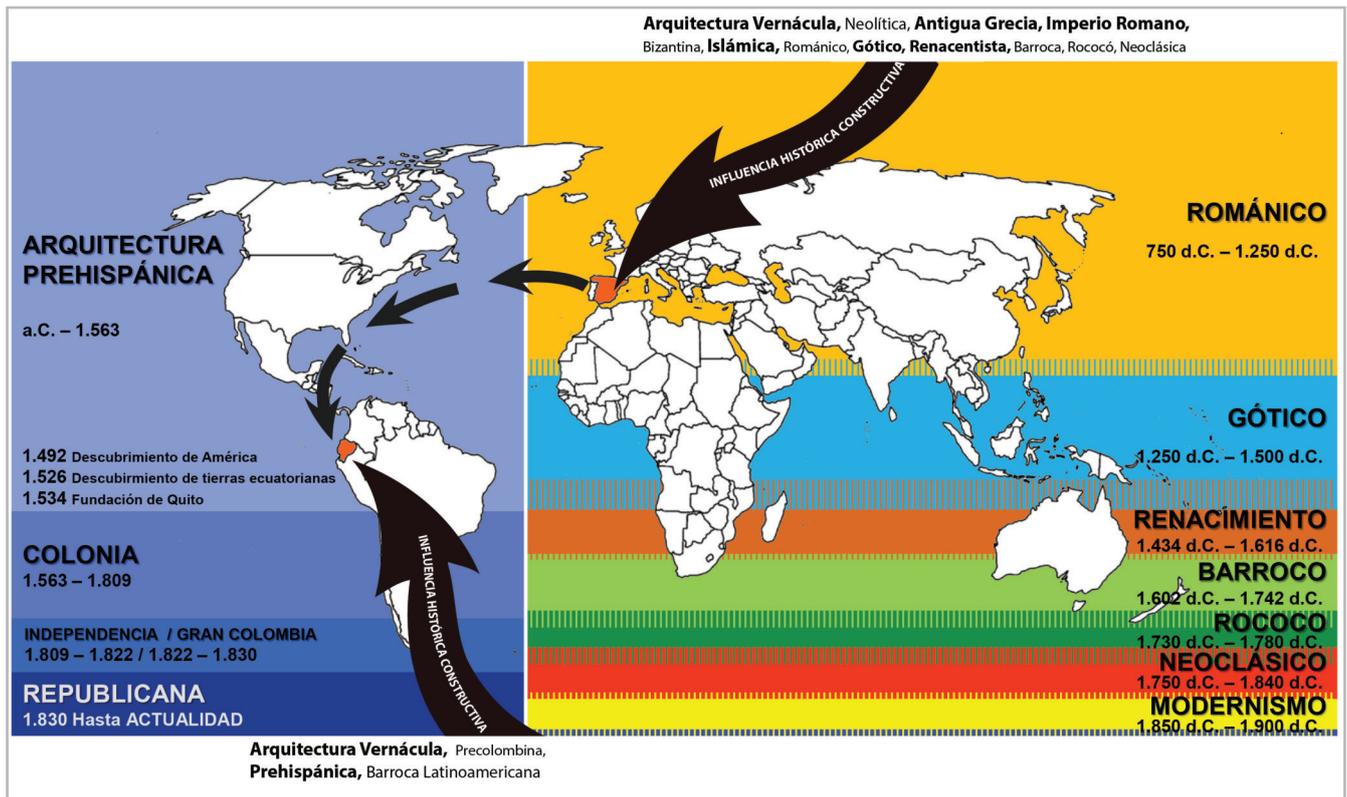
En el medioevo, después de la caída del Imperio Romano, fue difícil conservar el acervo de conocimiento sobre los morteros; es más, cada región aplicó y varió la utilización de los principios romanos adaptándolos a su necesidad local, matizándolas o alterándolas con la experimentación de nuevas fibras, aditivos y agregados, lo que derivó en morteros de composición química y mecánica diferentes (Newton y Sharp 1987: 163-175). El medioevo español es una mezcla serena y estética donde predomina la construcción clerical, los castillos y fortificaciones militares, se evidencian morteros a base de cal con sillares de piedra en las juntas, se preparaba un mortero con lascas de piedra o trozos de teja para evitar la introducción de troncos de madera y hacer palanca. En Italia, Francia, España así como en el resto de países que sostuvieron el pensamiento del medioevo, existió un retroceso en los procedimientos y la calidad en la fabricación de la cal, pues declinaron en la selección granulométrica del árido,

la temperatura de cocción, la proporción y homogeneidad de las mezclas, desvinculando la relación entre el ligante y el agregado (Gutierrez-Solano *et al.* 1989: 45; Malinowski 1981: 342; Furlan y Bissegger 1975: 169). Esta deficiente conceptualización del mortero intentó mejorarse con aditivos orgánicos como albúmina de huevo, caseína de mamíferos, queratina de animales, cera de abejas, gluten de trigo – centeno – cebada, zumo de frutas, fibra o aceite vegetal, sangre animal y urea – orina (Sickers 1981: 25-52; Rampazzi *et al.* 2015: 115-116). No obstante, en el mismo estudio se concluye que el uso de estos aditivos conllevan a la aparición de microorganismos que originan patologías químico biológicas en los elementos constructivos. Sobre el ocaso del medioevo, por decreto monárquico o aristocrático muchos países estimulan la construcción en piedra, la misma que siglos antes estaba reservada a edificios religiosos y militares, con la finalidad de que perduren en el tiempo y eviten ser la antorcha de la hoguera en la conquista de sus pueblos; obviamente esto cambió el hábito de los constructores de módulos pequeños y unifamiliares pues tuvieron que adaptarse a las exigencias del sistema constructivo ignorando las variaciones crecientes de calidad del pétreo y de la cal, decreciendo la eficacia de la fabricación del mortero (Furlan y Bissegger 1975: 169).

Posterior a la descripción que se ha realizado, los empastes, morteros y revestimientos han ido manteniendo el mismo principio de composición con la variable lógica de adaptación regional a su geo localización y estilo arquitectónico con variaciones plásticas del elemento constructivo a larga duración. Se ha pasado de los morteros prehistóricos rústicos y toscos hasta aquellos revocos y enlucidos decorativos en el auge de la burguesía o la experimentación de ligantes hidráulicos con el empleo de la cal resistente a la acción del agua marina, los cuales generaron un nuevo esquema de utilización del material constructivo, algo que ya realizaron los griegos y romanos siglos atrás (Álvarez, Pérez y García 1995: 58). No serán parte del estudio los morteros actuales generados artificialmente o cementos como el portland, puzolánico, aluminoso, etc.

### El uso de los morteros en américa

Es necesario poner sobre contexto que con el descubrimiento de América en 1492 se produjo la aplicación de materialidades ya experimentadas, donde existió una tradición constructiva prehispánica que tuvo su arraigo local y experiencia en la construcción y en el uso de materiales naturales en bruto. Todo esto se evidencia en el uso ornamental de los morteros con pigmentos y texturas, como el azul maya o el rojo de la cochinilla, producto de sus cactus centroamericanos, entre otros (Maganoli *et al.* 1995: 483-485). [figura 1] La llegada de los conquistadores y su conocimiento en técnicas y tratados constructivos generó un producto con variables etnotipológicas, el uso de materiales locales orgánicos e inorgánicos y la riqueza



**Figura 1.-** Cronología de la influencia de los estilos de arte - arquitectura determinantes para poder delimitar los principios de una arquitectura ecuatoriana

experimental local se nutrió con los aspectos técnicos depurados de los morteros de cal (Martínez *et al.* 2008: 95). Al parecer, en el Imperio Inca el trabajo con argamasas, morteros de junta o revestimientos fueron poco utilizados, en tal caso un mortero de barro sería una de las escasas alternativas (Ramón 2017: 300-301), sin embargo, ciudades como Chan Chán en la costa norte del Perú y Pachacámac en Lima, son ejemplos significativos de uno de tierra. En la configuración de su arquitectura monumental inca la piedra manifiesta el poder del pueblo, la utilización simple de una mezcla rústica a base de tierra cruda como lo evidencian sus vestigios arqueológicos “con restos de coprolitos, se define un estrato compuesto por grava, arena gruesa y tierra fina arcillosa” (Chu 2017: 30). En el florecer del imperio las investigaciones evidencian que las construcciones en el valle del Cuzco usaron morteros de barro y paja *ichu* (McEwan, Gibaja y Chatfield 2005: 259). Sin olvidar que agregados pétreos finos eran usados para utensilios domésticos. En América, la construcción *a la española* no se evidenciará sino con la práctica urbanística de la ciudad en Santo Domingo, República Dominicana, en 1494 (Ortiz 2004: 21).

### El uso de los morteros en Ecuador y en la villa de Quito

La llegada de los europeos a las costas del territorio ecuatoriano ha sido determinado en 1526, en ese momento la arquitectura vernácula refleja una respuesta arquitectónica afín con la organización social, los señorios

étnicos: trabajo colectivo, aporte estético y constructivo acumulativo que se refleja en el material constructivo básico que tiene cada región geográfica y las características meteorológicas zonales. Es así que la arquitectura monumental que expresaba el poder dominante se diferencia de la vivienda común por su presencia, materialidad y su larga duración. Los resultados de los estudios arqueológicos han permitido determinar como material predominante el uso de los morteros de tierra. No obstante, hace falta un estudio en profundidad de los 6500 años de construcción prehispánica. Los periodos prehispánicos, determinados ya en investigaciones en los años sesenta, son tres: el Periodo Formativo (3500 a.C. – 500 a.C.) que se caracteriza por el uso del sistema constructivo entramado de madera denominado bahareque, con postes de madera empotrados en el suelo practicados tanto en edificaciones de la costa como de la sierra; el Periodo de Desarrollo Regional (500 a.C. – 500 d.C.), caracterizado por el uso de cimientos y sobre cimientos de piedra con muros de bahareque en la costa y construcciones de madera y paja de páramo en la sierra; el Periodo de Integración (500 d.C. – 1534 d.C.) en el que se consolida la praxis de la construcción con cangahua, bahareque y piedra; construcción de pirámides truncadas y escalonadas de cangahua; pisos conformados por planchas de arcilla cocida en la cima de las pirámides, mediante la quema de material vegetal. Sobre la plataforma de arcilla cocida se encontraba una construcción de bahareque. En la costa la construcción en caña y madera se la realizó sobre montículos de tierra

en las zonas húmedas para impedir que suban animales rastrosos o depredadores (Del Pino 2018: 92).

La huella prehispánica constituye una preexistencia con la que cuentan los fundadores de ciudades del actual Ecuador, es así que Fray Gaspar de Torres para 1597 describe las construcciones de los Caranqui “las casas de los naturales son de un sistema de cañas, sin enlucido de barro y cubiertas con hojas de palma” (MDMQ 2003: 22); mientras Salinas de Loyola describe las costumbres constructivas del bohío de los Paltas en la zona de Loja “las casas donde habitan son de paredes de palos, o tablas y algunas cubiertas con barro a manera de tabique y otras de paja, la cubierta, en general de la misma paja...” (22). La Fundación de la villa de San Francisco de Quito se impone mediante una sucesión de guerras, saqueos, y finalmente la negociación entre españoles e indígenas al finalizar el año 1534 (Del Pino 2017: 165-169; Ortiz 2004: 23-29). La arquitectura residencial del Quito colonial se caracterizó por soluciones de una sola planta monoambiente como las prehispánicas, construida por su propio habitante, con el apoyo de la comunidad indígena. La construcción de este bohío usó “materiales rústicos sin procesamiento evidenciando el uso de barro, adobe, bahareque, madera o caña con cubiertas de palmas o paja sobre estructuras de madera rolliza, según el clima y la disponibilidad de los materiales” (Ortiz, Abram y Najera 2007: 102). En otras palabras, aseveramos la frase pronunciada en 1990 de Valerie Fraser sobre la arquitectura colonial andina “la arquitectura de la América española del siglo XVI es una arquitectura de y para la conquista; es fundamental para la construcción y consolidación del imperio español” (Webster 2011: 305).

El Centro Histórico de Quito se desarrolla sobre una topografía agreste y particular donde “las irregularidades del terreno y los errores en las medidas, dan por resultado pequeñas variaciones que conducen a un pequeño equilibrio entre la unidad y la diversidad” (Rudofsky 1968: 55). Emplazado en una área de 376 hectáreas, posee un total de 4674 predios edificados de los cuales 4286 se encuentran inventariados y de éstos 130 bienes son monumentales, entre los cuales figuran iglesias,

conventos, claustros, etc., que representa el 42% de los predios edificados, mientras que el 58% restante equivale a construcción de arquitectura civil. La parroquia González Suárez representa el núcleo central de consolidación histórica, posee 54 hectáreas, es aquí donde se emplazan las edificaciones a estudiar (Del Pino 2010: 15).

Conocido como el *Gran Convento*, el Centro Histórico de Quito entre la época de su fundación en 1534 y mediados del siglo XVIII, tuvo alrededor de una trentena de edificaciones destinadas al clero mendicante estableciendo un vínculo entre el poder dominante y la producción arquitectónica. Alfonso Ortiz detalla que para el siglo XVI, con una población de 4.000 personas, 15 edificaciones religiosas sobresalían en este centro urbano colonizado (Carrión *et al.* 1990: 142). A pesar de la diversidad de órdenes religiosos y ejemplos de gran valor arquitectónico “la definición va a ser mayoritariamente monumentalista, y limitada geográficamente a algunas zonas: el centro histórico y unos pocos barrios más identificados por su riqueza arquitectónica” (Burgos-Vigna 2015: 67).

En las investigaciones publicadas sobre la arquitectura y la ciudad de Quito describen la utilización progresiva de los morteros. En un principio, cuando la construcción era de mampuestos de tierra y piedra, se utilizaron morteros de tierra *cangahua* (Boada *et al.* 1993: 83). Esta no es sólo una aproximación local pues investigadores han evidenciado este material como una respuesta doméstica primaria “el barro parece ser el primer material de unión empleado para fabricar morteros en un edificio antiguo, que está en uso, hasta ahora en algunas zonas del mundo” (Moropoulou, Bakolas y Anagnostopoulou 2005: 295). Luego, con el pasar de la conquista y el asiento del dominio español se optó por “blanquear con cal las paredes interiores y exteriores de las casas” (Boada *et al.* 1993: 111). Esta práctica se explicará más tarde por la necesidad de asepsia en las ciudades y haciendas afectadas por plagas y pestes.

En los estudios que Susan Webster hace sobre la Iglesia San Francisco comenta que “se observa una mezcla de piedras de cantera de cal y arena” (Webster 2012: 50) [figura 2]. Este es un primer indicio que pone en alerta la



**Mortero de cal sobre fachada Iglesia San Francisco**

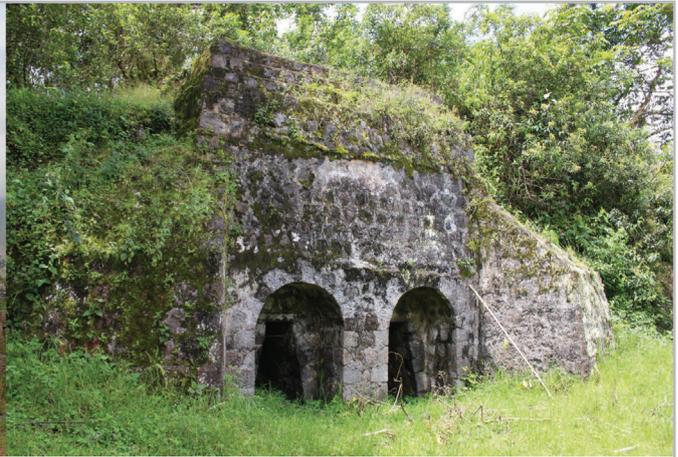
**Mortero de cal en cúpula de Catedral Quito**

**Mortero de cal sobre pintura mural Santo Domingo**

**Figura 2.-** Ejemplos de revestimientos encalados



**Horno de Cal "Rumicucho"**



**Horno de Cal "Reserva Geobotánica Pululahua"**

**Figura 3.- Hornos antiguos de Cal**

existencia de morteros a base de cal para unir, consolidar y dar un acabado que determina una estética a los muros de mampostería; no obstante, dentro del proceso constructivo, desde la colonia hasta la actualidad, no existe una tabla de elementos ni de dosificaciones, sino únicamente la aplicación empírica "prueba error de dosificaciones de la mezcla" esperando la compatibilidad del mortero nuevo sobre la superficie ya construida. En el estudio del Proyecto de Cooperación Internacional Ecuador-Bélgica, Ecu-Bel, se menciona que en la Iglesia Santo Domingo se desarrollaron prospecciones arqueológicas que determinaron un abanico de información no muy ordenada que identifican los sistemas constructivos y los materiales empleados, pero no establecen una cronología histórica constructiva; por ejemplo en el informe que transcribe Kennedy dice "este noviciado... elegante y espacioso, fue construido todo en cal y ladrillo sobre un terraplén en arquería de cal y piedra" (Alemán y Van Balen 1994: 36), pero los informes de restauración mencionan el uso de morteros puzolánicos en proporciones elevadas. Una de las explicaciones de esta asimetría en la información se encuentra en la reforma dominicana aplicada a las iglesias de la Orden en toda América; los daños producidos por sismos y terremotos posteriores a la construcción del edificio, permiten identificar que la mayor parte de los edificios religiosos monumentales del centro histórico de Quito tienen hasta tres reconstrucciones y en algunos casos profundas reformas en las que los sistemas constructivos son los mismos utilizados durante siglos. El cambio se produce con la inserción del cemento puzolánico cuya difusión es notoria desde mediados del siglo XX, aspecto que debe ser estudiado en profundidad para determinar con mayor precisión las etapas de la arquitectura monumental religiosa de Quito.

La construcción civil se identificó por la edificación en tierra con sistemas como el adobe, tapial y bahareque considerando que al menos el adobe tuvo una semejanza métrica al adobón de Andalucía "fabricado en el propio

terreno... de largas dimensiones, más o menos de 1.20m de largo por 0.70m de alto" (Navarro 1985: 36,135). Para proteger la construcción de tierra se la recubrió con una *lechada* compuesta por tierra muy fina y agua para rellenar las fisuras producidas por el secado del muro; el material térreo para la construcción se lo denomina en Ecuador *chocoto*. Posteriormente, "la necesidad de enlucir y revestir las paredes con cal para preservarlas de las inclemencias del tiempo" (37). Para 1541 los fundadores tuvieron ya algunos materiales de construcción para mejorar las edificaciones originarias, en 1537 se comenzó a "explotar cal en un pequeño horno de Tolóntag" (Enríquez 1938: 217), pero el Quito construido con *cal* y *canto* se consolidó hacia 1551, año en que Francisco Ruiz obtiene los permisos para hacer y utilizar las minas de cal en Tolóntag y posteriormente a esta mina se suma la de Lulumbamba y Calacalí (Enríquez 1938: 235; Andrade-Marín 2003: 119-120). [figura 3] Desde ese momento la cal permitió generar esa argamasa que consolidaría la construcción de obra monumental o civil en la ciudad así como la infraestructura: pavimentos, puentes, arquería y algunas cloacas subterráneas de las quebradas que fraccionaban para ese momento este centro urbano.

El conocimiento progresivo del uso de la cal se impuso entre los siglos XVI y XVIII, adaptándose a la necesidad que imponía el orden colonial, a las condiciones de clima y humedad, al imaginario histórico constructivo y colectivo que asoció la mampostería de piedra, tierra y ladrillo cocido encalados como un rasgo de prestigio en la arquitectura y un patrón racional de construcción. [figura 4] El propósito de la investigación doctoral titulada *Caracterización de los morteros de revestimiento del Quito Colonial en los siglos XVI, XVII y XVIII* es identificar los tipos de morteros usados entre estos siglos, reconocer su composición, calidad, estética y modo de preparación como parte de la valoración de las edificaciones históricas patrimoniales. En los siglos XIX y XX la utilización del *mortero de cal* es parte de la cotidianidad en la práctica constructiva de la arquitectura republicana (Boada *et al.* 1993: 136). Pero, este material



**Figura 4.-** Revestimientos de barro

¿fue usado por las ventajas de impermeabilidad, plasticidad y biodegradación o como un principio simplemente estético o fachadismo instaurado por el imaginario colectivo u ordenanzas locales?. Hay que tener en cuenta que los morteros de revestimiento por su empleo son la “piel a sacrificar” (Baldi *et al.* 1981: 134), pues están en constante contacto directo con agentes que alteran su composición.

### Conclusiones

La investigación demuestra una primera aproximación de la utilización de morteros tradicionales de barro, otros de arena e hidrato de cal y de morteros de cal y yeso (Castilla 2004: 13), aplicados sobre los mampuestos. Esta reseña de hechos descriptivos y empíricos nos permitirá en posteriores etapas considerar fases deductivas, analíticas e investigativas a partir de la información y los resultados obtenidos. “Una buena intervención comienza cuando se reúnen todos los argumentos” técnicos y constructivos “desde la ubicación, hasta las particularidades históricas constructivas propias de la edificación, sin olvidar el establecimiento de un programa de mantenimiento periódico del inmueble edificado” (Lara 2017: 39). Hay que tener en cuenta que en la investigación histórica sobre los constructores de los edificios religiosos de Quito existe un sesgo con respecto a la manera de describir la historia constructiva, omitiendo el proceso o elaboración de los morteros y negando la participación de artesanos locales en la edificación colonial bajo la denominación de “autores anónimos” cuando en realidad, en los libros de cuentas aparecen contratos, a veces con montos significativos, para la construcción de obras de cantería, carpintería, albañilería, entre otros oficios, como lo describe la investigación de Susan Webster.

En 1981 el Centro Internacional de Estudios para la Conservación y la Restauración de los Bienes Culturales (ICCROM), trató de estandarizar un mortero de restauración bajo ciertas características físicas, mecánicas, térmicas, de fraguado, de trabajabilidad, de porosidad, etc. (Prado *et al.* 2009: 2). Sin embargo, pese a este intento de normalización se tiene que considerar lo que manifestó Alessandrini en 1989 “no se puede uniformizar la metodología” ya que cada caso tiene sus propias particularidades basadas

en el estudio histórico constructivo de la edificación. La materialidad, adherencia, composición, compatibilidad y la calidad del mortero de revestimiento, objeto de estudio, se someterán a un tipo de exploración sin olvidarse de la calidad del mantenimiento de la edificación (IAPH 2003: 43).

La arquitectura del centro histórico de Quito fue edificada por indígenas, mestizos, negros y alarifes europeos, quienes aplicaron y fusionaron las técnicas europeas con las locales. Esta práctica se aplicó según el tipo de construcción, la adaptación de técnicas a los materiales disponibles, a manera de ejemplo, en donde no hubo hierro, o este era muy costoso, se trabajó en madera, tanto las piezas como los ensambles; es decir, se dieron soluciones creativas para resolver problemas específicos del lugar mediante los recursos y las técnicas disponibles, visualizaron la lógica tras el poder de la conquista. En suma, el artesano local logró generar esa belleza yuxtapuesta, que hoy constituye la arquitectura patrimonial, como diría Jamshid Kooros “El albañil en sus limitaciones encuentra posibilidades infinitas, creando con variedad y armonía; mientras que el arquitecto moderno, con todos los materiales y sistemas estructurales de que dispone, produce monotonía y disonancia” (Rudofsky 1968: 151).

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la investigación del programa doctoral DTCA en Construcción y Tecnología Arquitectónica de la Universidad Politécnica de Madrid cuyo tema es: “*Caracterización de los morteros de revestimiento del Quito Colonial en los siglos XVI, XVII y XVIII*” el mismo que en el proceso investigativo determinó precisar un análisis cronológico de su predecesor constructivo en los morteros de revestimiento que se recopilan en este artículo. Partiendo de la premisa que el actual Ecuador fue parte del Virreinato del Perú, este dominio territorial, político y administrativo permitió aplicar y complementar algunas de las técnicas constructivas locales de manera empírica.

Agradecemos a aquellos compañeros que generosamente han compartido sus conocimientos sobre la historia de

la arquitectura ecuatoriana, así como a investigadores de otras disciplinas, maestros de oficios que laboran en nuestras construcciones históricas y han aportado su conocimiento del uso, dosificación y composición de los morteros y revestimientos llamados coloniales; y más aún a los guardianes, priores y representantes técnicos de los claustros e iglesias que forman parte de esta investigación por la facilidad de acceso a sus instalaciones.

## Referencias

- ALEJANDRE SÁNCHEZ, F. J. (2002). *Historia, Caracterización y Restauración de Morteros*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.
- ALEMÁN, M., KOEN VAN BALEN, EDS. (1994). "Puesta en valor del Patrimonio Arquitectónico en el Convento de Santo Domingo". Vol. 5 de *Estudios y Metodologías de Preservación del Patrimonio Cultural del PROYECTO ECUA-BEL (Ecuador – Bélgica)*. Bogota: Libri-Mundi.
- ÁLVAREZ, J. I. MARTÍN PÉREZ, A. GARCÍA CASADO, P. (1995). "Historia de los morteros." *Boletín informativo del Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico* 13: 52-59. <https://doi.org/10.33349/1995.13.263>
- ANDRADE MARÍN, L. (2003). *La lagartija que abrió la calle Mejía: Historietas de Quito*. Quito: FONSAL (Fondo de Salvamento).
- BALDI, P. CORDARO, M. MORA, L. MORA, P. (1981). "Architecture - "Couleur." *Simposio ICCROM - International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property*, Roma, 3 – 6 Noviembre, 133-144.
- BOADA CASTRO, R., DEL PINO, I., GONZÁLEZ, M., LÓPEZ LÓPEZ, L., LUZURIAGA, M., MALDONADO, C., GABRIELA MERINO, et al (1993). "Arquitectura de Quito: Una visión histórica de su Arquitectura". Vol. 8 de *Serie Quito. Quito: TRAMA, Dirección de Planificación del Ilustre Municipio de Quito, Consejería de Obras Públicas y Transporte*, Junta de Andalucía.
- BURGOS-VIGNA, D. (2015). "Del patrimonio a la cultura: evoluciones en la gobernanza urbana de Quito." *Territorios* 32 (32): 61-79. <https://doi.org/10.12804/territ32.2015.03>
- CALDERON, L., LENIN, M. (2017). "Patología de la construcción en tierra cruda en el area andina ecuatoriana." *AUC Revista de Arquitectura - Universidad Católica Santiago de Guayaquil* 38: 31-41
- CARRIÓN, F., COLÓN CIFUENTES, I. P. FRANCISCO E., KINGMAN, E., NARANJO LALAMA, F., NARVÁEZ, A., et al . (1990). "Centro Histórico de Quito: Problemática y Perspectivas". Vol 1 de *Serie Quito. Quito: TRAMA, Dirección de Planificación del Ilustre Municipio de Quito, Consejería de Obras Públicas y Transportes*, Junta de Andalucía.
- CASTILLA PASCUAL, F. J., MALDONADO RAMOS, L. (2004). "Estabilización de morteros de barro para la protección de muros de tierra" *Tesis Doctoral en Arquitectura*, Universidad Politécnica de Madrid.
- CHU, A. (2017). "Investigaciones en el ushnu mayor de Incahuasi, Cañete: contribuciones al estudio de los ushnus incas." *Revista del Instituto Riva-Agüero* 2 (1) 11-56. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-76910-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-0-387-76910-3_10).
- DEL PINO MARTÍNEZ, I. A. (2010). "Centro Histórico de Quito: Una centralidad urbana en transformación hacia el turismo". *Tesis de Maestría en Gobierno de la ciudad, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales*, FLACSO Quito.
- DEL PINO MARTÍNEZ, I. A. (2017). "Espacio urbano en la historia de Quito: Territorio, traza y espacios ciudadanos". *Tesis Doctoral en Arte y Arquitectura*, Universidad Nacional de Colombia.
- DEL PINO, I. (2018). "La huella prehispánica", en *M.D.M.Q., Quito Patrimonios* (págs. 79-131). Quito: Azuca Cía. Ltda.
- ELSEN, J. (2006). "Microscopy of historic mortars—a review." *Cement and Concrete Research* 36 (8): 1416-1424. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.006>.
- ENRÍQUEZ, E. (1938). *Quito a través de los siglos- Recopilación y notas bio-bibliográficas*. Quito: Imprenta Municipal.
- FURLAN, V., BISSEGGER, P. (1975). "Les mortiers anciens. Histoire et essais d'analyse scientifique." *Zeitschrift für schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte* 32: 166. <https://doi.org/10.5169/seals-166356>
- GALEANO, E. (1998). *Patas arriba: La escuela del mundo al revés*. Madrid: Madrid Siglo XXI.
- GÁRATE ROJAS, I. (2002). *Artes de la cal*. Madrid: Madrid Munilla-Lería.
- GUTIERREZ-SOLANA, F., JAUREGUI, M., BOHIGAS, R., SARABIA, P. (1989). "Análisis de morteros medievales de dos castillos de Cantabria. España." *Materiales de Construcción* 39 (213): 37-45. <https://doi.org/10.3989/mc.1989.v39.i213.815>.
- IAPH (Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico) (2003). "Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos". Granada: Junta de Andalucía.
- LA SPINA, VINCENZINA. (2012). "La metodología para el estudio de los revestimientos continuos tradicionales de las fachadas de los centros históricos." *V Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT*, Cartagena, España, Abril: 24-26.
- MAGALONI, D., R. PANCELLA, Y. FRUH, J. CANETAS, AND V. CASTANO. (1995). "Studies on the Mayan Mortars Technique." *Material Research Society Symposium Proceedings*. 352: 483-489. [doi:10.1557/PROC-352-483](https://doi.org/10.1557/PROC-352-483).

- MALINOWSKI, R. (1981). "Ancient mortars and concretes - Durability aspects." Artículo presentado en el *Simposio ICCROM - International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property*, Roma, 3 - 6 Noviembre, 341-350.
- MALINOWSKI, R., GARFINKEL, Y. (1991). "Prehistory of Concrete." *Concrete International - American Concrete Institute (ACI)* 13 (3): 62-68.
- MARTINET, G., DELOYE, F.X., GOLVIN, J.C. (1992). "Caractérisation des mortiers pharaoniques du temple d'Amon à Karnak." *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* 181: 39-45.
- MARTINEZ, W., ALONSO, E. M., RUBIO, J. C., BEDOLLA, J. A., VELASCO, F. A., TORRES, A. A. (2008). "Comportamiento mecánico de morteros de cal apagada artesanalmente, adicionados con mucílago de cactácea y ceniza volcánica, para su uso en restauración y conservación de monumentos coloniales." *Revista de la construcción* 7 (2): 93-101.
- MCEWAN, G., GIBAJA, A., CHATFIELD, M. (2005). "Arquitectura monumental en el cuzco del periodo intermedio tardío: evidencias de continuidades en la reciprocidad ritual y el manejo administrativo entre los horizontes medio y tardío." *Boletín de Arquitectura PUCP* (9) 257-280.
- MICHELL, G., GRUBE, G. (1985). *La arquitectura del mundo islámico: su historia y significado social*. Madrid: Madrid Alianza Editorial.
- MORGAN, G. C. (1992). "Romano - british mortars and plasters." *Tesis doctoral en Arqueología e Historia Antigua*, University of Leicester.
- MOROPOULOU, A., BAKOLAS, A., ANAGNOSTOPOULOU, S. (2005). "Composite materials in ancient structures." *Cement and concrete composites* 27 (2): 295-300. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.018>.
- MUNICIPIO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, EMPRESA DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO, Y FUNDACIÓN CASPICARA. (2003). *Casa Ecuatoriana*. Quito: Cobol Servicios Gráficos.
- NAVARRO, J.G. (1985). *Artes plásticas ecuatorianas*. Quito: Banco Central del Ecuador.
- NEWTON, R. G., SHARP, J. H. (1987). "An investigation of the chemical constituents of some renaissance plasters." *Studies in conservation* 32 (4): 163-175. <https://doi.org/10.1179/sic.1987.32.4.163>.
- ONTIVEROS-ORTEGA, E., SEBASTIAN-PARDO, E., VALVERDEES-PINOSA, I. (1999). "Deterioration in XI-XIV century arab ramparts (Granada, Spain)." *Materials and structures/Matériaux et constructions* 32 (215): 45-51. <https://doi.org/10.1007/bf02480411>.
- ORLANDOS, A. K. (1966). *Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens grecs*. Paris: Editions E. de Boccard.
- ORTEGA ANDRADE, F. (1994). "La Construcción Romana (1)." *Revista de Edificación RE* (18): 45-59.
- ORTIZ CRESPO, A. (2004). "Origen, traza, acomodo y crecimiento de la ciudad de Quito". Quito: *Fondo de Salvamento del Patrimonio Cultural de Quito* (FONSAL), TRAMA.
- ORTIZ CRESPO, A., ABRAM, M., SEGOVIA NAJERA J. (2007). "Damero". Quito: *Fondo de Salvamento del Patrimonio Cultural de Quito* (FONSAL), TRAMA.
- ORWELL, G. (1983). 1984. Barcelona: Barcelona Círculo de Lectores ALMA.
- PRADO GOVEA, R.H., CERECEDA, M.L., SPAIRANI-BERRIO, Y., HUESCA TORTOSA, J. A. (2009). "Estudio y caracterización de morteros para la restauración arquitectónica". *CONPAT - Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción*, Valparaíso, 29 Septiembre - 02 Octubre. <http://hdl.handle.net/10145/12207>.
- RAMÓN, G. (2017). "Shaping precolonial concepts in the andes: The ushnu for Llocllayhuancupa (Huarochirí, Lima)." *Latin american antiquity* 28 (2): 288-307. [doi:10.1017/laq.2017.22](https://doi.org/10.1017/laq.2017.22).
- RAMPAZZI, L., COLOMBINI, M.P., CONTI, C., CORTI, C., LLUVERAS-TENORIO, A., SANSONETTI, A., ZANABONI, M. (2015). "Technology of medieval mortars: An investigation into the use of organic additives." *Archaeometry* 58: 115-130. <https://doi.org/10.1111/arcm.12155>.
- RASSINEUX, F., PETIT, J.C., MEUNIER, A. (1989). "Ancient analogues of modern cement: calcium hydrosilicates in mortars and concretes from gallo-roman thermal baths of western France." *Journal of the American Ceramic Society* 72(6): 1026-1032. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1989.td06263.x>
- ROJO ALVAREZ, A. (2015). "El análisis de morteros históricos como herramienta de datación e interpretación de técnicas y fases constructivas." *Tesis Doctoral en Geología*, Universidad de Oviedo.
- RUDOFKY, B. (1968). *Arquitectura sin Arquitectos*. Madrid: Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- SANTAYANA, G. (1922). *The Life of Reason*. Nueva York: Charles Scribner's Sons.
- SANZ ARAUZ, D. (2009). "Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas" *Tesis Doctoral en Geología*, Universidad Politécnica de Madrid.
- SERSALE, R. (1991). "Lime, the first in time among the justly named binding materials." *Atti della Accademia Pontaniana* 40: 257-275.

SICKERS, LAUREN-BROOK. (1981). "Organics vs. synthetics: Their use as additives in mortars." *Simposio ICCROM - International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property*, Roma, 3 – 6 Noviembre, 25 - 52.

VALEK, J., HUGHES, J. J., GROOT, C. J. W. P(2012). "Historic mortars: characterisation, assessment and repair". Vol. 7 de *RILEM Bookseries*. New York London: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0>

VALERA, C. de (1869). *La Santa Biblia: que contiene los sagrados libros del antiguo y nuevo testamento*. Madrid: Depósito central de la Sociedad Bíblica.

WEBSTER, SUSAN V. (2011). "Vantage points: andeans and europeans in the construction of colonial Quito." *Colonial latin american review* 20 (3): 303-330. <https://doi.org/10.1080/10609164.2011.624330>.

WEBSTER, S.V. (2012). "La desconocida historia de la construcción de la Iglesia de San Francisco." *Procesos: Revista ecuatoriana de historia* (35): 37-66.

#### Autor/es



**M. Lenin Lara Calderón**  
[lenin.lara.calderon@alumnos.upm.es](mailto:lenin.lara.calderon@alumnos.upm.es)  
Universidad Politécnica de Madrid

Arquitecto, con formación investigativa, docente y profesional, Máster en Restauración Arquitectónica y Máster Administración de Empresas Inmobiliarias, actualmente es estudiante de doctorado del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Universidad Politécnica de Madrid. Profesor investigador de la Universidad Internacional del Ecuador, ha colaborado en varios programas y proyectos de investigación sobre patología de la construcción y conservación del patrimonio



**David Sanz Arauz**  
[david.sanz.arauz@upm.es](mailto:david.sanz.arauz@upm.es)  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Geólogo, PhD Geological Sciences, Máster en Restauración Arquitectónica. Desde 2000 es Profesor Asociado en el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. En la actualidad es adjunto a la Subdirección de Doctorado, Postgrado e Investigación de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid



**Inés del Pino Martínez**  
[idelpinom@puce.edu.ec](mailto:idelpinom@puce.edu.ec)  
Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Arquitecta, Máster en Estudios de la Cultura por la Universidad Andina Simón Bolívar; Máster en Gobierno de la Ciudad con mención en Áreas Históricas; Doctora en Arte y Arquitectura por la Universidad Nacional de Colombia. Profesora investigadora de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Investiga temas relacionados con territorio y paisaje, arquitectura y ciudad ecuatoriana

Artículo enviado el 05/09/2019  
Artículo aceptado el 29/03/2020



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.687>

## Oficinas regionais, influências de muitas e desvairadas partes: o caso dos suportes de madeira das pinturas maneiristas de Belchior de Matos da ermida de Geraldês (Peniche, Portugal)

António João Cruz, Elisabete Ferreira, Alexandra Lauw, Carla Rego, Helena Pereira

**Resumo:** As duas pinturas, representando Santa Luzia e o Martírio de São Sebastião, feitas por Belchior de Matos (c. 1570-1628) para uma pequena ermida de Peniche, no início do século XVII, têm suportes de madeira que as primeiras observações, realizadas no âmbito de uma intervenção de conservação e restauro, sugeriram ter excelente qualidade e influências de construção que contrastam com o que seria expectável numa encomenda menor de um modesto e mal pago artista de província. Por isso, com o objectivo de aprofundar o caso e contribuir para o conhecimento das pequenas oficinas regionais de pintura do período maneirista, foi feito um estudo pormenorizado desses suportes, incluindo a moldura e a camada de preparação, com recurso a métodos laboratoriais (observação com lupa binocular, fotografia, dendrocronologia, microscopia óptica e FTIR). Concluiu-se, efectivamente, que os painéis mostram que as oficinas regionais de pintura, ao contrário do que se poderia prever, não funcionavam necessariamente isoladas e fechadas sobre si próprias e podiam ter um diversificado conhecimento técnico que, além de soluções originais, envolvia práticas com diferentes origens geográficas, do norte ao sul da Europa, que, com mais estudos de casos, importa esclarecer até que ponto estavam ou não consolidadas em Portugal.

**Palavras-chave:** pintura, suporte de madeira, carvalho do Báltico, tradições técnicas, influências técnicas

## Talleres provinciales, influencias de muchas y variadas partes del mundo: el caso de los soportes de madera de las pinturas manieristas de Belchior de Matos de la iglesia de Geraldês (Peniche, Portugal)

**Resumen:** Las dos pinturas, que representan a Santa Luzia y el Martirio de São Sebastião, realizadas por Belchior de Matos (c. 1570-1628) para una pequeña ermita en Peniche, a principios del siglo XVII, tienen soportes de madera que las primeras observaciones, llevado a cabo como parte de una intervención de conservación y restauración, sugirieron tener una excelente calidad e influencias de construcción que contrastan con lo que se esperaría en un orden menor de un artista provincial modesto y mal pagado. Por lo tanto, con el objetivo de profundizar el caso y contribuir para lo conocimiento de los pequeños talleres regionales de pintura del período manierista, se realizó un estudio detallado de estos soportes, incluido el marco y la capa de preparación, utilizando métodos de laboratorio (observación con lupa binocular, fotografía, dendrocronología, microscopía óptica y FTIR). Se concluyó que los paneles muestran que los talleres regionales de pintura, al contrario de lo que se podría predecir, no necesariamente operaban aislados y cerrados y podían tener un conocimiento técnico diversificado que, además de las soluciones originales, envolvía prácticas con diferentes orígenes geográficos, de norte a sur de la Europa, que, con más estudios de caso, es importante aclarar en qué medida se consolidaron o no en Portugal.

**Palabras clave:** pintura, soporte de madera, roble báltico, tradiciones técnicas, influencias técnicas

## Provincial workshops, influences from many and varied parts of the world: the case of the wooden supports of Belchior de Matos' Mannerist paintings of Geraldês' church (Peniche, Portugal)

**Abstract:** The present paper focuses on the study of two paintings, representing Saint Lucy and the Martyrdom of Saint Sebastian, made by Belchior de Matos (c. 1570-1628), for a small church in Peniche, in the early 17th century. The first observations made in

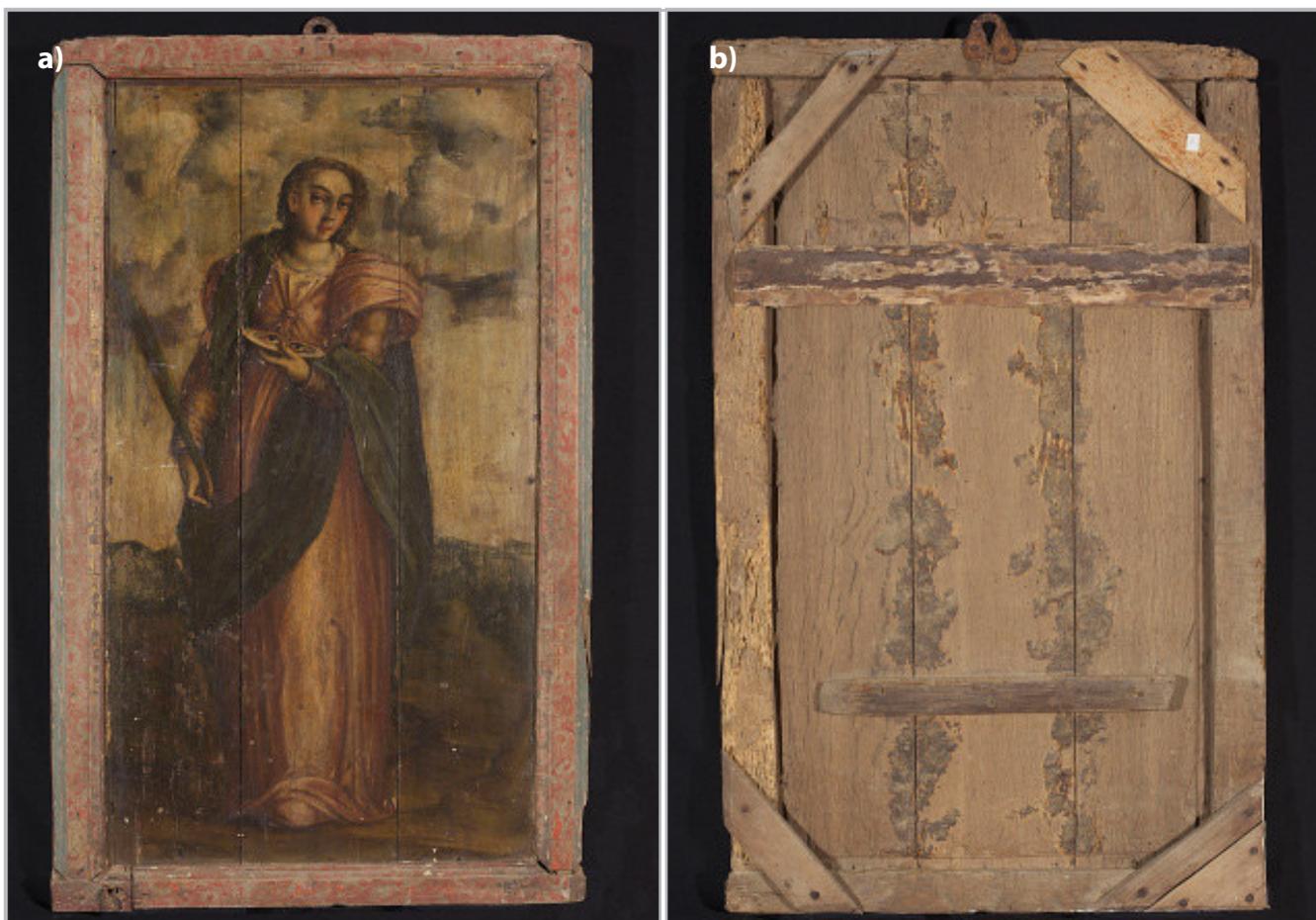
the context of a conservation-restoration intervention showed that the wooden supports had an excellent quality and construction influences that contrast with what would be expected in a small commission to a modest and underpaid provincial artist. Thus, a detailed study of these supports, including the frame and the ground layer, was made using analytical techniques (observation with binocular loupe, photography, dendrochronology, optical microscopy and FTIR) in order to develop further the practices of small provincial painting workshops of the Mannerist period. In fact, contrary to what might be expected, the panels show that these workshops did not necessarily work in isolation but that they possessed a diversified technical knowledge that, besides original solutions, included practices from different geographical origins, from northern to southern Europe. With more case studies, it is important to clarify the extent to which they were or were not consolidated in Portugal.

**Keywords:** painting, wood support, Baltic oak, technical traditions, technical influences

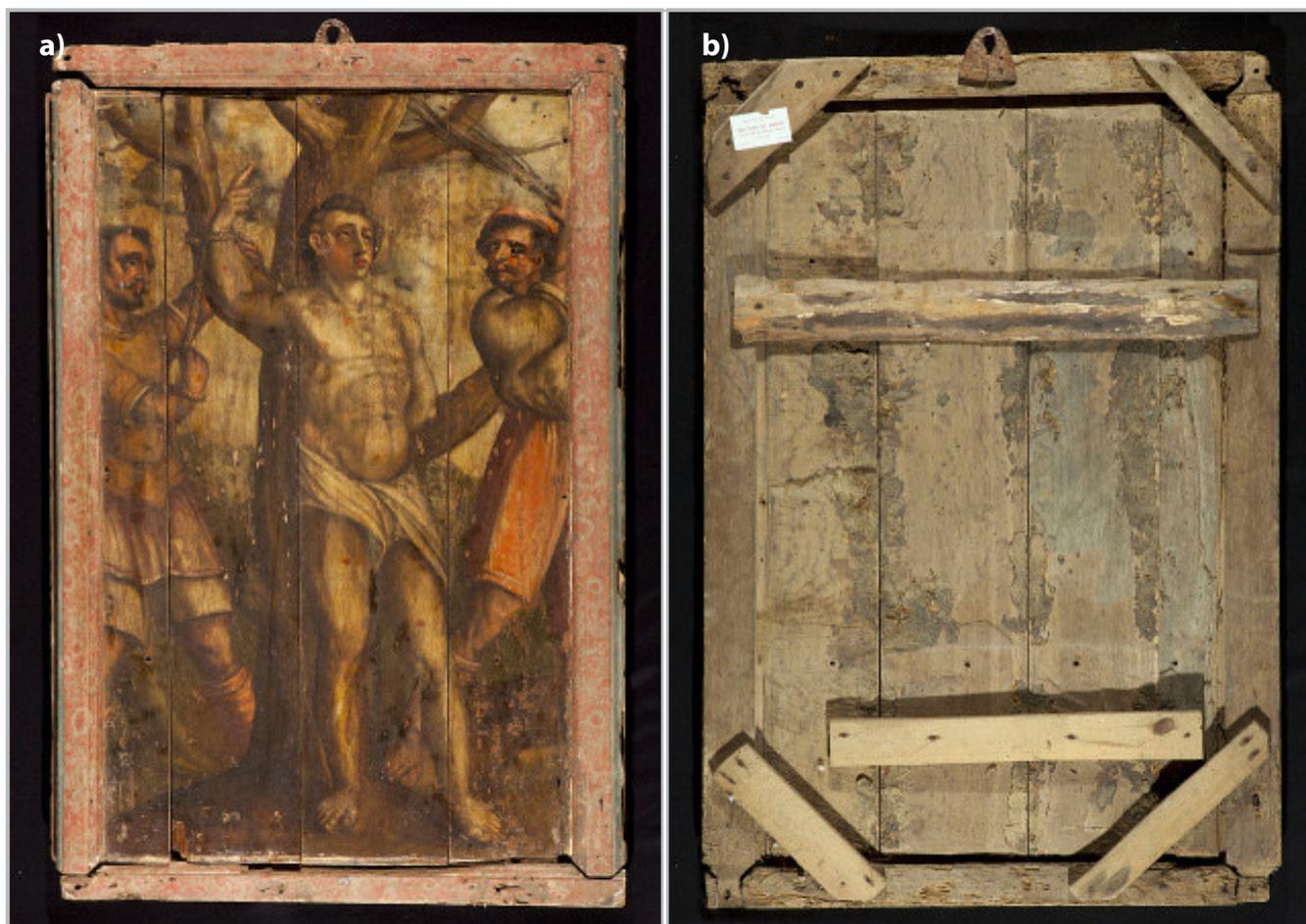
## Introdução

Do antigo retábulo-mor da ermida de São Sebastião e Santa Luzia, do lugar de Geraldês, freguesia de Atouguia da Baleia, concelho de Peniche, são conhecidas duas pequenas pinturas sobre madeira que formavam um díptico: uma representa *Santa Luzia* [figura 1] e a outra o *Martírio de São Sebastião* [figura 2]. Até agora arrecadadas na igreja matriz de Geraldês, segundo o historiador Vítor Serrão, são da autoria do pintor maneirista Belchior de Matos (c. 1570-1628) e foram executadas na década de 1610-1620 (Serrão 1981: 36).

Sobre o pintor, a primeira referência documental conhecida data de 1591 (Serrão 1981: 21-22). Nesta ocasião, ainda jovem, estava no Porto e era “criado” e “oficial pintor” na oficina do mestre lisboeta Diogo Teixeira, um dos mais elogiados pintores da época, com estatuto aristocrático e extensa obra realizada por todo o país, que então trabalhava no retábulo-mor da igreja da Misericórdia. Belchior de Matos, como aprendiz, tinha como função preparar as tintas, engessar e aparelhar as tábuas, preparando-as para a pintura, e, no final, ajudar na colocação dos painéis no retábulo. Nos anos seguintes continuou a trabalhar com Diogo Teixeira, ainda que tenha



**Figura 1.** - Pintura representando *Santa Luzia*: frente (a) e verso (b). A travessa inferior é a única que persiste das travessas originais.



**Figura 2.-** Pintura representando o *Martírio de São Sebastião*: frente (a) e verso (b).

adquirido o estatuto de pintor autónomo, e os dois, em 1595, realizaram o retábulo-mor da ermida do Espírito Santo, das Caldas da Rainha. Após conclusão desta obra, Belchior de Matos fixou-se nesta cidade, onde residiu até à morte, em 1628 (Serrão 1981: 21-22).

Belchior de Matos foi “um pintor de província” (Serrão 1989) e, a partir do estabelecimento da sua oficina nas Caldas da Rainha, satisfaz várias empreitadas pouco relevantes, maioritariamente destinadas a retábulos-mor de pequenas ermidas ou a capelas laterais de igrejas pertencentes a localidades próximas da cidade. Trabalhou também como pintor de varas e andores, de tábuas avulsas, como dourador de colunas e de frontispícios, como “renovador” de painéis antigos e engessador de tábuas. Esta actividade de engessador, muito relevante para o tema do presente estudo, está documentada através de registos de pagamentos efectuados em 1596, 1599, 1621, 1622, 1623, 1624 e 1626 (Serrão 1981: 60-61, 68-71).

Embora tenha sido incluído na lista dos privilegiados do Hospital de Nossa Senhora do Pópulo, das Caldas da Rainha, Belchior de Matos foi sempre visto, sobretudo, como um operário e artífice habilidoso, que também era pintor a óleo, sendo os seus trabalhos pagos

invariavelmente segundo uma tabela muito abaixo do que era cobrado por outros pintores (Serrão 1981). Do ponto de vista artístico, as suas pinturas têm cores ácidas, mostram figuras robustas, distorcidas, alongadas e com músculos bem definidos, e evidenciam teatralidade de gestos e de atitudes – como é característico da pintura maneirista (Serrão 1981: 28; Silva 1996: 22). Porém, do ponto de vista técnico, denotam alguma dificuldade na representação das figuras (Serrão 1981:32), especialmente visível no desenho de pés e de mãos.

As duas obras da ermida de Geraldês apresentam essas características gerais da pintura de Belchior de Matos, tendo sido descritas como uma “encomenda menor” (Serrão 1981: 36), “certamente mal paga e, por isso mesmo, de acabamento deficiente” (Serrão 1981: 78), que “revela graves deficiências de desenho e um tratamento seco da matéria cromática” (Serrão 1981: 36). No entanto, durante o estudo efectuado no âmbito da intervenção de conservação e restauro a que as pinturas foram sujeitas no Instituto Politécnico de Tomar, em 2018-2019, foram notadas diversas particularidades do suporte que não seriam expectáveis numa obra menor de um pintor regional. Mais concretamente, as observações efectuadas sugeriram o uso de materiais e procedimentos com origens ou influências geograficamente diversas, muito

para além do espaço regional em que se desenvolveu a actividade do pintor e das limitadas ambições das obras. Essa aparente contradição é reforçada pelo anacronismo artístico e fechamento às novidades (Serrão 1989: 172) que se manifesta de forma notória na obra daquele que era conhecido como o pintor das Caldas e foi descrito como “um artista sem inovação, conservador e modesto” (Serrão 1981: 48). Além disso, as observações sugeriram também o uso nos suportes de materiais de grande qualidade e a adopção de bons procedimentos técnicos para a sua construção, algo que não se esperaria encontrar numa oficina como a de Belchior de Matos. Considerou-se então que o estudo mais detalhado dos dois suportes e o seu enquadramento nas práticas da época poderia ser uma significativa contribuição para o conhecimento das oficinas regionais de pintura, que pouco ou nada têm interessado os estudos laboratoriais mas que são tão importantes para a História da Arte como os artistas de maior craveira e reconhecimento, pelo quadro sociológico que igualmente ajudam a compor (Serrão 1989).

É esse estudo dos suportes das duas pinturas de Belchior de Matos, com o recurso a métodos de exame e análise, o tema do presente artigo. Além da caracterização dos mesmos, incluindo a moldura e a camada de preparação, pretende-se perceber até que ponto uma oficina com actividade apenas regional, artisticamente fechada às influências exteriores, afinal usava materiais e técnicas que vinham de fora.

Adicionalmente, de uma forma mais geral, pretende-se contribuir para o conhecimento dos suportes de pintura usados em Portugal que, como se ilustra aqui, podem ser muito informativos, mas aos quais pouca atenção é dada nos estudos publicados, sendo ainda escassa a informação detalhada disponível.

## Metodologia

Para a caracterização geral dos suportes, foi fundamental a informação obtida através do contacto com as obras durante a intervenção de conservação e restauro. Para isso, além da observação directa, foi usada uma lupa binocular com ampliação até 40× (Leica M320 IVC) e um microscópio digital de mão, com fibra óptica, com ampliação até 225× (Dino-lite AM7013MZT e filtro polarizador). O facto de as juntas dos painéis estarem abertas e de estes terem sido desmontados durante a intervenção facilitou determinadas observações. Foi efectuada fotografia geral das obras com iluminação normal e com luz rasante com uma máquina fotográfica Canon EOS 5D Mark II e fotografia documental de pormenores com um *smartphone* Huawei ANE-LX1.

A datação dos suportes foi realizada através de uma abordagem dendrocronológica. A madeira foi previamente desbastada na secção transversal, com uma

lâmina, de forma a se observarem nitidamente os anéis de crescimento. A datação foi realizada através de técnica baseada na obtenção de macrofotografias na secção transversal de cada tábua com recurso a uma máquina fotográfica digital (Canon EOS 1100D) (Lauw *et al.* 2013). A medição dos anéis de crescimento foi efectuada com recurso ao programa Image Analysis (Analysis 2.1), através da exibição sequencial das fotografias. A datação final obteve-se através do programa TSAP Win Scientific 4.64 (Rinntech), usando bases de dados de cronologias-padrão. A vantagem deste método é permitir a visualização dos anéis de crescimento para possíveis reavaliações futuras e evitar a repetição do manuseamento das pinturas.

Para o estudo estratigráfico e caracterização da preparação, foram retiradas microamostras da camada cromática que foram montadas em resina epóxida Epoxicure (Buehler), e observadas num microscópio óptico Olympus CH30 com máquina fotográfica acoplada Olympus DP10. Foram igualmente recolhidas amostras da preparação e do material aplicado no verso dos suportes. Estas foram analisadas por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) num espectrómetro Alpha (Bruker), em modo ATR, entre 4000 e 400  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ . As fibras constituintes do material do verso foram identificadas por microscopia óptica com recurso ao corante de Herzberg.

Embora não sejam aqui expressamente apresentados quaisquer resultados obtidos dessa forma, para o estudo material das pinturas utilizou-se igualmente fotografia de fluorescência de ultravioleta, fotografia de infravermelho, radiografia e equipamento não invasivo de espectrometria de fluorescência de raios X.

## Descrição geral dos suportes

O suporte da pintura representando *Santa Luzia* tem 102 cm de altura e 56 cm de largura, sendo constituído por 3 tábuas dispostas na vertical [figura 1]. O do *Martírio de São Sebastião* tem a mesma altura mas mede 62 cm de largura e é composto por 4 tábuas, igualmente na vertical [figura 2]. A espessura, em média, é de 2,2 cm e de 1,5 cm, respectivamente.

No verso, cada um dos suportes apresentava originalmente duas travessas horizontais, das quais apenas uma não foi substituída e persiste [figuras 1 e 2]. Quando as pinturas foram recebidas para tratamento, todas as juntas estavam completamente abertas, sendo as tábuas mantidas na sua posição por essas travessas e pelas molduras policromadas que aparentam ser originais, ainda que tenham sido repintadas.

A dimensão total das obras, com as molduras, é de 112 cm de altura por 69 cm de largura no caso da *Santa Luzia* e de 112 cm de altura por 74 cm de largura no caso do *Martírio de São Sebastião* (dimensões após a intervenção).

## As tábuas

A observação macroscópica, na secção transversal dos suportes, da estrutura celular da madeira sugere que esta é do género *Quercus*. Dada a impossibilidade de remoção de amostras para o estudo anatómico ao nível microscópico, não foi possível a identificação da espécie. Porém, considerando os resultados do estudo dendrocronológico sobre a proveniência da madeira, é expectável que se trate de *Quercus robur* ou *Quercus petraea*, duas espécies muito semelhantes do ponto de vista anatómico.

Através da comparação dos padrões de crescimento das sete tábuas analisadas, constatou-se que duas tábuas da pintura de *Santa Luzia* (I e III) [figura 3a] e uma tábua do *Martírio de São Sebastião* (II) [figura 3b] provêm da mesma árvore (ver datação por dendrocronologia).

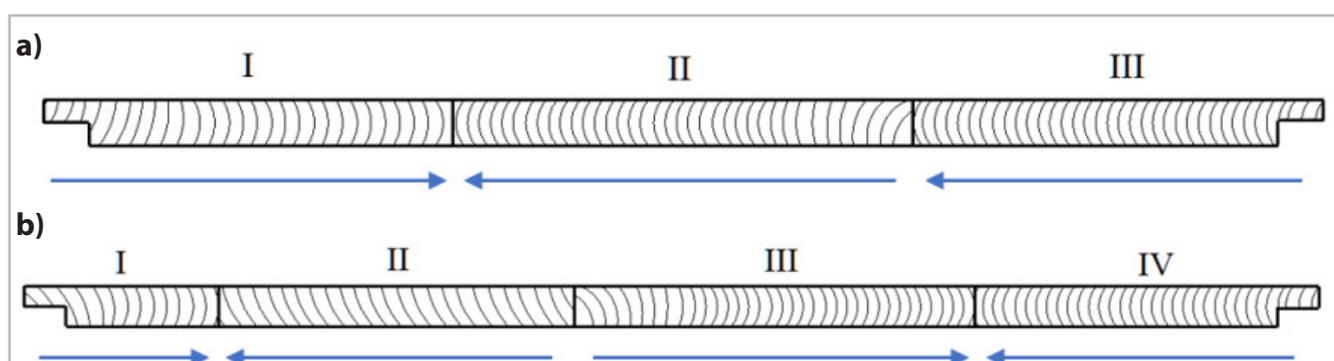
As tábuas revelam cuidado na escolha, tal como era habitual no norte da Europa (Campbell, Foister 1997). Em primeiro lugar, são de corte radial ou radial puro (segundo a terminologia portuguesa de Helena Melo (Melo 2012: 212), baseada em Pascale Fraiture) [figura 3], minimizando assim a contracção da madeira e os respectivos problemas. Através da observação das secções transversais, não se observou a existência de anéis de borne. Superficialmente não se observou qualquer nó, ainda que exista um pequeno nó no interior de uma das tábuas [figura 4]. Finalmente, a qualidade da madeira resulta dos anéis relativamente finos, que têm reduzida tendência de deformação (Fraiture 2012): nas três tábuas provenientes da mesma árvore a espessura média é de 1,30-1,40 mm e nas restantes é significativamente inferior (ver abaixo).

Ainda que usada frequentemente na pintura portuguesa dos séculos XV e XVI, não seria expectável encontrar carvalho do Báltico em pinturas, como estas, de fraca qualidade e mal pagas, uma vez que era madeira de muito boa qualidade e dispendiosa, não apenas por causa da sua qualidade mas também devido ao seu transporte desde as longínquas florestas do norte da Europa. Além disso, a procura e os preços do carvalho do Báltico foram excepcionalmente elevados no início do século XVII (Wadum 1998: 151).

Belchior de Matos tinha várias alternativas. Por exemplo, em Espanha, o mais frequente era o uso de espécies autóctones, especialmente pinho e nogueira (Bruquetas Galán 2002: 199-201). Em Portugal, não obstante o predomínio do carvalho do Báltico, também eram usadas espécies locais, mesmo em encomendas de muito maior relevância: nalgumas oficinas a escolha recaía sobre o castanho, mas são igualmente conhecidas pinturas sobre madeira de nogueira, árvores de fruto e pinho (Esteves 2003; Klein 2012) e um tratado da primeira metade do século XVII menciona igualmente o cedro e o cipreste (Monteiro, Cruz 2010: 273).



**Figura 4.**- Nó na secção lateral (lado da junta) de uma das tábuas do *Martírio de São Sebastião*



**Figura 3.**- Corte e disposição das tábuas (vistas a partir da base, com a face pintada virada para cima): a) *Santa Luzia*; b) *Martírio de São Sebastião*. As setas indicam o sentido do crescimento dos anéis (da medula para a casca).

Todas as tábuas têm 102 cm de comprimento, correspondendo à altura dos painéis, e a sua largura está compreendida entre 9,3 e 20,2 cm [tabela 1]. A diferença de largura entre o topo e a base de cada tábua é na maior parte dos casos de 0,1 cm ou inferior, sendo, no máximo, de 0,4 cm. A espessura varia entre 2,0 e 2,5 cm no painel de *Santa Luzia* e entre 1,0 e 2,0 cm no painel do *Martírio de São Sebastião*. As diferenças entre as duas obras manifestam-se também na regularidade do verso: as tábuas do painel de *Santa Luzia* têm superfície regular, devido a corte com serra, enquanto no painel do *Martírio de São Sebastião* as tábuas das extremidades têm muito menor espessura do que as centrais e, salvo no caso da tábua III, apresentam superfície muito irregular. Este facto, assim como a descontinuidade de marcas entre tábuas, permite concluir que o tratamento do verso dos suportes foi feito antes de as tábuas terem sido ensambladas. A irregularidade do verso de algumas tábuas não é indiciadora de falta de cuidado pois corresponde a uma situação muito frequente em Espanha (Marijnissen 1985: 66), ainda que o caso seja diferente na Flandres, onde, conforme a dimensão e o destino das pinturas, o acabamento do verso podia ser muito cuidado ou inexistente (Campbell, Foister 1997; Marijnissen 1985: 65; Verougstraete 2015: 32-34). A respeito da mistura de tábuas com diferente acabamento do verso no painel

do *Martírio de São Sebastião* é interessante notar-se que o mesmo se observa numa pintura de Pedro Berruguete que também apresenta no verso duas travessas como as pinturas em estudo (Bruquetas Galán 2002: 214).

A espessura destas tábuas está de acordo como que era usual em Portugal, onde a espessura parecia ser superior ao que era comum no norte da Europa. A largura, no máximo de 20 cm, fica consideravelmente aquém da largura máxima das tábuas de carvalho do Báltico usadas em pinturas feitas em Portugal, as quais, na maior parte dos casos, tinham, pelo menos, 25 cm (Melo 2012: 90-93). No entanto, a largura das tábuas de carvalho do Báltico diminuiu muito significativamente durante o primeiro terço do século XVII (Dubois, Fraiture 2011), pelo que, excluindo a tábua mais estreita, a largura deve estar de acordo com o que era habitual na época. Porém, ainda que fosse difícil usar apenas duas tábuas em cada suporte, uma vez que as tábuas de carvalho do Báltico raramente tinham mais do que 30 cm de largura (Verougstraete 2015: 15) e as pinturas têm 60 cm ou mais, no caso do *Martírio de São Sebastião* teria sido fácil usar apenas três tábuas, tal como acontece no painel de *Santa Luzia*, em vez das quatro.

Resumindo, as tábuas são de excelente qualidade, o que explica o bom estado em que se encontram, sem deformações significativas e sem fissuras.

**Tabela 1.-** Corte e largura das tábuas.

Pintura	Tábua	Corte	Largura (cm)	
			Topo	Base
<i>Santa Luzia</i>	I	RP	18,0	18,0
	II	R	20,0	20,2
	III	R	18,4	18,4
<i>Martírio de São Sebastião</i>	I	R	9,4	9,3
	II	R	17,0	17,0
	III	R	19,2	19,1
	IV	RP	16,0	16,4

Corte: R = radial; RP = radial puro

### Datação por dendrocronologia

Os anéis de crescimento das sete tábuas foram medidos, sempre que possível, no topo e na base das mesmas [tabela 2]. Nalguns casos foi impossível a medição em toda a largura devido à descontinuidade dos anéis e, por isso, há uma diferença significativa do número de anéis medidos nas duas extremidades de uma tábua. Das setes tábuas, duas resultam de crescimento que pode ser descrito como “muito lento”, dada a espessura média dos anéis ser inferior a 1 mm; duas de crescimento “lento”, com uma espessura média dos anéis inferior a 1,2 mm; e as restantes três de crescimento “médio”, inferior a 2 mm.

**Tabela 2.-** Avaliação dos anéis de crescimento.

Pintura	Tábua	N.º de anéis medidos (topo/base)	Espessura mínima (mm)	Espessura máxima (mm)	Espessura média ± desvio-padrão (mm)	N.º total de anéis
<i>Santa Luzia</i>	I	104 / 64	0,58	2,28	1,36 ± 0,41	105
	II	- / 187	0,33	2,07	0,97 ± 0,37	187
	III	107 / 115	0,60	2,51	1,37 ± 0,42	126
<i>Martírio de São Sebastião</i>	I	79 / 49	0,36	1,81	0,99 ± 0,42	79
	II	97 / -	0,50	2,82	1,30 ± 0,43	97
	III	170 / 151	0,45	2,30	1,02 ± 0,34	170
	IV	122 / -	0,71	2,21	1,13 ± 0,23	122

A tabela 3 apresenta os coeficientes de correlação entre todos os padrões de crescimento das tábuas, constatando-se que as tábuas I e III do painel de *Santa Luzia* e a tábua II do painel do *Martírio de São Sebastião* foram obtidas de uma mesma árvore (tVH a variar de 19,5 a 20,7; valores assinalados a negrito). Os três padrões da mesma árvore foram sincronizados e combinados numa única série cronológica (I-III-II) de 126 anos. As baixas correlações das tábuas I e IV do painel do *Martírio de São Sebastião* relativamente às restantes tábuas analisadas (tVH a variar de 2,9 a 4,0) levantam a hipótese de não serem provenientes do mesmo local.

Para três das cinco séries cronológicas resultantes das duas pinturas em estudo foram obtidas correspondências estatisticamente significativas com cronologias-padrão de referência [Tabela 4] que permitem concluir que as

madeiras têm como proveniência a região do Báltico. A datação do anel mais recente do painel de *Santa Luzia* corresponde ao ano de 1594 e do painel do *Martírio de São Sebastião* ao ano de 1599. Para as duas séries cronológicas das tábuas I e IV do painel do *Martírio de São Sebastião* não se encontrou correspondência nas cronologias-padrão usadas e, por isso, não foi possível obter uma data para as mesmas.

Para a datação das pinturas é necessário ter em consideração a remoção da zona de borne e o período de secagem das madeiras. Este era, no mínimo, de 2 anos e o borne, considerando a proveniência do carvalho, correspondia, no mínimo, a 9 anéis de crescimento (Klein 2010). Assim, as pinturas não foram executadas antes de 1610 (1599+9+2). Considerando-se o valor médio de 15 anéis na zona de borne, pode-se afirmar que é mais provável

**Tabela 3.-** Correlações (GIK GLS / tVH) entre as medidas dos anéis de crescimento das sete tábuas.

Tábuas		Santa Luzia			Martírio de São Sebastião			
		I	II	III	I	II	III	IV
Santa Luzia	I							
	II	72*** / 7,2						
	III	<b>87*** / 19,5</b>	64*** / 6,1					
Martírio de São Sebastião	I	60*** / 3,5	62*** / 3,1	36*** / 3,1				
	II	<b>87*** / 19,6</b>	71*** / 7,6	<b>97*** / 20,7</b>	58** / 2,7			
	III	71*** / 6,9	61*** / 4,4	63*** / 6,5	58*** / 3,1	66*** / 5,9		
	IV	67*** / 3,0	68*** / 3,8	64*** / 4,0	64*** / 3,5	61*** / 3,5	41** / 2,9	

Parâmetros estatísticos: GIK = *Gleichläufigkeit* (Grau de sincronização de duas sequências); GSL = *Gleichläufigkeitswert* (Grau de significância da sincronização de duas sequências: 99,9 % [\*\*\*] e 99 % [\*\*]) (Eckstein, Bauch 1969); tVH – *t-value Hollstein-standardization* (Hollstein 1980).

**Tabela 4.-** Datação das pinturas.

Pintura ou série	Tábua	Intervalo da série cronológica (Data do 1.º anel - Data do último anel)	Parâmetros estatísticos		Cronologias de referência
			GIK, GSL	tVH	
Santa Luzia	I	Integrada na série I-III-II			
	II	1407-1593	67***	7,0	Baltic 1; CHRONOMASFFL; NSG; NGG
	III	Integrada na série I-III-II			
Martírio de São Sebastião	I	Não datada			
	II	Integrada na série I-III-II			
	III	1430-1599	68***	6,7	CHRONOMASFFL; NSG
	IV	Não datada			
Série I-III-II		1469-1594	73***	8,0	NSG; EG

Parâmetros estatísticos: ver Tabela 3.

Cronologias de referência: Baltic 1 (Hillam, Tyers 1995); EG = England Gemald MC 18 Fletcher, NGG = Niederlande Gesamt Gemalde, NSG = Niederlande Sued Gemalde (Peter Klein, não publicadas); CHRONOMASFFL (Alexandra Lauw, não publicada).

que as pinturas sejam posteriores a 1616 (1599+15+2). Ressalva-se, porém, que estas datas não têm em conta a eventual falta de anéis do cerne nem a possibilidade de um maior tempo de secagem e armazenamento das tábuas. Com efeito, nos séculos XVI e XVII, o tempo de secagem da madeira utilizada pelos pintores flamengos geralmente era superior a 2 anos, podendo chegar a 8 anos (Klein 2010). De qualquer forma, as datas referidas são compatíveis com o intervalo de 1610 a 1620 proposto para a realização das pinturas com base em considerações histórico-artísticas (Serrão 1981: 36), ainda que não possa ser excluída a possibilidade de serem posteriores a 1620.

### **Construção dos suportes**

#### *—Disposição das tábuas*

As sete tábuas dispõem-se na vertical, isto é, alinhadas com o lado mais comprido das pinturas, minimizando o número de tábuas, e na posição em que a pressão resultante do peso se distribui de forma semelhante por todas as tábuas em vez de se acentuar nas tábuas da base caso a disposição fosse horizontal (Dunkerton *et al.* 1999: 216).

Em ambas as pinturas, as extremidades laterais dos painéis correspondem às extremidades mais antigas das tábuas [figura 3], como era comum na pintura flamenga (Verougstraete 2015: 41; Wadum 1998). Dessa forma, o lado mais resistente era o que ficava exposto ao exterior. Além disso, no *Martírio de São Sebastião*, as quatro tábuas estão dispostas de uma forma regular: nas três juntas, o lado mais antigo com o lado mais antigo e o lado mais recente com o lado mais recente [figura 3]. O facto de isso não acontecer no painel de *Santa Luzia* significa que foi considerado que o mais importante era o lado que ficava para fora, já que, por as tábuas serem em número ímpar, não era possível conciliar os dois critérios. Contudo, nesta pintura há a simetria resultante de as duas tábuas exteriores serem da mesma árvore, um tipo de simetria encontrado em obras flamengas (Verougstraete 2015: 43).

Ainda que a disposição regular seguida no *Martírio de São Sebastião* fosse comum no norte da Europa (Wadum 1998: 154), provavelmente o mais frequente nas tábuas cortadas radialmente era as juntas, excepto a central, envolverem lados diferentes das tábuas, ficando as da esquerda e da direita, independentemente do seu número, simetricamente dispostas com o lado mais antigo para fora. Deste modo minimizavam-se as tensões (Verougstraete 2015: 41-43). No entanto, parece que em Portugal nem sempre se prestava atenção à disposição das tábuas ao longo das juntas (Melo 2012: 97).

Nas tábuas com corte radial, a face exterior, isto é, a mais afastada da medula, dispõe-se alternadamente para a frente e para o verso dos painéis [figura 3], tal como alguns recomendavam com o objectivo de minimizar a

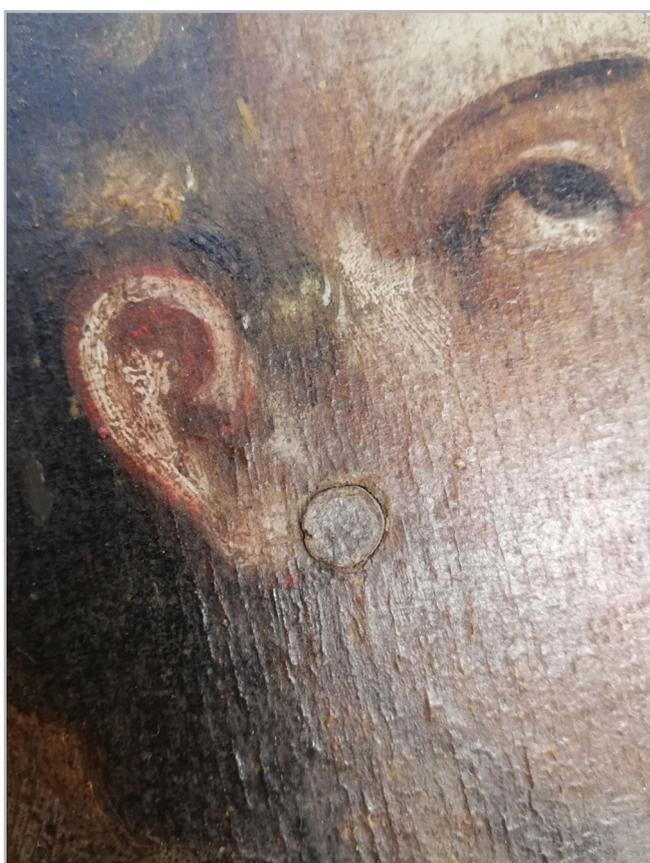
deformação dos painéis (Alba González-Fanjul 2015: 125). Este procedimento, porém, devia ter efeitos significativos sobretudo quando as tábuas tinham corte tangencial, pelo que neste caso, em que o afastamento relativamente a um corte radial puro é mínimo, a relevância deste dado está apenas na atitude sistemática que parece revelar.

Nas duas pinturas, as tábuas mais estreitas são as das extremidades. Isto está de acordo com a tradição italiana (Castelli 2009), mas contraria a prática flamenga de as colocar no centro dos painéis de forma a afastar as juntas das extremidades onde, devido à ligação à moldura, as tensões eram mais intensas (Verougstraete 2015: 43). Nalguns casos, o uso de uma tábua larga no centro do painel tinha como objectivo evitar a colocação de juntas na área mais importante da composição e assim minimizar o risco de aparecimento de fissuras no motivo central da pintura (Dunkerton *et al.* 1999: 216; Wadum 1998: 155), mas não no presente caso pois, como adiante se detalha, não foi evitada a aplicação de cavilhas que originaram marcas visíveis no rosto das figuras.

#### *—Assemblagem e reforço*

Em ambas as pinturas, a união entre as tábuas foi efectuada por junta viva ou junta plana, como era comum quer no norte quer no sul da Europa. Frequentemente, nomeadamente em Portugal (Cordeiro 2013b), eram inseridas cavilhas na secção das tábuas, não tanto para reforço da união, mas sobretudo para garantir o correto alinhamento das tábuas durante a colagem (Castelli 2009; Wadum 1998). Porém, nas obras em estudo não foi empregue qualquer cavilha, algo que não era frequente em Portugal, mas que foi usado numa – mas apenas numa – das pinturas que Diogo Teixeira pintou para a Misericórdia do Porto, onde Belchior de Matos colaborou como ajudante (Sousa, Cruz 2012). Nas pinturas de Peniche, além disso, não foi detectada qualquer acumulação de adesivo nas superfícies em contacto, não obstante as excelentes condições de observação resultantes da total desmontagem do suporte durante a intervenção de conservação e restauro. A hipótese de não ter sido usado um adesivo, sugerida por esse facto, é apoiada pela ausência, nas superfícies em contacto, dos golpes que por vezes eram feitos com o objectivo de melhorar a ligação do adesivo (Castelli 2009; Verougstraete 2015: 46). Juntas sem adesivo não são comuns, mas está publicado o caso de um retábulo castelhano, um século mais antigo, onde a união das tábuas foi feita sem adesivo ou qualquer elemento de madeira ou metal inserido entre as tábuas, tendo sido usadas duas travessas de madeira na horizontal, aplicadas no verso de cada pintura, fixas com pregos de ferro introduzidos pela frente (Hodge *et al.* 1998). Contudo, não se pode excluir a possibilidade de, efectivamente, ter sido usado um adesivo nas pinturas em estudo pois, segundo reconstituições históricas, a sua visibilidade numa junta pode ser muito reduzida (Melo 2019).

De qualquer forma, nas pinturas em estudo foram usadas travessas semelhantes às daquele retábulo castelhano, salvo terem sido aplicadas pela frente cavilhas de madeira em vez de pregos [figura 5]. O uso de travessas, seja com esse número e disposição ou não, era comum em Espanha como sistema de reforço das juntas previamente coladas (Bruquetas Galán 2002: 212-220), assim como em Itália (Castelli 2009; Uzielli 1998), mas era raro no norte da Europa (Marijnissen 1985: 66). As cavilhas de madeira eram muito utilizadas em Espanha para fixação das travessas (Bruquetas Galán 2002: 216; Véliz 1998: 139), enquanto em Itália eram empregues quase exclusivamente pregos de ferro (Castelli 2009; Uzielli 1998). Em Portugal são conhecidos casos de fixação das travessas quer com cavilhas de madeira, quer com pregos (Cordeiro 2013b).



**Figura 5.-** Marca da cavilha no painel do *Martírio de São Sebastião*.

Nas duas obras, as travessas foram colocadas a cerca de 20-25 cm das extremidades, ficando afastadas 50-60 cm (tomando como referência a posição das cavilhas). Antes da sua colocação, o verso das tábuas do painel de *Santa Luzia* foi ajustado para melhor contacto das travessas; no outro caso não é evidente se isso sucedeu.

Tal como é perceptível na superfície da pintura [figura 5], cada travessa ligava-se a cada tábua por uma única cavilha, com cerca de 0,5 cm de diâmetro, geralmente colocada a meio da largura da tábua. Actualmente, das quatro travessas, apenas a travessa inferior do painel de *Santa*

*Luzia* é original e do total de 14 cavilhas apenas subsistem 11, das quais só as três da travessa original estão inteiras, pois as outras partiram-se ou foram cortadas no verso. As travessas não originais estavam fixas com pregos.

No caso da travessa superior do *Martírio de São Sebastião*, a posição da cavilha na tábua III é muito excêntrica relativamente à tábua, tendo ficado, no entanto, a meio da largura do painel. Deste modo, a cavilha não ficou no rosto do santo, mas apenas junto à orelha [figura 5]. Como a cavilha da travessa inferior foi colocada no centro da tábua, pode pensar-se que aquele deslocamento da cavilha superior teve como objectivo evitar qualquer marca no rosto do santo. Porém, como semelhante cuidado não houve nem no caso do algoz à sua esquerda nem, o que é mais relevante, na outra pintura, no rosto de Santa Luzia, fica por esclarecer a situação.

No caso do painel de *Santa Luzia*, como claramente se percebe pela marca junto à travessa original (igual a outra existente na zona da travessa superior), as travessas foram cortadas com um serrote depois de aplicadas [figura 6]. Este corte pode ter sido feito mais tarde, por exemplo, numa ocasião em que as pinturas mudaram de lugar, mas, ainda que possa parecer pouco racional, as observações efectuadas não permitem excluir a possibilidade de o corte ter sido feito logo após a sua aplicação. De qualquer modo, esse corte das travessas foi efectuado depois do rebaixo das extremidades do painel (cf. abaixo).



**Figura 6.-** Marca de serrote junta à travessa original do painel de *Santa Luzia*.

Depois de fixas as travessas, foi aplicada sobre as juntas [figuras 1 e 2] uma pasta de fibras [figura 7] e outro material que, actualmente, apresenta superfície irregular, grande rigidez e cor castanha escura. De acordo com os resultados de microscopia, as fibras são de linho ou cânhamo, mas, considerando o lúmen estreito, é mais provável serem de linho (Ilvessalo-Pfäffli 1995: 336-339). Segundo as análises por FTIR, o material que aglomera as fibras e as fixa ao suporte é colofónia [figura 8]. O espectro

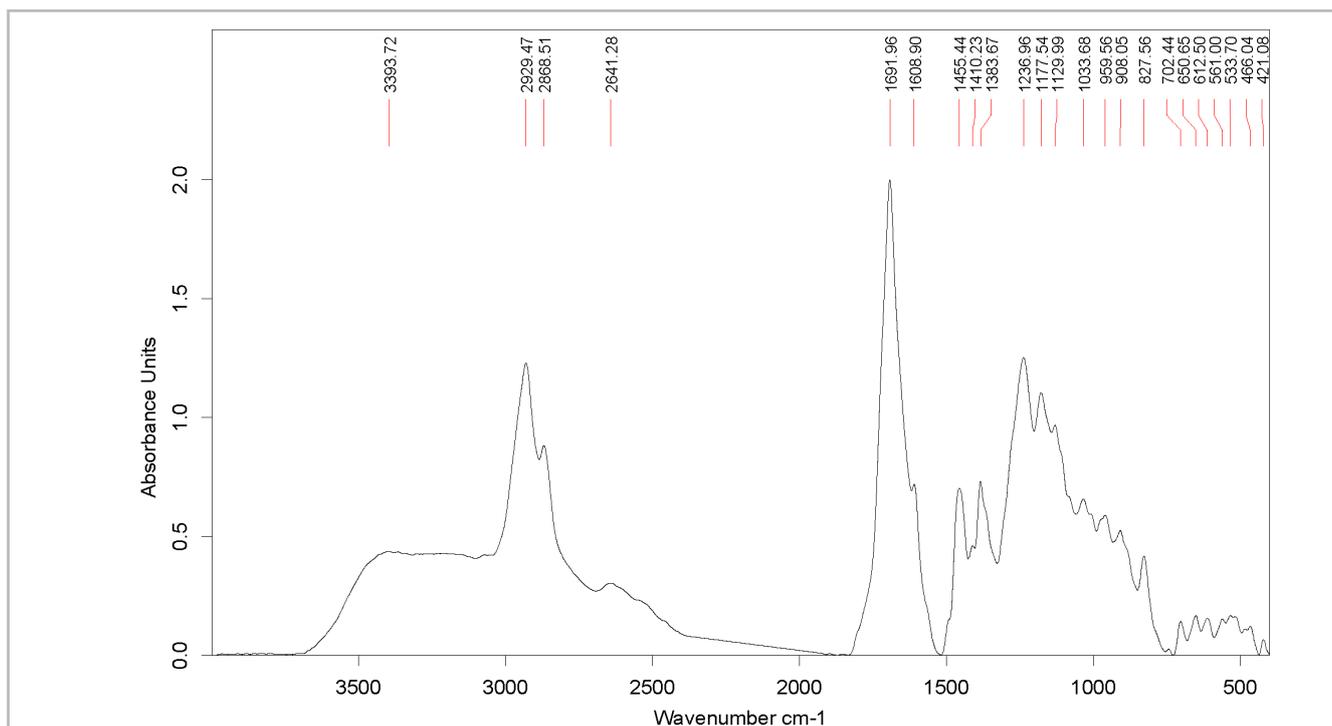
tem grande semelhança ao obtido para uma amostra de colofónia da Kremer Pigmente [tabela 5] (Prati *et al.* 2011), apresentando quer as bandas gerais das resinas diterpénicas (entre as quais a intensa banda  $\nu(\text{C}=\text{O})$  do grupo carbonilo a  $1692\text{ cm}^{-1}$  e as bandas  $\nu(\text{C}-\text{H})$  dos grupos  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ , respectivamente, a  $2929$  e  $2869\text{ cm}^{-1}$ ), quer outras mais específicas (designadamente a banda a  $702\text{ cm}^{-1}$  característica da colofónia e a banda a  $1178\text{ cm}^{-1}$  relacionada com a fotodegradação das resinas) (Azémard *et al.* 2014; Derrick *et al.* 1999; Prati *et al.* 2011). As bandas que não constam do mencionado espectro de referência, surgem noutras amostras de colofónia (Azémard *et al.* 2014; Melo 2012: 243). Em particular, a banda a  $2641\text{ cm}^{-1}$  faz parte de um conjunto de bandas com reduzida intensidade características dessa resina (Azémard *et al.* 2014) devidas à dimerização do grupo carbonilo (Derrick *et al.* 1999: 104).



**Figura 7.-** Fibras no verso dos suportes (microscópio de mão, ampliação 250x).

**Tabela 5.-** Bandas do espectro de FTIR obtido para o material castanho aplicado no verso dos suportes e de amostra de referência de colofónia da Kremer Pigmente (Prati *et al.* 2011).

N.º de onda (cm <sup>-1</sup> )	
Amostra das pinturas	Referência de colofónia
3394	
2929	2928 (m)
2869	2867 (m)
2641	
1692	1691 (s)
1609	
1455	1455 (m)
1384	1384 (m)
1237	1237 (m)
1178	1177 (w)
1130	
1034	1035 (w)
960	952 (w)
908	
828	824 (m)
702	707 (w)
651	658 (s)
612	611 (w)
561	561 (m, sh)
534	540 (s)
466	478 (w)
	449 (w)
421	417 (m)



**Figura 8.-** Espectro de FTIR obtido para amostra de material misturado com as fibras no verso dos suportes.

Esta pasta de fibras e colofónia foi aplicada após as travessas, pois interrompe-se nessa zona, e depois de o painel estar emoldurado, visto encontrar-se no rebaixo efectuado para encaixe na moldura (ver abaixo) e na própria moldura (na face interna) [figura 9].



**Figura 9.-** Pasta na área do rebaixo que não penetrou na moldura e na face interna desta (lado superior do painel de Santa Luzia).

O reforço das juntas com tecido ou fibras era uma prática espanhola comum. Essa operação era feita imediatamente antes da aplicação da camada de preparação, nalguns casos após secagem do painel durante alguns meses, e podia incidir na frente ou no verso do painel (Bruquetas Galán 2002; Véliz 1998). As fontes documentais mencionam frequentemente a aplicação de “nervo” ou “cânhamo forte” com cola forte, isto é, cola animal, um tratamento que é designado como “enervar” ou “encañamar” (Bruquetas Galán 2002: 225-228). Segundo o tratadista Francisco Pacheco (1564-1644), no seu tempo, como a madeira usada era de boa qualidade (por exemplo, “borne”, ou seja, carvalho do Báltico (Bruquetas Galán 2002: 434)), o processo estava simplificado e esse reforço, que diz fazer-se sempre mesmo quando os suportes tinham travessas, era efectuado apenas com fibras no verso do suporte, diferentemente do que se fazia antes (Pacheco 2001: 480, 506). Até há pouco considerava-se que “nervo” era sinónimo de cânhamo ou outra fibra vegetal, mas já foram identificados efectivamente nervos, isto é, tendões animais, nas juntas de algumas pinturas do espanhol Luis de Morales (c.1510-1586) (Jover *et al.* 2015).

Independentemente da natureza das fibras, o reforço das juntas em pinturas realizadas em Portugal só é conhecido num número muito limitado de casos: no retábulo dos Jerónimos pintado, em 1570-1572, pelo espanhol Lourenço de Salzedo (Almada, Figueira 2000), num painel executado pelo eborense Francisco João em 1592 (Melo 2012: 243) e, na forma de vestígios, num painel de 1596-1598 da autoria de Diogo Teixeira, o mestre de Belchior de Matos (Sousa *et al.* 2014). Além disso, são conhecidas referências documentais à aquisição de nervos e ao

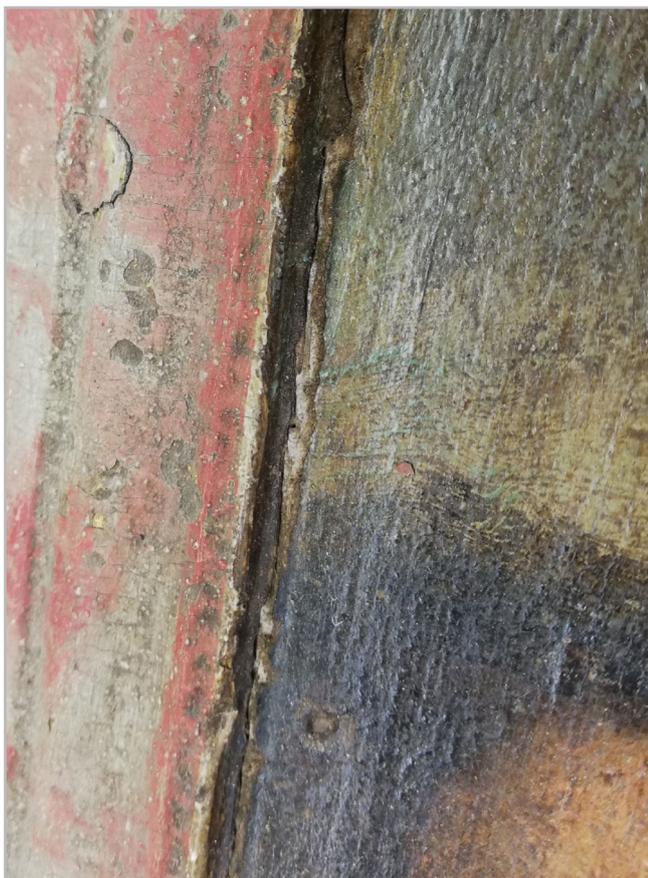
trabalho de enervar efectuado durante a reparação de uma pintura de Diogo Teixeira que ao mesmo foi contratada em 1597 (Basto 1931). A situação mais semelhante à das obras em estudo é a do painel de Francisco João, um pintor fortemente influenciado por Morales, uma vez que as fibras (que não foram identificadas) também estão misturadas com colofónia, ainda que não se limitem às juntas (Melo 2012: 243).

Em resumo, sobre a construção dos suportes pode dizer-se que as tábuas, com origem no norte da Europa, foram dispostas de uma forma regular seguindo procedimentos flamengos a respeito de alguns aspectos e italianos a respeito de outros e a assemblagem, eventualmente feita de uma forma incomum sem o recurso a cola, foi realizada usando técnicas características de Espanha, especialmente de Castela.

### Molduras

As molduras, de linhas simples, sem entalhes de elementos decorativos, apresentam decoração polícroma constituída por marmoreado vermelho e branco, com frisos azuis nas extremidades das partes laterais. Subjacente, através das observações com a lupa binocular e dos cortes estratigráficos, é perceptível uma policromia vermelha com friso interno dourado. Como os suportes apresentam quer margens não pintadas sem camada de preparação, quer rebarba que nalgumas zonas tem continuidade nas molduras [figura 10], as molduras foram colocadas nos suportes antes da aplicação da camada de preparação e da realização das pinturas, de acordo com as tradições medievais. Em Portugal, essa prática parecia ser comum ainda em finais do século XVI, como é constatado através de casos de diferentes oficinas (Cordeiro 2013a: 255; Melo 2012: 290; Mendes 2004: 44; Salgado, Dias 2013), nomeadamente em obras do mestre de Belchior de Matos (Sousa *et al.* 2014). A ligação foi feita através do encaixe dos suportes rebaixados nas calhas das molduras [figura 9], o sistema mais frequente na pintura flamenga até ao início do século XVI (Verougstraete 2015: 66), mas que em 1600 já não era habitual em pinturas isoladas (Streeton, Wadum 2012). Em Itália e em Espanha as molduras eram geralmente pregadas, pela frente, aos suportes (Castelli 2009; Véliz 1998), ainda que em Espanha fosse também usado o sistema de encaixe em calhas (Bruquetas Galán 2013). Em Portugal, ainda que a informação publicada seja escassa, há referências a exemplos de fixação semelhante ao das pinturas em estudo (Melo 2012: 99, 247-248). Convém notar-se, no entanto, que a comparação é dificultada pelo facto de serem diferentes as molduras de pinturas isoladas e as molduras de pinturas integrantes de um retábulo, como é o caso.

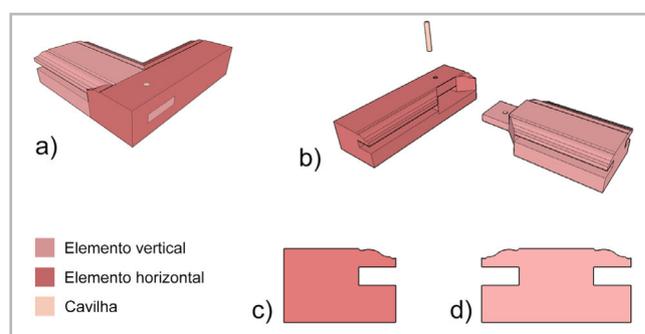
De acordo com o sistema usado, as molduras e suportes formavam um só conjunto, contribuindo as molduras, portanto, para a união das tábuas dos suportes.



**Figura 10.-** Rebarba e continuidade pictórica entre o painel e a moldura, numa zona pontualmente não repintada, no painel do *Martírio de São Sebastião*.

As molduras são de madeira que macroscopicamente parece ser de carvalho e as marcas existentes no verso das molduras sugerem o uso de serra manual, sobretudo no painel de *Santa Luzia*, e ferramenta cortante por percussão (possivelmente formão), sobretudo no do *Martírio de São Sebastião* [figura 11].

Nos cantos, os elementos verticais e horizontais unem-se mediante ligações macho-fêmea com respiga de fora a fora, travadas por cavilha circular de madeira [figura 12]. A linha de corte das ensamblagens é direita, horizontalmente no verso e mista na frente (combina uma união direita horizontal com uma união diagonal). Trata-se de um sistema que não corresponde a nenhum dos 38 tipos de assemblagem de molduras identificados por Hélène Verougstraete nas pinturas flamengas dos séculos XV e XVI (Verougstraete 2015: 50-63) e para o mesmo não se encontrou paralelo na literatura.



**Figura 12.-** Esquema do sistema de assemblagem das molduras (a, b) e perfis dos elementos horizontais (c) e verticais (d).



**Figura 11.-** Marcas no verso das molduras (fotografias de luz rasante): a) marcas de serra manual no painel de *Santa Luzia*; b) marcas de outra ferramenta no painel do *Martírio de São Sebastião*.

A orientação dos encaixes não é a melhor para a suspensão das pinturas pelo elemento superior da moldura, por colocar as cavilhas sobre tensão e facilitar o deslizamento das respigas e consequente abertura das juntas. Com efeito, esse problema era especialmente visível [figuras 1 e 2], ainda que em resultado, sobretudo, da degradação da madeira. Para o minimizar, no passado, provavelmente quando as pinturas foram colocadas nas paredes da ermida suspensas pelas peças de ferro existentes nos elementos do topo, foram colocadas tábuas nos cantos, em posição diagonal, fixas com pregos de ferro [figuras 1 e 2]. No entanto, originalmente essa fragilidade podia não ser significativa, pois o sistema de fixação à estrutura retabular era diferente.

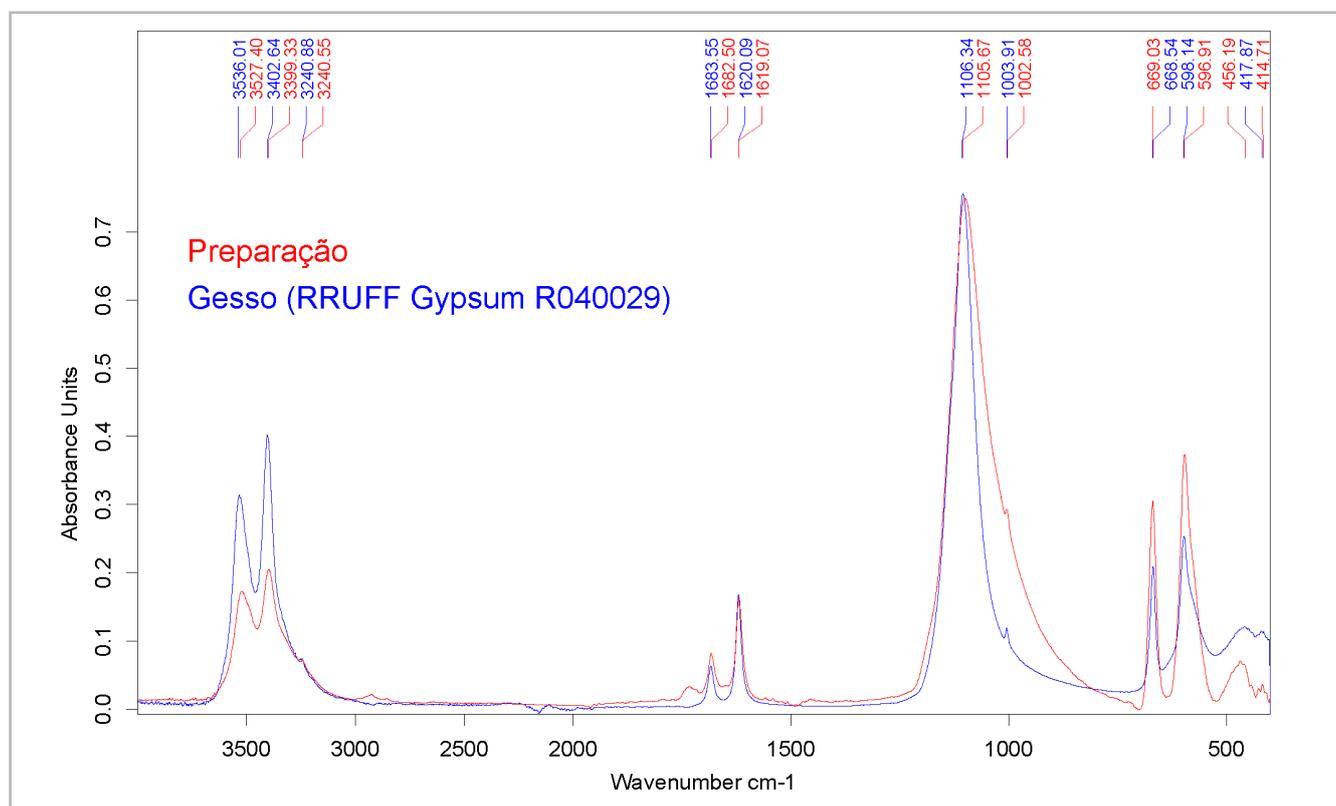
### Camada de preparação

Como já foi referido, a preparação foi aplicada depois de colocadas as molduras, de acordo com a antiga tradição de origem flamenga. Trata-se de uma camada branca, de difícil observação nos cortes estratigráficos, devido à desagregação destes, com estrutura porosa e pequenas inclusões castanhas e pretas, como se vê numa amostra, não montada em resina, de uma escorrência entre o suporte e a moldura [figura 13]. As bandas do espectro de FTIR correspondem apenas a gesso (sulfato de cálcio di-hidratado) [figura 14]. São especialmente significativas as bandas  $\delta(S-O)$  a 669 e  $\nu(S-O)$  a 1003  $cm^{-1}$ , que não evidenciam qualquer deslocação ou desdobramento que

ocorrem na presença de anidrite (sulfato de cálcio anidro) (Melo *et al.* 2014). Ainda que não seja detectável qualquer banda no espectro que possa ser atribuída ao adesivo ou aglutinante empregue, as bolhas observadas [figura 13], características de mistura de carga ou pigmento com cola animal agitada com vigor ou aplicada demasiado quente (Dunkerton 1994: 90, 108-110), permitem concluir que a preparação é de gesso com cola animal.



**Figura 13.-** Amostra da preparação observada com microscópio de mão (ampliação 50x).



**Figura 14.-** Espectro de FTIR de amostra de preparação e de referência de gesso (RRUFF Project, Gypsum R040029).

Em traços gerais, as preparações de sulfato de cálcio são características do sul da Europa, especialmente de Itália, e as de carbonato de cálcio do norte da Europa, mas a situação é mais complexa. Por um lado, no sul da Europa, nomeadamente em Portugal e em Espanha, também eram usadas preparações de carbonato de cálcio, ainda que menos frequentemente (Antunes *et al.* 2013; Calvo *et al.* 2013). Por outro lado, o sulfato de cálcio era usado quer na forma anidra (anidrite), quer na forma hidratada (gesso), separadamente ou misturadas, num só estrato ou numa sequência de dois estratos. Apenas gesso, como sucede nas pinturas em estudo, era pouco comum quer em Portugal (Antunes *et al.* 2013; Antunes 2014; Oliveira *et al.* 2013), quer em Espanha (Calvo *et al.* 2013), quer em Itália (Gettens, Mrose 1954).

Esse uso apenas de gesso é caso único no conjunto de pinturas já estudadas de alguma forma relacionadas com Belchior de Matos. Com efeito, nas pinturas de Diogo Teixeira da Misericórdia do Porto, onde Belchior de Matos colaborou como aprendiz, sendo responsável por engessar e aparelhar as tábuas, a preparação é, essencialmente, de anidrite (Antunes 2014: 687-688); na *Lamentação*, da Igreja de Miragaia (Porto), atribuída a Belchior de Matos, a preparação é igualmente de anidrite (Antunes 2014: 305); e no Pentecostes pintado por Belchior de Matos, c. 1600, para igreja da Lourinhã, a preparação é de uma mistura de anidrite e, em menor concentração, gesso (Antunes 2014: 688-689).

Portanto, a composição da camada de preparação das pinturas em estudo é pouco comum qualquer que seja o enquadramento considerado.

### Discussão e conclusão

Se a datação por dendrocronologia das duas pinturas de Belchior de Matos está de acordo com o esperado, as características dos suportes são muito diferentes do que seria previsível encontrar em duas obras mal pagas realizadas numa pequena oficina de província, no início do século XVII, por um pintor sem grande domínio das técnicas artísticas:

- a madeira dos suportes é de excelente qualidade, seja devido à espécie e origem, seja devido ao corte das tábuas, originando suportes que não tiveram deformação significativa
- a disposição das tábuas segue um padrão regular, num aspecto de acordo com práticas de origem flamenga, noutro adoptando hábitos italianos
- a junção das tábuas foi feita de modo pouco comum, mas com reforços no verso efectuados tal como era habitual em Espanha, especialmente em Castela, e, no que diz respeito à pasta aplicada nas juntas, de acordo com procedimentos que, segundo o tratadista

Francisco Pacheco, eram novos no seu tempo

- em contrapartida, a colocação da moldura antes da camada de preparação e a ligação da moldura ao suporte seguiu uma antiga tradição flamenga, frequente em Portugal
- a assemblagem das molduras foi efectuada com um tipo de encaixes que não encontramos na literatura
- finalmente, a natureza da preparação, ainda que no geral de acordo com a tradição mediterrânica, corresponde a uma forma de sulfato de cálcio (forma di-hidratada) que, isoladamente como aconteceu nestas pinturas, era pouco usada

Portanto, além da contradição entre a qualidade da madeira e a qualidade da pintura, os resultados obtidos mostram uma prática ecléctica, onde se mistura a originalidade com as diferentes influências geográficas e os procedimentos antigos com os mais modernos. Se os procedimentos antigos podem ser interpretados como arcaísmo que facilmente se compreende em oficinas de província, o mesmo não sucede com os procedimentos mais modernos. Por outro lado, trata-se de pinturas de influências formais italianas, mas realizadas com procedimentos técnicos que têm sobretudo outras origens. Ou seja, do ponto de vista técnico, esta oficina parecia não estar tão isolada do mundo como as limitadas ambições artísticas e os escassos recursos económicos poderiam sugerir.

Seriam este eclectismo e estas contradições reflexo da divisão de tarefas envolvidas numa empreitada? Em parte podem ser, pois, de acordo com a legislação da época, como o regimento dos marceneiros de Lisboa, de 1572, a construção dos painéis usados como suporte de pintura era da exclusiva competência dos assembladores (Correia 1926: 109-110). Aliás, no anterior regimento dos assembladores, de 1549, era expressamente referido que “nenhum pintor de qualquer arte que seja não tomará nenhuma obra de madeira de qualquer sorte e maneira que seja” (Langhans 1943: 467). Estas são referências significativamente anteriores às pinturas em estudo, mas durante muito tempo, e até consideravelmente mais tarde, se mantiveram anacronicamente em vigor em Portugal, nomeadamente nas pequenas e obscuras oficinas regionais, procedimentos e práticas de origem medieval (Serrão 1983; Serrão 2001). Além disso, há inclusivamente uma referência documental ao trabalho realizado por um marceneiro para uma obra pintada por Belchior de Matos, em 1626, para a Misericórdia de Óbidos (Serrão 1981: 26-27).

Relativamente à preparação dos painéis, considerando as já mencionadas numerosas referências documentais aos trabalhos de engessar adjudicados a Belchior de Matos ao longo da sua carreira baseada nas Caldas da Rainha, é muito provável que a aplicação da camada de

gesso aos painéis tenha sido efectuada pelo pintor ou, à semelhança do que ocorria mesmo em pequenas oficinas como a sua (Serrão 2001) e tinha acontecido com ele quando esteve ao serviço do seu mestre Diogo Teixeira, por qualquer eventual ajudante ou aprendiz sob a sua responsabilidade.

De qualquer forma, não obstante o quase certo envolvimento de mestre marceneiro na construção dos suportes onde Belchior de Matos executou as pinturas (ainda que possivelmente construídos de acordo com as suas indicações), as múltiplas e diversificadas influências detectadas nos suportes estudados e as suas características mostram que as obras saídas das oficinas regionais de pintura, por um lado, podiam ter materiais de qualidade muito superior ao seu merecimento artístico e, por outro lado, podiam surgir num imprevisível ambiente de diversificados conhecimentos técnicos que, além de soluções originais, envolvia práticas provenientes de muitas e desvairadas partes.

Uma questão que se pode colocar é se os procedimentos técnicos observados nas duas pinturas, apresentados neste artigo, são exclusivo desta oficina ou se as mesmas práticas eram comuns noutras oficinas, em particular nas de implantação regional. Dito de outra forma, será que as diversas influências aqui encontradas estavam assimiladas nas oficinas portuguesas e, conseqüentemente, correspondiam simplesmente a uma prática nacional? Parece-nos que a escassa literatura que aborda com detalhe as características técnicas dos suportes de madeira usados na época em Portugal não permite uma resposta neste momento, sendo necessários mais estudos de casos.

Independentemente da situação a este respeito, noutra perspectiva, este artigo mostra que os estudos realizados no contexto de uma intervenção de conservação e restauro podem proporcionar informação importante para a abordagem de problemas da História da Arte que dificilmente poderia ser obtida de outra forma.

### Agradecimentos

Agradece-se a Gonçalo Figueiredo (IPT) as fotografias gerais e a Vítor Gaspar (IPT) as análises por microscopia óptica e FTIR. AJC agradece a Helena Melo (Laboratório HERCULES) as numerosas informações sobre aspectos importantes relacionados com a produção dos painéis de madeira usados em pintura.

### Referências

ALBA GONZÁLEZ-FANJUL, T. (2015). *La construcción de los soportes pictóricos de madera en Castilla: siglos XV y XVI*. Tese de doutoramento. Universidad Complutense de Madrid. <http://eprints.ucm.es/33197/>.

ALMADA, C. O., FIGUEIRA, L. T. (2000). "Conservação e restauro - 1998-1999". In: *História e Restauro da Pintura do Retábulo-mor do Mosteiro dos Jerónimos*. Lisboa: IPPAR: 81-290.

ANTUNES, V., SERRÃO, V., OLIVEIRA, M. J., DIAS, L., CANDEIAS, A., MIRÃO, J., COROADO, J., CARVALHO, M. L., SERUYA, A. I. (2013). "Técnicas e materiais de preparação na pintura portuguesa dos séculos XV e XVI". In: *As Preparações na Pintura Portuguesa. Séculos XV e XVI*, Serrão, V., Antunes, V. & Seruya, A. I. (eds.). Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa: 55-74.

ANTUNES, V. H. (2014). *Técnicas e Materiais de Preparação na Pintura Portuguesa dos Séculos XV e XVI*. Tese de doutoramento. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.

AZÉMARD, C., VIEILLESZAZES, C., MÉNAGER, M. (2014). "Effect of photodegradation on the identification of natural varnishes by FT-IR spectroscopy", *Microchemical Journal*, 112: 137-149. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.09.020>.

BASTO, A. M. (1931). *O Pintor Quinhentista Diogo Teixeira*. Gaia: Edições Pátria.

BRUQUETAS GALÁN, R. (2002). *Técnicas y Materiales de la Pintura Española en los Siglos de Oro*. Madrid: Fundación de Apoyo a la Historia del Arte Hispánico.

BRUQUETAS GALÁN, R. (2013). "Aparejos e imprimaduras. La preparación de la pintura según las fuentes históricas españolas". In: *As Preparações na Pintura Portuguesa. Séculos XV e XVI*, Serrão, V., Antunes, V. & Seruya, A. I. (eds.). Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa: 27-37.

CALVO, A., SANTOS, S., ANDRÉS, M. S., SOUSA, M. J., CRUZ, A. J. (2013). "Del Mediterráneo al Atlántico: algunas consideraciones sobre las preparaciones de la pintura sobre tabla en la península ibérica". In: *As Preparações na Pintura Portuguesa. Séculos XV e XVI*, Serrão, V., Antunes, V. & Seruya, A. I. (eds.). Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa: 95-106. <http://www.ciarte.pt/artigos/201303.html>.

CAMPBELL, L., FOISTER, S. (1997). "Methods and materials of Northern European painting in the National Gallery, 1400-1550", *National Gallery Technical Bulletin*, 18: 6-55.

CASTELLI, C. (2009). "The construction of wooden supports of late medieval altarpieces". In: *Sassetta. The Borgo San Sepolcro Altarpiece*, Israël, M. (ed.). Leiden: Primavera Press: 319-336.

CORDEIRO, F. R. (2013a). *Thomas Luis, Pintor Maneirista do Sacro e do Profano: Arte, Conservação e Restauro. Casos de Évora, Aldeia Galega, Elvas, Idanha-a-nova e Vila Viçosa - Séculos XVI a XVII*. Tese de doutoramento. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10451/11426>.

CORDEIRO, F. R. (2013b). "Altarpieces in Portugal: joinery techniques within the context of fifteenth- and sixteenth-century European workshop practice". In: *The Renaissance Workshop. The Materials and Techniques of Renaissance Art*,

- Saunders, D., Spring, M., Meek, A. (eds.). London: Archetype Publications: 49-59.
- CORREIA, V. (1926). *Livro dos Regimentos dos Officiaes Mecanicos da Mui Nobre e Sempre Leal Cidade de Lixboa (1572)*. Coimbra: Imprensa da Universidade.
- DERRICK, M. R., STULIK, D., LANDRY, J. M. (1999). *Infrared Spectroscopy in Conservation Science*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute. [http://hdl.handle.net/10020/gci\\_pubs/infrared\\_spectroscopy](http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/infrared_spectroscopy).
- DUBOIS, H., FRAITURE, P. (2011). "Between creativity and economy: remarks on the quality of Rubens' panel supports. A study of paintings in the Royal Museums of Fine Arts of Belgium". In: *Studying Old Master Paintings. Technology and Practice*, Spring, M. (ed.). London: Archetype Publications: 136-142.
- DUNKERTON, J. (1994). "Michelangelo as a painter on panel". In: *Making & Meaning. The Young Michelangelo*, Hirst, M. & Dunkerton, J. (eds.). London: National Gallery Publications: 83-133.
- DUNKERTON, J., FOISTER, S., PENNY, N. (1999). *Dürer to Veronese. Sixteen-Century Painting in the National Gallery*. London: National Gallery Company.
- ECKSTEIN, D. & BAUCH, J. (1969). "Beitrag zur rationalisierung eines dendrochronologischen verfahrens und zur analyse seiner aussagesicherheit", *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 88(1): 230-250. <https://doi.org/10.1007/BF02741777>.
- ESTEVEES, L. (2003). "A dendrocronologia aplicada às obras de arte". Documento dactilografado. Lisboa: Instituto Português de Conservação e Restauro.
- FRAITURE, P. (2012). "Dendro-archaeological Examination of Paintings by Pieter Brueghel the Younger". In: *The Brueg(h) el Phenomenon. Paintings by Pieter Bruegel the Elder and Pieter Brueghel the Younger with a Special Focus on Technique and Copying Practice*, Currie, C. & Allart, D. (eds.). Brussels: Royal Institute for Cultural Heritage: 1002-1016.
- GETTENS, R. J., MROSE, M. E. (1954). "Calcium sulfate minerals in the grounds of Italian paintings", *Studies in conservation*, 1(4): 174-189. <https://doi.org/10.1179/sic.1954.026>.
- HILLAM, J., TYERS, I. (1995). "Reliability and repeatability in dendrochronological analysis: tests using the Fletcher archive of panel-painting data", *Archaeometry*, 37(2): 395-405. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1995.tb00752.x>.
- HODGE, S., SPRING, M., MARCHANT, R. (1998). "The construction and painting of a large Castilian retable: a study of techniques and workshop practices". In: *Painting Techniques. History, materials and studio practice. Contributions to the Dublin Congress. 7-11 September 1998*, Roy, A. & Smith, P. (eds.). London: The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works: 70-76. <https://doi.org/10.1179/sic.1998.43.Supplement-1.70>.
- HOLLSTEIN, E. (1980). *Mitteeuropäische Eichenchronologie*. Mainz am Rhein: Verlag Philipp von Zabern.
- ILVESSALO-PFÄFFLI, M. S. (1995). *Fiber Atlas Identification of Papermaking Fibers*. Berlin: Springer.
- JOVER, M., ALBA, L., GAYO, M. D. & GARCÍA-MÁIQUEZ, J. (2015). "El taller del pintor: procedimientos artísticos en el obrador de Luis de Morales". In: *El Divino Morales*, Gómez, L. R. (ed.). Madrid: Museo Nacional del Prado: 213-225.
- KLEIN, P. (2010). "Dendrochronological analyses of Netherlandish panel paintings". In: *La Pintura Europea Sobre Tabla. Siglos XV, XVI y XVII*. Madrid: Ministerio de Cultura: 94-99. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4086462>.
- KLEIN, P. (2012). "Wood identification and dendrochronology". In: *The Conservation of Easel Paintings*, Stoner, J. H. & Rushfield, R. (eds.). Abingdon: Routledge: 51-65.
- LANGHANS, F. P. (1943). *As Corporações dos Ofícios Mecânicos. Subsídios para a sua História*. Lisboa: Imprensa Nacional.
- LAUW, A., ESTEVES, L., TELES, M., LEAL, S., PEREIRA, H. (2013). "Pinturas do século XV e XVI: uma abordagem dendrocronológica". In: *As Preparações na Pintura Portuguesa. Séculos XV e XVI*, Serrão, V., Antunes, V. & Seruya, A. I. (eds.). Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa: 279-287.
- MARIJNISSEN, R. H. (1985). *Paintings. Genuine, Fraud, Fake. Modern Methods of Examining Paintings*. Brussels: Elsevier.
- MELO, H. F. P. P. (2012). *O Pintor Francisco João (Act. 1563-1595). Materiais e Técnicas na Pintura de Cavalete em Évora na Segunda Metade do Século XVI*. Tese de doutoramento. Universidade Católica Portuguesa, Escola das Artes. <http://repositorio.ucp.pt/handle/10400.14/14977>.
- MELO, H. P., CRUZ, A. J., CANDEIAS, A., MIRÃO, J., CARDOSO, A. M., OLIVEIRA, M. J., VALADAS, S. (2014). "Problems of analysis by FTIR of calcium sulphate-based preparatory layers: the case of a group of 16th-century Portuguese paintings", *Archaeometry*, 56(3): 513-526. <https://doi.org/10.1111/arc.12026>.
- MELO, H. P. (2019). Comunicação pessoal, 2019-06-20.
- MENDES, J. (2004). "Intervenção de conservação e restauro". In: *Retábulo de Ferreira do Alentejo*. Lisboa: Instituto Português de Conservação e Restauro: 43-63.
- MONTEIRO, P., CRUZ, A. J. (2010). "Breve Tratado de Iluminação composto por um religioso da Ordem de Cristo". In: *The Materials of the Image. As Matérias da Imagem*, Afonso, L. U. (ed.). Lisboa: Cátedra de Estudos Sefarditas «Alberto Benveniste» da Universidade de Lisboa: 237-286. <http://www.ciarte.pt/artigos/201011.html>.
- OLIVEIRA, M. J., ANTUNES, V., SERRÃO, V., CANDEIAS, A., SERUYA, A. I., MIRÃO, J., COROADO, J. (2013). "Caracterização material da

camada preparatória de pintura portuguesa por u-XRD e SEM-EDS". In: *As Preparações na Pintura Portuguesa. Séculos XV e XVI*, Serrão, V., Antunes, V. & Seruya, A. I. (eds.). Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa: 39-44.

PACHECO, F. (2001). *El Arte de la Pintura*. Madrid: Ediciones Cátedra.

PRATI, S., SCIUTTO, G., MAZZEO, R., TORRI, C., FABBRI, D. (2011). "Application of ATR-far-infrared spectroscopy to the analysis of natural resins", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 399(9): 3081-3091. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-4388-y>

SALGADO, A., DIAS, J. (2013). "Análise tecnológica dos suportes lenhosos. Análise dos processos de restauro do retábulo da igreja da Misericórdia de Almada". In: *As Preparações na Pintura Portuguesa. Séculos XV e XVI*, Serrão, V., Antunes, V. & Seruya, A. I. (eds.). Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa: 273-277.

SERRÃO, V. (1981). *Belchior de Matos, 1595 - 1628*. Pintor das Caldas da Rainha. Caldas da Rainha: Museu de José Malhoa.

SERRÃO, V. (1983). *O Maneirismo e o Estatuto Social dos Pintores Portugueses*. Lisboa: Imprensa Nacional - Casa da Moeda.

SERRÃO, V. (1989). "Belchior de Matos, um pintor de província". In: *Estudos de Pintura Maneirista e Barroca*. Lisboa: Caminho: 169-177.

SERRÃO, V. (2001). "Um contrato de ensino de pintura em Castelo Branco em 1732". In: *A Cripto-história da Arte. Análise de Obras de Arte Inexistentes*. Lisboa: Livros Horizonte: 201-214.

SILVA, J. H. P. (1996). *Estudos sobre o Maneirismo*. Lisboa: Editorial Estampa.

SOUSA, M. J., CRUZ, A. J. (2012). "Materiais e técnica do painel representando a Visitação executado para o retábulo da capela de Santa Isabel (Porto), pelo pintor maneirista Diogo Teixeira", *ECR - Estudos de Conservação e Restauro*: 4: 210-230. <https://doi.org/10.34618/ecr.4.3093>.

SOUSA, M. J., CRUZ, A. J., CALVO, A. (2014). "Estudo técnico e material do suporte das pinturas de Diogo Teixeira realizadas para o Mosteiro de Arouca", *ECR - Estudos de Conservação e Restauro*, 6: 38-59. <https://doi.org/10.7559/ecr.6.7523>.

STREETON, N., WADUM, A. J. (2012). "Northern European panel paintings". In: *The Conservation of Easel Paintings*, Stoner, J. H. & Rushfield, R. (eds.). Abingdon: Routledge: 86-97.

UZIELLI, L. (1998). "Historical overview of panel-making techniques in Central Italy". In: *The Structural Conservation of Panel Paintings*, Dardes, K. & Rothe, A. (eds.). Los Angeles: The Getty Conservation Institute: 110-135. [http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf\\_publications/panelpaintings.html](http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/panelpaintings.html).

VÉLIZ, Z. (1998). "Wooden panels and their preparation for

painting from the middle ages to the seventeenth century in Spain". In: *The Structural Conservation of Panel Paintings*, Dardes, K. & Rothe, A. (eds.). Los Angeles: The Getty Conservation Institute: 136-148. [http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf\\_publications/panelpaintings.html](http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/panelpaintings.html).

VEROUGSTRAETE, H. (2015). *Frames and Supports in 15th and 16th-century Southern Netherlandish Painting*. Brussels: Royal Institute for Cultural Heritage. <http://www.kikirpa.be/uploads/files/frames.pdf>.

WADUM, J. (1998). "Historical overview of panel-making techniques in the Northern countries". In: *The Structural Conservation of Panel Paintings*, Dardes, K. & Rothe, A. (eds.). Los Angeles: The Getty Conservation Institute: 149-177. [http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf\\_publications/panelpaintings.html](http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/panelpaintings.html)

#### Autor/es



**António João Cruz**

[ajcruz@ipt.pt](mailto:ajcruz@ipt.pt)

Techn&Art, Centro de Tecnologia, Restauro e Valorização das Artes; Instituto Politécnico de Tomar; Laboratório HERCULES, Universidade de Évora. Portugal

Possui licenciatura em Química (1986) e doutoramento em Química Analítica (1993) pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Colaborou com o então Instituto José de Figueiredo (Lisboa) entre 1992 e 1997. Desde 1995, tem leccionado em diversos cursos de licenciatura, mestrado e doutoramento de Conservação e Restauro e de outras áreas relacionadas com o Património Cultural. Actualmente é Professor Adjunto no Instituto Politécnico de Tomar e director do respectivo Mestrado em Conservação e Restauro. Interessase pelo estudo laboratorial de obras de arte, a história da Conservação e Restauro e os problemas da relação entre a Conservação e Restauro e as outras áreas do conhecimento. Entre 2005 e 2019 foi director da revista "Conservar Património" (indexada na Scopus e na Web of Science).



**Elisabete Ferreira**

[lis.m.ferreira@gmail.com](mailto:lis.m.ferreira@gmail.com)

Instituto Politécnico de Tomar, Estrada da Serra. Portugal

Possui licenciatura em Conservação e Restauro pelo Instituto Politécnico de Tomar (2017). Concluiu o mestrado em Conservação e Restauro, especialidade em pintura de cavalete, também no Instituto Politécnico de Tomar (2019). O presente artigo tem origem no estágio final que realizou no âmbito do mestrado.



**Alexandra Lauw**

[alexandralauw@isa.ulisboa.pt](mailto:alexandralauw@isa.ulisboa.pt)

Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa. Portugal

Institutos Politécnicos e Instituições de Investigação Científica. Áreas de investigação: florestas e produtos florestais, biomassa, bioenergia e biorefinarias. Orientou mais de 40 teses de doutoramento. Possui cerca de 400 publicações científicas internacionais, em livros, capítulos de livros e revistas científicas de editoras reconhecidas.

Licenciada em Engenharia Florestal pelo Instituto Superior de Agronomia (ISA) em 1996, inicia a sua actividade como bolseira de investigação no Centro de Estudos Florestais (CEF). Em 2003, trabalha no sector privado, regressando ao ISA, em 2010, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais, com a tese final na área da dendrocronologia. Desde 2011 a 2014, dá continuidade à investigação na área da dendroclimatologia e da dendroarqueologia, estabelecendo, para tal, parcerias com centros de investigação de universidades portuguesas, museus e entidades privadas. A formação complementar e contínua realizou-se pelos estágios na Universidade de Hamburgo (Alemanha, 1998), *WSL Birmensdorf, Swiss Federal Research Institute* (Suíça, 2010), *Institut Royal du Patrimoine Artistique* (Bélgica, 2012) e Universidade de Ljubljana (Eslovénia, 2016). Em 2014 inicia o seu Doutoramento com uma abordagem dendrocronológica e de anatomia vegetal aplicada à pintura e instrumentos musicais.

Artículo enviado el 24/11/2019

Artículo aceptado el 09/04/2020



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.700>



**Carla Rego**

[cmrego@ipt.pt](mailto:cmrego@ipt.pt)

Instituto Politécnico de Tomar, Estrada da Serra. Portugal

É Professora Adjunta no Instituto Politécnico de Tomar, na Unidade Departamental de Arqueologia, Conservação e Restauro e Património. É investigadora no Techn&Art, Centro de Tecnologia, Restauro e Valorização das Artes, Instituto Politécnico de Tomar. Realizou com aproveitamento a parte curricular e Prova de Suficiência Investigadora do Doutoramento em Bines Culturales, da Universidade do País Basco. É Mestre em Museologia e Património Cultural, da Universidade de Coimbra. Desde 1997 que exerce a actividade de conservadora-restauradora de Pintura e Escultura, no Laboratório de Conservação e Restauro – IPT.



**Helena Pereira**

[hpereira@isa.ulisboa.pt](mailto:hpereira@isa.ulisboa.pt)

Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Portugal

Professora catedrática do Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa. Engenheira química (Instituto Superior Técnico), doutorada (Dr. rer. nat.) pela Faculdade de Biologia, Universidade de Hamburgo, com agregação no Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa. Desempenhou diversos cargos de gestão académica e científica em Universidades,

# Influencia del método de aplicación en la consolidación con nanopartículas de sílice ( $\text{SiO}_2$ ): arenisca del claustro de la Catedral de Pamplona

Segundo Premio en la convocatoria Joven Investigador GEIIC 2019

**Irene Samaniego Jiménez, Ainara Zornoza-Indart**

**Resumen:** La influencia del método de aplicación en la eficacia consolidante de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  ha sido evaluada en una arenisca deteriorada proveniente del claustro de la Catedral de Pamplona utilizando los métodos de aplicación más empleados, brocha y spray y, estudiando el método de perforación y goteo. Para ello, se analizaron los cambios en las propiedades físicas del material pétreo tras la aplicación del tratamiento utilizando técnicas portátiles no destructivas o microdestructivas (velocidad de propagación de ultrasonidos, test de adhesión superficial, resistencia a la microperforación, comportamiento hídrico y espectrofotometría). Los resultados demuestran que el método de aplicación influye notoriamente en la efectividad del consolidante, dejando de manifiesto que la selección del método de aplicación depende del estado de conservación del material pétreo, la localización de su deterioro (superficial, interno o ambos) y de las propiedades intrínsecas del material que determinan la compatibilidad con el producto, su penetración y por tanto, su eficacia.

**Palabras clave:** consolidación, arenisca, método de aplicación, nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , técnicas de análisis no destructivas

## Influence of the application method in the consolidation with silica nanoparticles ( $\text{SiO}_2$ ): sandstone of the Pamplona Cathedral cloister

**Abstract:** The influence of the application method on the consolidating efficacy of  $\text{SiO}_2$  nanoparticles has been evaluated in a deteriorated sandstone from the cloister of the Pamplona Cathedral using the most used application methods, brush and spray and, studying the drilling and dripping method. The changes in the physical properties of the stone after the application of the treatment were analyzed using non-destructive or microdestructive techniques (ultrasonic velocity, peeling test, drilling resistance, hydric behavior and spectrophotometry). The results show that the application method has a significant influence on the effectiveness of  $\text{SiO}_2$  nanoparticles, concluding that the selection of the application method depends on the conservation state of the treated stone, the location of the deterioration (superficial, internal or both) and the intrinsic factors of the material that determine the compatibility with the product, its penetration and therefore its effectiveness.

**Keyword:** consolidation, sandstone, application method,  $\text{SiO}_2$  nanoparticles, non-destructive techniques

## Influência do método de aplicação na consolidação com nanopartículas de sílica ( $\text{SiO}_2$ ): arenito do claustro da Catedral de Pamplona

**Resumo:** A influência do método de aplicação na eficácia da consolidação com nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  foi avaliada num arenito deteriorado do claustro da Catedral de Pamplona, usando os métodos de aplicação mais empregues, pincel e aspersão, e estudando o método de perfuração e de gotejamento. As alterações nas propriedades físicas da pedra, após a aplicação do tratamento, foram analisadas por técnicas não destrutivas ou microdestrutivas (velocidade ultrassónica, teste de descamação, resistência à perfuração, comportamento hídrico e espectrofotometria). Os resultados mostram que o método de aplicação tem uma influência significativa na efetividade das nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , concluindo que a seleção do método de aplicação depende do estado de conservação da pedra tratada, da localização da deterioração (superficial, interna ou ambas) e dos fatores intrínsecos do material que determinam a compatibilidade com o produto, a sua penetração e, portanto, a sua eficácia.

**Palavras-chave:** consolidação, arenito, método de aplicação, nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , técnicas não destrutivas

## Introducción

La exposición a la intemperie, combinada con las variaciones ambientales y la contaminación antropogénica producen daños en los materiales porosos compuestos por carbonato cálcico y sílice empleados en el patrimonio arquitectónico (Gheno *et al.* 2018). Uno de los daños que actualmente sigue siendo un desafío en el campo de la conservación y restauración del material pétreo es la descohesión del sustrato, pudiendo provocar la pérdida de la identidad del monumento.

El tratamiento de consolidación consiste en devolver la cohesión de la piedra uniendo, en el caso de las areniscas, los granos minerales que la forman y que han quedado sueltos, mejorando sus características mecánicas (Villegas *et al.* 2003). Debe aplicarse únicamente cuando sea necesario, ya que es un tratamiento irreversible y los productos a emplear pueden causar efectos adversos a corto y largo plazo (Ferreira y Delgado 2008). Para evitar lo máximo posible estos efectos perjudiciales, entre las características más relevantes que debe reunir un producto consolidante cabe destacar la compatibilidad con el sustrato tanto química, como física y estética; tener una buena penetración en el sustrato tratado para evitar comportamientos diferenciales entre las zonas tratadas (suelen ser escasos mm) y las zonas sin tratar y mejorar las propiedades mecánicas del sustrato en el que se aplica para ralentizar su deterioro y aumentar así su durabilidad (Girginova *et al.* 2018). Muchos han sido los productos propuestos y aplicados como consolidantes, desde los compuestos de origen natural, tales como aceite de linaza, jugo de cactus o lechadas de cal a los polímeros sintéticos del siglo XX, siendo seleccionados más por razones de disponibilidad que por otras cualidades prefijadas (Doehne y Price 2010). Sin embargo, se han observado multitud de efectos adversos en el uso de estos productos como consolidantes; por ejemplo, con carácter general comportamientos frente a los agentes ambientales muy diferentes al material pétreo que causan tensiones, oclusión de los poros del sustrato o escasa resistencia a la cristalización de sales (Cultrone y Madkour 2013; Barajas *et al.* 2010; Villegas *et al.* 2003); y en el caso de los productos organosilícicos reducción de su eficacia en sustratos calcáreos, un comportamiento hidrófobo temporal que limita los tratamientos posteriores o la tendencia a la fractura del gel producido en el caso de los productos organosilícicos (Naidu *et al.* 2015; Mosquera 2013; Briffa *et al.* 2012; Doehne y Price 2010; Scherer y Wheeler 2009; Mosquera *et al.* 2008; Wheeler 2005; Weiss *et al.* 2000). Es por ello, que la investigación en nuevos tratamientos más eficaces y más estables a lo largo del tiempo, es hoy por hoy el ámbito más importante dentro del campo de la conservación científica, siendo entre estos nuevos tratamientos el uso de nanopartículas el que más se está desarrollando.

A pesar de la cantidad de nanopartículas que se está investigando con distintos fines (agentes de limpieza,

consolidantes, biocidas, hidrofugantes y superficies autolimpiantes), sólo las nanopartículas de hidróxido de cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) se comercializan con fines consolidantes y, por tanto, son las más empleadas.

Por un lado, las nanopartículas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  solucionan algunos aspectos negativos del empleo del hidróxido cálcico ya que se presentan dispersas alcohólica aumenta su capacidad de reacción, mejoran la penetración y evitan la introducción de grandes cantidades de agua en el sustrato pétreo. No obstante, estos productos también presentan desventajas a la hora de aplicarlos como producto consolidante ya que las condiciones ambientales, en especial la humedad relativa y el  $\text{CO}_2$ , juegan un papel importante en la carbonatación de las nanopartículas formándose aglomerados y reduciendo su eficacia en condiciones de baja humedad relativa (Rodríguez-Navarro y Ruiz-Agudo 2018; López-Arce y Zornoza-Indart 2015; López-Arce *et al.* 2010). Por otra parte, la presencia de alcoholes como disolventes puede considerarse una desventaja con respecto a la seguridad y al medioambiente.

Por otro lado, el tratamiento de consolidación con nanopartículas de sílice se ha estudiado recientemente sobre diferentes sustratos pétreos (Iucolano *et al.* 2019; Pozo-Antonio *et al.* 2019; Gheno *et al.* 2018; Zornoza-Indart *et al.* 2018; Zornoza-Indart *et al.* 2017; Zornoza-Indart y López-Arce 2016). Este producto surge como alternativa al empleo de los productos organosilícicos (silicatos de etilo). Dos son las principales diferencias entre ambos productos. En primer lugar, el disolvente empleado, agua en el caso de las nanopartículas, hace que pueda ser empleado en sustratos con humedad y disminuye los problemas de toxicidad. En segundo lugar, el tiempo necesario para la obtención del gel, que en los productos con nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  se reduce a 3-4 días mientras que es de 4 semanas en el caso del silicato de etilo (Gheno *et al.* 2018; C.T.S. 2015a).

Entre los productos comerciales basados en nanopartículas de sílice, se encuentra el Nano Estel, una dispersión acuosa coloidal de sílice con dimensiones nanométricas en torno a 10-20 nm (C.T.S., 2015b). Además el producto Nano Estel no provoca la formación de subproductos secundarios dañinos; por el contrario, dado su pH alcalino (9,8-10,4) el efecto sobre algunos tipos de película pictórica puede ser negativo. Con respecto a su efectividad como consolidante sobre diferentes sustratos pétreos como la toba, el granito o la calcarenita bioclástica, el producto provoca un aumento moderado de las propiedades mecánicas (Iucolano *et al.* 2019; Pozo-Antonio *et al.* 2019; Zornoza-Indart y López-Arce 2016). Además, su eficacia depende de la humedad relativa del ambiente de exposición ya que, aunque en ambientes húmedos el consolidante disminuye la porosidad abierta, la eficacia es mayor en ambientes secos, produciendo menores cambios cromáticos y evitando la formación de una capa craquelada densa en la superficie (Zornoza-Indart y López-

Arce 2016). En cuanto a su estabilidad a largo plazo, en diferentes investigaciones llevadas a cabo recientemente se demuestra que tras ciclos de envejecimiento acelerado el producto Nano Estel no produce cambios cromáticos perceptibles en el caso de la toba (Iucolano *et al.* 2019) o sobre rocas macro, meso y microporosas (Gheno *et al.* 2018). En cuanto a la estabilidad del producto con respecto a los ciclos de cristalización de sales, en el estudio comparativo de Licchelli *et al.* (2014) la resistencia de las muestras tratadas con Nano Estel fue levemente mayor o casi igual que la piedra sin tratar, mostrando en general resultados donde las nanopartículas presentaban menos cambios que los resultados logrados con el silicato de etilo.

Todos estos estudios centrados en analizar la eficacia de los tratamientos consolidantes, comparan la acción de los diferentes productos disponibles empleando distintos métodos de aplicación sin muchas veces tener en cuenta la influencia que el método de aplicación tiene en la eficacia del producto. Tanto es así que, leves diferencias en el método de aplicación pueden acarrear diferencias significativas en los resultados obtenidos (Ferreira y Delgado 2008). Además, algunos de los métodos de aplicación que se utilizan en laboratorio son difícilmente aplicables en la restauración de edificios arquitectónicos, como son el goteo, la capilaridad o inmersión, siendo estos dos últimos los métodos más eficaces según Ferreira y Delgado (2012) y Zornoza-Indart *et al.* (2012).

La brocha y el espray son los métodos de aplicación más utilizados in situ por restauradores aunque, con frecuencia, al emplear estos métodos la superficie del sustrato se satura con poca cantidad de producto generando capas o costras superficiales (Ferreira y Delgado 2012). Esto supone una baja penetración del producto que queda acumulado en la superficie del material pétreo, provocando menos cambios petrofísicos en el interior del sustrato y comportamientos diferenciales entre las zonas tratadas (unos escasos mm en la superficie del material) y las zonas sin tratar. Por otro lado, para tratar de solventar las dificultades de la utilización de los anteriores métodos y favorecer la penetración del producto hacia el interior del material pétreo, también se emplean otros métodos como por ejemplo la perforación y goteo. Este último, aunque empleado por los restauradores, ha sido escasamente investigado, por lo que se hace necesario un estudio para comparar su efectividad con relación al resto de métodos; en este sentido habría que valorar si los daños causados por la realización de una oquedad (microperforación) en la piedra para aplicar el producto y el posterior relleno con un mortero, se ven compensados con una mayor penetración del producto y por tanto una mayor consolidación en profundidad. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, aunque existan estos métodos, la aplicación de los productos de consolidación in situ suponen una problemática añadida, ya que se ve influida por diversos factores entre los que cabe destacar la dificultad de tratar grandes dimensiones, el coste que supone un tratamiento de este tipo en grandes superficies

(la fachada de un monumento, un claustro, etc.), la verticalidad, la absorción irregular del consolidante por la heterogeneidad del sustrato pétreo, las variaciones de las condiciones ambientales y la imposibilidad de eliminar por completo el contenido en sales solubles que pueden dificultar la penetración y la acción consolidante. En el caso concreto de la aplicación mediante perforación y goteo in situ, se debe tener en cuenta los riesgos que suponen las perforaciones en materiales descohesionados, para valorar si es viable su empleo en la práctica real.

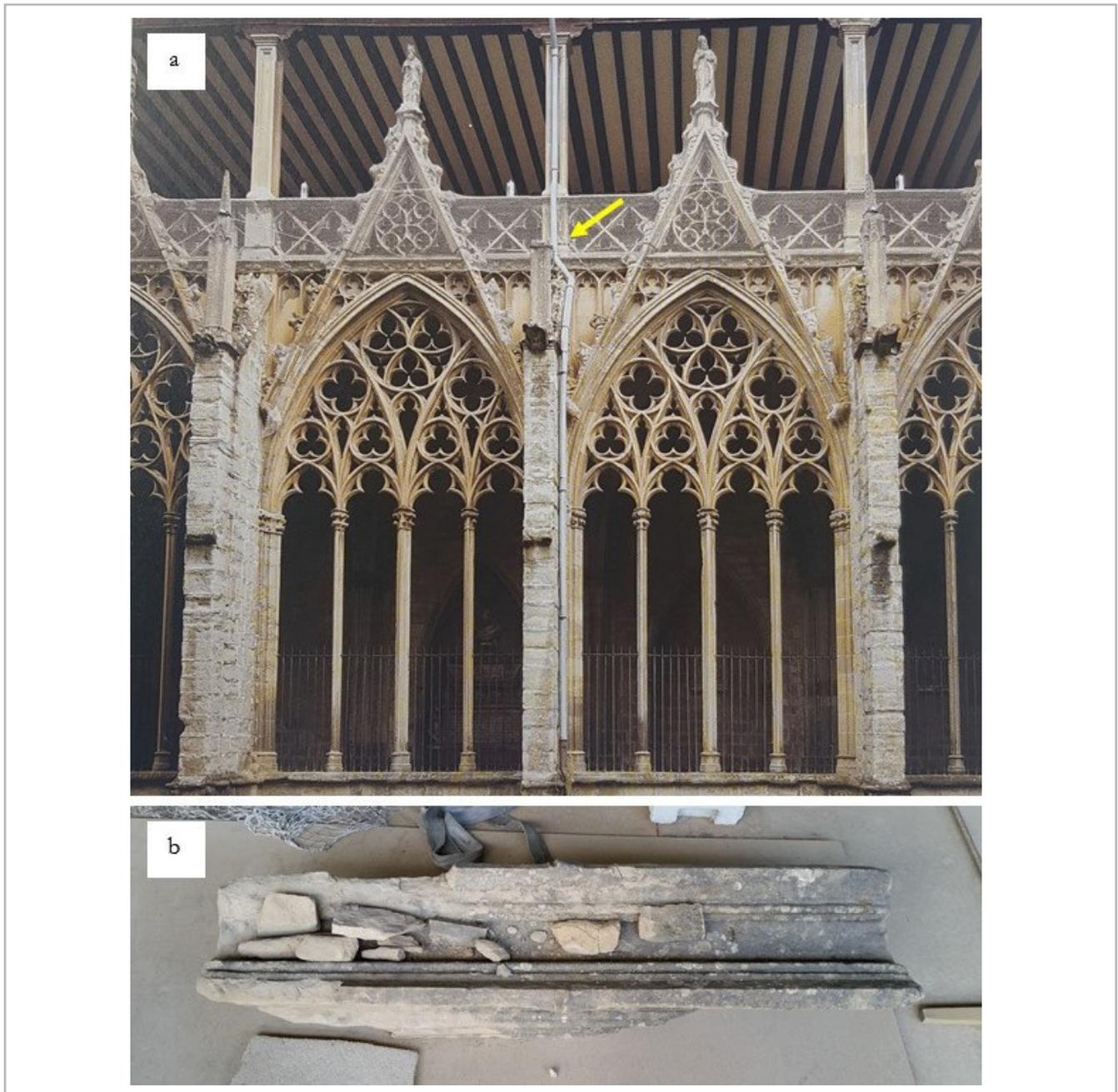
El objetivo de esta investigación es evaluar la influencia del método de aplicación en la eficacia consolidante de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> sobre una arenisca deteriorada (arenisca del claustro de la Catedral de Pamplona donde se empleó dicho producto en los trabajos de restauración) utilizando dos de los métodos de aplicación más empleados, la brocha y el espray, y estudiando el método de aplicación por perforación y goteo como una opción más a utilizar en la restauración in situ de monumentos.

## Metodología empleada

### —Muestras pétreas

El producto consolidante fue aplicado sobre la roca arenisca proveniente del claustro gótico de la Catedral de Pamplona, Navarra. El claustro se edificó entre los siglos XIII-XIV y la galería de la cual fueron extraídas las muestras empleadas en el estudio (fuste +J del ala sur) fue la última fase de construcción del Claustro (Fernández-Ladreda *et al.* 2015). El fuste se encontraba en un pésimo estado de conservación ya que la roca estaba totalmente disgregada y no podía cumplir su función como sustentante del pináculo [figura 1]. A partir del fuste original se tallaron un total de 11 muestras cúbicas (5 x 5 x 5 cm). Debido al mal estado de conservación de la zona más externa y ornamental y a la imposibilidad de emplear estas zonas debido a su avanzado estado de descohesión, las muestras talladas corresponden a la zona interna del fuste. Se emplearon 3 muestras para cada método de aplicación con el fin de obtener valores medios y desviaciones estándar y poder así observar tendencias en los cambios producidos además de estudiar individualmente cada muestra comparando los resultados obtenidos antes y tras la aplicación del tratamiento [tabla 1].

Las muestras de arenisca naranja analizadas, se encuadran geológicamente dentro de las "Arenisca de Liédana", una formación de edad Eoceno que aflora en las proximidades de Pamplona. Desde el punto de vista petrográfico se trata de una arenisca de grano fino (125-250 µm), bien clasificada, compuesta por granos de cuarzo (70%), fragmentos de roca (20%) y menores porcentajes de feldespatos y moscovita, clasificable como una sublitarenita; otras características destacables son un claro predominio de los fragmentos de roca arcillosa sobre los carbonatados, una notable porosidad intergranular (en



**Figura 1.-** (a) Fachada de la galería sur del claustro de la Catedral de Pamplona antes de la fase de restauración (Imagen de Fernández-Ladreda *et al.* 2015). (b) Fuste retirado de la galería sur empleado para el estudio.

**Tabla 1.-** Muestras pétreas, método de aplicación, cantidad de producto aplicado y condiciones ambientales.

Material pétreo	Nomenclatura	Método de aplicación	Cantidad de producto aplicado	Condiciones ambientales
Arenisca naranja (Arenisca de Liédena)	C1	-	-	Temperatura de $20 \pm 0,5^\circ \text{C}$ y humedad relativa de $82 \pm 4,4\%$
	C2			
	S1	Espray	20 g	
	S2			
	S3			
	B1	Brocha	20 g	
	B2			
	B3			
	G1	Perforación y goteo		
G2				
G3				

torno al 15%) y un escaso material cementante (1-13%) de naturaleza fundamentalmente carbonatada (Arbotante, 2008). La relación de fragmentos carbonatados frente a los fragmentos silicatados es muy baja, siendo por tanto compatibles las nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ . Por último, en el estudio de Arbotante (2008) se establece que la roca (arenisca naranja o litotipo 1) tiene una anisotropía natural de laminación paralela pero, los resultados de succión capilar (relacionados con la absorción del consolidante aplicado) muestran una gran cercanía entre las distintas orientaciones, concluyendo que la anisotropía no tiene una gran influencia frente a este parámetro progresando la succión capilar de igual manera independientemente de la orientación de la laminación.

—*Producto consolidante: Nano Estel*

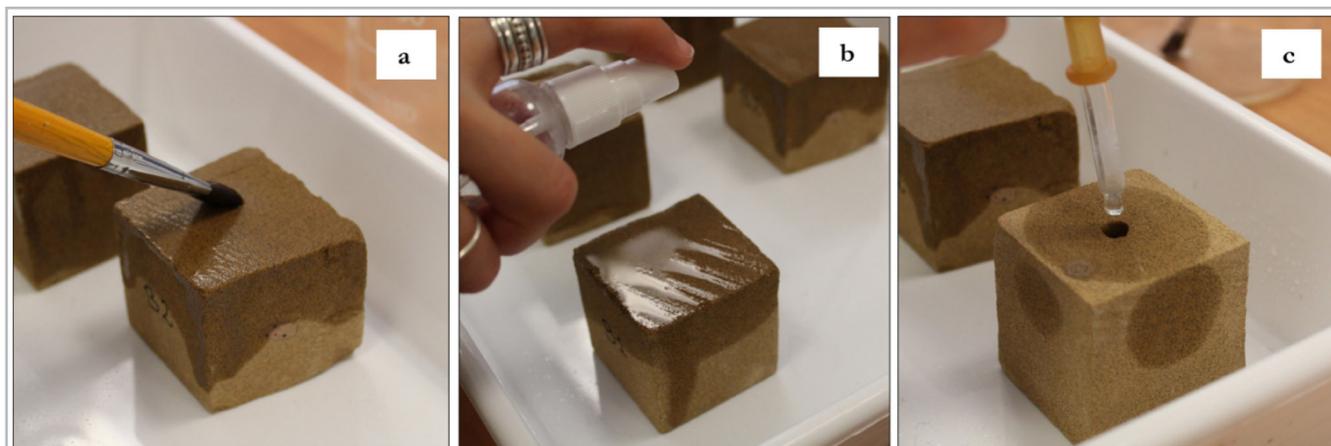
El producto fue escogido por ser un producto basado en nanopartículas novedoso disponible en el mercado, y que comienza a emplearse de manera más habitual, siendo asimismo uno de los productos utilizados en los trabajos de restauración llevados a cabo en el claustro de la Catedral de Pamplona.

El Nano Estel (C.T.S., 2015b) es una dispersión acuosa coloidal de sílice con dimensiones en torno a 10-20 nm, presentándose como un líquido fluido con un residuo seco del 30%. Este producto se emplea en la consolidación de materiales pétreos, como aglutinante de pigmentos naturales o como ligante de inertes para la realización de morteros. Aunque el fabricante recomienda diluirlo con 1-2 partes de agua (reduciendo la materia activa al 10-15%), en este trabajo se ha diluido en 3 partes de agua debido a que fue la concentración empleada en los tratamientos de consolidación del claustro de la Catedral de Pamplona. La cantidad de producto necesaria para consolidar cada espécimen se calculó por medio de la cantidad total de agua absorbida a presión atmosférica por capilaridad (UNE-EN 15801:2010, Aenor, 2010) aplicando finalmente 20g de producto en cada muestra con brocha, spray y perforación y goteo [figura 2]. En el caso de la aplicación mediante

perforación y goteo las muestras fueron perforadas a una profundidad de 2,5 cm con una broca de 5 mm de diámetro, de manera que la oquedad quedara en el centro de la muestra para que el consolidante la impregnara desde el núcleo y se expandiera de la forma más homogénea posible. El consolidante se aplicó en una sola cara de las muestras para simular el tratamiento in situ. Las muestras fueron expuestas en una cámara climática durante 15 días a unas condiciones ambientales de  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$  y una humedad relativa (HR) de  $82 \pm 4,4\%$  seleccionadas por ser similares a las condiciones ambientales en las que fueron aplicadas las nanopartículas in situ en la catedral (del 10 de junio al 31 de agosto del 2018). Se introdujo un dispositivo de control ambiental Hobo U12-013 para registrar las condiciones utilizando el software Hoboware con un rango de temperatura de  $-20-70 \pm 0,35^\circ\text{C}$  y  $5-95 \pm 2,5\%$  HR. Para mantener la HR se empleó una solución súper saturada de cloruro sódico. Para evitar el contacto entre las muestras y la solución salina, estas se depositaron en una bandeja perforada por encima de la solución. El recipiente fue sellado con un film transparente adhesivo y para evitar la condensación y facilitar la evaporación del solvente se realizaron perforaciones.

—*Técnicas instrumentales analíticas*

Las muestras fueron estudiadas empleando diferentes técnicas instrumentales analíticas y métodos de ensayo de caracterización portátiles no destructiva o microdestructivas antes del tratamiento y después de 15 días tras la aplicación del consolidante. El empleo de este tipo de técnicas (portátiles y no destructivas) se basa en que una de las mayores problemáticas a la hora de estudiar la eficacia de los productos aplicados en bienes arquitectónicos inmuebles es la dificultad de analizar los resultados obtenidos in situ. Para poder llevar a cabo estas investigaciones cuantitativas, entre los aspectos más relevantes a tener en cuenta para seleccionar las técnicas y métodos de análisis necesarios y adecuados según el objetivo que se persigue son por un lado, la limitación de toma de muestras y por otro, la necesidad de técnicas



**Figura 2.-** Métodos de aplicación llevados a cabo en la investigación. (a) brocha; (b) spray; (c) perforación y goteo.

portátiles. En cuanto a la limitación de toma de muestras, a la hora de utilizar técnicas de análisis aplicadas a materiales del Patrimonio Cultural para cuantificar la eficacia de los tratamientos y seleccionar los más adecuados según las características de cada caso (tipo de material pétreo, estado de conservación, condiciones ambientales...), se ha de tener en cuenta que cualquier muestreo significa una pérdida irreparable artística y cultural. Es por ello, que se han de utilizar en la medida de lo posible, técnicas no destructivas que eviten la toma de muestras y que permitan realizar análisis directos minimizando su manipulación y posible deterioro. Por otro lado, tanto in situ como en el trabajo realizado en laboratorio, las técnicas de análisis no destructivas permiten llevar a cabo distintas investigaciones en una misma zona o muestra pudiendo comparar los resultados obtenidos tanto en la aplicación de tratamientos de conservación-restauración como en el deterioro producido debido a ensayos de envejecimiento acelerado en una misma muestra aumentando la reproducibilidad de los resultados al disminuir la influencia de la heterogeneidad y anisotropía de las muestras pétreas. En cuanto a la necesidad de técnicas portátiles, en el caso de bienes patrimoniales inmuebles, estas técnicas son necesarias debido a la imposibilidad de mover los elementos constructivos que lo componen.

El comportamiento mecánico se evaluó a través de la velocidad de propagación de ultrasonidos, el test de adhesión superficial y la resistencia a la microperforación. La velocidad de propagación de ultrasonidos se empleó para evaluar indirectamente las propiedades mecánicas de las muestras relacionadas con los cambios de porosidad. El equipo utilizado fue el Proceid Pundit PL200, con una precisión de 0,1  $\mu$ s midiendo las ondas longitudinales de forma directa transmisión/recepción. Las recomendaciones de la norma UNE-EN 14579 (Aenor, 2005) fueron seguidas con algunas diferencias respecto a la forma y dimensiones de las probetas (utilizando muestras cúbicas de 5x5x5 cm). La frecuencia de los transductores utilizados fue de 54 kHz. Por cada muestra se realizaron un total de tres medidas en los diferentes ejes espaciales (X, Y y Z) para obtener valores promedio de la velocidad de propagación de ultrasonidos ( $V_p$ ). El test de adhesión superficial se realizó siguiendo el método normalizado por Drdácý *et al.* (2012) para evaluar la efectividad del tratamiento con el análisis del material liberado de las muestras, utilizando cinta adhesiva de doble cara transparente (Tesa) de 1,5 cm ancho x 5 cm de largo, 2 zonas de medida (10 secuencias de aplicación) y 90 s por cada secuencia. La resistencia a la microperforación se empleó para establecer la resistencia tanto superficial como en profundidad, aportando datos sobre la efectividad y penetración del producto aplicado. Para ello se empleó el equipo de Sistema de Medida de Resistencia a la Perforación (Drilling Resistance Measurement System), modelo DRMS Cordless fabricado por Sint Technology. La operación se controló mediante el software DRMS Cordless, donde se registró la posición del taladro con un intervalo de 0,1 mm y la correspondiente fuerza de perforación (N). Se realizaron un total de 3 medidas por muestra. Se llevaron a cabo

pruebas previas para determinar las condiciones óptimas de ensayo (velocidad de penetración 5 mm/min, velocidad de rotación de 600 rpm hasta 25 mm de profundidad y 5 mm de diámetro de broca).

El comportamiento hídrico se estudió a través del ensayo de absorción de agua por capilaridad UNE-EN 15801:2010 (Aenor, 2010) para determinar los cambios producidos en la cantidad de agua absorbida y en el coeficiente capilar. Las unidades de medida empleadas fueron  $g/(m^2s^{1/2})$  en vez de  $kg/(m^2s^{1/2})$ . Este tipo de ensayos de medición de absorción de agua y modificaciones en el comportamiento hídrico pueden realizarse in situ mediante esponjas de contacto o mediante el método de la pipeta.

La espectrofotometría se realizó con un espectrofotómetro ColorEye® XTH y el software Color IQC de X-Rite usando el espacio cromático CieLab para medir las variaciones cromáticas producidas tras la aplicación del producto. Para ello se siguió la norma UNE-EN 15886:2011 (Aenor 2011), el iluminante utilizado fue el D65 y el observador estándar de 10°. Los parámetros estudiados fueron luminosidad ( $L^*$ ), coordenada cromática  $a^*$  (indica la posición entre el rojo y el verde), coordenada cromática  $b^*$  (indica la posición entre el amarillo y el azul) y la diferencia total del color calculada a través de la fórmula  $\Delta E^* = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2}$  (Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), 1986).

## Resultados y discusión

### —Propiedades mecánicas

#### •Velocidad de propagación de ultrasonidos

Las variaciones de la velocidad de propagación de ultrasonidos ( $\Delta V_p\%$ ) debidos a la aplicación del producto pueden observarse en la tabla 2. En todas las muestras se produce un aumento de  $V_p$  tras la aplicación del consolidante. Este aumento se debe al incremento de la densidad de la roca debido a una de la porosidad como consecuencia del relleno de los poros por el producto consolidante cohesionando la roca disgregada y aportando resistencia (Montoto 1996; Zornoza-Indart y López-Arce 2016).

El incremento de  $V_p$  en las muestras tratadas con spray y brocha es muy similar ( $20,2 \pm 2,5\%$  y  $19,4 \pm 6,9\%$  respectivamente). En investigaciones llevadas a cabo por otros autores el incremento de  $V_p$  no es tan elevado (Zornoza *et al.* 2018; Zornoza-Indart y López Arce 2016), por lo tanto, se observa que el producto aplicado mediante spray y brocha ha penetrado y no ha consolidado las muestras únicamente de forma superficial. Esta penetración del producto puede deberse al alto grado de deterioro del sustrato y a la porosidad del material, presentando poros capilares (macroporos entre 3  $\mu$ m - 80  $\mu$ m) que favorecen la introducción del producto en la estructura interna del sustrato (Martínez y Blanco, 2011) quedando patente la

**Tabla 2.-** Velocidad de propagación de ultrasonidos (Vp) en las tres direcciones espaciales (X, Y y Z) y la variación de Vp antes y después tras 15 días de la aplicación del tratamiento de consolidación con nanopartículas de SiO<sub>2</sub>.

Muestra	Método de aplicación	Vp media en los tres ejes (m/s)			
		Antes	Después	ΔVp (%)	Media ΔVp (%)
S1	Espray	1625 ±525,8	1958 ±567,9	20,5	20,2 ± 2,5
S2		1603,7 ±110,3	1965,7 ± 116,8	22,6	
S3		1753 ±238,9	2062 ±216,4	17,6	
B1	Brocha	1904,3 ± 142,8	2206 ±136,9	15,8	19,4 ± 6,9
B2		1853,3 ±201,5	2130,3 ±267,7	14,9	
B3		1894 ±184,7	2411 ±109,5	27,3	
G1	Perforación y goteo	1825 ±232,8	2239 ±218,9	22,7	30,2 ± 6,9
G2		1585,3 ±247,7	2083,3 ±126,5	31,4	
G3		1371,7 ± 328,6	1870,7 ±195,6	36,4	



**Figura 3.-** Detalle de la acumulación de producto en la muestra tratada con brocha (53,2 x).

del mismo. El producto se ha repartido de forma más homogénea en la estructura interna del material pétreo, expandiéndose hasta las caras laterales de las muestras. Además, el mayor incremento de Vp puede deberse a la acción más efectiva del consolidante por la evaporación más lenta del agua, manteniéndose más tiempo dentro de la estructura porosa de la roca permitiendo que fluya por el interior del sistema poroso. Por el contrario, los métodos de brocha y espray se aplican sobre la superficie de las muestras, que al estar en contacto directo con el ambiente hacen que el disolvente se evapore más rápido, quedando en ocasiones acumulaciones del producto [figura 3].

relevancia de las propiedades petrofísicas propias del sustrato para la eficacia de los tratamientos.

Las muestras tratadas mediante perforación y goteo sufren el mayor incremento de Vp (30,2±6,9%). Este mayor incremento se debe a que el producto ha consolidado internamente el material pétreo al aplicarlo en el núcleo

#### •Test de adhesión superficial

Los resultados del test de adhesión superficial [tabla 3] muestran una disminución significativa en el material liberado, conllevando por tanto una alta eficacia consolidante superficial. La disminución del material liberado es mayor en la aplicación mediante brocha (-97,2%), seguida de la aplicación con espray (-85,3%), y la aplicación mediante perforación y goteo (-60%).

**Tabla 3.-** Material liberado (mg) en el test de adhesión superficial en las muestras control y las muestras tras 15 días de aplicación del tratamiento de consolidación con nanopartículas de SiO<sub>2</sub>.

Secuencia del Test	Material desprendido (mg)											
	Muestras control		Espray			Brocha			Perforación y goteo			
	C1	C2	S1	S2	S3	B1	B2	B3	G1	G2	G3	
1	1,16	0,56	0,37	0,23	0,08	0,05	0,04	0,06	0,41	0,27	0,20	
2	0,78	0,66	0,14	0,10	0,04	0,02	0,03	0,03	0,38	0,22	0,22	
3	0,72	0,41	0,09	0,02	0,05	0,03	0,03	0,01	0,32	0,29	0,09	
4	0,68	0,48	0,06	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01	0,32	0,16	0,14	
5	0,74	0,41	0,19	0,08	0,01	0,02	0,01	0,00	0,24	0,34	0,17	
6	0,38	0,32	0,08	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,32	0,14	0,08	
7	0,27	0,37	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,13	0,12	
8	0,29	0,19	0,09	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,09	0,09	
9	0,19	0,30	0,06	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,06	0,04	
10	0,18	0,17	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,09	0,10	
Total del material liberado (mg)	5,39	3,87	1,15	0,66	0,24	0,15	0,12	0,11	2,48	1,80	1,26	
Media del material liberado (mg)	4,63 ±1,08		0,68 ± 0,46			0,13 ± 0,02			1,85 ± 0,61			
Disminución del Material liberado (%)			-85,3			-97,2			-60			

Los resultados muestran por tanto que en la aplicación con espray y brocha la disminución del material liberado es significativa y muy superior al caso de la perforación y goteo. Sin embargo, cuando se aplica el producto con brocha o espray, la superficie del sustrato se satura con facilidad con poca cantidad de producto, lo que genera capas o costras superficiales del producto que podrían incrementar la resistencia superficial dañina y generar deterioros diferenciales [figura 3], aunque, teniendo en cuenta su aplicación in situ y según el caso, esto puede suponer aspectos positivos ya que la consolidación superficial es esencial para no generar zonas débiles (Fort 2009).

En el método de aplicación de perforación y goteo, aunque la cantidad de material liberado se reduce (-60%) la cantidad de material liberado es superior debido a que la consolidación se realiza internamente y no sobre la superficie del sustrato, como se muestra en los resultados de ultrasonidos.

#### •Resistencia a la microperforación

Los resultados de la resistencia a la microperforación tras 15 días de la aplicación de las nanopartículas de sílice se muestran en la tabla 4. Entre las muestras tratadas y sin tratar se observa un aumento en la heterogeneidad (visible en el aumento de las desviaciones estándar) posiblemente derivada de una distribución no homogénea del producto aumentando la dureza en algunas zonas, pero no en la totalidad del material pétreo. En los tres métodos de aplicación se ha producido un incremento de la resistencia a la microperforación, lo que supone que el producto consolidante ha penetrado en la matriz porosa del sustrato pétreo mejorando las propiedades mecánicas.

El método de aplicación con espray incrementa la dureza hasta un 47% lo que supone una mayor penetración del producto mediante este método en comparación con la aplicación a brocha (21%), pudiendo estar la diferencia en que en el caso de la brocha la superficie se satura con más facilidad por la fricción de la herramienta removiendo los componentes de la superficie dificultando la penetración y generando acumulaciones de producto, quedando el

producto en superficie lo que coincide con los resultados del test de adhesión superficial y la acumulación de producto en la cara tratada. Se ha de tener en cuenta que si la superficie del material pétreo a tratar está descohesionada la aplicación mediante pincel puede causar deterioros en la superficie al movilizar los granos descohesionados (Villegas *et al.* 2003), con el riesgo de ocluir la superficie del sustrato imposibilitando la penetración del consolidante (Ziegenbalg *et al.* 2018). Tanto es así que, para consolidar superficies muy deterioradas, Baglioni *et al.* (2015) aconsejan el empleo de papel Japón entre el sustrato y el pincel para evitar la movilización, acumulación y pérdida de partículas de la superficie.

El método de aplicación mediante perforación y goteo muestra los mayores valores de resistencia a la microperforación (54%). Relacionando los datos con los obtenidos en la velocidad de propagación de ultrasonidos, el consolidante al aplicarse desde el núcleo de la muestra se expande homogéneamente dentro de la matriz porosa de la muestra llegando hasta las caras laterales, por lo que la dureza aumenta en su conjunto y no sólo de forma superficial como el caso de la brocha.

#### — Comportamiento hídrico

En todas las muestras se produce un descenso de la cantidad de agua absorbida tras la aplicación del producto consolidante [tabla 5] producida por una reducción de la porosidad interna. Sin embargo, estas reducciones son leves (-3,91±0,47, -5,7±0,95 y -0,34±0,37) y la cinética de absorción no se modifica [figura 4].

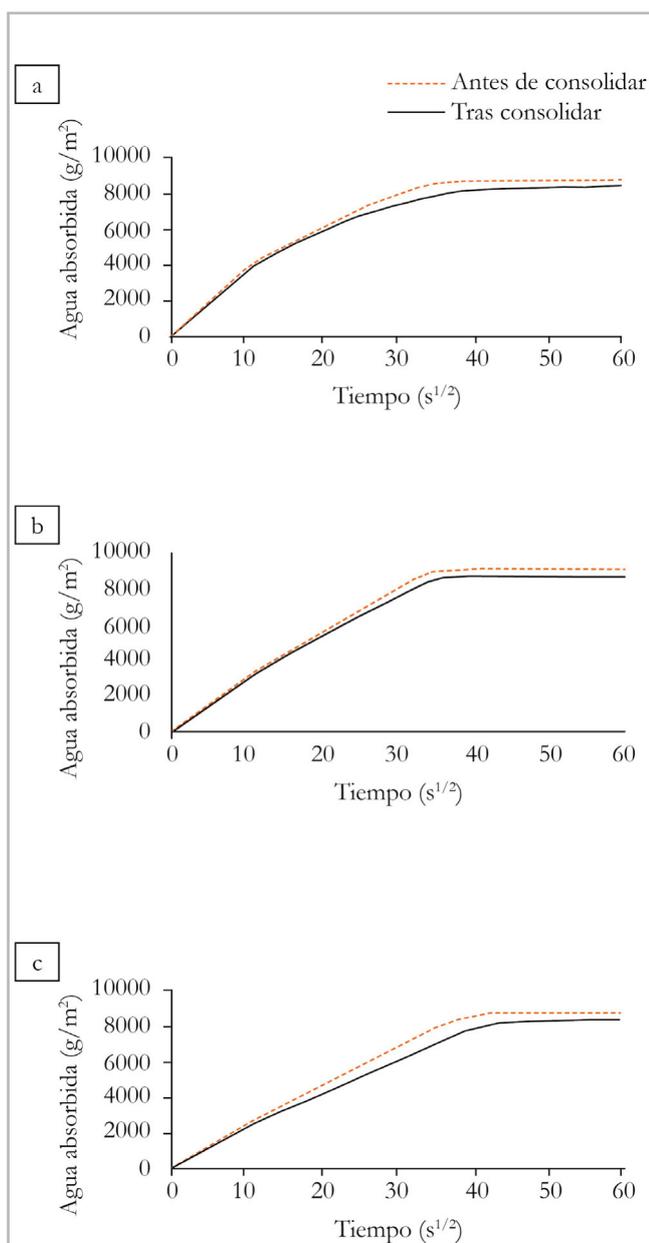
En los tres métodos de aplicación se produce una disminución en el coeficiente de absorción capilar [tabla 5], que es semejante en las muestras tratadas mediante brocha y perforación y goteo (-7±3,51 y -6,98±0,88 respectivamente) y menor en el caso del espray (-5,48±0,56). Esta disminución se traduce en que las muestras absorben agua más lentamente, lo que podría deberse a que las nanopartículas de sílice forman una red microporosa en el interior del sustrato pétreo que dificulta el transporte capilar ralentizando su absorción (Martínez y Blanco 2011; Buj y Gisbert 2007). Sin embargo, es un cambio muy leve

**Tabla 4.-** Valores (Fuerza, N) y variación ( $\Delta$ ) de la resistencia a la microperforación de las muestras pétreas antes y tras 15 días de la aplicación del tratamiento de consolidación con nanopartículas de SiO<sub>2</sub>.

Muestra	Método de aplicación	Fuerza (N)	$\Delta$ (%)
Control	-	6,18±0,55	-
S3	Espray	9,1±2,15	47
B3	Brocha	7,47±2,35	21
G3	Perforación y Goteo	9,5±2,55	54

**Tabla 5.-** Valores y variación ( $\Delta$ ) de la absorción de agua por capilaridad de las muestras pétreas antes y tras 15 días de la aplicación del tratamiento de consolidación con nanopartículas de SiO<sub>2</sub>.

Muestra	Método de aplicación	Absorción total de agua por capilaridad (g)				Coeficiente capilar (g/(m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> ))			
		Antes	Después	$\Delta$ (%)	Media (%)	Antes	Después	$\Delta$ (%)	Media (%)
S1	Espray	21,8	21	-3,7	-3,91±0,47	376,26	357,99	-4,86	-5,48 ±0,56
S2		24,7	23,6	-4,5		325,11	306,85	-5,62	
S3		22,2	21,4	-3,6		306,85	288,58	-5,95	
B1	Brocha	21,7	20,7	-4,6	-5,7±0,95	288,58	277,63	-3,79	-7±3,51
B2		23,5	22	-6,4		339,73	317,81	-6,45	
B3		21,3	20	-6,1		339,73	303,2	-10,75	
G1	Perforación y Goteo	20,6	19,9	-3,4	-3,74±0,37	233,79	219,18	-6,25	-6,98 ±0,88
G2		21,8	20,9	-4,1		325,11	303,2	-6,74	
G3		24,3	23,4	-3,7		321,46	295,89	-7,95	



**Figura 4.-** Resultados del ensayo de absorción capilar antes y tras 15 días del tratamiento de consolidación con nanopartículas de SiO<sub>2</sub>. (a) método de aplicación con espray -S1; (b) método de aplicación con brocha-B1; (c) método de aplicación por perforación y goteo-G1.

comparándolo con otros estudios en los que se analizan los cambios producidos en el comportamiento hídrico tras la aplicación de silicatos de etilo en los que se observó una reducción en el coeficiente de capilaridad en torno al -45±11% obstruyendo la porosidad y creando zonas diferenciales entre la zona tratada y sin tratar (Zornoza-Indart *et al.* 2016), lo que supone importantes cambios en la circulación del agua a través del sistema poroso de la piedra, que implica una reducción de la permeabilidad al vapor de agua y una posible acumulación de agua en el interior del sistema poroso (Fort 2011).

— *Espectrofotometría*

Los cambios en los parámetros cromáticos sufridos por las muestras debidos a la aplicación del producto consolidante pueden observarse en la tabla 6. En todos los casos se producen variaciones en los parámetros cromáticos y, a pesar de que siguen la misma tendencia en los tres métodos de aplicación, los cambios producidos son mayores en el caso de la aplicación del producto mediante perforación y goteo.

En todas las muestras tratadas con espray, brocha y perforación y goteo, la luminosidad ( $\Delta L^*$ ) se reduce oscureciendo la superficie del sustrato (-5,93±1,74; -5,56±0,29; y -8,44±0,62 respectivamente). El parámetro a\* no experimenta variaciones significativas en ningún caso, mientras que el parámetro b\* aumenta en el caso del espray y la perforación y goteo (3,49±1,67 y 2,78±0,34 respectivamente), lo que significa que el color de la superficie tiende al amarillo. Estas variaciones implican una diferencia de color total ( $\Delta E^*$ ) de 7,26±1,72 en el caso del espray, 5,63±0,33 en el caso de la brocha y 9,1±0,7 en el caso de la perforación y goteo; por lo tanto, son visibles a simple vista, ya que  $\Delta E^*$  es superior a 5 (NORMAL 20/85, 1996) o superior a 3 según otros autores (Delgado Rodrigues y Grossi 2007; Benavente *et al.* 2003). Esto significa una posible incompatibilidad en cuanto a los criterios que debe seguir un producto consolidante utilizado en la restauración del patrimonio arquitectónico, ya que la piedra no debe sufrir cambios de color o brillo a causa de un tratamiento (VV.AA. 2013; Villegas *et al.* 2003).

**Tabla 6.-** Variaciones ( $\Delta$ ) en los parámetros cromáticos (parámetros  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  y  $\Delta E^*$ ) de las muestras tras 15 días de la aplicación del tratamiento de consolidación con nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ .

Muestra	Método de aplicación	$\Delta L^*$	$\Delta$ Medio	$\Delta a^*$	$\Delta$ Medio	$\Delta b^*$	$\Delta$ Medio	$\Delta E^*$	$\Delta$ Medio
S1	Espray	-6,4		2,29		5,27		8,6	
S2		-4,01	$-5,93 \pm 1,74$	1,41	$1,83 \pm 0,44$	3,22	$3,49 \pm 1,67$	5,33	$7,26 \pm 1,72$
S3		-7,39		1,79		1,97		7,85	
B1	Brocha	-5,76		0,83		0,68		5,86	
B2		*	$-5,56 \pm 0,29$	*	$0,71 \pm 0,17$	*	$0,46 \pm 0,32$	*	$5,63 \pm 0,33$
B3		-5,35		0,59		0,24		5,39	
G1	Perforación y Goteo	-9,16		2,16		3,06		9,9	
G2		-8,08	$-8,44 \pm 0,62$	1,96	$1,96 \pm 0,2$	2,87	$2,78 \pm 0,34$	8,8	$9,1 \pm 0,7$
G3		-8,08		1,75		2,4		8,6	

Al producirse cambios cromáticos perceptibles al ojo humano, adquiere relevancia el factor de la uniformidad del cambio cromático producido a la hora de aplicar el producto in situ. Los métodos de aplicación con espray y brocha, aunque han producido un cambio de color uniforme, se ha de tener en cuenta que se han aplicado de forma horizontal en las muestras y que, en el caso de su aplicación in situ la verticalidad juega un papel importante a la hora de consolidar, ya que, el producto debido a su baja viscosidad y a la gravedad tiende a desplazarse hacia abajo dificultando su control pudiendo generar diferencias en la cantidad de producto aplicado y grado de absorción pudiendo producir un cambio de color no uniforme en la superficie tratada. En el caso del método de aplicación por perforación y goteo el cambio cromático producido no es homogéneo, sino que el producto consolida desde la zona central hacia las esquinas generando un cambio cromático circular difícilmente corregible [figura 5].

**Figura 5.-** Aspecto final de la muestra G3 tratada mediante perforación y goteo con nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ .

Según el estudio llevado a cabo por La Russa *et al.* (2014), los cambios cromáticos producidos por el Nano Estel pueden variar según la concentración a la que se aplique el producto concluyendo que la concentración que menores cambios produce es la del 20% de residuo seco. Por otro lado, en los estudios llevados a cabo por Lucolano *et al.* (2019) y Zornoza-Indart *et al.* (2016), donde diluyeron el producto a una concentración de 15% de residuo seco, la aplicación del producto sobre diferentes sustratos pétreos no provocó variaciones cromáticas detectables al ojo humano ( $\Delta E^* < 3$ ). En este estudio el producto se ha diluido en 3 partes de agua, llevando el residuo seco a una concentración de 3,75%, obteniendo valores de  $\Delta E^*$  mayores a 5 en los tres métodos de aplicación. El cambio cromático superior producido en las muestras tratadas mediante perforación y goteo ( $\Delta E^* 9,1 \pm 0,7$ ) podría relacionarse con las propiedades intrínsecas del material pétreo y su estado de descohesión, que provocarían cambios cromáticos mayores que en los otros dos métodos de aplicación (brocha y espray). La aplicación del producto desde la parte interna del material pétreo hacia las partes externas, provocaría un transporte hacia las zonas exteriores de elementos disgregados con el consiguiente cambio cromático en la superficie [figura 5].

### Conclusiones

Los resultados del estudio de la eficacia consolidante del producto mediante el empleo de técnicas de análisis portátiles no destructivas o microdestructivas, pone de manifiesto la posibilidad de realizar estudios sobre la eficacia e idoneidad de los tratamientos y productos de conservación-restauración mediante este tipo de técnicas que pueden utilizarse de una forma sencilla in situ pudiéndose emplear en las obras de restauración arquitectónica permitiendo realizar estudios previos in situ para determinar los tratamientos y productos más adecuados en cada caso.

Los resultados obtenidos demuestran que el método de aplicación influye en la efectividad del producto

consolidante basado en nanopartículas de sílice, por lo tanto, su selección es determinante a la hora de realizar tratamientos de consolidación y estos deben de ser escogidos según el estado de conservación del material pétreo (deterioro superficial, interno o ambos).

En los tres métodos de aplicación se observa que su distribución no es homogénea ni abarca toda la muestra pétreo, como puede verse en las diferencias entre los cambios producidos en las zonas internas y en las propiedades superficiales. Esta distribución no homogénea ha de tomarse en consideración ya que puede generar comportamientos diferenciales entre las zonas en las que ha penetrado o se acumula el consolidante y las zonas sin tratar. Sin embargo, en este caso como la reducción en la cantidad de agua absorbida, así como el coeficiente capilar, es un cambio muy leve, no se observan cambios que puedan relacionarse con modificaciones drásticas en la porosidad interna, reduciendo la posibilidad de producirse comportamientos diferenciales.

En el caso de la aplicación del producto mediante spray, este tiene una eficacia elevada en la consolidación superficial, como demuestra el hecho de que la cantidad de material liberado disminuya. Sin embargo, también se observa eficacia consolidante en el interior del material pétreo ya que se produce un aumento de la velocidad de propagación de ultrasonidos y un descenso en la cantidad de agua absorbida lo que suponen un relleno de la porosidad. Esta consolidación interna también se observa en el incremento de las propiedades mecánicas con el aumento de la resistencia a la microperforación.

En el caso de la aplicación del producto mediante brocha la eficacia consolidante se centra en la superficie como puede observarse en la reducción del material liberado. Por lo tanto, este método sería adecuado en el caso de aplicar un tratamiento consolidante en superficies descohesionadas donde el material interno se encuentre en buen estado. En el caso de tener como objetivo la consolidación del material pétreo más allá de su superficie, este método no parece resultar adecuado ya que, es el que menos cambios produce en la parte interna del material (menores aumentos en la velocidad de propagación de ultrasonidos y en la resistencia a la microperforación). Además, comparándolo con el spray, se observa una menor penetración del producto y una mayor acumulación en superficie ya que posiblemente ésta se satura con más facilidad por la fricción de la herramienta removiendo los componentes descohesionados ocluyendo la superficie de las muestras dificultando la penetración.

En el caso de la aplicación del producto mediante el sistema de perforación y goteo, la eficacia consolidante se centra en la parte interna del material. Estos resultados pueden observarse debido a que la disminución del material liberado es mucho menor que en los otros dos casos mientras que, el incremento en las propiedades relacionadas con los aspectos internos del material

(velocidad de propagación del ultrasonidos y resistencia a la microperforación) son los más elevados. Por lo tanto, este método de aplicación es más adecuado para materiales pétreos en los que el deterioro se centre en la zona interna. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que este sistema supone la realización de perforaciones en el material pétreo y su posterior relleno mediante morteros, suponiendo una problemática mayor en materiales descohesionados.

Otra cuestión a tener en cuenta es que, en los tres métodos de aplicación, en especial en el método de perforación y goteo, se producen cambios cromáticos visibles a simple vista. Siguiendo los criterios utilizados para evaluar la idoneidad de los tratamientos de conservación, las variaciones producidas se consideran no adecuadas ya que, la aplicación de un tratamiento no debería ser detectado visualmente y afectar significativamente a los parámetros cromáticos del material tratado.

La comparación con otros estudios pone en relevancia la importancia de las propiedades intrínsecas del material, ya que la penetración del producto es elevada comparando los datos con otras investigaciones debido al grado de deterioro del sustrato y a la elevada porosidad del material pétreo.

Por último, cabe mencionar que para la realización del estudio se ha empleado arenisca original extraída de la zona interna de uno de los fustes del claustro, con una notable descohesión, aunque en cualquier caso menor a la existente en las zonas más externas y ornamentales. Esto hace que los resultados obtenidos sean orientativos, debido a la enorme variabilidad del estado de conservación del monumento y la imposibilidad de reproducir este estado en las muestras, por lo que los resultados se centran en poner de relieve la influencia del método de aplicación en la eficacia del producto consolidante. Además, se ha de tener en cuenta también que los resultados obtenidos muestran la eficacia consolidante del producto según el método de aplicación tras su aplicación y que, será necesario realizar ensayos de envejecimiento acelerado para determinar si los cambios producidos aumentan la durabilidad de los materiales pétreos bajo condiciones ambientales agresivas a largo plazo.

### Agradecimientos

Las autoras agradecen a Violeta Romero de la Institución Príncipe de Viana (Gobierno de Navarra), por la donación de uno de los fustes retirados del claustro de la Catedral de Pamplona, Blanca Sagasti de la empresa SAGARTE por el trabajo llevado a cabo en el claustro, Blanca Narbona, Basilio Fernández y Beatriz Arrugaeta del Laboratorio General de la Diputación de Álava por su ayuda en análisis de las muestras y a Gonzalo Diarce y Ane Miren García de la Escuela de Ingeniería de Bilbao por su ayuda en el desarrollo del peeling test.

## Referencias

- AENOR (2005). UNE-EN 14579:2005. *Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la velocidad de propagación del sonido*. Madrid, España.
- AENOR (2010). UNE-EN 15801:2010. *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad*. Madrid, España.
- AENOR (2011). UNE-EN 15886:2011. *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición del color de superficies*. Madrid, España.
- ARBOTANTE (2008). *Estudio del material pétreo y su patología en el claustro y sobreclaustro de la Catedral de Pamplona*. Informe. Departamento de ciencias de la tierra. Universidad de Zaragoza.
- BAGLIONI, P., CHELAZZI, D., GIORGI, R. (2015). *Nanotechnologies in the Conservation of Cultural Heritage. A compendium of materials and techniques*. Springer Netherlands.
- BARAJAS, M., BOSCH, P., MALVAÉZ, C., BARRAGÁN, C., LIMA, E. (2010). "Stabilization of the Tlaltecuhltli monolith pigments", *Journal of Archaeological Science*, 37: 2881-2886. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.029>
- BENAVENTE, D., MARTÍNEZ-VERDU, F., BERNABEU, A., VIQUEIRA, V., FORT, R., GARCÍA DEL CURA, M. A., ORDOÑEZ, S. (2003). "Influence of surface roughness on color changes in building stones", *Color Research & Application*, 28: 343-351. <https://doi.org/10.1002/col.10178>
- BRIFFA, S., SINAGRA, E., VELLA, D. (2012). *Teos based consolidants fro maltese globigerina limestone: Effect of hydroxyl conversion treatment*. Paper presented at the 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, New York.
- BUJ, O., GISBERT, J. (2007). "Cuantificación de la porosidad en Areniscas mediante análisis digital de imágenes", *Geoceta*, 41: 35-38.
- C.T.S. ESPAÑA. (2015a) Ficha técnica Estel 1000.
- C.T.S. ESPAÑA. (2015b). Ficha técnica Nano Estel.
- CNR-ICR. (1996). NORMAL 20/85. Interventi conservativi: progettazione esecuzione e valutazione preventiva. Milan (Italy).
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE (CIE). (1986). *Colorimetry*. Vienna, Austria.
- CULTRONE, G., Y MADKOUR, F. (2013). "Evaluation of the effectiveness of treatment products in improving the quality of ceramics used in new and historical buildings", *Journal of Cultural Heritage*, 14: 304-310. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.08.001>
- DELGADO-RODRIGUES, J., GROSSI, A. (2007). "Indicators and ratings for the compatibility assessment of conservation actions", *Journal of Cultural Heritage*, 8: 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.04.007>
- DOEHNE, E., PRICE, C. (2010). *Stone Conservation. An Overview of Current Research*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- DRDÁCKÝ, M., LESAK, J., RESCIC, S., SLÍZKOVÁ, Z., TIANO, P., VALACH, J. (2012). "Standardization of peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces", *Materials and Structures*, 45: 505-520. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9778-x>
- FERNÁNDEZ-LADREDA, C., MARTÍNEZ, C.J., MARTÍNEZ, J., LACARRA, M.C. (2015). *El arte gótico en Navarra*. Pamplona: Ediciones Gobierno de Navarra.
- FERREIRA, A. P., DELGADO, J. (2008). "Stone consolidation: The role of treatment procedures", *Journal of Cultural Heritage*, 9: 38-53. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.004>
- FERREIRA, A. P., DELGADO, J. (2012). "Consolidation of carbonate stones: Influence of treatment procedures on the strengthening action of consolidants", *Journal of Cultural Heritage*, 13: 154-166.
- FORT, R. (2009). "La piedra natural y su presencia en el patrimonio arquitectónico", *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 17.1: 16-25.
- FORT, R. (2011). "Tratamientos de conservación y restauración de geomateriales: tratamientos de consolidación e hidrofugación". En *La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio*. Madrid: Programa Geomateriales, 125-132.
- GHENO, G., BADETTI, E., BRUNELLI, A., GANZERLA, R., MARCOMINI, A. (2018). "Consolidation of Vicenza, Arenaria and Istria stones: A comparison between nano-based products and acrylate derivatives", *Journal of Cultural Heritage*, 32: 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.02.013>
- GIRGINOVA, P. I., GALACHO, C., VEIGA, R., SANTOS SILVA, A., CANDEIAS, A. (2018). "Inorganic Nanomaterials for Restoration of Cultural Heritage: Synthesis Approaches towards Nanoconsolidants for Stone and Wall Paintings", *ChemSusChem*, 11: 4168-4182. <https://doi.org/10.1002/cssc.201801982>
- IUCOLANO, F., COLELLA, A., LIGUORI, B., CALCATERRA, D. (2019). "Suitability of silica nanoparticles for tuff consolidation", *Construction and Building Materials*, 202: 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.002>
- LA RUSSA, M. F., RUFFOLO, S. A., ROVELLA, N., BELFIORE, C. M., POGLIANI, P., PELOSI, C., MIROCLE, G. (2014). "Cappadocian ignimbrite cave churches: stone degradation and conservation strategies", *Periodico di Mineralogia*, 83: 187-206. <https://doi.org/10.2451/2014PM0011>
- LICHELLI, M., MALAGODI, M., WETHTHIMUNI, M., ZANCHI, C. (2014). "Nanoparticles for conservation of biocalcarene Stone", *Applied Physics A*, 114: 673-683. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-7973-z>

- LÓPEZ-ARCE, P., ZORNOZA-INDART, A. (2015). "Carbonation acceleration of calcium hydroxide nanoparticles: induced by yeast fermentation", *Applied Physics A*, 120: 1475-1495. <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9341-7>
- LÓPEZ-ARCE, P., GOMEZ-VILLALBA, L. S., PINHO, L., FERNÁNDEZ VALLE, M. E., ÁLVAREZ DE BUERGO, M., FORT, R. (2010). "Influence of porosity and relative humidity on consolidation of dolostone with calcium hydroxide nanoparticles: Effectiveness assessment with non-destructive techniques", *Materials Characterization*, 61: 168-184. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.11.007>
- MARTÍNEZ, S., BLANCO, M.T. (2011). "Caracterización de morteros históricos". En *La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio*. Madrid: Programa Geomateriales, 55-61.
- MONTOTO, M. (1996). "Técnicas no destructivas aplicadas a la conservación del patrimonio histórico". En *Cuadernos Técnicos: Técnicas de Diagnóstico Aplicadas a la Conservación de los Materiales de Construcción en los Edificios Históricos*. Sevilla: Junta de Andalucía, Conserjería de Cultura, Instituto andaluz del patrimonio histórico, 85-94.
- MOSQUERA, M. J. (2013). "Nuevos productos para restauración y conservación del Patrimonio Cultural RIIPAC", *Revista sobre Patrimonio Cultural: Regulación, Propiedad Intelectual e Industrial*, 2: 153-172.
- MOSQUERA, M. J., DE LOS SANTOS, D. M., MONTES, A., VALDEZ-CASTRO, L. (2008). "New Nanomaterials for Consolidating Stone", *Langmuir*, 24: 2772-2778. <https://doi.org/10.1021/la703652y>
- NAIDU, S., LIU, C., SCHERER, G. W. (2015). "Hydroxyapatite-based consolidant and the acceleration of hydrolysis of silicate-based consolidants", *Journal of Cultural Heritage*, 16: 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.01.001>
- POZO-ANTONIO, J.S., OTERO, J., ALONSO, P., I BARBERÀ, X. M. (2019). "Nanolime- and nanosilica-based consolidants applied on heated granite and limestone: Effectiveness and durability", *Construction and Building Materials*, 201: 852-870. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.213>
- RODRIGUEZ-NAVARRO, C., RUIZ-AGUDO, E. (2018). "Nanolimes: from synthesis to application", *Pure and Applied Chemistry*, 90: 523-550. <https://doi.org/10.1515/pac-2017-0506>
- SCHERER, G. W., WHEELER, G. (2009). "Silicate Consolidants for Stone", *Key Engineering Materials*, 391: 1-25. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.391.1>
- V.V.A.A. (2013). *Proyecto COREMANS: Criterios de intervención en materiales pétreos*. Madrid, España: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España.
- VILLEGAS, R., SAMEÑO, M., BAGLIONI, R. (2003). "Tipología de Materiales para Tratamiento". En *Cuadernos Técnicos: Metodología de Diagnóstico y la Evaluación de Tratamientos para la Conservación de los Edificios Históricos*. Granada: IAPH, 168-193.
- WEISS, N., SLAVID, I., WHEELER, G. (2000). *Development and Assessment of Conversion Treatment for Calcareous Stone*. Paper presented at the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Amsterdam.
- WHEELER, G. (2005). *Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone*. Los Angeles: Getty Conservation Institute.
- ZIEGENBALG, G., DRDÁCKÝ, M., DIETZE, C., SCHUCH, D. (2018). *Nanomaterials in architecture and art conservation*. Singapore: Pan Stanford Publishing
- ZORNOZA-INDART, A., LÓPEZ-ARCE, P. (2016). "Silica nanoparticles (SiO<sub>2</sub>): Influence of relative humidity in stone consolidation", *Journal of Cultural Heritage*, 18: 258-270. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.06.002>
- ZORNOZA-INDART, A., LÓPEZ-ARCE, P., GÓMEZ-VILLALBA, L. S., VARAS, M. J., FORT, R. (2012). *Consolidation of deteriorated carbonate stones with nanoparticles of Ca(OH)<sub>2</sub>*. Paper presented at the 12th International Conference on the deterioration and conservation of stone, New York (EEUU).
- ZORNOZA-INDART, A., LOPEZ-ARCE, P., LEAL, N., SIMÃO, J., ZOGHLAMI, K. (2016). "Consolidation of a Tunisian bioclastic calcarenite: From conventional ethyl silicate products to nanostructured and nanoparticle based consolidants", *Construction and Building Materials*, 116: 188-202. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.114>
- ZORNOZA-INDART, A., LÓPEZ-ARCE, P., LÓPEZ-POLÍN, L. (2017). "Durability of traditional and new nanoparticle based consolidating products for the treatment of archaeological stone tools: Chert artifacts from Atapuerca sites (Burgos, Spain)", *Journal of Cultural Heritage*, 24: 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.10.019>
- ZORNOZA-INDART, A., LÓPEZ-ARCE, P., ZOGHLAMI, K., LEAL, N., SIMÃO, J. (2018). "Marine Aerosol weathering of Mediterranean calcarenite stone: Durability of ethyl silicate, nano Ca (OH)<sub>2</sub>, nano SiO<sub>2</sub>, and nanostructured consolidating products", *Studies in Conservation*, 64: 73-89. <https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1477654>

#### Autor/es



**Ainara Zornoza-Indart**

ainara.zornoza@ehu.eus

Departamento de Pintura, Facultad de Bellas Artes, Universidad del País Vasco (UPV-EHU)

Doctora en Arquitectura por la UPV/EHU con Premio Extraordinario (2017). Máster en Conservación y Restauración de Bienes Culturales (Universidad Politécnica de Valencia 2009) y Licenciada en Bellas Artes con Premio Extraordinario (Universidad de Barcelona 2008). Desde 2016 imparte docencia a tiempo completo en la Universidad del País Vasco en el Grado de Conservación y Restauración de

Bienes Culturales de la Facultad de Bellas Artes, en el máster de Conservación y Exhibición de Arte Contemporáneo (CYXAC) y el Máster en Rehabilitación, Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido y de las Construcciones existentes de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Ha trabajado como restauradora tanto de pintura mural como de materiales arqueológicos en diversas empresas e instituciones, en la gestión de proyectos de investigación en la Oficina de Proyecto Europeos de la Universidad Pública de Navarra y como investigadora en el Instituto de Geociencias del CSIC (departamento de Geomateriales). Ha participado en distintos proyectos de investigación tanto nacionales como internacionales y sus líneas de investigación se centran en la caracterización de materiales pétreos, mecanismos de deterioro, técnicas de análisis no destructivas y aplicación de tratamientos especialmente aquellos basados en nanopartículas.

**Irene Samaniego Jiménez**[irenesama15@gmail.com](mailto:irenesama15@gmail.com)

Graduada en Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Universidad del País Vasco (UPV-EHU).

Graduada con Excelencia y Premio Extraordinario en Conservación y Restauración de Bienes Culturales por la Universidad del País Vasco (junio 2019). Ha trabajado en prácticas como restauradora del claustro de la Catedral de Pamplona y otros monumentos de la ciudad con la empresa Sagarte.

Artículo enviado el 04/10/2019

Artículo aceptado el 22/04/2020



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.698>

## Aportaciones estructurales al estudio de la denominada, “ermita de San Jorge” (Cáceres): el aljibe de la torre medieval de Los Mogollones

Francisco Serrano Candela, José Carlos Salcedo Hernández

**Resumen:** De entre los muchos elementos arquitectónicos dispersos por el término municipal de Cáceres (ciudad histórica incluida en el Patrimonio Mundial de la UNESCO) hay uno en estado de ruina, conocido como “ermita de San Jorge”, que en el estado actual del conocimiento algunos autores consideran un edificio religioso por el hecho de tener una estructura de nave diáfana y una serie de pinturas con motivos religiosos. La investigación resumida en este artículo: 1.- Se ha realizado con metodología arquitectónica, recabando los datos conocidos y realizando un levantamiento arquitectónico de la estructura del edificio, no sólo de la geometría de los restos, sino del sistema estructural, así como del análisis del emplazamiento. 2.- Demuestra que la estructura resistente de los restos constructivos corresponde en realidad a un edificio de almacén de agua (aljibe), emplazado en un camino histórico de la red caminera de Cáceres y en las inmediaciones de la torre medieval de Los Mogollones.

**Palabras clave:** Arqueología, agua, pinturas, Ribera, Cáceres, aljibe, San Jorge

### Structural contributions to the study of the so-called “Hermitage of San Jorge” (Cáceres): the cistern of the medieval tower of Los Mogollones

**Abstract:** Among the many scattered architectural elements in the municipality of Cáceres, an UNESCO World Heritage historical city, there is one in ruins known as the “hermitage of San Jorge”. The current state of knowledge leads some scholars to consider it a religious building, because of its nave structure and a series of paintings with religious motifs. The research summarized in this article: 1.-Has been done following an architectural methodology, gathering known data and making an architectural survey of the building structure which includes the geometry of the ruins and the study of the materials and construction system, as well as a location analysis. 2.- Demonstrates that the sturdy structure of the building ruins corresponds in reality to a water supply cistern, located on a historic road of Cáceres’ road network and in the vicinity of the medieval tower of Los Mogollones.

**Keywords:** Archeology, water, paintings, Ribera, Cáceres, cistern, San Jorge

### Contribuições estruturais para o estudo da chamada “Ermita the San Jorge” (Cáceres): a cisterna da torre medieval de Los Mogollones

**Resumo:** Entre os muitos elementos arquitetónicos dispersos por todo o município de Cáceres (cidade histórica incluída no Património Mundial da UNESCO), há um em estado de ruína, conhecido como “ermida de São Jorge”, que, segundo o estado atual de conhecimento alguns autores consideram ser um edifício religioso pelo facto de possuir uma estrutura de nave aberta e uma série de pinturas com motivos religiosos. A pesquisa resumida neste artigo: 1.-Foi realizada com metodologia arquitetónica, reunindo os dados conhecidos e realizando um levantamento arquitetónico da estrutura do edifício, não apenas da geometria das ruínas, mas do sistema estrutural, bem como a análise do local. 2.-Demonstra que a estrutura da construção em ruínas corresponde na realidade a um edifício de armazenamento de água (cisterna), localizado numa estrada histórica da rede rodoviária de Cáceres, na proximidade da torre medieval de Los Mogollones.

**Palavras-chave:** Arqueologia, água, pinturas, Ribera, Cáceres, cisterna, São Jorge

## Introducción

Dentro del extenso término municipal de Cáceres, existe un importante número de restos arquitectónicos de la época romana a la medieval.

Una de las tipologías arquitectónicas estudiadas (Serrano 2017) ha sido la de las ermitas dispersas en el territorio, definidas como "capillas o santuarios, de reducidas dimensiones, situadas por lo común en despoblado y que no suelen tener culto permanente" (Serrano 2017: 9). En el estado actual del conocimiento estaban inventariadas sólo once ermitas (2, Inventario) y en el trabajo de este equipo el número de ermitas localizadas se ha elevado hasta veinte (1, Serrano 2017: 44).

La mayoría de estos edificios se encuentra en desuso y en ruinas, resultado del abandono inherente al desmantelamiento del mundo rural (Campesino 1982). Uno de estos edificios, considerado en el estado del arte como una "ermita", es la comúnmente denominada "ermita de San Jorge", en cuyos restos existen unas pinturas al fresco, de temática religiosa, atribuidas al pintor local Juan de Ribera (Perales 1994) (Corrales 1998); sin embargo, su tipología de estructura arquitectónica no corresponde a la de ermita (Serrano 2017).

Los autores de este trabajo consideramos que, aunque la construcción haya tenido en algún momento de su historia un uso religioso, éste uso no es el que haya sido el origen y sentido de su construcción.

El hidrogeólogo e investigador Juan Gil Montes (Gil 2016) fue quien planteó por vez primera la hipótesis de que pudiera tratarse de una construcción de aljibe, como almacén de agua para la torre de Los Mogollones, situada a sólo 180 m al Sur de los restos. Sugiere que pudiera servir, desde la posición elevada de su cubierta, para repartir por gravedad el agua para regar la parcela en la que se encuentra [figura 1].

José-Julio García (García 2019) lo mantiene también, citando a Juan Rosco (Rosco 1999), pero lo cierto es que, aunque García y Rosco hablen de un edificio "colector de agua", describen la construcción como "adosada a un estanque" y con un pequeño mecanismo para sacar agua; cuando en realidad el agua estaba dentro del edificio y el "estanque" (una simple charca) es un destrozo posterior del edificio patrimonial para "esparcir" el agua por la finca y que el ganado beba.

El trabajo de José-Julio García (García 2019) expone que se trataría de un edificio de uso industrial, transformado para el uso religioso y lo fecha a mediados del siglo XVI. Apunta que era la "transformación de una cisterna o colector de agua en ermita".

Relacionado al estudio de los abastecimientos de agua, otros investigadores señalan los sistemas desarrollados en



**Figura 1.-** Estado actual, tras las lluvias de marzo de 2018. Obsérvese su proximidad a la torre de Los Mogollones. Fuente: Elaboración propia.

el Sureste de España y analizan las relaciones existentes entre las superficies de las cuencas y el volumen de los aljibes (Van Wesemael 1998).

Objetivo de la investigación: Determinar si el origen de los restos constructivos de "San Jorge" corresponden a una ermita o, si corresponden a un edificio-aljibe.

Hipótesis de partida: Si se tratara de un aljibe como plantean Juan Gil (Gil 2016) y Van Wesemael (Van Wesemael 1998), atendiendo al estado de la técnica:

- El pozo existente dentro de la construcción debería estar realizado en roca impermeable, donde se pudiera mantener el agua captada durante mucho tiempo sin que se filtrase.
- Debería existir un sistema de recarga de agua del aljibe.
- Y debería existir un sistema de elevación y reparto del agua

## Metodología

El problema se ha estudiado con metodología de estructuras arquitectónicas (estructuras históricas):

- Primero, se han recabado todos los datos del estado del conocimiento, que son principalmente de Historia del Arte y procedentes de estudios técnicos (Sánchez 2016), de los materiales, pero no de la estructura histórica.

– En una segunda fase, se ha realizado, un levantamiento arquitectónico-estructural (Serrano 2012). Definiendo unas áreas que han sido estudiadas con más detalle:

. La estructura resistente del edificio ha sido analizada sobre planos realizados a nivel de detalle de escala 1/50, si bien en este artículo se incluyen sólo representación de los dibujos al tamaño que permite el formato del documento.

. El estudio de los restos del sistema de elevación y reparto de agua de cubierta. E.1/20.

. Estudio del arroyo de Las Seguras como entrada de agua al edificio, a E. 1/200.

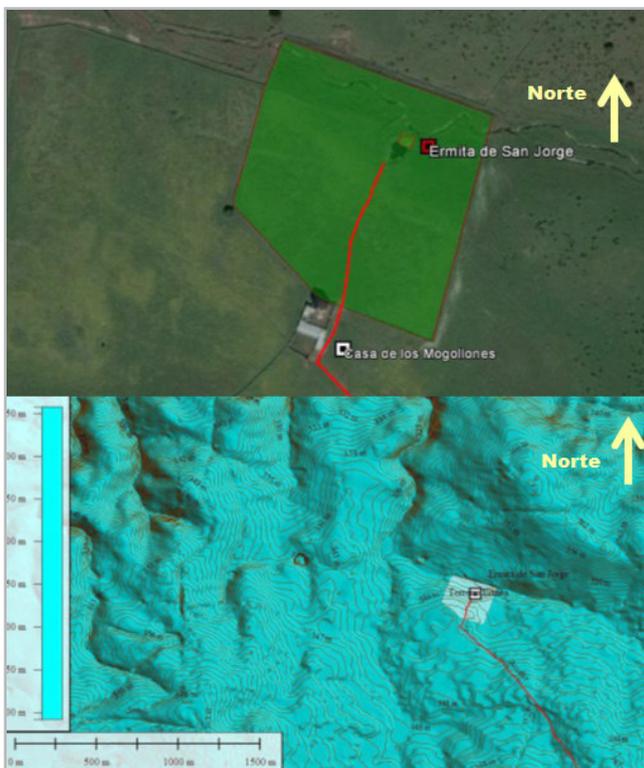
– Finalmente, se han discutido todos los hallazgos para completar unas conclusiones que han permitido determinar de qué tipo de edificio se trata, documentarlo correctamente, explicar cómo funcionaba y valorarlo desde el punto de vista arquitectónico dentro del conjunto patrimonial de Cáceres.

## Resultados

### —Resultados del estudio de la topografía

La simple consulta de los mapas oficiales, demuestra la existencia, bordeando la construcción por el Norte, del arroyo de Las Seguras, afluente del río Salor [figura 2].

En la figura 2, también se aprecia el relieve. El resultado del estudio de la topografía con mayor detalle y su



**Figura 2.-** Vistas entorno de la construcción; al Sur se encuentra la torre de Los Mogollones y se restituyen las curvas de nivel sobre el terreno que rodea la construcción y el encajamiento del arroyo. Fuentes: Google EARTH y Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.

contraste con las primeras fotografías aéreas de los “vuelos americanos” de 1946 y de 1956, ha demostrado:

Que la construcción objeto de estudio se encuentra a escasos 10 m al Sur del arroyo de las Seguras, con condiciones topográficas favorables para captar agua de la cuenca del arroyo que tiene una extensión de más de 6,2 km<sup>2</sup>.

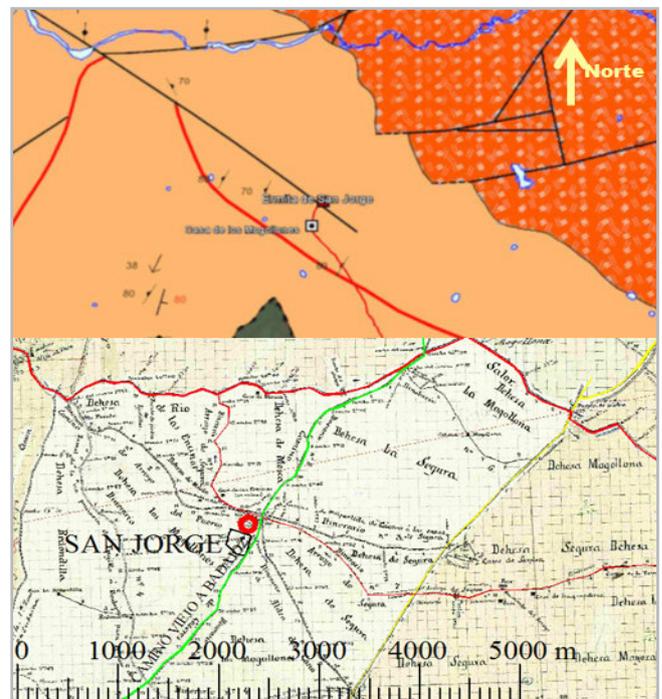
La cota del fondo del pozo es de 341 m de altitud sobre el nivel del mar. La cota del techo de la construcción es de 346 m. Y la cota del punto óptimo del arroyo para situar un azud, es de 343 m. Por otra parte, no se han encontrado restos de azud o de canal que conduzcan el agua al espacio existente en el interior de la construcción.

Se puede apreciar que la charca junto a la construcción, está en las fotos del vuelo americano de 1946, tratándose de una simple charca, no de un estanque ni otro tipo de instalación hidráulica con obra de fábrica.

### —Resultados del estudio hidrogeológico

Se consultan los datos existentes del Mapa Geológico Nacional (Magna 1982):

El edificio está emplazado en terreno impermeable, justo en la aureola de metamorfismo entre el batolito granítico de Malpartida y las pizarras de la penillanura cacereña, sobre una “falla supuesta” por el MAGNA (Magna 1982) [figura 3].



**Figura 3.-** Restitución de la ubicación de San Jorge y la torre de Los Mogollones sobre la información digital del MAGNA, hoja 704. Y restitución de caminos sobre la base de la cartografía histórica de los “Bosquejos Planimétricos mandados formar en todos los términos municipales de España por la Ley de 24 de Agosto de 1896 para la rectificación de las Cartillas Evaluatorias”. Fuentes: Las indicadas.

El terreno por el que transcurre el arroyo de Las Seguras es impermeable, así como la roca del emplazamiento en la que se encaja el pozo y proporciona el lugar idóneo para que, una vez lleno, se mantenga durante cierto tiempo.

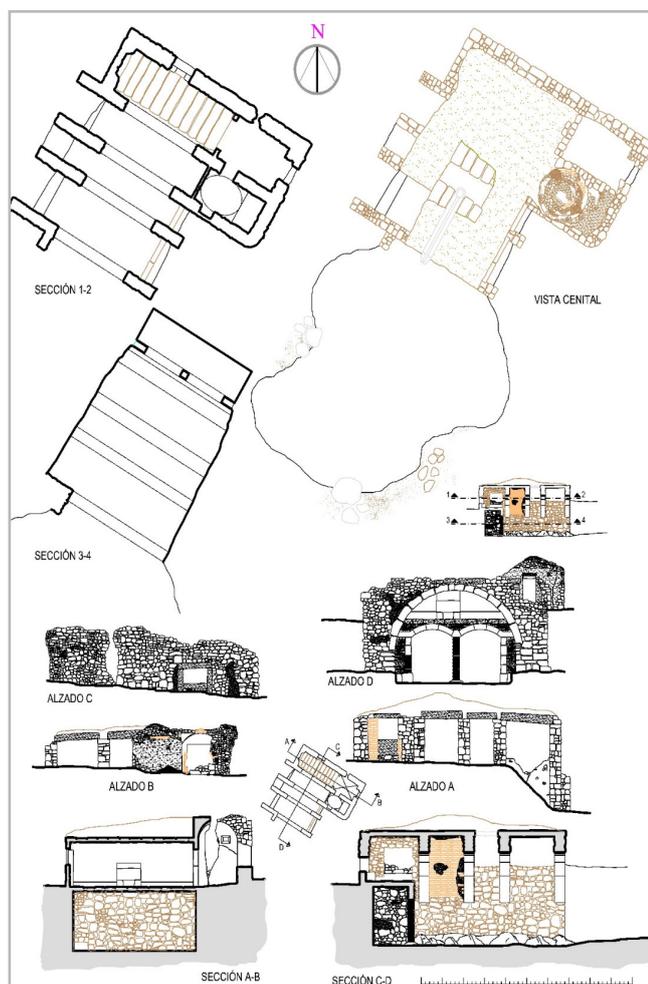
En la visita al lugar se identifican los materiales rocosos descritos en el mapa. Se aprecia una penillanura recubierta de material detrítico, con pizarra que no aflora, salvo en el pozo.

En conclusión, el arroyo realiza la función de "recarga" de agua del pozo, que no es natural sino una excavación antrópica.

#### —Resultados del estudio de la red caminera y del castillo de Los Mogollones

Aunque en la actualidad el edificio parece estar "en medio de la nada", debido al desuso y a la desaparición de la red caminera, se ha procedido en este trabajo al análisis del emplazamiento por consulta de la cartografía histórica. En el mapa de 1896 [figuras 3 y 6], se constata que la construcción se encuentra en el cruce de los siguientes caminos:

- Camino de Badajoz ("camino viejo de Badajoz").
- Camino de Arroyo del Puerco a Aldea del Cano.



**Figura 4.-** Planos de plantas, alzados y secciones. Originales E.1/50. Fuente: Elaboración propia

- Camino de Malpartida de Cáceres a las Casas de Segura.

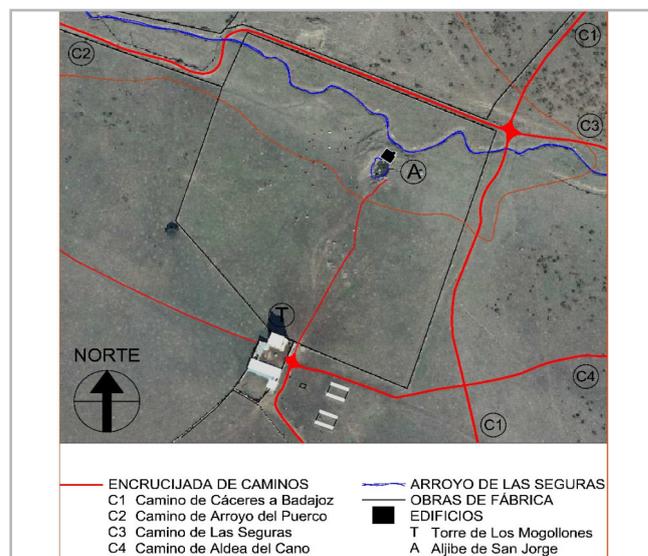
El edificio habría sido construido a finales del s. XV o principios del s. XVI (García: 2019), vinculado al castillo de los Mogollones, una familia relacionada con la trashumancia que participó en la reconquista de la ciudad. El castillo presenta la torre del homenaje como único volumen que permanece, de planta rectangular, con tres plantas, azotea y matacanes en cada uno de los cuatro frentes. En ella se observa una puerta de acceso con arco apuntado y un escudo en mármol de Los Ulloa (Navareño: 1998). No hay constancia de la existencia de un aljibe dentro del castillo que, si hubiera existido, sería muy pequeño, de mucha menor capacidad que el que es objeto de estudio.

#### — Resultado del estudio de materiales y del sistema estructural del edificio

El levantamiento arquitectónico, realizado en base a detalles constructivos muy precisos, aunque los planos que se incluyen en la publicación se hayan reducido de escala, incluye la geometría de la forma de los restos y también el estudio en detalle de materiales y sistemas constructivo-estructurales [figura. 4 y 5].



**Figura 5.-** Imagen con el nivel de la charca bajo. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.-** Restitución de red de caminos históricos, elementos de fábrica y edificios sobre la imagen del "Vuelo Americano de 1946". Fuente: I.G.N. y Vuelo Americano.

Observamos [figura 7], una construcción con estructura “de cubierta”, sobre un espacio diáfano, que no es otro que el pozo antes descrito, cuyo fondo está a una cota de 3 m por debajo del terreno circundante.

Esta estructura resistente es diáfana y está resuelta con una sucesión de arcos paralelos, cuyas pilastras arrancan de la roca y emergen del pozo sólo 1,5 m, a la altura de los salmeres de los arcos, que son de medio punto rebajados con dovelas de cantería de granito. Los dos arcos centrales están más próximos entre sí que el resto de los existentes.

Todos los arcos están coronados con fábrica de mampostería de pizarra y granito tomada con argamasa de cal, para constituir líneas de carga horizontales y servir de apoyo a la cubierta plana, definiendo crujías paralelas con anchos de 2,15 m, 1,60 m, 1,25 m y 2,06 m. Estas líneas de carga se salvan con losas de granito formando una estructura de cubierta plana [figura 7]. Sobre esta cubierta plana se observa una capa de tierra y vegetación [figura 7].

En el centro de la cubierta, coincidiendo con los dos arcos más juntos, se encuentran unos restos de elementos de granito (pilas, gárgolas y canaletas) que son compatibles con una antigua noria, emplazada en el centro de esta cubierta, confirmando la hipótesis de Juan Gil Montes (Gil 2016). El hecho de que su posición coincida con el punto en que los arcos están mucho más próximos, implica que

la estructura fue específicamente diseñada para soportar este ingenio.

La estructura portante del conjunto del edificio tiene capacidad suficiente para resistir tanto su peso propio como el de los animales y mecanismos que existieran sobre ella. Se trata de una estructura resistente sabiamente diseñada, los arcos transforman en empujes horizontales el elevado peso de la cubierta plana y estos empujes son absorbidos por la roca que, al haber sido esculpida para crear el pozo, ofrece gran resistencia a compresión. Actualmente, los vestigios de elementos estructurales soportan tanto el peso de la propia estructura que aún persiste (arcos y losa) como un grueso tomo de tierra a pesar de su edad, estado de abandono (RODRÍGUEZ: 2011) y a estar sometida a la acción erosiva de la atmósfera [figura 7].

#### —Construcciones anexas al edificio principal de nave

Adosada a la nave diáfana de estructura de arcos (al Sureste), existe una construcción configurada por dos dependencias que claramente son posteriores y de otro tipo de estructura, construidas con muros de fábrica de mampostería [figura. 4 y 8], que José-Julio García denomina “nartex” (García 2019). Ambas dependencias están cubiertas con bóvedas de arista y cúpula de ladrillo cerámico tosco. Con el tiempo y las transformaciones sufridas no se identifican con un uso concreto.



**Figura 7.-** Cárcavo del centro de la nave, visto por debajo y por arriba. No se trata de un “hundimiento”, sino de un espacio rectangular configurado para un fin. Fuente: Elaboración propia



**Figura 8.-** Imágenes del interior. Se observan las pinturas que existen en los paramentos de las construcciones anexas y también en la pared Noreste de la nave. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9.-** Estructura de entreplanta y arranque de los arcos de la nave desde la roca. Fuente: Elaboración propia

— *Estructura de entreplanta interior de la nave:*

Al nivel del terreno, en el lado Noroeste de la planta, existe esta estructura, que cuenta con tres pilas (figura 9), sobre las que apoyan dos arcos menores, de dovelas graníticas. Su cimentación se encuentra al nivel del fondo del pozo, a una cota inferior a los arranques de los arcos de la nave [figura 9]. Es una construcción menor dentro de la nave diáfana.

La concepción estructural del conjunto del edificio no es de tipo "popular", sino singular y muy evolucionada para su época. Los contrafuertes de los arcos reciben también el apoyo de las losas de cubierta, lo que contribuye al equilibrio y estabilidad del conjunto, que es la clave en una estructura histórica de fábrica.

Algunos arcos han perdido los elementos de apoyo y se han desplazado. No obstante, el grado de consolidación y monolitismo es tal que, aunque los arcos carecen de estas vinculaciones exteriores, se mantienen en equilibrio.

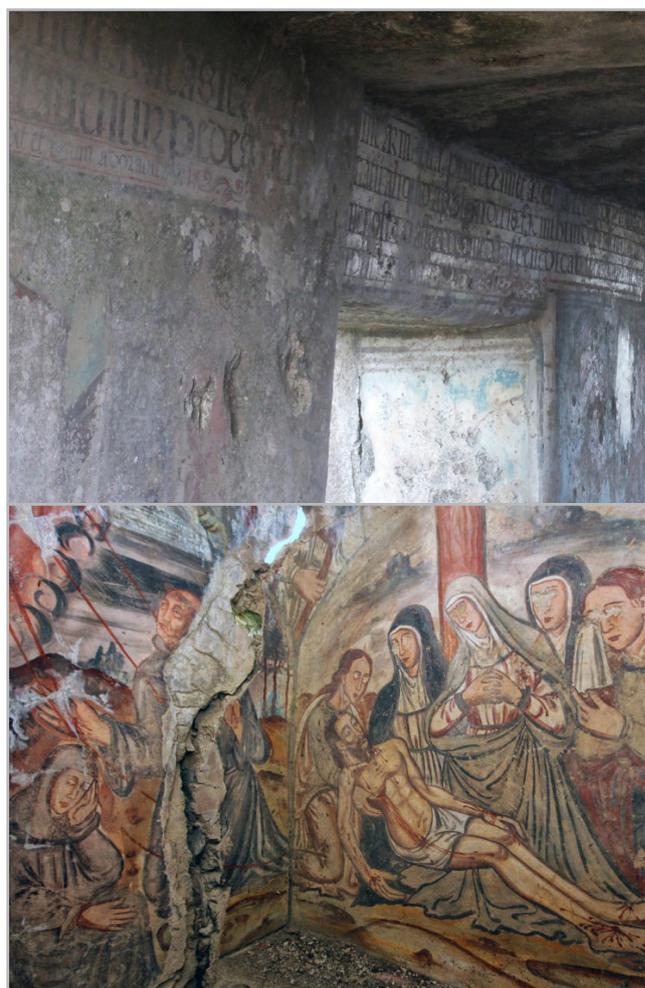
Las piezas de cantería de la cubierta plana cuentan con perforaciones compatibles con el eje de una noria. Existe

una pieza tallada en granito, con una longitud de 3,8 m y un ancho de 0,6 m y un extremo volando sobre el hueco existente en la cubierta, a modo de pila.

La pieza que recoge el agua está cuidadosamente labrada, en un extremo tiene forma de cubeta y en el otro (que vuela sobre el exterior del edificio) tiene reducida la sección, a modo de gárgola. Los dos extremos están comunicados por un canal que transcurre por el centro de la pieza.

En conclusión, los esfuerzos realizados para fabricar estos elementos y colocarlos en esa concreta posición, así como la estructura necesaria para soportarlos, no son arbitrarios, sino encaminados a una específica utilización que nada tiene que ver con el de ermita. Este análisis no había sido realizado en el estado del arte.

En los paramentos interiores encontramos las pinturas con motivo religioso [figura. 8 y 10], atribuidas a Juan de Ribera y fechadas en el s. XVIII (Perales 1994) y (Corrales 1998). Crean un cierto "enigma", porque no responden al uso para el que había sido realizada originalmente esta construcción.



**Figura 10.-** Pinturas de motivo religioso, Juan de Ribera (3), que ha decorado otros edificios de Cáceres. Fuente: Elaboración propia.

## Discusión

En este apartado se interpretan los resultados en relación a los objetivos e hipótesis originales y al estado de conocimiento actual.

### —El sentido de los aljibes en Cáceres

No debe confundirse un aljibe, que almacena el agua en un pozo impermeable, con un “pozo” que, en terreno permeable, capta el agua de un acuífero subterráneo.

Concretamente, en el casco antiguo de Cáceres, los palacios y casas fuertes medievales tienen este sistema de aljibes, que recoge el agua de las cubiertas hasta conducirla a un pozo enterrado, bajo el suelo del patio de la construcción (Tapia 2003), o en la base de una torre (Trejo 2016). Existen otros aljibes de abastecimiento a la población como el de la Casa de Las Veletas, el de la plaza de San Jorge, el del antiguo colegio de los Jesuitas, el de la torre de Los Pozos, el de la casa Yussuf Al Burch, el de la Casa de Paredes-Saavedra o el de la Casa de Fernando Valhondo.

Por lo tanto, no es de extrañar que en el entorno de un edificio de arquitectura defensiva como es la torre de Los Mogollones exista un elemento para abastecimiento de agua. De hecho, a esta torre no se le conoce en el estado del arte ningún sistema de suministro de agua y por definición de arquitectura defensiva, debería tener uno para su subsistencia.

### — Contraste con otros aljibes conocidos en España

Aplicando la ficha del MMAMRA (Mmamrm: 2) a los restos de San Jorge, apreciamos que varían los sistemas constructivos y las formas estructurales-arquitectónicas, pero la función como aljibe se confirma:

- Es un pozo excavado en roca impermeable en el que se mantiene el agua captada de un arroyo de recarga.
- Tiene planta rectangular de 6,2 m x 9,3 m, y 5,0 m de. Sobresaliendo 2 m del terreno.
- Su cubierta no es una bóveda como en estos edificios tipificados por el MMAMRM para las zonas de Levante, sino una cubierta plana, soportada por un sistema alquitradado de arcos paralelos que equilibran sus empujes con las paredes de roca del pozo.
- La roca del entorno es impermeable, por lo que se genera escorrentía con la lluvia, que es captada por la cuenca del arroyo y dirigida al aljibe por algún canal que se ha perdido, pero que el estudio topográfico realizado para este trabajo justifica.
- La capacidad de recepción de agua del aljibe es la de los 6,2 km<sup>2</sup> de la cuenca del arroyo de Las Seguras en este punto.
- Los elementos constructivos de la cubierta y de

los cerramientos cumplen perfectamente las dos funciones de un aljibe:

- Evitan la evaporación del agua contenida.
- Evitan su contaminación, preservándola de la luz, las altas temperaturas, acceso de animales, etc.
  - El edificio carece de huecos (las ventanas estarían tapadas).
  - ELos arcos y losas de la cubierta plana están cubiertos de tierra para aislar.

—La gran variabilidad temporal de las precipitaciones en esta zona, es la que hace idóneo este sistema de abastecimiento.

—Su cubierta plana y resistente, dotada de medios para elevación y distribución del agua ponen de manifiesto que el agua almacenada en el pozo, era elevada por medio de una noria hasta el nivel de la cubierta y desde aquí era distribuida por gravedad para toda la cerca de 4,6 hectáreas, que es una zona de cultivos anexa a la torre de Los Mogollones). Y podría permitir el abastecimiento de agua para el ganado encerrado en ella. Esta forma de explotación ganadera es habitual en las fincas de Cáceres.

—Este tipo de instalación requiere una rampa para acceso a la cubierta con el animal que estaría en el Sureste, que es el lado demolido, en el que la topografía natural tiene menor altura.

—La cubierta, posee una capacidad resistente suficiente para soportar el peso de la noria y de una bestia que la moviera y ofrece la superficie necesaria. Además, persisten los restos de los elementos de riego, como el negativo del eje de la noria y la huella de un canal de piedra, que han podido ser verificados *in situ*.

Se han confirmado los elementos que Gil Montes (Gil 2016) exponía a modo de hipótesis en su investigación.

Encontramos en Extremadura otras realizaciones con este mismo tipo de sistema estructural para soportar suelos horizontales, formada por arcos paralelos y lanchas de piedra que salvan la distancia entre los arcos, como la primera planta de la torre del Homenaje del castillo de Olivenza, de 1493 (Salcedo 2014). Existen restos de norias en fincas de Cáceres, como en Sierra de Fuentes.

### — El origen del granito de los sillares

Ya se ha indicado que la zona es de pizarra. Como la piedra labrada del edificio es de granito, algunos investigadores se preguntan sobre el origen de este material, también presente en construcciones megalíticas del entorno.

La roca granítica más cercana la encontramos en el batolito granítico de Malpartida de Cáceres (7 km al Norte del emplazamiento) y las canteras más próximas, a 1,3 km en esta dirección, según el Mapa Geológico Nacional. Este granito, es un material de grano grueso, que coincide con las características de los sillares labrados existentes. Es también el mismo tipo de granito del dolmen de La

Hijadilla, pero no hay constancia del aprovechamiento de material prehistórico, que no presenta labra de caras paralelas como sí tienen los sillares que conforman contrafuertes, esquinas, recercados y dovelas de los restos de “San Jorge”.

— *Descarte de que se trate de una construcción original de ermita*

El primer investigador que denomina estos restos como San Jorge fue Juan Sanguino Michel (Sanguino 1902) y fueron difundidos como “ermita” por Tomás Martín Gil en el libro *Viaje por viejas ermitas* (Martín 1937). Actualmente se ha extendido la denominación de la misma como “ermita de San Jorge”, aunque sin suficiente fundamento (García 2019) y así la nombran otros autores como Gaitán (Corrales 1998) o Ramos-Macario (Ramos 2013). En el inventario de Patrimonio de la Junta de Extremadura (INVENTARIO) aparece con este mismo nombre, dando carta de naturaleza a la cuestión.

Estos autores no dudan en calificar de “ermita” y atribuir la función religiosa a estos restos debido (según ellos) a la existencia de, la nave que conforman las crujías definidas por los arcos, una estructura de piso intermedio, que sería “un coro” al que se accede desde una estancia previa, a la que asignan una función de sacristía o de nártex por su forma y posición en planta y por último los sillares sobresalientes de los restos que dicen que podrían corresponder al aparejo con una hipotética cabecera que se ha perdido.

Ningún autor había estudiado en su contexto la estructura resistente del edificio, constatando la estructura horizontal de losas de cubierta que soportan los restos de la noria y soportarían a la/s bestia/s que movieran el mecanismo, que da al traste con la hipótesis de ermita.

La existencia en los restos de pinturas religiosas de fecha posterior y la existencia de una estructura de arcos sucesivos, que interiormente “parece” la estructura de la nave de una iglesia, han inducido a considerar esta construcción como una ermita, sin haber valorado suficientemente la función de abastecimiento de agua y la forma estructural resistente.

Investigadores como María del Mar Lozano Bartolozzi (Lozano 1976) y Antonio José Campesino (Campesino 1982), prudentemente, no incluyeron al edificio que nos ocupa en sus respectivos listados de ermitas.

El estudio de los materiales y del sistema estructural demuestra que este edificio no puede corresponder originalmente a una ermita, por no ajustarse a tipología alguna conocida y por el contrario, sí responde a una tipología estructural de aljibe.

En concreto, no puede ser una ermita porque lo que se

consideraba como “suelo” en el estado del conocimiento, se encuentra excavado a una cota inferior a la del terreno, lo que no es propio de una ermita, pues el emplazamiento de las ermitas es “ligeramente elevado” (Serrano 2017) sobre el terreno. Además, no se conocen ermitas con cubierta plana, a base de losas de piedra, que carece de sentido constructivo, funcional y formal; salvo que exista la necesidad de soportar una actividad que requiera tal superficie plana.

Lo que se consideraba “coro” de la nave, que es el pequeño pórtico descrito con un soporte interior, dispuesto a media altura en el lado considerado “pies” de la nave, puede corresponder a una estructura que sirviera para acceder al interior del edificio con otras funciones como, acarrear agua con cántaros para consumo humano.

Un edificio concebido como ermita, se levantaría sobre una posición elevada, nunca en una depresión y, aún menos, su espacio más voluminoso y relevante, la nave, estaría en posición de sótano excavado en roca dura. Únicamente se podría entender que alguna estancia estuviese bajo tierra, si tuviera algún otro uso ligado al agua del terreno. Tampoco le encontramos sentido a que sea una “cripta” (García 2019) en este lugar.

Aunque el objeto principal de la construcción de este edificio no fuera el religioso, sí es posible que, por contar con un espacio cubierto y por su localización en el cruce de caminos históricos en un enclave que en siglos pasados estuvo nutrido de diversos asentamientos rurales, hubiera sido reaprovechado en el siglo XVI con un uso religioso. En este sentido, nos parece acertada la tesis de “transformación al uso de ermita” a mediados del siglo XVI (fecha de las pinturas) de una construcción preexistente con otra actividad, como plantea José-Julio García (García 2019). Aunque el uso de aljibe se habría mantenido simultáneamente.

Investigadores como Salvadora Haba y Victoria Rodrigo (Haba 1990) relacionan el agua con la salud y la santidad en otros lugares de Extremadura y ya han estudiado casos del culto a las aguas y su continuidad en relación con las vías de comunicación. Estas hipótesis darían sentido al aprovechamiento de la construcción inicial de aljibe para un uso religioso posterior, con la realización de las pinturas existentes y deberían ser estudiadas en el futuro junto a una más precisa caracterización de las pinturas.

— *Descarte de que se trate de un molino*

Se debe descartar también la posibilidad de que se tratara de un uso preindustrial de molino porque el arroyo de Las Seguras no proporciona el caudal de agua necesario durante suficientes meses al año como para hacer rotar la muela de un molino y porque el edificio tendría que tener una salida por gravedad del agua por medio de un cárcavo, que ni existe ni puede haber existido, pues

sería incompatible con la topografía existente al estar enclavado en una hondonada.

— *El porqué del estado constructivo en que se encuentran los restos*

La construcción se encuentra en ruinas en el borde de una charca. La primera crujía de la construcción (cerramiento Sur) está derruida. Por eso presenta en este alzado uno de los arcos, que no puede corresponder al cierre de fachada.

Este muro testero que falta, se habría derruido y su material es posible que se encuentre en el fondo de la charca, del que sobresalen algunos bloques de piedra. Actualmente, la charca “entra” dentro de la nave y de los cimientos de los restos del edificio.

La construcción de aljibe se ha convertido en una charca [figura 7], al menos desde 1946 que aparece en el “vuelo americano”, similar a las que apreciamos en otras fincas de Cáceres. La charca se ha realizado excavando hasta el nivel del pozo y terraplenando alrededor las tierras extraídas. Ha sido posible identificar estas tierras in situ, removidas, al Oeste de la charca. De esta forma, el ganado encerrado en la finca puede acceder a beber en la conocida como “ermita de San Jorge”.

— *Necesidad de futuras investigaciones y actuaciones*

Los restos de “San Jorge” son un monumento de importancia por la singularidad de su estructura y por su decoración pictórica. Hay que valorar negativamente el estado de abandono de este patrimonio. Es necesario documentar, catalogar, declarar Bien de Interés Cultural (B.I.C.) y difundir su importancia patrimonial, para su conservación y disfrute social. En la actualidad el edificio es de propiedad privada, no cuenta con declaración de B.I.C., está incluido en el Inventario de Patrimonio de la Comunidad Autónoma de Extremadura (como ermita, pero sin ficha ni referencia) y, por su estado, fue incluido en 2016 en la “Lista Roja del Patrimonio” (LISTA ROJA)

Es necesario un estudio detallado de las pinturas murales existentes. No se ha podido saber por qué existen los restos de unas pinturas atribuidas a Juan de Ribera y se descarta que, por el solo hecho de tenerlas, el edificio tenga que ser necesariamente una ermita, como han aventurado investigaciones anteriores.

Queda por determinar el sentido de estas pinturas y concretar el uso religioso de los restos del aljibe. Se plantea como hipótesis la histórica relación de “culto a las aguas” en las vías naturales de comunicación (Haba 1990).

Sería necesaria una investigación arqueológica, que pudiera localizar los restos del sistema de captación en el arroyo y reparto de agua, que deben encontrarse

enterrados, o en la charca. Dicha investigación arqueológica debería contener el inventario de los elementos de cantería que se encuentran diseminados por los alrededores, formando parte de portillos y cercas.

## Conclusiones

Los restos constructivos de “San Jorge”, corresponden inequívocamente a un aljibe de abastecimiento de agua, que se encuentra 180 m al Norte de la torre medieval de Los Mogollones. Así se ha podido acreditar desde el punto de vista hidrológico, técnico-estructural y arquitectónico. Se descarta que se trate de una construcción original de ermita, porque su estructura resistente es incompatible con este uso.

Los restos del edificio-aljibe tienen en su interior un pozo de acumulación de agua, excavado en pizarra impermeable. Para la recarga del aljibe existía un canal desde el arroyo, cuyos restos se han perdido, pero que se justifica por la topografía, que continúa en la actualidad drenando el agua del arroyo a los restos del edificio.

El sentido estructural del edificio es el de proporcionar una cubierta a la masa de agua almacenada en el pozo, para evitar su evaporación, protegerla de la luz y de la temperatura, a la vez que servir de plataforma elevada para una noria de tracción animal ubicada en su cubierta. A esta cubierta el agua era elevada para ser repartida por su propio peso a la cerca en la que se encuentra. Razones funcionales, constructivas y formales, justifican que estos restos sean un aljibe y no puedan ser otra cosa.

Se plantea como siguiente línea de investigación su relación con el culto a las aguas o con la encrucijada de caminos en la que se encuentra el aljibe.

Los restos constructivos existentes, que se encuentran en estado de ruina inminente a causa de su abandono y por la socavación de la referida charca, definen un elemento de valor arquitectónico-patrimonial, al que se suma ahora el valor tipológico, pues no se conocía en el entorno de Cáceres (Patrimonio Mundial) ningún edificio específicamente construido de nueva planta para aljibe.

El resumen de las conclusiones es el siguiente:

1. El origen inicial de la construcción estudiada es un aljibe y no una ermita.
2. El aljibe cuenta con un punto de recarga de agua.
3. La construcción es una envolvente del aljibe que le aporta al agua óptimas condiciones de mantenimiento y manejo.
4. La cubierta plana tiene una función mecánica.
5. Se plantea como nueva línea de investigación, el estudio del comienzo de la modificación original de uso.
6. La construcción tiene indudable valor arquitectónico que debe ser conservado y transmitido.

## Notas

[1] "Todo apunta hacia una utilidad hidrológica de pozo-charca o tal vez aljibe (...) Estoy bien seguro que la ermita-aljibe de San Jorge debió haber tenido también esta misma función, de riego y de abrevadero, para lo cual dispondría de una vieja noria, hoy desaparecida, sobre su techo plano que, sin duda, aprovecharía los aportes hídricos canalizados desde el cercano Arroyo de Las Seguras, porque las rocas semipermeables de su subsuelo pizarroso no aportan ningún caudal subterráneo por carecer de manantial de aguas permanentes". J. Gil Montes, en <http://jugimo.blogspot.com>

[2] El término "aljibe", según el diccionario de la R.A.E. proviene del árabe hispano algúbb, y éste del árabe clásico gubb y significa "cisterna, depósito subterráneo de agua".

[3] Los aljibes presentes en las sierras de Almería están constituidos por una base rectangular con muros de mampostería, que se encuentran a una profundidad de entre 2 y 3 metros (...), "estos depósitos están cubiertos por un tejado de piedra en forma de cúpula que tiene como finalidad evitar la evaporación (...)". "Los aljibes se rellenan directamente del agua de escorrentía (...) o a través de un pequeño canal, del agua procedente de pequeños arroyos de curso intermitente (...)". "Aparte del uso del agua para consumo animal, el agua de algunos aljibes es además usada para otros propósitos como son el consumo doméstico de explotaciones aisladas o la gestión agrícola.

[4] Convertir Transformar un pozo en charca se ha convertido en una actividad bastante común en el medio rural, con el abaratamiento del movimiento de tierras tras la aparición de las retroexcavadoras. Consiste en abrir una de las paredes del pozo y ahondar en el terreno alrededor haciendo una charca, para que el ganado acceda autónomamente al interior por los taludes.

[5] Hay que reseñar que hasta los años 60 existía una población en diseminado en fincas, que mantenían las instalaciones existentes. Sin embargo, en los últimos años esta población ligada al territorio ha desaparecido y las explotaciones se mantienen con menos trabajadores. Para suplir la carencia de personal se han construido charcas en las que el ganado abreva libremente sin la necesidad de atención humana.

## Referencias

CAMPESINO FERNANDEZ, A.J. (1982). *Estructura y Paisaje Urbano de Cáceres*. Ed. Colegio Oficial de Arquitectos de Extremadura. Cáceres.

CORRALES GAITÁN, A. (1998). *Ermitas cacerenses*. Cáceres: Ed. Servicio de Publicaciones de la Cámara Oficial de Comercio e Industria de Cáceres. Cáceres. P.63

GARCÍA ARRANZ, J.J. (2019). "La ermita de San Jorge (Cáceres, España): un caso singular de transformación de arquitectura industrial en santuario a mediados del siglo XVI". *Rev. Revista*

*Santuários, Cultura, Arte, Romarias, Peregrinações, Paisagens e Pessoas*. Ed.

GIL MONTES, J (2016). "Adenda a La Ermita Hundida". En *blog Estudios de Geoarqueología de Extremadura*. <http://jugimo.blogspot.com/es/search?q=pasos+y>.

HABA QUIRÓS, S. RODRIGO LÓPEZ, V. (1990). "El tema del culto a las aguas y su continuidad en relación con las vías naturales de comunicación". Salamanca. En *Zephyrus: Revista de prehistoria y arqueología* numero 43.

*Inventario general del archivo histórico municipal de Cáceres* (1258-1950). Ayuntamiento de Cáceres. Cáceres.

LISTA ROJA del Patrimonio (2016). *Ermita del Salvador, conocida como de San Jorge* (Hispania Nostra información y fotos de Samuel Rodríguez Carrero): [http://listarojapatrimonio.org/ficha/ermita\\_del\\_salvador\\_san\\_jorge/](http://listarojapatrimonio.org/ficha/ermita_del_salvador_san_jorge/)

LOZANO BARTOLOZZI, M.M. (1976). *El desarrollo urbanístico de Cáceres. Siglos XVI-XIX*. Ed. Universidad Complutense de Madrid. Madrid

Mapa catastral (1896): *Bosquejos Planimétricos mandados formar en todos los términos municipales de España por la Ley de 24 de Agosto de 1896 para la rectificación de las Cartillas Evaluatorias*. Dirección General del Catastro.

Mapa Geológico Nacional. M.A.G.N.A.(1982). Hoja 704. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. Ed. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía. Realizado por Barón Ruiz, Tena Dávila & Corretge & González & Martínez & Granados & Cil & Ruiz. I.S.B.N.0373-1096.

MARTÍN GIL, T (1937). *Viaje por Viejas Ermitas*. En Centro de estudios Extremeños. Cáceres.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE RURAL Y MARINO. MMAMRA: *Inventario de Tecnologías disponibles en España para la lucha contra la desertificación: Almacenamiento tradicional del agua de escorrentía en ambientes semiáridos: Aspectos geomorfológicos e hidrogeológicos de los aljibes*.

NAVAREÑO MATEOS, A. (1998). *Castillos y Fortalezas en Extremadura*. Hoy, Diario de Extremadura. Badajoz.

PERALES PIQUERES, R., RAMOS RUBIO, J. A, MARTÍNEZ DÍAZ, J. M. (1994). Nuevas aportaciones sobre las creaciones artísticas extremeñas del pintor Juan de Ribera. En *Actas de los XX Coloquios Históricos de Extremadura*. Trujillo, CIT Trujillo/Diputación Provincial de Cáceres: 277-280.

RAMOS RUBIO, J., SAN MACARIO SÁNCHEZ, O. (2013). *Ermitas y oratorios de la tierra de Cáceres*. Ed. Asamblea de Extremadura. Mérida.

RODRÍGUEZ CARRERO, S. (2011). "Ermita de San Jorge, en las cercanías de Cáceres". Parte 1ª. En *Extremadura: caminos de cultura*

(blog) (17/07/2011). Accesible en: <http://caminosdecultura.blogspot.com.es/2011/07/ermita-de-san-jorge-en-las-cercanias-de.html>.

ROSCO MADRUGA, Juan (1999). La ermita de San Jorge. En *Senderos de Extremadura*, 3: 24-27. Accesible en [http://www.alexur.net/Senderos/numero3/ermita\\_sanjorge/ermita\\_sanjorge.html](http://www.alexur.net/Senderos/numero3/ermita_sanjorge/ermita_sanjorge.html)

SALCEDO J. (2014). *Inventario de Arquitectura Defensiva de Extremadura*. Ficha 2014-BA-04. Universidad de Extremadura. p 93 Cáceres (inédito).

SÁNCHEZ, M., GIL, E.; MUNICIO, C., FERNÁNDEZ-NICOLÁS, J.A. (2016). "Aplicaciones del escaneado láser en patrimonio histórico artístico". En *Libro de Actas CONTART 2016*, La Convención de la Edificación (pp.789-798). Granada: Universidad de Granada.

SANGUINO MICHEL, J. (1902). *Comisiones de monumentos de Cáceres*. Extracto del acta de la sesión celebrada el 6 de octubre de 1902. En *Revista de Extremadura*, tomo IV, nº 42: 572.

SERRANO CANDELA, Fco. (2017). *Arquitectura en el territorio. Las ermitas de Cáceres*, Grupo de Investigación Construcciones Arquitectónicas.

SERRANO CANDELA, F. (2017). Tesis doctoral. *Catalogación del patrimonio arquitectónico disperso en el territorio: las ermitas del entorno de Cáceres*. Cáceres: Universidad de Extremadura. <http://dehesa.unex.es/handle/10662/5640>.

SERRANO CANDELA, F., SAUMEL LLADO, J. (2012). *Nuevas Tecnologías Láser y Métodos tradicionales en el Levantamiento de planos Arquitectónicos*. Ed. Informes de la Construcción. Cáceres. <http://dx.doi.org/doi:10.3989/ic.2003.v55.i488.539>.

TAPIA GÓMEZ, J.A. (2003). *Levantamiento y estudio constructivo de la manzana del Casco Antiguo de Cáceres del Colegio de los Jesuitas*. (Cáceres). Proyecto Final de Carrera. Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura. Cáceres.

TREJO AIRES, N. (2016). *Análisis comparativo de fuentes documentales y gráficas del Palacio de las Cigüeñas (Cáceres)*. Trabajo Fin de Máster. Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura. Cáceres.

VAN WESEMAEL, B & POESEN, J., SOLÉ BENET, A., CARA BARRIONUEVO, L & PUIGDEFÁBREGAS, J. (1998). "Collection and storage of runoff from hillslopes in a semi-arid environment: geomorphic and hydrologic aspects of the aljibe system in Almeria Province, Spain". *Journal of Arid Environments* 40: 1-14. <https://doi.org/10.1006/jare.1998.0429>.

## Autor/es



**Francisco Serrano Candela**

[estructu@unex.es](mailto:estructu@unex.es)

Departamento de Construcción de la Escuela Politécnica de Extremadura

Doctor arquitecto, profesor Colaborador en el Departamento de Construcción de la Escuela Politécnica de Extremadura en el Grado de Edificación desde el año 1991. Universidad de Extremadura. Grupo de investigación. COMPHAS: Tecnología en Construcción, Movilidad y Patrimonio Sostenibles.

<https://orcid.org/0000-0001-8910-6837>

web: <http://comphas.unex.es/comphas/>



**José Carlos Salcedo Hernández**

[estructu@unex.es](mailto:estructu@unex.es)

Departamento de Construcción de la Escuela Politécnica de Extremadura

Doctor arquitecto, profesor Contratado Doctor en el Departamento de Construcción de la Escuela Politécnica de Extremadura en el Grado de Edificación. Universidad de Extremadura.

Grupo de investigación. G.I.C.A.: Grupo de Investigación Construcciones Arquitectónicas.

<https://orcid.org/0000-0002-7185-0286>

Artículo enviado el 24/02/2020

Artículo aceptado el 09/05/2020



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.732>

# Procesos de alteración y conservación de la escultura en vidrio

M<sup>a</sup> Ángeles Villegas Broncano y Jorge Alberto Durán Suárez

**Resumen:** Se exponen los procesos y mecanismos de alteración química de la escultura en vidrio, debidos tanto a su composición química como al efecto de las condiciones ambientales de los medios donde se pueden encontrar o conservar dichas obras escultóricas. Asimismo, se explican los orígenes e interacciones de las alteraciones de origen mecánico, óptico y biológico. Se presentan los procedimientos actuales de conservación curativa (restauración) y preventiva de la escultura en vidrio, de acuerdo con los criterios de intervención actualmente aceptados. Finalmente se consideran los posibles casos de conservación en espacios interiores y exteriores con ejemplos de esculturas reales.

**Palabras clave:** escultura, vidrio, restauración, conservación

## Alteration and conservation processes of glass sculpture

**Abstract:** Processes and mechanisms on the chemical alteration of glass sculptures are explained, both due to the glass chemical composition and to the environmental conditions effect, depending on the different places in which such glass sculptures could be conserved. Likewise, the origin and interaction of mechanical, optical and biological alterations are explained. Current remedial conservation procedures, as well as preventive conservation strategies for glass sculptures, are discussed according to the intervention criteria nowadays accepted. Finally, the different cases of conservation, both indoor and outdoor, are considered by means of real sculptures examples.

**Keyword:** sculpture, glass, restoration, conservation

## Processos de alteração e conservação da escultura de vidro

**Resumo:** São expostos os processos e mecanismos de alteração química da escultura em vidro, devido à sua composição química e ao efeito das condições ambientais dos espaços onde tais obras escultóricas podem ser encontradas ou preservadas. Da mesma forma, são explicadas as origens e as interações das alterações de origem mecânica, ótica e biológica. São apresentados os procedimentos atuais de conservação curativa (restauração) e preventiva da escultura em vidro, de acordo com os critérios de intervenção atualmente aceites. Finalmente, consideram-se os possíveis casos de conservação em espaços interiores e exteriores com exemplos de esculturas reais.

**Palavras-chave:** escultura, vidro, restauro, conservação.

## Introducción

En general, los artistas escultóricos que trabajan con vidrio aspiran a que sus creaciones sean valoradas y que pervivan. Ello depende de los siguientes factores: naturaleza y composición del vidrio o vidrios utilizados; proceso de ejecución; tratamientos en caliente o en frío realizados; condiciones ambientales de exposición o almacenamiento; y tiempo de permanencia en ellas. Dichos factores pueden actuar aislada o conjuntamente y pueden dar lugar a fenómenos sinérgicos de alteración (Fernández Navarro *et al.* 2011). Por ello su conocimiento

y el de sus mecanismos de actuación son de primordial importancia.

El presente trabajo pretende demostrar que la conservación integral de las obras escultóricas en vidrio como bienes culturales del Patrimonio artístico, depende de tres factores fundamentales: la naturaleza y las propiedades del vidrio empleado, las técnicas de ejecución utilizadas, y las características del entorno donde las obras se exhiban, almacenen o conserven. Para ello se caracterizan las patologías de degradación de las esculturas en vidrio y se investiga la influencia de las condiciones ambientales

en su conservación integral. Se analizan los criterios de restauración, conservación y protección.

### Procesos de alteración química

#### —Influencia de la composición química

El factor que ejerce mayor influencia en las propiedades de los vidrios, en su durabilidad química y en su estado de conservación es su composición química. Los vidrios más comunes para la creación de obras artísticas son los de silicato constituidos mayoritariamente por óxido de silicio, óxido alcalino (de sodio o de potasio) y óxido de calcio. También hay que mencionar los vidrios cristal (UNE 1979), de silicato de plomo y potasio, destinados a la producción de objetos de mayor calidad y valor artístico.

Se ha demostrado que solo cuando la suma de los porcentajes molares de los óxidos formadores del vidrio (de silicio, aluminio y fósforo) es superior al 60 % los vidrios se mantienen inatacables en el tiempo. La influencia de los óxidos alcalinos sobre la estabilidad del vidrio es también decisiva: el porcentaje que limita la estabilidad química se estima entre 16-20 % en peso. Los vidrios potásicos presentan una durabilidad química mucho menor que los sódicos; y los vidrios con bajos contenidos de óxido de calcio son menos durables que los que poseen contenidos elevados (Fernández Navarro 2003).

#### —Influencia de las condiciones ambientales

El grado de deterioro sufrido por los vidrios también depende de las condiciones ambientales a las que hayan estado expuestos y de la mayor o menor agresividad de los agentes químicos con que hayan permanecido en contacto. El deterioro será muy diferente según hayan estado a la intemperie, procedan de un enterramiento, de un medio subacuático o de un espacio interior (Palomar 2013).

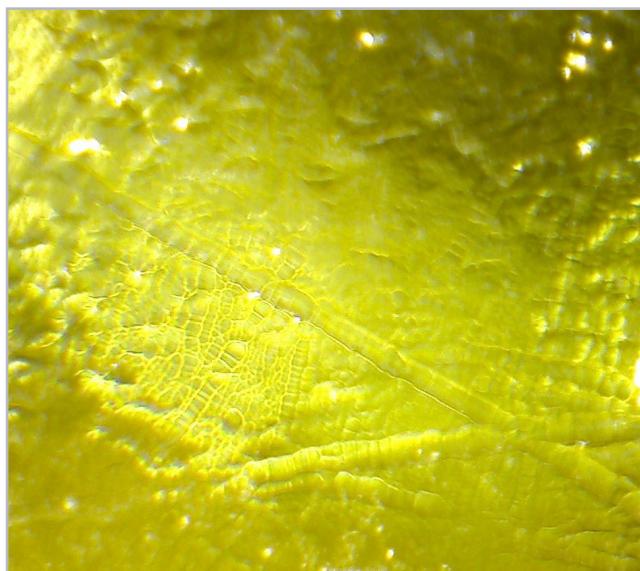
##### •Obras expuestas a la intemperie

El ataque químico del vidrio en sus primeras etapas siempre se inicia con la presencia de humedad (Rana 1961). En un ambiente rigurosamente seco cualquier vidrio podría permanecer inalterado indefinidamente.

El proceso de alteración se inicia con la adsorción sobre la superficie del vidrio de una delgada película de agua, cuyas moléculas se fijan sobre los grupos silanol (Si-OH) y lentamente se van difundiendo dando lugar a la formación de una capa de gel de sílice. Esta agua superficial produce por cambio iónico una extracción de los iones alcalinos del vidrio, que origina una progresiva desalcalinización superficial. Cuanto mayor sea el contenido de óxidos alcalinos del vidrio, más intensa y más grave será la extracción de iones alcalinos y la degradación del vidrio.

A este proceso se suma la acción de los agentes atmosféricos (CO<sub>2</sub>) y la de las emisiones contaminantes (SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) que se disuelven en el agua creando un medio ácido más agresivo (El-Shamy 1972; Scholze 1975). La secuencia del ataque creciente da lugar primero a la formación de hidróxidos, que se transforman en nitratos y en carbonatos, y, por último, en sulfatos. Los productos solubles se eliminan arrastrados por la lluvia, y los insolubles permanecen en la superficie formando depósitos cristalinos o costras.

La corrosión se inicia en las zonas del vidrio con microfisuras o grietas, donde el ataque químico progresa más rápidamente (Inglis 1913). Recíprocamente el ataque químico acelera la propagación de las microfisuras (Lawn *et al.* 1975). Es decir, existe un efecto sinérgico entre la corrosión química y las lesiones mecánicas [figura 1].



**Figura 1.-** Imagen de lupa convencional (x4) del aspecto de la superficie de una escultura de vidrio de Javier Gómez en la que se observa el progreso del ataque químico por ácidos siguiendo las líneas de las microfisuras generadas por el pulido mecánico de dicha superficie.

##### •Obras conservadas en espacios interiores

Las esculturas de vidrio situadas en interiores, supuestamente no agresivos, protegidos de la intemperie y del contacto directo con los agentes atmosféricos contaminantes, no suelen presentar alteraciones graves. No obstante, puede aparecer con el tiempo un ligero velo blanco superficial o empañamiento que origina un tacto escurridizo. Este efecto de exudado (*crizzling*) es el resultado de una acción prolongada de la humedad ambiental sobre vidrios con un contenido relativamente elevado de óxido alcalino o un porcentaje bajo de óxido de calcio (Brill 1975). Es un mecanismo de ataque análogo al que sufre en un medio acuoso inicialmente neutro. Si el agua de condensación que forma la película húmeda permanece mucho tiempo en contacto con el vidrio en

un ambiente saturado de humedad sin poder evaporarse, comienza a extraer iones alcalinos por cambio iónico. Los iones se van concentrando en la escasa cantidad de agua que forma la película y la convierten en un medio alcalino cada vez más cáustico que comienza a romper los enlaces de la red vítrea, iniciando una intensa corrosión.

Una prolongada exposición del vidrio a una humedad relativa  $\geq 60\%$  supone un riesgo importante de *crizzling*. Cuanto mayor sea el contenido de iones alcalinos del vidrio, mayor será su extracción y acumulación en la superficie. La capa superficial de hidróxido alcalino se carbonata por reacción con el  $\text{CO}_2$  del aire y da lugar al velo superficial. La gravedad del defecto aumenta en función del tiempo de permanencia y de la temperatura ambiental. Su localización es más frecuente en el interior de las obras huecas con zonas estrechas, en las que la aireación es más difícil y la humedad permanece más tiempo.

Cuando el ataque está más avanzado la extracción de los iones alcalinos puede crear huecos microestructurales que actúan como puntos de iniciación de microfisuras. Se provoca una red de grietas que puede incluso conducir al desmoronamiento de la obra por pérdida de su resistencia mecánica (Orowan 1944).

•Obras procedentes de enterramientos

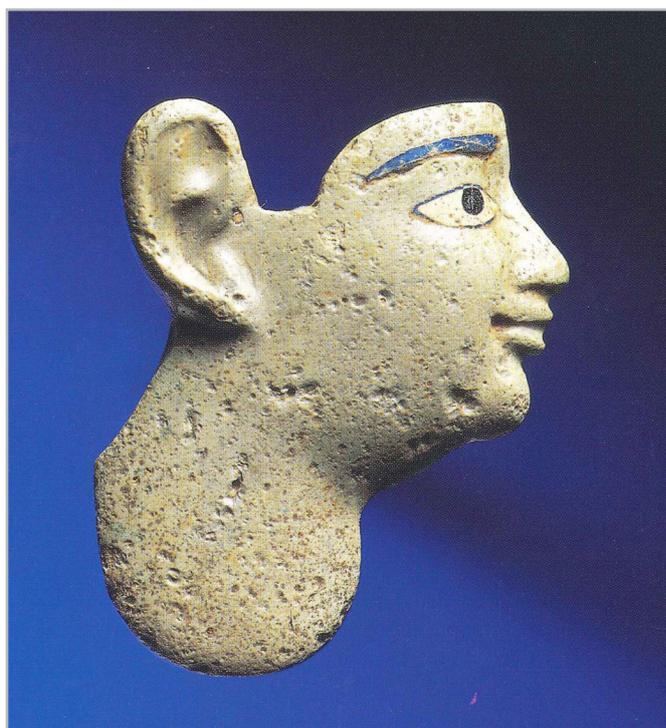
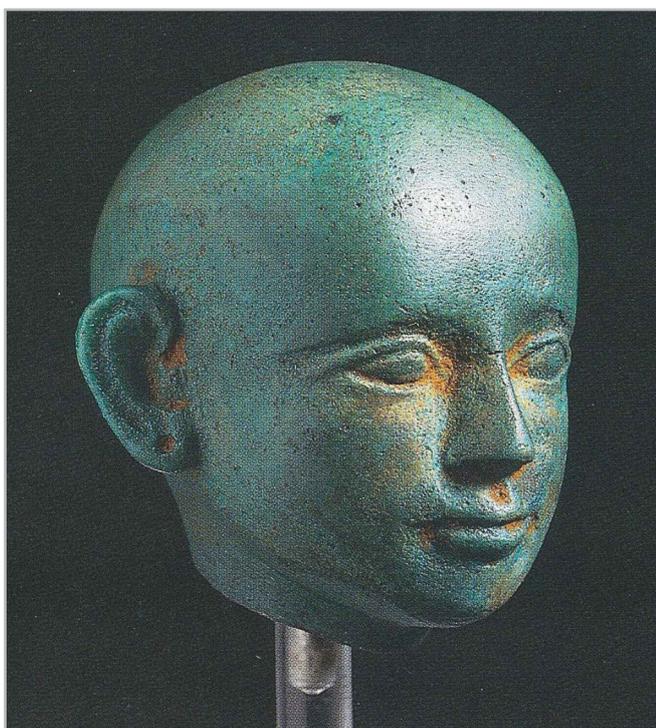
Los objetos escultóricos que han permanecido enterrados en suelos húmedos presentan una desalcalinización superficial más profunda, que origina la formación de una

capa porosa rica en sílice y grupos  $\text{OH}^-$  (Agua *et al.* 2015). Es el mismo mecanismo de lixiviación que el *crizzling* pero más grave, y depende de la humedad del entorno, régimen de lluvias, temperatura y duración de su permanencia (Palomar *et al.* 2012a). Los objetos escultóricos conservados en enterramientos durante tiempos muy prolongados presentan un aspecto mate u opaco con manchas de colores distribuidas irregularmente por la superficie, así como zonas iridiscentes y picaduras o cráteres [figura 2] (García Heras *et al.* 2012).

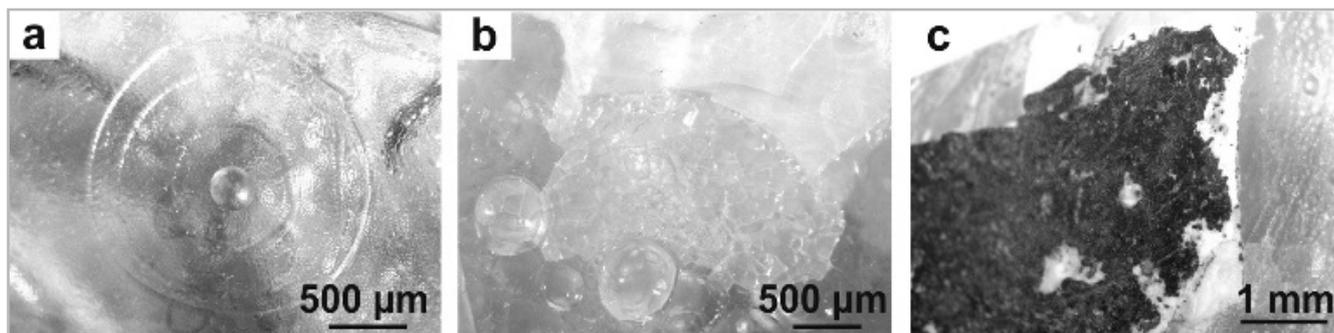
En condiciones de elevada humedad y/o de larga permanencia, el agua puede difundirse más profundamente y crear una estructura microporosa muy enriquecida en sílice, formada por finas capas superpuestas. Por eso estos objetos son muy quebradizos y pueden desmenuzarse con una ligera presión. Las irisaciones que presentan son debidas a los colores de interferencia producidos por las múltiples reflexiones de la luz al atravesar las sucesivas capas cuyo espesor es del orden de 500 nm.

•Obras procedentes de medios subacuáticos

Los objetos escultóricos que han permanecido en medios subacuáticos, la mayoría en pecios, son mucho más escasos y se dispone de menos información sobre sus alteraciones. Los estudios arqueométricos realizados en vidrios sódico cálcicos tardorromanos (Palomar 2013), pusieron de manifiesto la formación de capas desalcalinizadas y la presencia de numerosas picaduras y depósitos superficiales [figura 3].



**Figura 2.-** a) Cabeza en vidrio azul (Egipto, siglo X-VII a.C.). b) Relieve de perfil en vidrio blanco (Egipto, principios XXX Dinastía Ptolemaica, siglo IV-III a.C.). Según Stern *et al.* 1994.



**Figura 3.**- Imágenes de lupa binocular de vidrios romanos rescatados del fondo marino: a) picadura aislada, b) capa de irisación, c) depósitos oscuros. Según Palomar *et al.* 2012b.

En los vidrios conservados en medios submarinos el ataque transcurre en dos etapas: un ataque hidrolítico en medio neutro con extracción de iones alcalinos, y la destrucción del retículo vítreo con pérdida de óxidos formadores (Palomar *et al.* 2012b). Se forman costras de alteración, pero de baja adherencia respecto a las que presentan los vidrios expuestos prolongadamente a la intemperie.

#### —Procesos de alteración por deterioro mecánico

La fragilidad del vidrio es la responsable de su baja resistencia a los impactos y es la causa de su deterioro mecánico, que incluye desde lesiones puntuales (fisuras, cuarteados, grietas, desconchados) hasta su fractura total (Inglis 1913; Lawn *et al.* 1975). Además hay que incluir las alteraciones producidas por abrasión o rayado durante la manipulación de las obras escultóricas.

En todos los vidrios está demostrada la existencia de microfisuras superficiales que actúan como centros multiplicadores de la tensión aplicada, de modo que los esfuerzos que se ejercen se concentran en el vértice de la microfisura, a partir del cual se inicia y se propaga la rotura. Esto explica por qué un vidrio puede romperse al ser sometido a esfuerzos mecánicos relativamente pequeños y aparentemente inocuos. En realidad la rotura es el resultado del lento crecimiento y propagación de las fisuras preexistentes. Su crecimiento está favorecido por la presencia de humedad ambiental, porque las moléculas de agua se adsorben en la microfisura y rompen por ataque hidrolítico los enlaces químicos del vidrio haciendo avanzar la microgrieta.

La velocidad de crecimiento de las fisuras y, por tanto, la velocidad de rotura depende de tres factores fundamentales que rompen progresivamente los enlaces silicio-oxígeno: la intensidad del esfuerzo aplicado, la concentración de agua en el ambiente y la duración del esfuerzo. Al prolongar el tiempo, se produce un efecto de fatiga que hace disminuir la resistencia del vidrio y acelera su rotura (Orowan 1944).

#### — Procesos de alteración por deterioro óptico

Una alteración singular que sufren algunos vidrios que contienen óxido de manganeso, es la creciente tonalidad violeta que pueden adquirir si han estado prolongadamente expuestos a la luz solar o a una iluminación rica en radiación ultravioleta, por ejemplo en obras ubicadas a la intemperie. Este fenómeno se llama solarización (Fernández Navarro 2003).

El manganeso puede hallarse en los vidrios en tres estados de oxidación diferentes:  $Mn^{2+}$  (incolore),  $Mn^{3+}$  (de rosa a violeta) y  $Mn^{4+}$  (de marrón a negro).

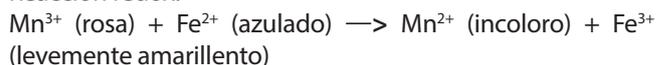
El óxido de manganeso se ha empleado para producir la coloración rosa de las carnaciones humanas en las vidrieras y continúa empleándose como colorante para impartir color de rosa a violeta en el vidrio, siendo el responsable de dicha coloración el cromóforo  $Mn^{3+}$ .

Por otra parte, el manganeso también se ha utilizado desde antes de la época romana hasta hace pocos años como decolorante en la fabricación de vidrio incolore (se conocía como "jabón de vidrieros"), debido a que añadido a la mezcla vitrificable en su estado tetravalente en forma de pirolusita  $MnO_2$ , se reduce térmicamente a  $Mn^{3+}$ , y este  $Mn^{3+}$  oxida al hierro ferroso  $Fe^{2+}$  residual en las arenas silíceas a hierro férrico  $Fe^{3+}$ , según la secuencia de reacciones:

Termorreducción:



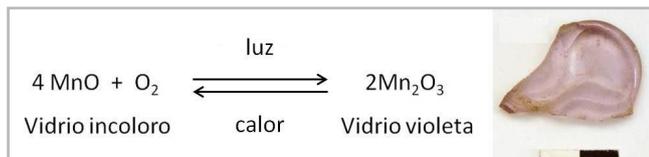
Reacción redox:



De este modo el tono residual azulado o verdoso debido a las impurezas de hierro de las arenas aportadoras de la sílice se compensa por adición cromática con el rosado de los iones  $Mn^{3+}$ .

Lo que se ignoraba es que el óxido de manganeso, que en su estado reducido ( $Mn^{2+}$ ) no produce color, experimenta un proceso de solarización o fotooxidación por efecto de

la acción prolongada de la luz solar y pasa al estado de oxidación  $Mn^{3+}$  que imparte un color violeta al vidrio, de acuerdo con la reacción de la figura 4.



**Figura 4.-** Reacciones de solarización en un vidrio incoloro de silicato sódico cálcico convencional que se hubiera decolorado con óxido de manganeso (oxidación fotoquímica).

#### — Procesos de alteración por deterioro biológico

El biodeterioro es un fenómeno de degradación originado por organismos vivos, por colonización de microorganismos como los hongos y bacterias, o bien por la proliferación de líquenes, musgos y otras especies vegetales (Carmona *et al.* 2006).

Se puede considerar que el biodeterioro de las esculturas en vidrio se reduce a aquellas conservadas en exteriores. Ello se debe a que la superficie de un vidrio común sólo se coloniza por organismos y microorganismos en condiciones ambientales especiales, con porcentajes de humedad relativa muy elevados, en entornos de baja contaminación ambiental y siempre que la superficie del vidrio sea lo suficientemente reactiva, o sea receptiva para el asentamiento de organismos vivos (Gorbushina *et al.* 1999; Sterflinger *et al.* 2013). Esta última condición tiene lugar cuando los vidrios han experimentado previamente procesos de degradación química que originan una superficie específica elevada, una textura y microestructura rugosa apta para la biocolonización, y/o presentan depósitos de partículas sólidas que generan un campo de cultivo adecuado.

Un ejemplo de escultura en vidrio biodeteriorada se muestra en la figura 5. Es una obra del escultor español Pedro García que se instaló en el jardín de su residencia en una zona muy umbría y húmeda. La escultura se mantuvo en su pedestal metálico y no se movió durante

más de tres años. Como se aprecia en las imágenes, la superficie del vidrio de los elementos que componen la obra está colonizada por diversos tipos de líquenes y otros microorganismos.

#### Restauración de las obras escultóricas de vidrio

La restauración pretende subsanar los efectos del deterioro para recuperar una apariencia lo más parecida posible a la original. Sin embargo, la reparación total no siempre es posible, porque las capas de vidrio atacadas o erosionadas son irrecuperables. Dentro de los procesos de restauración existen diferencias importantes entre la metodología más laboriosa requerida por las obras de origen arqueológico, y la que precisan las obras que han permanecido en ambientes interiores, si bien en todos los casos debe aplicarse el criterio conservador del principio de mínima intervención.

Los efectos más frecuentes que presentan las esculturas mantenidas en condiciones no excesivamente agresivas son el empañamiento, la alteración química de la superficie del vidrio y las lesiones mecánicas, grietas y fisuras. Cualquier tratamiento requiere una limpieza previa de la superficie para eliminar los depósitos de suciedad y recuperar la transparencia y colores originales. La limpieza debe realizarse primeramente en seco mediante soplado con una boquilla de aire comprimido y pinceles de pelo suave. Están desaconsejados los cepillos de fibra de vidrio porque pueden producir abrasiones y pérdidas de soporte. Seguidamente se realiza un lavado con un paño suave impregnado con agua desionizada y alcohol, o con tensoactivos no iónicos (Corpus Vitrearum 2004).

El empañamiento superficial puede eliminarse frotando con un paño suave humedecido con un ácido débil diluido. Nunca se deben emplear detergentes alcalinos porque serían contraproducentes. No obstante, el empañamiento puede reaparecer al secarse. Un secado rápido por descenso de la humedad relativa por debajo del 40 % puede formar microcristales superficiales; y si la humedad relativa desciende bruscamente por debajo del 30 %, se puede inducir un agrietamiento irreversible.



**Figura 5.-** Pedro García. Sin título. Escultura fragmentada, biodeteriorada y conservada en el exterior (c 15 cm alto).

Una vez desencadenado el proceso de desalcalinización superficial del vidrio, el deterioro sufrido por los objetos es irreversible (Fernández Navarro 2000).

Cuando se limpia el interior de obras de vidrio hueco, sobre todo si son partes estrechas donde no es posible introducir un paño, hay que secarlas escrupulosamente para evitar gotas de agua en el interior cuya permanencia podría iniciar una lixiviación alcalina que produciría manchas blanquecinas indelebles. Para evitarlo debe realizarse un primer lavado con una mezcla de agua y etanol al 50 %, seguido de otro lavado con etanol puro y un aclarado final con acetona. El secado debe llevarse a cabo en un ambiente sin humedad y a temperatura menor de 40°C. Las manchas superficiales de óxido de hierro que pueden presentar algunas obras se pueden limpiar con una solución de ácido oxálico (Ling 1999; Newton 1989).

#### — Restauración de las lesiones mecánicas

Las fisuras se deben bloquear para impedir su crecimiento y propagación. Hay que aislarlas del entorno y protegerlas de la humedad aplicando un recubrimiento hidrófugo. Primeramente hay que secarlas para tener una buena adherencia del recubrimiento e impedir que se ahueque permitiendo la entrada contraproducente de humedad.

Las erosiones superficiales, rozaduras y arañazos se eliminan mediante pulido con óxido de cerio seguido de cepillado con cerdas suaves y abrillantamiento con discos de fieltro. Las lesiones más profundas (desconchados, desportillados) se restauran reponiendo los fragmentos desprendidos y uniéndolos con un adhesivo adecuado.

Existe una gran variedad de materiales poliméricos (Newton 1989) que podrían aplicarse para unir fragmentos, fijar capas desprendidas o para sellar bordes. Sin embargo, algunos se han empleado antes de que estuvieran suficientemente probados. A veces se han empleado resinas que han envejecido, se han agrietado, amarilleado o dado lugar a la acumulación electrostática de polvo, formando depósitos negros opacos.

Hay un amplia gama de resinas epoxi que presentan buena adherencia, pero también el inconveniente de que los disolventes que se usan para aplicarlas pueden producir amarilleamiento, y después de endurecidas no son solubles. Por ello su eliminación solo es posible con un calentamiento posterior. Estos inconvenientes limitan su utilización.

Los polímeros acrílicos dan buenos resultados, son muy adherentes (aunque menos que las resinas epoxi), no amarillean, tienen un índice de refracción similar al del vidrio y pueden diluirse fácilmente para ajustar su viscosidad. Su ventaja reside en que después de endurecerse se pueden disolver en frío en diversos disolventes orgánicos. Los

productos comerciales más empleados son el Paraloid B 72 o Acriloid B 72, Plexigum N 80, WZ K 13-30/2 y el Viacryl VC 363 (Fernández Navarro 2000).

#### — Procesos de reconstrucción

En el caso de obras escultóricas procedentes de excavaciones es frecuente encontrar piezas muy fragmentadas que requieren reconstrucciones complejas para restablecer su posible configuración inicial. La tarea comprende la extracción de todos los componentes de la obra del suelo; estudio de su estado de conservación; limpieza mecánica y química; diseño de la reconstrucción gráfica de la supuesta forma original; consolidación de los fragmentos y pegado; montaje sobre una armadura o soporte para su exposición; recomposición del conjunto; rellenado de los espacios vacíos mediante la colocación de piezas de reposición de vidrio nuevo preparado al efecto, con indicación de sus características y dejando constancia de la intervención. Este trabajo es una tarea interdisciplinaria que requiere el concurso de especialistas de varias disciplinas (arqueólogos, químicos, restauradores, historiadores, diseñadores) (Newton 1989; Ortiz Palomar 1999).

#### Conservación preventiva y control periódico

Para prevenir los ambientes saturados de vapor de agua que forman condensaciones en la superficie del vidrio y provocan su alteración química y la exudación o *crizzling* (Brill 1975), se recomienda airear y mantener la humedad y temperatura constantes. Los valores recomendables son: humedad relativa 45-65 %, con oscilaciones diarias menores de  $\pm 2-3$  %, y temperatura 21-23°C. También es aconsejable la colocación de absorbentes de humedad.

Por otra parte, debe evitarse guardar o exponer las obras de vidrio en vitrinas o espacios herméticamente cerrados ya que, aunque protegen del polvo, tienen el riesgo de que se cree un microclima estanco que podría ser muy agresivo. Por ejemplo, para evitar el polvo se han realizado sellamientos con silicona que han resultado contraproducentes debido a las emisiones de ácido acético u otros compuestos orgánicos volátiles que han atacado gravemente las obras que se pretendía proteger. Asimismo, se han detectado emisiones de productos volátiles nocivos procedentes de pegamentos, disolventes orgánicos e incluso de materiales y maderas nobles empleados en las vitrinas y muebles expositores (Peña Poza 2014; Peña Poza *et al.* 2014; Peña Poza *et al.* 2015).

En cuanto a la iluminación se recomiendan luminarias exentas de componente ultravioleta y cuya iluminancia no exceda de 150 lx (o 150 lm/m<sup>2</sup>), para evitar la aparición o intensificación del color violeta de los vidrios que contengan óxido de manganeso debido al fenómeno de solarización.

Además de los controles de humedad y temperatura, es recomendable la colocación de sensores o dosímetros que detecten la presencia de determinados gases, o bien de sensores que reaccionen ante contaminantes agresivos. Entre otros tipos se han preparado por el procedimiento Sol-gel sensores químicos de respuesta óptica basados en el cambio de color que experimentan distintos indicadores en función del pH del aire (Villegas Broncano *et al.* 2012; Llorente Alonso *et al.* 2013).

La metodología consiste en instalar los sensores en los lugares próximos a las obras cuyo ambiente se desee evaluar, tanto en interiores como en exteriores. Los sensores no precisan alimentación eléctrica ni conexiones, cableados o materiales auxiliares. Se colocan en una funda protectora perforada por ambas caras para facilitar el contacto directo del sensor con el aire y, si es necesario, se cuelgan con una pinza. Al cabo de 24 h de exposición, el color del sensor se registra *in situ* por medio de una unidad de medida portátil [figura 6] conectada a un ordenador. Dicho ordenador dispone del software específico para realizar la transformación de los parámetros de color del sensor en datos de pH ambiental, así como la gestión de los resultados. En días sucesivos se pueden registrar los resultados de pH ambiental para confirmar las medidas del primer día (Peña Poza 2014). Este tipo de evaluación permite tasar las condiciones ambientales y prevenir los riesgos de alteración de las obras expuestas.



**Figura 6.-** Unidad de medida portátil, con un sensor insertado en su portamuestras, conectada a un ordenador.

### Conservación en espacios interiores

Las esculturas en vidrio suelen ser obras monolíticas y no siempre presentan superficies lisas y poco sensibles a los depósitos de polvo, suciedad y otras sustancias agresivas (González Vicario 1997a). En opinión del escultor español Javier Gómez (Barrionuevo Dumeynieu 2003), la obra recién acabada y no expuesta a agentes externos, presenta una perfecta combinación de luz y vidrio. Sin embargo con el paso del tiempo, y más si la escultura ha sufrido la meteorización, humedad, lluvia, manipulación y/o limpieza inadecuadas, los depósitos por escasos que sean

se hacen visibles y los daños mecánicos son irreversibles, salvo que, con autorización del escultor o bajo su dirección o criterio, se repare la superficie dañada. En general esa reparación supone el diseño de una nueva escultura.

El riesgo más crítico de las esculturas es el daño mecánico y las fracturas catastróficas producidas por roces, golpes o caídas, cuyos resultados suelen ser irreversibles. Los procesos de embalaje, transporte, desembalaje y ubicación de la obra en exposiciones, museos y galerías de arte son peligrosos y no siempre están cubiertos por seguros adecuados. Normalmente en los contratos que suscriben los artistas no se especifican las condiciones de conservación y/o restauración de la obra en caso de accidente, lo que demuestra que la escultura en vidrio, a pesar de tratarse de un material muy frágil, no se considera de ningún modo especial respecto al resto de los materiales escultóricos.

En resumen, los aspectos a tener en cuenta para una correcta conservación de la escultura en vidrio en interiores son:

- En museos, galerías de arte, salas de exposición, colecciones, etc., el daño irreversible, destrucción, robo o pérdida puede ser compensado por un seguro y, en el mejor de los casos, incluir que el artista proceda a su reparación, si puede hacerlo.
- En el caso de colecciones particulares es conveniente establecer un acuerdo que cubra los daños, restauraciones y reparaciones por parte del autor, si puede hacerlo. En el acuerdo se puede manifestar la voluntad del propietario de no intervenir la obra, aun en el supuesto de que se produzcan alteraciones.
- Cuando se trata de obras de gran tamaño realizadas con hojas de vidrio unidas con adhesivos, los seguros deben contemplar la estabilidad formal de la escultura durante los traslados y manipulaciones.

Entre las muchas obras escultóricas en vidrio de Javier Gómez (Gómez 2000; Gómez 2007), un ejemplo de conservación en interior es la escultura titulada "Horizonte" [figura 7]. La obra está compuesta por hojas de vidrio pegadas y sustentadas por una peana de 1 m de altura. Esta obra corresponde a un tipo de ejecución iniciado en España por el escultor en vidrio pionero Joaquín Torres Esteban (González Vicario, 1997b; González Vicario 1998) del que fueron discípulos Javier Gómez y Pedro García, anteriormente citado en este trabajo. Ambos escultores españoles en vidrio son los más reputados e internacionalmente reconocidos. El estado de conservación de la obra que se muestra en la figura 7 es bueno, salvo una pequeña rotura no observable a simple vista. El diseño de la escultura permite su modificación cambiando la posición de los dos módulos que la componen. Las hojas de vidrio se rebajaron por la parte interior de forma que el peso total quedara aligerado para

evitar el desprendimiento del adhesivo. Esta operación de recorte de las hojas de vidrio fue realizada por el autor y se considera una intervención conservacionista más que una restauración.



**Figura 7.-** Javier Gómez. Horizonte, 1988 (96 x 79 x 55 cm). Museo de Arte en Vidrio de Alcorcón, Madrid.

En esta escultura el autor realizó la unión de las hojas de vidrio mediante dos o tres puntos de adhesivo de unos 2 cm de diámetro. Transcurridos varios años se observó que el agua de limpieza, el polvo y la suciedad penetraban a través de los intersticios entre las hojas de vidrio. Consecuentemente decidió limpiar las láminas, secarlas cuidadosamente y volverlas a unir sellando los bordes con el adhesivo, para terminar con un pulido de los mismos. La propuesta de conservación futura de esta obra incluye la continuidad de su ubicación en el museo y una limpieza periódica cada seis meses con agua desionizada jabonosa neutra, utilizando paños secos de algodón natural. Respecto a su movilidad, las precauciones deben ser extremas dado su gran tamaño y la delicadeza de su estructura, para evitar roces, golpes, choques y caídas. En cuanto a la interacción de la escultura con la luz, el entorno de su ubicación en el museo es el adecuado, pues está resguardada de la luz natural por medio de toldos de tono natural en las ventanas que permiten el paso suficiente de luz para su observación.

### Conservación en espacios exteriores

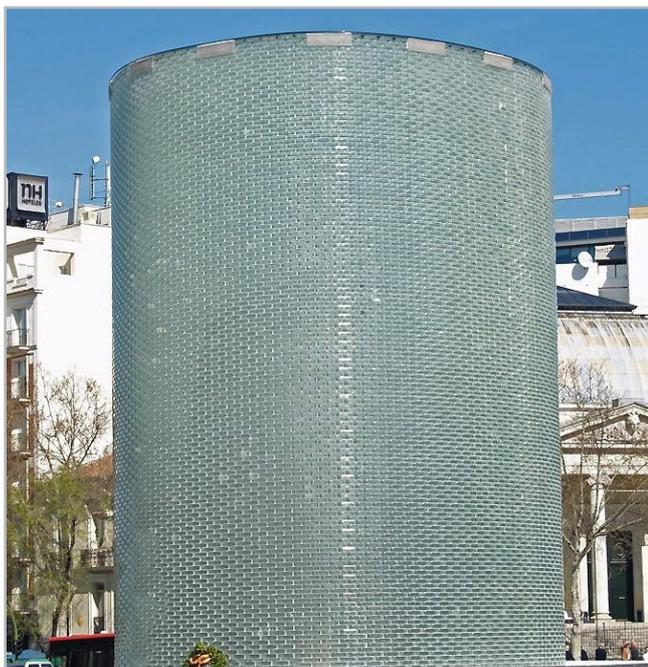
Las esculturas en vidrio que se conservan en exteriores suelen ser grandes o de dimensiones considerables y están expuestas a la meteorización, cuya intensidad depende de la situación geográfica del entorno. Hay que tener en cuenta si se trata de un ambiente urbano, más o menos contaminado, o natural donde no se

espera contaminación. En los ambientes urbanos hay que considerar los entornos de parques, jardines y zonas afines en las que los efectos de la contaminación están amortiguados o incluso no existen. Estas ubicaciones son frecuentes ya que las esculturas suelen formar parte de un proyecto ornamental o artístico que integra la obra en un paisaje más o menos controlado. La conservación de las esculturas en vidrio en exteriores pueden enfrentarse a tres niveles de interacción o agresión ambiental: en ambientes urbanos generalmente contaminados, en ambientes urbanos no contaminados o poco contaminados, y en ambientes naturales. Los ejemplos de conservación que se muestran a continuación representan casos concretos según esta clasificación.

Las esculturas instaladas en zonas urbanas en las que el tráfico rodado es intenso son las más susceptibles de meteorización e incluso de ataque químico, favorecido por la presencia de gases contaminantes ácidos. En el primer caso la presencia de una humedad relativa considerable, junto con sus variaciones debidas a las estaciones y al día/noche, así como las oscilaciones de temperatura, provocan las condensaciones de agua que favorecen los depósitos de polvo, suciedad, partículas de hollín o de otra naturaleza que se acumulan en la superficie. Este efecto es más notorio y peligroso cuantos más elementos de vidrio constituyen la escultura, y se agrava seriamente si entre dichos elementos hay aristas, diedros o triedros, que son zonas al abrigo del lavado por lluvia y se convierten en pozos de suciedad. Dichos depósitos alteran la apariencia del vidrio, disminuyen su transparencia y enmascaran su color; son una capa donde se provoca y/o favorece el ataque hidrolítico, o el ataque ácido si el entorno está contaminado. Incluso si el ataque es neutro (hidrolítico) el proceso puede terminar en un ataque alcalino, debido a la interacción de los productos de corrosión del vidrio que vuelven a atacarlo de un modo mucho más agresivo destruyendo su estructura.

Un ejemplo puede ilustrarse en los elementos de vidrio que componen el Monumento a las Víctimas del 11M en Madrid [figura 8]. Está situado en una zona urbana de intenso tráfico rodado que afecta la conservación de los bloques de vidrio. Actualmente estos aparecen deslucidos por la suciedad y su transparencia prácticamente no se aprecia. Aunque no es posible realizar análisis o comprobaciones visuales de su estado de conservación, es muy probable que las superficies estén alteradas por el ataque hidrolítico, los contaminantes gaseosos ácidos y la suciedad. Tampoco se puede descartar que estén degradados debido a un ataque ácido o alcalino.

En este caso la intervención debe incluir una limpieza periódica, más frecuente cuanto mayor sea la contaminación, con sustancias no agresivas y materiales suaves (Fernández Navarro 2000). Cualquier otra intervención, como la aplicación de recubrimientos protectores, lacas abrillantadoras, ceras o resinas resultarían contraproducentes o, cuando menos, inútiles



**Figura 8.-** Estudio de arquitectura FAM. Monumento a las Víctimas del 11M (altura 11 m, diámetro 9,5 m), inaugurado el 11 de marzo de 2007. Inmediaciones de la Glorieta de Carlos V, Madrid.

para preservar los bloques de la meteorización y permitir la formación de la capa protectora de gel de sílice, que se forma naturalmente por la interacción del vidrio con el ambiente. Otra medida eficaz de conservación preventiva sería la restricción del tráfico rodado en sus proximidades y alejarlo tanto como sea posible.

Otro caso frecuente de ubicación de esculturas en vidrio en núcleos urbanos es en fuentes ornamentales. Los vidrios sometidos al flujo constante del agua pueden alterarse según un patrón de ataque hidrolítico. Sin embargo, el efecto no es agresivo si el agua fluye continuamente. El ataque hidrolítico al vidrio resulta agresivo cuando las gotas de agua se secan sobre su superficie creando núcleos en los que los iones alcalinos extraídos del vidrio forman un microentorno alcalino que degrada al vidrio por un ataque muy agresivo en medio básico. Los vidrios de las esculturas en fuentes soportan un gran riesgo de ataque alcalino ya que se alternan periodos en que el agua no fluye y las gotas se secan sobre la escultura. Además el ataque se ve estimulado por la cercanía permanente del agua contenida en la base de la fuente.

Las esculturas en zonas marítimas experimentan un riesgo importante de ataque hidrolítico y de ataque alcalino como fase final de degradación. La elevada humedad relativa permanente y la niebla salina marina aceleran las reacciones en la superficie, lo que sumado a los ciclos de temperatura y las prolongadas exposiciones solares, pueden agravar su alteración. Aparte de una cuidadosa limpieza, pocas precauciones más pueden adoptarse para evitar los estragos de la niebla salina excepto, naturalmente, evitar instalarlas en esos entornos.

Lo mismo puede decirse sobre las esculturas en las proximidades de ríos, lagos o grandes volúmenes de agua, si bien los efectos adversos de la niebla salina no existen, y sólo los derivados de la humedad y la intemperie son los que afectan a su conservación [figura 9]. En estos casos la limpieza debe realizarse según el procedimiento descrito, evitando la aplicación de sustancias teóricamente protectoras que podrían dañar la superficie del vidrio.



**Figura 9.-** Magdalena Paukner, Das Urkraut. Jardín del Frauenau Glasmuseum, Frauenau, Alemania.

Cuando las esculturas están instaladas en entornos naturales alejados de grandes extensiones de agua y donde no se espera contaminación, las obras pueden conservarse relativamente bien, excepto por el ataque hidrolítico de la superficie del vidrio, siempre expuesto a las variaciones de la humedad ambiental y la radiación solar.

El conocimiento del régimen de lluvias es fundamental para prever cómo puede desarrollarse la alteración de los elementos de la escultura. Dicha alteración también dependerá de la presencia de aristas y de los huecos o abrigos de dichos elementos que favorecen la acumulación de polvo, tierra, deyecciones de aves, nidos de insectos, etc. Esto es crítico cuando se trata de obras de vidrio hueco ubicadas en entornos naturales que pueden convertirse en depósitos de basura.

La presencia de esculturas en vidrio en parques y jardines urbanos está sujeta a los mismos problemas de conservación que las que se instalan en entornos naturales no urbanos. El ataque hidrolítico, dependiente del régimen de lluvias y de la zona geográfica, determinará el inicio de la alteración superficial, que se intensifica bastante en esculturas compuestas de hojas de vidrio plano.

Un caso especial es el de las esculturas que combinan vidrio y otro material sensible a la corrosión, sobre todo

metales [figura 10]. A los productos de alteración y degradación del vidrio se suman los de los metales que suelen dar lugar a manchas de las aguas ferruginosas que resbalan por el vidrio y se secan sobre él. Frecuentemente las zonas de contacto entre ambos materiales suponen una seria amenaza para la integridad de la escultura, tanto por cuestiones mecánicas como por los posibles efectos sinérgicos de disminución local de la resistencia química frente a los agentes de meteorización.



**Figura 10.-** Ronald Fischer. Himmelsschale, 2007. Jardín del Frauenau Glasmuseum, Frauenau, Alemania.

Finalmente las esculturas de vidrio monolítico [figura 11] podrán tener una conservación más sencilla y duradera, ya que la superficie expuesta de vidrio a los agentes de meteorización es menor y seguramente con mayor curvatura que en el caso de las esculturas realizadas por unión de hojas de vidrio, lo que permite que el agua resbale más fácilmente y, en consecuencia, que la superficie se seque homogéneamente en menos tiempo. En cualquier caso las recomendaciones de limpieza y conservación preventiva son las mismas que se han expuesto.



**Figura 11.-** Esculturas de vidrio a la entrada del Glasmuseum Ernsting Stiftung, Coesfeld Lette, Alemania.

### Consideraciones finales

Los vidrios de silicato sódico cálcico comúnmente empleados en las esculturas son estables y presentan una elevada durabilidad química. Para garantizar su estabilidad debe evitarse el empleo de elevados porcentajes de óxidos alcalinos en su composición. El deterioro del vidrio depende no sólo de su composición química, sino también de las condiciones ambientales a las que esté expuesto, de la agresividad química del medio y de la duración de su permanencia. El prolongado contacto del vidrio con sustancias alcalinas (caústicas) puede producir ataques superficiales indelebles.

Los defectos más frecuentes en esculturas en vidrio mantenidas en condiciones no muy agresivas, son el empañamiento (en interiores), la alteración química de su superficie y las lesiones mecánicas (grietas, fisuras, desconchados y defectos de abrasión o rayado por la manipulación). Las microfisuras originadas por lesiones superficiales o por inclusiones de impurezas favorece el inicio de la corrosión química, y, por otro lado, el ataque químico acelera la propagación de las microfisuras. Es decir, existe un efecto sinérgico entre la corrosión química y las lesiones mecánicas.

Cualquier proceso de alteración del vidrio se inicia siempre con la formación de una capa de humedad superficial. Por tanto para que el vidrio permanezca inalterable es necesario conservarlo en un ambiente rigurosamente seco. Las esculturas en vidrio expuestas largo tiempo a la intemperie en ambientes muy húmedos y umbríos pueden presentar biodeterioro originado por colonias de microorganismos o por la proliferación de líquenes y musgos. Algunos vidrios que contienen óxido de manganeso pueden adquirir una creciente tonalidad violeta, si han estado prolongadamente expuestos a la luz solar o a una iluminación rica en ultravioleta.

Además del criterio de mínima intervención, la restauración de las esculturas en vidrio requiere una limpieza previa no agresiva de la superficie. Las superficies interiores de las obras con huecos deben quedar perfectamente secas para evitar el ataque de las paredes internas. Las fisuras se deben bloquear con un recubrimiento hidrófugo para impedir su crecimiento y propagación. Las lesiones superficiales se pueden eliminar mediante un pulido con óxido de cerio, seguido de un abrillantamiento con discos de fieltro. Las lesiones más profundas se pueden restaurar reponiendo los fragmentos desprendidos y uniéndolos con un adhesivo adecuado.

Respecto a la conservación preventiva, en los espacios expositivos de esculturas en vidrio deberá mantenerse una aireación y control de la temperatura y humedad. En cuanto a la iluminación es recomendable el uso de luminarias exentas de componente ultravioleta, con iluminancia menor de 150 lm/m<sup>2</sup>. Asimismo, es recomendable la instalación de sensores específicos para la detección de contaminantes gaseosos.

## Agradecimientos

A la financiación parcial del proyecto PIE-CSIC ref. 201310E081 y del programa TOP Heritage de la Comunidad de Madrid ref. S2018/NMT-4372. Al apoyo profesional de la Red *TechnoHeritage* de Ciencia y Tecnología para la Conservación del Patrimonio Cultural, y de la Plataforma Temática Interdisciplinar del CSIC *Patrimonio Abierto: Investigación y Sociedad* (PTI-PAIS).

## Referencias

AGUA, F., CONDE, J.F., OÑATE, P., SANGUINO, J., DÁVILA, A., GARCÍA-HERAS, M., VILLEGAS, M.A. (2015) "Caracterización y estado de conservación de vidrios tardorromanos del Museo Arqueológico Regional de Madrid procedentes de las necrópolis de Cubas de la Sagra". *Bol. Soc. Esp. Ceram.* V. 54 (2): 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.bsecev.2015.03.003>.

BARRIONUEVO DUMEYNIU, C. (2003) *Propuesta de conservación de escultura contemporánea en vidrio. Departamento de Pintura y Restauración.* Facultad de Bellas Artes. Universidad Complutense de Madrid.

BRILL, R. H. (1975). "Crizzling - A problem in glass conservation". *Conservation in archaeology and the applied arts, Stockholm Congress, 1975:* 121-134. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works (IIC). Londres.

CARMONA, N., LAIZ, L., GONZÁLEZ, J.M., GARCIA-HERAS, M., VILLEGAS, M.A., SAIZ-JIMENEZ, C., (2006) "Biodeterioration of historic stained glasses from the Cartuja de Miraflores (Spain)". *Int. Biodeter. Biodegr.* 58 (3-4) 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2006.06.014>.

CORPUS VITREARUM (2004). *Guidelines for the conservation and restoration of stained glass.* Second edition. Nuremberg.

EL-SHAMY, T. M., LEWINS, J., DOUGLAS, R. W. (1972) The dependence on the pH of the decomposition of glasses by aqueous solutions. *Glass Technol.* 13 (3) 81-87.

FERNÁNDEZ NAVARRO, J.M. (2000). "Causas del deterioro físico y químico de los vidrios históricos". En *Jornadas nacionales sobre restauración y conservación de vidrios*, Capítulo 2. Fundación Centro Nacional del Vidrio, Ed. Fernández Navarro, J.M. San Ildefonso (Segovia).

FERNÁNDEZ NAVARRO, J.M., (2003) *El vidrio.* Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. Referencia Ed. CSIC: 10909.

FERNÁNDEZ NAVARRO, J. M., VILLEGAS, M. A. (2011) "What is Glass? "En *Modern methods for analysing archaeological and historical glass*, Capítulo 1. Ed. Koen Janssens. John Wiley & Sons Ltd. Hoboken, NJ, Estados Unidos. <https://doi.org/10.1002/9781118314234.ch1>

GARCÍA HERAS, M., FERNÁNDEZ NAVARRO, J. M., VILLEGAS BRONCANO, M. A. (2012). *Historia del vidrio: desarrollo formal, tecnológico y científico.* Ed. Proyecto PIE-CSIC 200460E594. Madrid.

GÓMEZ, J. (2000). *Vuelos.* Catálogo de obras. Ed. Museo Municipal de Arte en Vidrio de Alcorcón. Alcorcón (Madrid).

GÓMEZ, J. (2007). Catálogo de la exposición del 23 de octubre al 15 de enero de 2007. Ed. Museo Municipal de Arte en Vidrio de Alcorcón. Alcorcón (Madrid).

GONZÁLEZ VICARIO, M. T. (1997a). *El vidrio y la forma construida en la escultura de Javier Gómez.* Goya 258: 361-368.

GONZÁLEZ VICARIO, M. T. (1997b) "La práctica artística del escultor contemporáneo y los materiales". *Espacio, tiempo y forma*, UNED. Serie VII, Historia del Arte, t. 10, 287-311.

GONZÁLEZ VICARIO, M. T. (1998). *En Catálogo de la exposición Torres Esteban, una pasión por el vidrio del 8 de mayo de 1998 al 28 de febrero de 1999.* Ed. Fundación Centro Nacional del Vidrio. La Granja de San Ildefonso (Segovia).

GORBUSHINA, A., PALINSKA, K. (1999) Biodeteriorative processes on glass: Experimental proof of the role of fungi and cyanobacteria. *Aerobiologia* 15: 183-192. <https://doi.org/10.1023/A:1007616614172>

INGLIS, E. (1913) "Stresses in a plate due to pressure of cracks and sharp corners". *Trans. Inst. Naval Arch.* 55: 219.

LAWN, B. R., WILSHAW, T. R. (1975) *Fracture of brittle solids.* Cambridge Solid State Science Series. Cambridge University Press, Cambridge.

LING, D. (1999) "Conservación de vidrio hueco en el British Museum de Londres". En *Jornadas nacionales sobre restauración y conservación de vidrios*, Capítulo 9. Fundación Centro Nacional del Vidrio, Ed. Fernández Navarro, J.M. San Ildefonso (Segovia).

LLORENTE-ALONSO, A., PEÑA-POZA, J., DE ARCAS, G., GARCÍA-HERAS, M., LÓPEZ, J.M., VILLEGAS, M.A. (2013) Interface electronic system for measuring air acidity with optical sensors. *Sensor Actuat A-Phys.* 194, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.01.058>.

NEWTON, R., DAVISON, S. (1989) *Conservation of glass.* Ed. Butterworth-Heinemann, Ltd. Oxford. ISBN: 0408106239.

OROWAN, E. (1944). "Fatigue of glass under stress". *Nature* 154: 341-343.

ORTIZ PALOMAR, E., PAZ PERALTA, J.A. (1999) "Propuesta para la conservación y exposición de vidrio arqueológico. Proyecto experimental promovido desde el Museo de Zaragoza". En *Jornadas nacionales sobre restauración y conservación de vidrios*, Capítulo 12. Fundación Centro Nacional del Vidrio, Ed. Fernández Navarro, J.M. San Ildefonso (Segovia).

PALOMAR, T., GARCÍA-HERAS, M., SABIO, R., RINCÓN, J.M., VILLEGAS, M.A. (2012a). "Composition, preservation and production technology of Augusta Emerita Roman glasses from the first to the sixth century AD". *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 12 (2): 193-211.

PALOMAR, T., GARCÍA-HERAS, M., VILLEGAS, M.A. (2012b). "Deterioro y alteraciones de vidrios romanos en medio marino" Estudios arqueológicos de Oeiras". *Actas do IX Congresso Ibérico de Arqueometria* 19: 155-162.

PALOMAR SANZ, T. (2013). *La interacción de los vidrios históricos con medios atmosféricos, acuáticos y enterramientos*. Tesis doctoral. España, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. <http://hdl.handle.net/10486/12962>.

PEÑA POZA, J. (2014). *Optimización, comportamiento y preindustrialización de sensores ambientales basados en la tecnología sol-gel*. Tesis doctoral. España, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. <http://hdl.handle.net/10486/664117>.

PEÑA POZA, J., LASMARÍAS LÓPEZ, J.M., GONZÁLEZ AMADOR, J., TOLOSANA MATEO, J.A., GARCÍA FERRERAS, H., VILLEGAS, M.A. (2014). "Tasación mediante sensores ambientales de las condiciones de conservación de los bienes culturales del museo y biblioteca histórica de la Academia General Militar de Zaragoza". En *Actas de EMERGE 2014. Jornadas de investigación emergente, en conservación y restauración de patrimonio*: 373-381. Ed. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/47276>.

PEÑA POZA, J., GÁLVEZ FARFÁN, J.M., GONZÁLEZ RODRIGO, M., GARCÍA RAMÍREZ, S., VILLEGAS BRONCANO, M.A., GARCÍA HERAS, M., (2015) "Propuesta de protocolo de valoración de la acidez ambiental en salas y vitrinas de la exposición temporal El último viaje de la fragata Mercedes. La razón frente al expolio (Museo Naval, Madrid)". *Ge-conservación* 8: 14-26. <https://doi.org/10.37558/gec.v8i0.279>.

RANA, M. A., DOUGLAS, R. W. (1961). "The reaction between glass and water. Part 2. Discussion of the results". *Phys. Chem. Glasses* 2, 196-205.

SCHOLZE, H., HELMREICH, D., BAKARDIEV, I. (1975) "Untersuchungen über das Verhalten von Kalk-Natrongläsern in verdünnten Säuren". *Glastech. Ber.* 48, 237-247.

STERFLINGER, K., PIÑAR, G. (2013). "Microbial deterioration of cultural heritage and works of art – tilting at windmills?" *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 97 (22): 9637-9646. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5283-1>.

STERN, E. M., SCHLICK-NOLTE, B. (1994). "Glas der alten Welt". *Technische Betrachtungen*, p. 82. Ed. Verlag Gerd Hatje. Stuttgart.

UNE 43-603-79 (1979). Vidrio. Nomenclatura y terminología. Cristal. Vidrio sonoro.

VILLEGAS BRONCANO, M.A., GARCÍA HERAS, M., PEÑA POZA, J., DE ARCAS CASTRO, G., BARRERA LÓPEZ DE TURISO, E., LÓPEZ NAVARRO, J.M., LLORENTE ALONSO, A., (2012). *Sistema para la determinación de la acidez ambiental y método que hace uso del mismo*. Patente española P201031071.

## Autor/es



**Mª Ángeles Villegas Broncano**  
[mariangeles.villegas@cchs.csic.es](mailto:mariangeles.villegas@cchs.csic.es)  
Instituto de Historia, CSIC.

Doctora en Ciencias Químicas por la Universidad Autónoma de Madrid (1987) y en Arte por la Universidad de Granada (2016), Profesora de Investigación de OPIs con destino en el CSIC (Instituto de Cerámica y Vidrio, 1984-2001; Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, 2001-2007; Instituto de Historia, desde 2007). Es responsable de un grupo de investigación sobre materiales del Patrimonio Cultural y su conservación. Sus líneas de investigación son: conservación integral y protección del Patrimonio Histórico y Cultural; sensores ambientales y sistemas avanzados de conservación preventiva; arqueometría de materiales (vidrio, cerámica, metales, aleaciones, morteros, etc.).



**Jorge Alberto Durán Suárez**  
[giorgio@ugr.es](mailto:giorgio@ugr.es)  
Facultad de Bellas Artes Alonso Cano.  
Universidad de Granada

Doctor en Bellas Artes por la Universidad de Granada (1995), Catedrático de la Facultad de Bellas Artes Alonso Cano de la Universidad de Granada, Área de Escultura. Es responsable del grupo de investigación HUM629 de la Junta de Andalucía. Su principal línea de investigación es sobre materiales avanzados para aplicaciones técnicas y artísticas, y su conservación-restauración. Es coordinador de módulos y profesor de varias asignaturas del Máster Universitario en Ciencia y Tecnología en Patrimonio Arquitectónico y del Máster Universitario en Rehabilitación Arquitectónica, ambos de la universidad mencionada.

Artículo enviado el 08/04/2020  
Artículo aceptado el 09/05/2020



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.743>



# Factores de alteración del retablo en madera policromada; una propuesta de terminología y clasificación

**Benjamín Domínguez Gómez**

**Resumen:** Describir bajo metodología científica el “estado de conservación” de un retablo en madera policromada, poniéndolo en relación con los riesgos a los que se ve sometido, exige contar previamente con una clasificación justificada de esas unidades que denominamos “causas” o “agentes de deterioro” de una forma concreta y organizada. Esto supone identificar, ordenar y describir el origen de los daños manifestados sobre la obra, los cuales han sido generados en un proceso continuado en el tiempo en el que toman partido un alto número de variables, relacionadas entre sí de forma articulada y compleja.

Partiendo de los trabajos que nos han precedido, exponemos una revisión crítica del tema, proponiendo una nueva clasificación de los agentes de deterioro que tienen incidencia sobre esta tipología de obras de arte.

**Palabras clave:** Retablo, madera policromada, factores de alteración, clasificación, terminología, etiología

## Alteration factors of the altarpiece in polychrome wood; a proposal for terminology and classification

**Abstract:** Describing under scientific methodology the “state of preservation” of an altarpiece in polychrome wood, putting it in relation to the risks to which it is subjected, requires prior a justified classification of those units that we call “causes” or “deterioration agents” in a concrete and organized way. This involves identifying, ordering and describing the origin of the damage manifested on the work, which have been generated in a continuous process in the time in which a high number of variables, related to each other in an articulated and complex way, take sides.

Based on the previous work, we present a critical review of the subject, proposing a new classification of the deterioration agents that have an impact on this type of works

**Keyword:** Altarpiece, polychrome wood, alteration factors, classification, terminology, etiology

## Fatores de alteração do retábulo em madeira policromada: uma proposta de terminologia e classificação

**Resumo:** Descrever com metodologia científica o “estado de conservação” de um retábulo em madeira policromada, relacionando-o com os riscos a que está submetido, requer uma classificação previamente justificada daquelas unidades a que chamamos de “causas” ou “agentes de deterioração” de maneira concreta e organizada. Isso pressupõe identificar, ordenar e descrever a origem dos danos manifestados na obra, os quais foram gerados num processo contínuo, ao longo do tempo, no qual um grande número de variáveis participa, relacionadas entre si de maneira articulada e complexa.

A partir de trabalhos que nos precederam, apresentamos uma revisão crítica do tema, propondo uma nova classificação dos agentes de deterioração que têm incidência sobre este tipo de obras de arte.

**Palavras-chave:** Retábulo, madeira policromada, fatores de alteração, classificação, terminologia, etiologia

## Introducción

Describir sistemáticamente y bajo una metodología científica el denominado “estado de conservación” de un retablo en madera policromada resulta una tarea altamente compleja. Conlleva identificar, ordenar y describir los daños generados por un proceso, imperceptible en muchos casos, continuado en el tiempo. En él toman partido un alto número de variables, relacionadas entre sí de forma articulada y compleja. Tan es así que los procesos degenerativos suelen solaparse o conjugarse de forma reiterada, entre otras razones, por la superposición de estratos y la repercusión que sobre éstos tienen las alteraciones localizadas en las capas subyacentes.

Esta dificultad para expresar adecuadamente el estado de conservación de una obra se ve incrementada por el uso inadecuado —o al menos impreciso, aunque comúnmente aceptado— de muchos términos que la jerga de la conservación-restauración ha acuñado para agilizar su identificación. Palabras como biodeterioro, causas antrópicas, accidente o intervención anterior expresan de forma rápida las cuestiones a las que nos estamos refiriendo pero, sin embargo, pueden resultar excesivamente genéricas e imprecisas si lo que se persigue es establecer una clasificación rigurosa. En este sentido, también es frecuente que los conservadores-restauradores acudan al vocablo que describe la causa o agente de deterioro para detallar su consecuencia, tal y como ocurre con los términos abrasión, golpe, lixiviación, quemadura, ataque xilófago, corte, intervención anterior, humo, etc. Esta práctica, como defienden Alonso, Ordaz y Esbert en su trabajo sobre edificaciones en piedra, resulta inadecuada por cuanto en el diagnóstico inicial, cuando todavía no tenemos una información clara del origen de los daños *“es conveniente utilizar términos que en primera acepción sean descriptivos”* (ALONSO, ESTEVEZ Y ORDAZ 2013:115). Así se evita la adscripción automática a una causa de deterioro concreta ya que, la variedad de agentes involucrados, actuando de forma interrelacionada, pueden propiciar que esta vinculación a una única causa de deterioro, de forma sistemática y excluyente, resulte inapropiada, incompleta o, lo que es lo mismo, errónea.

Aun estando plenamente de acuerdo con esta formulación y partiendo de la premisa de que cualquier análisis patológico patrimonial debe apoyarse, en primer lugar, en la identificación de los indicadores visuales de alteración localizados sobre la pieza, éste exige abordar también el estudio de las causas que han generado dichos indicadores. Esto resulta imprescindible para comprender el mecanismo de alteración que se desencadena y subsanar el origen del daño, tal y como defendemos —con tanto empeño en la actualidad— cuando hablamos de conservación preventiva. Sólo este doble análisis nos proporciona

una lectura completa de la situación real del objeto de estudio y el conocimiento necesario para proponer una actuación que subsane las patologías presentes, erradicando las causas que las han generado.

Contrariamente a lo que sucede en otras disciplinas, como la medicina, los conservadores-restauradores todavía no hemos alcanzado el consenso en lo que a la etiología o estudio de las causas de deterioro de los bienes culturales se refiere, careciendo de un sistema de clasificación de uso universal y aceptado por toda la comunidad científica que nos permita redactar un diagnóstico preciso y claro <sup>[1]</sup>. Aunque hay algunas fórmulas muy populares y, por lo tanto, utilizadas de forma reiterada, lo cierto es que contamos con tantos sistemas de clasificación como instituciones o profesionales existen. Por tal motivo, nos parecía interesante hacer una revisión crítica del tema y proponer una clasificación justificada de los agentes de deterioro que afectan a los retablos en madera policromada.

El objetivo principal de esta clasificación es garantizar la inclusión de todos los agentes de forma ordenada y concreta, arrojando luz en los casos de ambigüedad, superposición, simultaneidad o yuxtaposición, que permita una total lectura de los procesos de deterioro, ya sea en su dirección natural causa-efecto, ya de forma inversa. Por otro lado, el problema de la concatenación de alteraciones también nos llevó a pensar que había que determinar cuáles son verdaderamente las alteraciones primarias en los procesos más frecuentes de degradación, es decir, las que se sitúan al inicio de las modificaciones materiales sufridas, y cuáles secundarias, o sea, las derivadas de esas primeras alteraciones, convertidas, una vez generadas, en causa y/u origen de un segundo proceso de deterioro subsidiario. El ejemplo por antonomasia de esta particular circunstancia lo constituye el fuego como agente de deterioro, puesto que su acción siempre está condicionada al desarrollo de una causa anterior que lo genere [figura1].



**Figura 1.-** Retablo parcialmente carbonizado tras verse afectado por la caída accidental de varias velas.

## Antecedentes metodológicos

La búsqueda de una sistematización en el estudio de los factores de degradación de las obras de arte -bienes muebles- tuvo su origen en el entorno museístico. Philip Ward, en su libro *La conservación del patrimonio: carrera contra reloj*, nos informa sobre el referente más antiguo en esta materia y la importancia que reviste: La publicación *The Conservation of Antiquities and Works of Art*, de H. J. Plenderleith, publicado en Londres en 1956 y editado en castellano en 1967 por el Instituto Central de Conservación de Antigüedades y Obras de Arte como una de las acciones prioritarias de su etapa fundacional. Según Ward "la importancia de este volumen radica en su contenido diagnóstico: fue la primera explicación sistemática de los mecanismos del deterioro, que continúa siendo la base de la conservación" (WARD 1992:14).

El manual presenta un capítulo introductorio dedicado a la influencia del medio ambiente, haciendo especial hincapié en los cambios producidos por la temperatura, la HR y la contaminación. También incorpora un esquema denominado "Causas de degradación de los objetos de museo" que constituye el antecedente más antiguo de la clasificación sistemática de los agentes de deterioro, al menos que conozcamos (PLENDERLEITH 1967:1-17). En este libro, se dedican algunas páginas al estudio de las alteraciones de las "pinturas sobre paneles de madera", las cuales Plenderleith relaciona "desde antiguo" con "el uso de muebles de iglesia pintados, en la decoración de los muros y como retablos de altar" en Italia (PLENDERLEITH 1967:181-186).

Desde entonces, numerosos autores e instituciones han trabajado en la identificación y estudio de los denominados agentes de deterioro de los bienes culturales en general y de los retablos en particular. De entre todos ellos, y en lo que concierne al diseño de nuestro sistema de clasificación, resultaba imprescindible implementar el trabajo de Stefan Michalski y sus famosos diez agentes de deterioro (MICHALSKY 2006:54-55). También el listado de causas que, aunque de forma indirecta, se establece en el *Plan Nacional de Conservación Preventiva* (I.P.C.E. 2011:7) o tener en consideración las muchas fórmulas utilizadas en publicaciones vinculadas a la conservación de los bienes culturales como Nicolaus (1999), Plazas (2011), Villarquide (2005) o Weyer (2015) por citar sólo algunas.

En materia de retablos y esculturas en madera policromada, hemos tenido muy presente las clasificaciones propuestas por la profesora González López, quien las organiza en base al origen del daño (GONZÁLEZ 2005:259; BAGLIONI y GONZÁLEZ 2003:72-98) o la que se incluye en *Metodología para la Conservación de Retablos de madera policromada: Seminario Internacional organizado por la Getty Conservation Institute y el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, que diferencia entre el Estado de Conservación, las intervenciones anteriores y los mecanismos y causas de alteración, recogiendo todos ellos información relativa a la

relación causa-efecto de las patologías existentes (CAMA 2006:18).

Con todo, y a pesar de tener muy presentes los trabajos citados, la concreción, justificación y desarrollo de las diferentes familias de agentes, así como su denominación definitiva son el resultado de profundizar en cada uno de los temas, estableciendo las jerarquías y relaciones oportunas en un proceso continuado de discusión y reelaboración. Por tal motivo, las fuentes bibliográficas y documentales utilizadas son extensísimas y de muy diferente índole <sup>[2]</sup>:

- Proyectos de intervención: En muchos casos, solapan la identificación de los agentes de deterioro con la descripción de los daños, si bien se vienen incluyendo de forma más o menos explícita -según los autores y/o las instituciones- los temas relativos a las causas y factores de alteración. Destacaremos los de carácter público como los del I.P.C.E. o I.A.P.H.

- Publicaciones relativas a la conservación-restauración de retablos: Tanto de investigación como las vinculadas a intervenciones donde destacaremos las del Instituto del Patrimonio Cultural de España (I.P.C.E.). La más reciente, *el Proyecto COREMANS. Criterios de intervención en retablos y escultura policromada*, no introduce aspectos novedosos, mas hace referencia a los agentes de deterioro de forma indirecta a lo largo de toda la publicación, por ejemplo, cuando enumera los estudios específicos a realizar, desarrolla el glosario de alteraciones o establece las recomendaciones de conservación preventiva tras el tratamiento, aún sin concretar ninguna clasificación específica (I.P.C.E. 2017).

- Manuales de gestión de emergencias y riesgos: Como el recurso *Gestión del riesgo de desastres para el Patrimonio Cultural* (U.N.E.S.C.O. 2014).

- Monografías de carácter específico por temas: Por citar sólo algunos, indicaremos el trabajo de Valgañón (2008) en materia de biología, Basile (1999) en lo que respecta a la conservación de templos, Thomson (1998) para los parámetros medioambientales o sobre actos antisociales a Fernández Pardo (2007).

- Normas UNE: AENOR. *UNE-ES 15898; Conservación del patrimonio cultural; Principales términos generales y definiciones* (2012) o *UNE-ES 15757; Conservación del patrimonio cultural; Especificaciones de temperatura y humedad relativa para limitar los daños mecánicos causados por el clima a los materiales orgánicos higroscópicos* (2011), entre otras.

- Manuales técnicos: Fundamental para el desarrollo de la categoría "Deficiencias en el inmueble contenedor" ha sido el *Protocolo de Inspección Técnica de Edificaciones* (COAS/FIDAS, 2005).

- Legislación civil y normativa eclesiástica: Véanse, para

el tema que nos ocupa, las indicaciones de la *Instrucción general del Misal Romano* (VATICANO, 2007).

- Fuentes de información de organismos públicos: Por ejemplo, las relativas a fenómenos meteorológicos, hidrológicos o sísmicos, obtenidas de la página web del Instituto Geográfico Nacional.
- Publicaciones en prensa relativas a intervenciones, hurtos, hallazgos o curiosidades.
- Diccionarios, glosarios de términos artísticos y/o conservación-restauración.

### Propuesta de clasificación

Nuestra propuesta [figura 2] se organiza en seis categorías. Éstas agrupan, en base a los criterios que expondremos a continuación, lo que hemos venido a considerar como “causas primarias”, es decir, aquellas que se generan de forma autónoma sin necesidad de estar vinculadas a un proceso anterior. Seguidamente, cada una de estas categorías o familias se subdivide de manera jerárquica en nuevos grupos diseñados y ordenados según las necesidades de cada caso concreto.

No obstante, la constatación de que, en realidad, el proceso de deterioro es una concatenación causa-efecto con muchos matices, nos obliga a advertir que esta agrupación positivista no se puede concebir como “compartimentos

estancos”, sino más bien como argumentos acumulables y/o complementarios que facilitan su identificación<sup>[3]</sup>. A éstas se unen, como causas derivadas o secundarias no incardinadas a ninguna de las seis categorías, el fuego y la disociación/desvinculación.

Característica importante en esta clasificación es que hemos prescindido de la denominación “factor humano” o “causa antrópica” tan utilizada por otros autores. El motivo no es otro que la conclusión alcanzada de que, en realidad, en un buen número de causas clasificadas, por no decir que en la mayoría, interviene el ser humano, tanto directamente sobre la materialidad del objeto físico -que son las que habitualmente se vienen denominando así- como de forma indirecta a través de los procesos de decisión.

Esta formulación -que tiene muy presente la conservación preventiva- es la consecuencia de considerar al objeto dentro de un entorno y de que la acción tutelar del responsable del bien está siempre presente en el contexto de la conservación del objeto viéndose afectado, en mayor o menor medida, por las decisiones que, en algún momento, éste haya podido tomar. Esta actitud coloca al titular del bien en el centro de los argumentos del deterioro y lo convierte además en el primer responsable del control de los parámetros medioambientales o la prevención ante fenómenos meteorológicos violentos, por citar dos de los muchos argumentos que se podrían esgrimir. En consecuencia, y dado que tan antrópica resultan unas como otras causas, nos resultaba más

CAUSAS O FACTORES DE ALTERACIÓN QUE TIENEN INCIDENCIA SOBRE LOS RETABLOS EN MADERA POLICROMADA					
CAUSAS NATURALES GENERADAS EN EL TERRITORIO	DEFICIENCIAS EN EL INMUEBLE CONTENEDOR	INCIDENCIA NEGATIVA PARÁMETROS MEDIOAMBIENTALES	DEFECTOS DE CONSTRUCCIÓN	ACTUACIONES ACOMETIDAS	FUNCIONALIDAD Y REPRESENTATIVIDAD SOCIAL
<b>Biodeterioro</b> Hongos Bacterias Insectos Plantas superiores Aves Mamíferos	<b>Degradación de la fábrica</b> Cubiertas Estructuras de los elementos de cubrición Revestimientos interiores de cubrición (bovedas, cúpulas...) Paramentos verticales Elementos horizontales de apoyo Solería Espacios inferiores	<b>Temperatura</b>  <b>Humedad</b> Aire húmedo Capilaridad Condensación Contenedores plantas Infiltración Limpieza con agua Presencia humana Procedente del exterior	<b>Mala praxis artística</b> Inadecuada ejecución Inadecuada elección del material	<b>Con desvinculación del emplazamiento físico original</b> Eliminación Sustitución Traslado División	<b>Funcionalidad religiosa</b> Adaptación al espacio litúrgico/ritual Uso de velas y otras luminarias tradicionales Exorno floral Colocación de ajuar litúrgico Montajes efímeros Manipulación de elementos Exceso de celo y limpieza Colocación de exvotos
<b>Fenómenos meteorológicos violentos</b> Tormenta Viento	<b>Presencia de instalaciones</b> Cableado eléctrico Cableado suministros Evacuación de aguas, sumideros y otros conductos	<b>Contaminación</b> Combustión (humo) Dióxido de azufre Dióxido de nitrógeno Ozono Polvo	<b>Aprovechamiento y/o Adaptación de elementos preexistentes</b> Arquitectura Elementos decorativos	<b>Sin desvinculación del emplazamiento físico original</b> Modificaciones intencionadas Reparaciones	<b>Turismo y act. cultural</b>  <b>Ausencia funcionalidad: Abandono y desatención</b> Cierre del inmueble Cierre de la estancia Desatención física Desatención jurídica y/o administrativa
<b>Fenómenos hidrológicos</b> Inundaciones		<b>Radiaciones electromagnéticas</b> Radiación ultravioleta Radiación infrarroja	<b>Cambios sobrevenidos durante el proceso de ejecución</b> Accidentes y/o Imprevistos Cambio de criterio estético Falta de fondos Nuevas exigencias		<b>Actos antisociales</b> Agresión física directa Expolio Destrucción
<b>Fenómenos geomorfológicos</b> Terremoto					
<b>FUEGO</b>					
<b>DISOCIACIÓN/DESVINCLACIÓN</b>					

Figura 2.- Propuesta de clasificación de los factores de alteración que tienen incidencia sobre los retablos en madera policromada.

adecuado metodológicamente reordenar los procesos tradicionalmente denominados como “causa antrópica” en base a otros criterios más específicos. También hemos prescindido de los vocablos episodio catastrófico, desastre, accidente fortuito u otros términos similares al entender que se corresponde con una valoración subjetiva y a posteriori, ya que el que un episodio sea catastrófico o no dependerá de la gravedad de los daños provocados y la valoración que se haga de ellos.

### Causas naturales generadas en el territorio

Como criterio de inclusión en este primer grupo no necesariamente entendemos aquellas que se generan en el exterior del inmueble como referencia física literal, sino las que tienen su origen en el ámbito de la naturaleza de forma exclusiva. Por lo tanto, como subcategoría de este grupo se propone, en primer lugar, el biodeterioro, desglosado en la acción de hongos, bacterias, insectos, plantas superiores, aves y mamíferos, ante la evidencia de que, ni el inmueble ni el retablo los generan de forma autónoma [figura 3].



**Figura 3.-** Incidencia del biodeterioro (termitas).

En segundo lugar figuran los fenómenos meteorológicos violentos, que, aunque la clasificación sistemática de amenazas propuesta en el manual *Gestión del riesgo de desastres para el Patrimonio Mundial* incluye muchas más (UNESCO 2014:68), a tenor de la incidencia de éstas en la problemática que nos ocupa, sólo incluimos la tormenta, como fenómeno meteorológico que conlleva aparejado aparato eléctrico, granizo, nieve, fuerte precipitación o lluvias torrenciales; así como el vendaval que nosotros denominaremos simplemente como viento ya que para nuestro estudio, la importancia no pivota en la fuerza -que también- sino en su mera presencia, que puede llegar a ser dañina aún sin necesidad de llegar a ser violenta. Es el caso de pequeñas corrientes de aire procedentes de vanos, aparatos de climatización, etc.

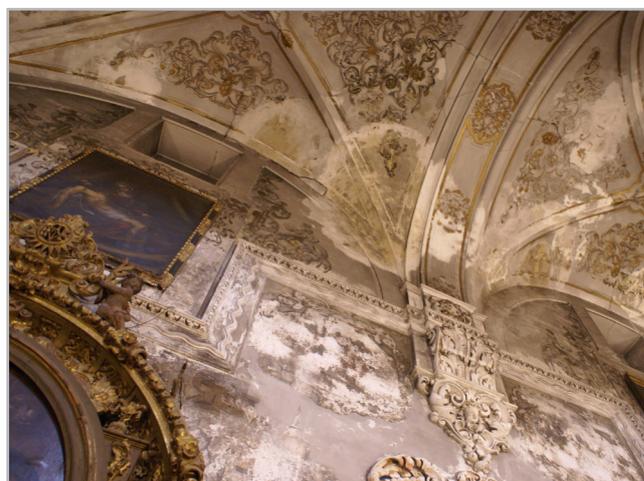
En tercer lugar, los fenómenos hidrológicos (inundaciones) y, por último, los fenómenos

geomorfológicos que, aunque se subdividen en actividad *Volcánica, Sísmica, Movimiento de masa y Erosión* (UNESCO 2014:68), en nuestro trabajo sólo tendremos en consideración los seísmos, grupo al que se pueden adscribir, por su idéntica problemática, todos los fenómenos de movimientos de tierra, aun teniendo diferente justificación geomórfica.

### Deficiencias en el inmueble contenedor

La inexorable vinculación del retablo con el inmueble que lo contiene, aun cuando incluso se localice en el exterior del mismo, convierte al edificio que lo alberga en uno de los principales actores en lo que a su conservación se refiere; ya sea como agente protector, ya como agente destructor, de forma directa o como amplificador de otras causas de deterioro. Con todo, las causas de deterioro vinculadas al inmueble no lo son porque éste sea el causante primigenio y único de las mismas, sino porque en él se localizan de forma sistemática y, por tanto, quedan agrupadas bajo este mismo epígrafe de forma natural. Aun así, resulta obligada una segunda diferenciación que nos permita un estudio ordenado de cada una de las múltiples causas incluidas en este apartado, organizadas de la siguiente manera:

En primer lugar, todo lo relacionado con la propia degradación material de la fábrica, esto es, lesiones del propio edificio que inciden sobre el retablo [figura 4]; a continuación, los factores de alteración generados por la presencia y uso de instalaciones nacidas de las necesidades funcionales del templo, así como en materia de seguridad, iluminación, climatización... asumiéndose, como norma general, que la mayor parte de los problemas tienen su origen en la acción tutelar que conlleva la toma de decisiones por parte de los responsables del inmueble y/o los técnicos encargados de la instalación y mantenimiento de estas instalaciones.



**Figura 4.-** Las patologías del inmueble, como filtraciones procedentes de las cubiertas, se convierten en agentes de deterioro de los retablos.

### Incidencia negativa de los parámetros medioambientales

En tercer lugar, se valora la incidencia negativa de los parámetros medioambientales, siempre vinculados de forma específica al entorno físico en el que se inserta la obra. En esta categoría se atienden los parámetros tradicionales de la conservación preventiva incluyendo el estudio de la temperatura, la humedad, la contaminación [figura 5] y las radiaciones electromagnéticas respectivamente.



**Figura 5.-** El origen de los depósitos de polvo hay que vincularlo a la contaminación atmosférica; su acumulación, a la falta de mantenimiento o desatención

### Defectos de construcción

La cuarta categoría comprende las causas de deterioro vinculadas a la materialidad de la obra, su ejecución técnica y los materiales en su estado primigenio. Es conocido como se viene incluyendo dentro de las causas de deterioro el "envejecimiento natural de los materiales", la "incorrecta ejecución material" y/o "la incompatibilidad e incorrecta aplicación" de los mismos. Efectivamente, todas ellas comparten la existencia de un "defecto de construcción", intencionado o no, que como describe la norma UNE ES 15898:2011, es la "imperfección de un bien debido a su concepción, a su producción, a su proceso de construcción o a la naturaleza de los materiales empleados" (AENOR 2012:10).

Con todo, otras circunstancias también pudieron propiciar que se generaran este tipo de defectos, por lo que hemos estimado que queden clasificados en agentes derivados de la mala praxis artística, del aprovechamiento y/o adaptación de elementos preexistentes o de los cambios sobrevenidos durante el proceso de construcción, con sus correspondientes subapartados.

### Actuaciones acometidas

Si el subconjunto anterior atendía a la materialidad de la obra en el momento de su ejecución, el conjunto de "actuaciones acometidas" se vinculan a los procesos



**Figura 6.-** Modificación de un retablo con una clara intención de aumentar su altura.

llevados a cabo sobre la obra y su entorno a lo largo de su historia material, es decir, las muy citadas “intervenciones anteriores”. Sin embargo, dicha consideración requeriría una especificación más concreta, la cual ha derivado en una subdivisión que contempla las actuaciones acometidas con desvinculación del retablo de su emplazamiento original (eliminación, sustitución, traslado y división) y las que no conllevan cambio de emplazamiento, divididas en modificaciones intencionadas (con motivos estéticos, funcionales o iconográficos) y las reparaciones que, aunque obviamente también pueden conllevar modificaciones puntuales, su principal característica es que sólo persiguen subsanar un daño, ampliando la vida útil del objeto, sin más [figura 6].

### Funcionalidad y representatividad social

Finalmente, la última de las familias atiende a las causas de deterioro provocadas por la acción nociva, perniciosa o perjudicial del entorno o en la obra misma como consecuencia de su funcionalidad y representatividad social. Dicha categoría aborda de forma especialísima toda la problemática del retablo como objeto inserto en el entorno eclesiástico, ámbito donde se localiza mayoritariamente nuestro objeto a valorar, con un amplio repertorio de agentes derivados [figura 7]. También se ahonda en el conocimiento de otras causas derivadas de su uso, esta vez no sacro, como es la incidencia del turismo o del retablo como objeto cultural [figura 8]. También la problemática de forma adversa, es decir, las lesiones derivadas a consecuencia del abandono y desatención.

Completa este grupo una subfamilia denominada actos antisociales, por los que entendemos toda clase de ataques a la obra que supongan una pérdida material y/o de su significado o valoración de forma completa o parcial, de forma sobrevenida e intencionada, ya que las agresiones físicas involuntarias han quedado incluidas en las consecuencias de las causas anteriores, sobre todo las mencionadas en las vinculadas a su funcionalidad religiosa (especialmente por su manipulación), abandono y/o desatención.

Si la denominación de la subcategoría la hemos tomado del Plan Nacional de Conservación Preventiva (I.P.C.E. 2011:7), los temas seleccionados emanan del variado repertorio que incluye la causa tradicionalmente denominada “antrópica” o la familia de los “episodios catastróficos”, entre otras. El caso es que, a pesar de que la comunidad científica y profesional, conocedora de la casuística, asume, comprende y justifica cada uno de los agentes en sus múltiples denominaciones, no hemos encontrado realmente un vínculo debidamente justificado que agrupase y definiese de forma adecuada los aspectos que estamos valorando. Así, algunos autores construyen su clasificación utilizando los escenarios en los que se suceden los hechos (conflicto bélico, actos vandálicos, abandono...); otros atendiendo a la acción física en la

que se desencadena (agresiones, fuego, expolio...); hay términos jurídicos utilizados de forma recurrente (saqueo, expolio, robo, hurto, vandalismo, devastación, latrocinio, exportación ilegal, venta ilícita y/o clandestina, agresión, atentado, destrucción, sustracción...) y también quien utiliza la evaluación de riesgos como nomenclatura, estableciendo como nexo de unión el hecho de que sean circunstancias sobrevenidas, catastróficas o accidentales.



**Figura 7.-** El exorno que se dispone sobre o delante de los retablos es un agente de deterioro muy característico de esta tipología de piezas.



**Figura 8.-** La actividad turística también puede llegar a convertirse en un agente de deterioro.

En consecuencia, nos hemos decantado por organizar las causas de deterioro adscribibles a este grupo de “actos antisociales” en base al acto específico o acción concreta que produce el deterioro, por medio de tres únicas subcategorías: agresión física directa, expolio<sup>[4]</sup> y destrucción, desarrolladas todas en los múltiples escenarios que les son comunes.

Aunque no cerramos las puertas a que pudieran existir eventos aislados aparentemente injustificados, que en cualquier caso podrían responder a un fenómeno psicopático, como se contempla en el *Plan nacional de emergencias y gestión de riesgos* (I.P.C.E. 2015:19), en el primer caso, el nexo común suele ser que, además de

la acción dañina, existe un interés por menoscabar la integridad física del objeto por la alta significación social que tiene para una determinada comunidad, algo que también suele estar presente en la última y más radical de las acciones que enumeramos, su destrucción total por cualquier medio o fórmula. Por su parte, el expolio, que no deja de ser una agresión física al objeto que provoca la desaparición total o parcial del mismo de su emplazamiento natural, tiene como característica principal la pervivencia de la pieza, el interés por la misma, social, artístico o pecuniario y, sobre todo, en la mayoría de los casos, el ánimo de lucro que supone su sustracción.

### **Causas secundarias; fuego y disociación / desvinculación**

A estas seis categorías se suman el fuego y la disociación/desvinculación, factores de alteración que no se incardinan en ninguno de estos grupos dado que, a pesar de su importancia en el contexto que estudiamos, realmente, son siempre causas secundarias, es decir, derivadas de alguna de las ya citadas y que, por lo tanto, no se sitúan al mismo nivel en lo que a la clasificación sistemática se refiere. Característico, sin embargo, de estos dos agentes de deterioro es que no pueden adscribirse de forma exclusiva a ninguna de las categorías primarias, pudiendo ser vinculadas, de una u otra forma, a casi todas las categorías. Véase, por ejemplo, el caso del fuego, que puede generarlos una tormenta, un fallo eléctrico, un exceso de radiación infrarroja, el uso de velas u otro tipo de luminarias, un acto antisocial o vandálico e incluso, la decisión de eliminar el retablo por la causa que sea.

Por su parte, y en relación al agente denominado disociación, cada vez lo escuchamos con más frecuencia, no tanto en el análisis organoléptico de las obras, sino especialmente cuando se habla de conservación preventiva, si bien su uso no está consensuado. De hecho, las pocas referencias bibliográficas que lo citan no son unánimes y la mayor parte de los diccionarios o glosarios de términos de conservación-restauración ni siquiera lo contemplan. Por lo que conocemos, la aplicación del término es dispar puesto que comprende o se vincula a dos significaciones distintas:

Por un lado, se utiliza para designar separación física, ya sea de una parte correspondiente a un todo, ya de un objeto en una colección; pero también, otros autores hacen referencia a la disociación como sinónimo de desvinculación, en relación al control de la documentación correspondiente a esa pieza o a los conocimientos que sobre ella se tienen y/o su relación con el todo que la contiene. En relación a este segundo significado, el Plan Nacional de Conservación Preventiva no lo cita como tal, aunque sí contempla dos aspectos que pueden vincularse a este agente de deterioro en su vertiente documental, como son la "ausencia de la documentación básica adecuada para la identificación y documentación de los bienes culturales" o

los "daños o pérdidas relacionados con la negligencia en los procedimientos de seguimiento y control", así como valora los escenarios más evidentes de disociación en el plano físico o material -primer supuesto citado- como son los daños físicos causados por la manipulación o disposición inadecuadas, por robo, expolio, etc. (I.P.C.E. 2011:7).

Nuestra opinión es que la inclusión del término disociación en el ámbito de los bienes culturales -y por consiguiente el inicio de esta confusión terminológica- proviene de la traducción directa del término anglosajón *dissociation* el cual se incluye en la famosa lista de los diez agentes de deterioro desarrollada por el C.C.I. y que, de nuevo, se elabora desde la perspectiva de las colecciones museísticas y no de la disciplina de la conservación en términos generales. Por tal motivo, puede que su traducción literal no sea la más adecuada para el significado que se le ha venido a conferir en castellano. Así, si disociación se define por la R.A.E. como la "acción y efecto de disociar" que, a su vez, se corresponde con "separar algo de otra cosa a la que estaba unida", el uso de este término afectaría de forma exacta al primero de los supuestos que hemos enunciado que, no obstante, ya se expresaba en castellano -con más o menos exactitud y corrección- con términos como separación, dispersión e incluso mutilación o pérdida material. Aquí cabría además incluir un matiz que hemos advertido en el *Dizionario di restauro archeologico*, el cual no incluye el término disociación, pero sí el de *dislocazione*, al que hace referencia al referirse al traslado de una pieza arqueológica desde su emplazamiento original a otro, si bien justificándolo por motivos de salvaguardia (MARINO 2003:82) <sup>[5]</sup>.

Sin embargo, la disociación, tal y como la entienden y definen los científicos canadienses, es un agente de deterioro que afecta a los aspectos legales, intelectuales y/o culturales de un objeto, pudiendo ser considerado como el agente metafísico, vinculado a los otros nueve agentes que atienden a los aspectos materiales de las obras. Puede definirse como el resultado de la tendencia natural de los sistemas ordenados a desmoronarse o destruirse con el tiempo. Su origen como agente lo explica García Fernández, al citarlos como *desvincular o descuidar*, cuando reconoce que "este agente de deterioro [que] estaba incluido en el primer grupo, fue Robert Waller el que planteó su importancia por los efectos que provocaba y le otorgó un grupo propio que luego fue aceptado por Stefan Michalski y el CCI. Este agente provoca la pérdida de objetos, datos relacionados con los objetos o la posibilidad de recuperar o asociar objetos a su correspondiente información" (GARCÍA FERNÁNDEZ 2013:102). Por lo tanto, el significado otorgado por Waller incluye estas dos perspectivas, la material o física y la documental, informativa o metafísica.

Para el caso de los retablos, nosotros entendemos que ambas visiones del término son válidas y están presentes en la casuística conocida, si bien no están tan estrechamente unidas como en el caso de las colecciones museísticas. Ello nos obliga a reflexionar acerca de la idoneidad de utilizarlo

de esta manera, puesto que claramente se ha demostrado que son dos cuestiones diferenciadas y que el uso del mismo término genera no pocas confusiones.

Consecuentemente, habría que diferenciar entre disociación, como agente afecto a la separación física, consecuencia directa de otras causas primarias como seísmos, modificaciones intencionadas, la manipulación, el expolio, etc. [figura 9] y desvinculación, que hace alusión a la cuestión metafísica canadiense y donde se podría



**Figura 9.-** El desmontaje descontrolado puede provocar la pérdida de elementos así como información relativa a su sistema constructivo.

incardinar toda la cuestión de la pérdida de elementos del ajuar propio del retablo (frontales de altar, platería, imaginería,...), documentación relativa a su historia (contratos, cartas de pago, memorias de restauración, fotografías...) o incluso la memoria colectiva de su uso y función [figura 10].

### Conclusiones

La elaboración de una clasificación justificada así como la definición de cada una de esas unidades que denominamos causas o agentes de deterioro nos facilitan su comprensión y, en consecuencia, nos orientan hacia una adecuada resolución de los problemas planteados. Igualmente, evita la omisión y/o dispersión de los datos, así como la disparidad y/o la arbitrariedad en su captación por parte de un equipo técnico multidisciplinar. Esta labor de definición y jerarquización resulta indispensable para diseñar cualquier método de trabajo con carácter científico, que facilite la identificación de los riesgos a los que está sometido el patrimonio de una forma veraz, concreta y organizada.

Sin embargo, lamentablemente, los bienes culturales no cuentan todavía con un desarrollo de su etiología suficientemente perfeccionado. Con esta contribución hemos querido avanzar en este sentido, si bien,



**Figura 10.-** Esculturas realizadas para un retablo que, posteriormente, han sido desvinculadas de éste.

entendemos que su definición definitiva requeriría de un profundo consenso por parte de la comunidad científica. Con todo, se establece una clasificación sistemática, con una terminología justificada y un sistema de ordenación homologable a otros temas/disciplinas que bien pudiera servir como punto de partida para esa formalización tan necesaria.

### Notas:

[1] Etiología: Estudio de las causas de las cosas; estudio de las causas de las enfermedades. El ejemplo más claro en este sentido es la *Clasificación Internacional de Enfermedades (C.I.E.)* que publica la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.) y que se viene desarrollando desde el s. XIX.

[2] Dadas las limitaciones de espacio, citaremos las publicaciones más significativas a modo de ejemplo.

[3] Adviértase también que para la organización de las categorías se ha adoptado un criterio tipológico, mucho más comprensible e intuitivo a la hora de seguir el desarrollo del texto, desestimando la ordenación alfabética estricta.

[4] En relación al término elegido, hurto y robo también podrían haber sido considerados correctos, con la salvedad de que el primero hace alusión a la apropiación indebida sin uso de la fuerza. Sin embargo, y por extensión del uso del término en los botines de guerra, expolio se asocia de forma natural al tráfico ilícito de bienes culturales, en cualquiera de sus acepciones, por lo que, en la búsqueda de una terminología específica y concisa, nos hemos decantado por dicho término, que permite agrupar al resto bajo su acepción, y no al contrario.

[5] En castellano, aunque dislocación hace alusión a “sacar algo de su lugar”, es referido a huesos y articulaciones, por lo que se nos antoja más correcto el uso del término deslocalización, o simplemente, para elementos pertenecientes a un retablo, disociación. Con todo, el término italiano comprende un matiz geográfico que disociación no posee, al menos, explícitamente.

### Referencias

AENOR (2012). UNE-ES 15898; *Conservación del patrimonio cultural; Principales términos generales y definiciones*. Madrid: AENOR.

AENOR. (2011). UNE-ES 15757; *Conservación del patrimonio cultural; Especificaciones de temperatura y humedad relativa para limitar los daños mecánicos causados por el clima a los materiales orgánicos higroscópicos*. Madrid: AENOR.

ALONSO, F.J., ORDAZ, J., ESBERT, R. M<sup>a</sup>. (2013). “Indicadores del deterioro en los materiales pétreos de edificación: Clasificación y análisis de los daños”. En Proyecto COREMANS: Criterios de intervención en materiales pétreos. Madrid: Instituto Patrimonio Cultural de España (I.P.C.E.): 111.

BAGLIONI, R., GONZÁLEZ LÓPEZ, M<sup>a</sup> J. (2003) “La Conservación de la Escultura Policromada”. En *Artes y Artesanías de la Semana Santa Andaluza* (volumen 3, la Imaginería Procesional). Santander: Ed. Tartessos: 72-98.

BASILE, G. (1999). *Edifici storici di culto decorazioni, arredi: Guida alla manutenzione*. Roma: Edizioni de Luca.

CAMA, J. (2006). “Un patrimonio cultural que sigue vivo. La teoría de la restauración como marco de referencia para la definición de una metodología de intervención en retablos”. En *Metodología para la Conservación de Retablos de madera policromada: Seminario Internacional* organizado por la Getty Conservation Institute y el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico Sevilla, mayo 2002. Sevilla: Junta de Andalucía, Consejería de Cultura, 2006: 14-19.

C.O.A.S., F.I.D.A.S. (2005). *Protocolo de Inspección Técnica de Edificaciones*. Sevilla: Colegio Oficial de Arquitectos de Sevilla/ Fundación para la investigación y difusión de la arquitectura en Sevilla.

FERNÁNDEZ PARDO, F. (2007). *Dispersión y destrucción del patrimonio artístico español*. Madrid: Fundación Universitaria Española.

GARCÍA FERNÁNDEZ, I. M<sup>a</sup> (2013). *La Conservación Preventiva de Bienes Culturales*. Madrid: Alianza Editorial.

GONZÁLEZ LÓPEZ, M<sup>a</sup> J. (2005). “Técnica y problemática de los retablos en madera policromada. Pautas para establecer una metodología de estudio para su conocimiento e intervención”. En *Actas de las IV Jornadas de Protección del Patrimonio Histórico*. Écija, Asociación de Amigos de Écija: 151-294.

I.A.P.H. *Activos Digitales IAPH; Proyectos y actuaciones para la conservación en bienes culturales* <https://repositorio.iaph.es/handle/11532/162076> [consulta 13/05/2020].

I.I.C. (<https://www.canada.ca/en/conservation-institute.html>) Agent of Deterioration: Dissociation (R. Robert Waller; Paisley S. Cato, s/f). Disponible en: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration/dissociation.html> [consulta 13/05/2020].

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL Información sísmica <http://www.ign.es/web/ign/portal/sis-area-sismicidad> [consulta 13/05/2020].

I.P.C.E. (2017). *Proyecto COREMANS. Criterios de intervención en retablos y escultura policromada* [en línea] Madrid: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes, Secretaría General Técnica, Subdirección General de Documentación y Publicación. Disponible en [https://sede.educacion.gob.es/publiventa/descarga.action?f\\_codigo\\_agc=15896C](https://sede.educacion.gob.es/publiventa/descarga.action?f_codigo_agc=15896C) [consulta 13/05/2020].

I.P.C.E. (2017). *Plan Nacional de Conservación Preventiva*. [en línea]. Madrid: I.P.C.E. Disponible en <http://www.culturaydeporte.gob.es/planes-nacionales/dam/jcr:30080f76-742a-407a-a5aa->

[1696b79f25ae/10-maquetado-conservacion-preventiva.pdf](https://www.culturaydeporte.gob.es/planes-nacionales/dam/jcr:7271e79b-5637-4cff-8a51-9baf9aedadc5/13-maquetado-emergencias.pdf)  
[consulta 13/05/2020].

I.P.C.E. (2015). *Plan Nacional de Riesgos y Emergencias del Patrimonio Cultural* [en línea]. Madrid: I.P.C.E. Disponible en <http://www.culturaydeporte.gob.es/planes-nacionales/dam/jcr:7271e79b-5637-4cff-8a51-9baf9aedadc5/13-maquetado-emergencias.pdf> [consulta 13/05/2020].

I.P.C.E. *Archivo del Instituto del Patrimonio Cultural de España* <http://catalogos.mecd.es/opac/index> [consulta 13/05/2020].

MARINO, L. (coord.) (2003). *Dizionario di restauro archeologico*. Firenze: Alinea.

MICHALSKI, S. (2006). *Preservación de las colecciones en Cómo administrar un museo: Manual Práctico*. I.C.O.M.

NICOLAUS, K. (1999). *Manual de restauración de cuadros*. Colonia (Alemania): Könemann.

PLAZAS, M<sup>a</sup> C. (2011). *Conservación preventiva en un museo; Nociones básicas*. Bogotá: Museo Nacional de Colombia.

PLENDERLEITH, H. J. (1967, 1956). *La conservación de antigüedades y obras de arte*. Madrid: Instituto Central de Conservación y Restauración de Obras de Arte, Arqueología y Etnología.

THOMSON, G. (1998). *El museo y su entorno*. Madrid: Akal.

U.N.E.S.C.O. (2014). *Gestión del riesgo de desastres para el Patrimonio Cultural* [Recurso electrónico]. París: UNESCO, ICCROM, ICOMOS y UICN. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002281/228134s.pdf> [consulta 23/4/2018].

VALGAÑON, V. (2008). *Biología aplicada a la conservación y restauración*. Madrid: Síntesis.

VATICANO. *Instrucción general del Misal romano* (Ed. español) [en línea] [Consulta 15/01/2018]. Disponible en: [http://www.vatican.va/roman\\_curia/congregations/ccdds/documents/rc\\_con\\_ccdds\\_doc\\_20030317\\_ordinamento-messale\\_sp.html](http://www.vatican.va/roman_curia/congregations/ccdds/documents/rc_con_ccdds_doc_20030317_ordinamento-messale_sp.html)

VILLARQUIDE, A. (2005). *La pintura sobre tela II: alteraciones, materiales y tratamientos de restauración*. San Sebastián: Nerea, D.L.

WARD, P. (1992). *La conservación del patrimonio: carrera contra reloj*. California: The Getty Conservation Institute.

WEYER, A; ROIG, P; POP, D. et al. (2015). *EwaGlos, European Illustrated Glossary of Conservation Terms for Wall Paintings and Architectural Surfaces*. Petersberg: Michael Imhof Verlag.

## Autor



**Benjamín Domínguez Gómez**

[bendomgom@alum.us.es](mailto:bendomgom@alum.us.es)

HUM-956 "Conservación y Patrimonio. Métodos y Técnicas" Universidad de Sevilla

Doctor en Bellas Artes con mención internacional por la Universidad de Sevilla, tras la defensa de la tesis doctoral titulada "La conservación preventiva del retablo lúneo: Diseño de una herramienta de evaluación aplicable a su tutela", calificada con Sobresaliente cum laude por unanimidad. Licenciado en Bellas Artes en la especialidad de conservación y restauración de obras de arte por la misma universidad, también es egresado del Máster en "Arquitectura y Patrimonio Histórico" de la Escuela Superior de Arquitectura de Sevilla, por cuyo expediente fue galardonado con el premio extraordinario Fin de estudios. Director-gerente de la empresa GESTIONARTE desde su creación en 2005, simultanea su labor profesional con la investigación científica dentro del Grupo de Investigación HUM-956 "Conservación y Patrimonio. Métodos y Técnicas" adscrito a la Universidad de Sevilla. Colaborador Honorario del Departamento de Pintura de la universidad hispalense, ha disfrutado de una Estancia de Investigación de doce meses en el Área de Conservación Preventiva del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (I.A.P.H.), con quienes ha colaborado en algunos proyectos, y en el Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro de Roma (I.S.C.R.) durante cuyo período fue beneficiario de una residencia como investigador en la Real Academia de España en Roma, dependiente del Ministerio de Asuntos Exteriores del Gobierno de España. Especializado en el tratamiento de obras en madera policromada, en su labor profesional como conservador-restaurador destacan los trabajos de investigación, redacción, dirección y ejecución de proyectos de intervención sobre retablos y escultura procesional. Es miembro de la Red de Expertos del Proyecto "Campus de Excelencia Internacional en Patrimonio Cultural y Natural" (CEB09-0032), del Grupo Español del International Institute for Conservation (GE-I.I.C.) y la Asociación de Conservadores-Restauradores de España (A.C.R.E.).

Artículo enviado el 22/12/2019

Artículo aceptado el 19/05/2020



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.726>

# Suplemento:

**TECHNOHERITAGE 2019 - *Fourth edition of the  
International Congress on Science and Technology for the  
Conservation of Cultural Heritage***

---

# TECHNOHERITAGE 2019

## IV International Congress Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage



# Índice

## Suplemento:

### ***TECHNOHERITAGE 2019 - Fourth edition of the International Congress on Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage***

#### ***Presentación /Presentation***

Javier Becerra Luna, Pilar Ortiz Calderón, Francisco S. Pinto **151**

#### ***Electrochemical evaluation of the patina of the weathering steel sculpture “Once Módulo”***

Ana Crespo, Blanca Ramírez-Barat, Iván Díaz, Emilio Cano **153**

#### ***Conservation to overcome oblivion. New methods for the survival of lost heritage memory***

María José Merchán, Emiliano Pérez **160**

#### ***Analysis of urban vulnerability as a tool for cultural heritage preservation. The cases of the medium-sized historical ensembles in Andalusia***

Daniel Navas-Carrillo, Blanca del Espino Hidalgo, Juan-Andrés Rodríguez-Lora, Teresa Pérez-Cano **171**

#### ***Heritage monitoring and surveillance using Sentinel satellite data in the Lower Alentejo (Portugal)***

Steffan Davies, Martino Correia, Ricardo Cabral **186**

#### ***The performance of shelters for the conservation of archaeological sites in dry and warm climates: the case of Complutum***

Cristina Cabello Briones **193**

#### ***Coberturas sostenibles en excavaciones arqueológicas. Metodología de aplicación al caso de mosaicos en el Conjunto Arqueológico de Itálica (Santiponce, Sevilla)***

M. Ordóñez-Martín y J.C. Gómez de Cózar **202**

#### ***Evaluación de riesgos, monitorización y simulación de edificios patrimoniales***

C. M.ª Muñoz González, Á. L. León Rodríguez, J. Navarro Casas, J. Ruiz Jaramillo, C. Teeling **215**

#### ***Environmental degradation of Modern non-balanced glasses***

Teresa Palomar, Alexandra Rodrigues **226**

#### ***Laser-Induced Fluorescence mapping of pigments in a secco painted murals***

Auxiliadora Gómez-Morón, Rocío Ortiz, Francesco Colao, Roberta Fantoni, Javier Becerra, Pilar Ortiz **233**

#### ***Técnicas analíticas para la caracterización de documentos: una revisión bibliográfica***

Gemma Mª Contreras, Javier Becerra **251**

#### ***La incidencia de la opinión social en el grado de vulnerabilidad de los edificios patrimoniales. El caso del centro histórico de Popayán (Colombia)***

Mª Isabel Turbay Varona, Rocío Ortiz, María Arana, Pilar Ortiz **267**

## Presentation / Presentación

The Network of Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage promotes the collaboration between the agents and stakeholders of the science-technology-business system, sharing experiences, knowledge, and technology with the main goal of contributing to the conservation and safeguard of Cultural Heritage.

The fourth edition of the International Congress on Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage was held in Seville, Spain, 26-30 March 2019, was focused on the application of digital and new technologies for the sustainable management, knowledge and social innovation for the prevention, conservation and management of heritage. More than 150 abstracts were received. The Congress had the support of Spanish National Research Council, Andalusian Institute of Historical Heritage, University Pablo de Olavide and University of Seville. And partially funded by the Spanish research projects

- ART-RISK: Artificial intelligence applied to preventive conservation of heritage buildings - a RETOS project of Ministerio de Economía y Competitividad and Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), (code: BIA2015-64878-R; MINECO/FEDER-UE)

- TUTSOSMOD: Sustainable management of cultural heritage through BIM and GIS models: contribution to knowledge and social innovation. A project funded by the Ministry of Science, Innovation and Universities (HAR2016-78113-R)

This special issue includes papers from Technoheritage participants in the congress, based on the use of digital and new technologies, physico-chemical techniques or vulnerability assessment, among others. In this context, Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage have a key-role in research, establishing new methodologies and protocols towards better knowing of our historical buildings, archeological sites and artworks.

La Red de Ciencia y Tecnología para la Conservación del Patrimonio Cultural promueve la colaboración entre los agentes y las partes interesadas del sistema ciencia-tecnología-empresa, compartiendo experiencias, conocimientos y tecnología con el objetivo principal de contribuir a la conservación y salvaguarda del Patrimonio Cultural.

La cuarta edición del Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología para la Conservación del Patrimonio Cultural, celebrada en Sevilla, España, del 26 al 30 de marzo de 2019, se centró en la aplicación de nuevas tecnologías digitales para la gestión sostenible, el conocimiento y la innovación social para la prevención, conservación y gestión del patrimonio. Se recibieron más de 150 resúmenes. El Congreso contó con el apoyo del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, el Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, la Universidad Pablo de Olavide y la Universidad de Sevilla. Y estuvo parcialmente financiado por los proyectos de investigación españoles:

- RIESGO DE ARTE: Inteligencia artificial aplicada a la conservación preventiva de edificios patrimoniales: un proyecto RETOS del Ministerio de Economía y Competitividad y Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), (código: BIA2015-64878-R; MINECO / FEDER-UE)

- TUTSOSMOD: Gestión sostenible del patrimonio cultural a través de modelos BIM y SIG: contribución al conocimiento y la innovación social. Un proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (HAR2016-78113-R)

Este número especial incluye artículos de los participantes del congreso Technoheritage, sobre el uso de las nuevas tecnologías digitales, técnicas físico-químicas o la evaluación de la vulnerabilidad, entre otros. En este contexto, la Ciencia y la Tecnología para la Conservación del Patrimonio Cultural tienen un papel clave en la investigación, estableciendo nuevas metodologías y protocolos para conocer mejor nuestros edificios históricos, sitios arqueológicos y obras de arte.

During the Technoheritage conference, each presentation (oral or poster) was evaluated by two reviewers, and some authors were asked for publication in a special issue of Ge-Conservación. The final papers according the standard for authors of the journal, were also evaluated by double blind per review system.

We sincerely acknowledge the work of Technoheritage network, authors, Local Organizing Committee, Scientific Organizing Committee and the anonymous reviewers.

\*Although all care is taken to ensure integrity and the quality of this publication and the information herein, no responsibility is assumed by the publishers, editors nor the authors for any damage to the property or persons as a result of operation or use of this publication and/or the information contained herein.

\*The Editors declare that they have no conflicts of interest regarding the publication of this Special Issue.

Durante el congreso Technoheritage, cada presentación (oral o póster) fue evaluada por dos revisores, y se informó a algunos autores que la posibilidad de publicar en un número especial de Ge-Conservación. Los trabajos finales, según el estándar para autores de la revista, también fueron evaluados por un sistema doble ciego de revisión.

Quisiéramos agradecer sinceramente el trabajo de la red Technoheritage, los autores, el Comité Organizador Local, el Comité Organizador Científico y los revisores anónimos.

\* Si bien se toman todas las precauciones para garantizar la integridad y la calidad de esta publicación y la información aquí contenida, los editores, editorial y autores no asumen ninguna responsabilidad por ningún daño a la propiedad o personas como resultado del funcionamiento o uso de esta publicación y/o la información aquí contenida.

\* Los editores declaran que no tienen conflictos de intereses con respecto a la publicación de este número especial.

## Editores invitados

### Javier Becerra Luna

Universidad Pablo de Olavide,  
Sevilla, España

### Pilar Ortiz Calderón

Universidad Pablo de Olavide,  
Sevilla, España

### Francisco S. Pinto

Universidad de Sevilla, Sevilla,  
España



# Electrochemical evaluation of the patina of the weathering steel sculpture *Once Módulo*

A. Crespo, B. Ramírez-Barat, I. Díaz, E. Cano

**Abstract:** Weathering steels (WS) have been widely used due to the protective rust formed on the surface of the bare metal exposed to the atmosphere. They have been studied attending to specifications and characteristics in engineering, but in cultural heritage the use of this material does not follow the same criteria and has different needs which must be addressed. Among them, the design and the location of the sculpture may have an impact on the rust formed and may not be as protective as it was supposed to be.

This work presents the study of the weathering steel sculpture *Once Módulo* which shows areas with different exposure to rainwater and different surface heterogeneities. The results obtained by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) have shown that the protective ability of the rust depends on the previous differences and that design and location of the artwork play an important role for its conservation.

**Keywords:** weathering Steel, sculpture, electrochemical impedance spectroscopy, atmospheric corrosion, conservation, contemporary art.

## Evaluación electroquímica de la pátina de la escultura en acero patinable *Once Módulo*

**Resumen:** Los aceros patinables han sido ampliamente utilizados debido a la habilidad protectora de la herrumbre que se forma en la superficie del metal al exponerlo a la atmosfera. Su estudio se ha enfocado en las especificaciones y características desde un punto de vista ingenieril, sin embargo, en patrimonio cultural el uso de este material no sigue los mismos criterios y tiene distintas necesidades que han de atenderse. Entre ellas, el diseño y la localización de la escultura pueden tener un impacto en la herrumbre formada y esta puede no ser tan protectora como se supondría.

Este trabajo presenta el estudio de la escultura de acero patinable *Once Módulo* la cual muestra áreas con distinta exposición al agua de lluvia y distintas heterogeneidades superficiales. Los resultados del análisis con Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE) han mostrado que la habilidad protectora de la herrumbre depende de las diferencias anteriores y que el diseño y la localización de la obra juegan un importante papel en su conservación.

**Palabras clave:** acero patinable, escultura, espectroscopia de impedancia electroquímica, corrosión atmosférica, conservación, arte contemporáneo

### Introduction

Weathering steels (WS), also known by the commercial name Cor-Ten, are carbon steels with alloying elements such as chromium, copper and nickel in quantities lower than 3-5% (Morcillo et al., 2013). WS are widely used in civil engineering due to their ability to naturally develop a protective patina at low aggressive atmospheres, which slows down the corrosion of the base metal and makes no need of painting the material (Díaz et al., 2012). Since the 1960s WS have also been used in contemporary art and architecture thanks to the rich colors of the patina and

with the aim of placing outdoors sculptures which could remain even longer than bronze (Scott, 1991). However, there are some characteristics differences in the use of WS in cultural heritage compared to civil engineering that may modify and affect the protective ability of the rust.

The first difference is the use of acids and salts on the surface of the steel. As the appearance of the appealing patina needs long exposure times, sculptors and blacksmiths usually accelerate its formation with chemical treatments (Crespo, 2016). The second issue is the geometry of the sculpture, as one of the conditions for a patina to be



**Figure 1.** - Sculpture *Once Módulo* from different perspectives.

protective is the alternation of wetting and drying cycles (Stratmann et al., 1983), the design may have sheltered zones and water accumulation zones with different time of wetness (ToW: number of hours per year in which the relative humidity is higher than 80% and the temperature is beyond 0°C, according to the ISO 9223). The last difference is the location of the artwork, if the artwork is constantly wet –as in parks with watering zones- or if is mainly dry – as under a porch or trees- the wetting and drying cycles may be altered and have consequences on the protective ability of the rust. A good understanding of these effects is important to foresee the long-term durability of the artwork and contribute to its preservation.

The sculpture *Once Módulo* was performed by Amador Rodríguez (Ceuta 1926, Madrid 2001), a Spanish sculptor and painter. He has worked with different materials depending on the message of his artwork; among them, steel was the first material he used. *Once Módulo* was performed in 1971 during his rationalist period, while he was studying different geometry forms (Gómez, 2016) which are expressed in this artwork [figure 1]. The sculpture is a cube with dimensions of 160 cm. each side made of WS with circular shapes inside. It was acquired by the Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía in 1971 and deposited at the Museo de Escultura al Aire Libre de Leganés (Madrid) in 2000-2001.

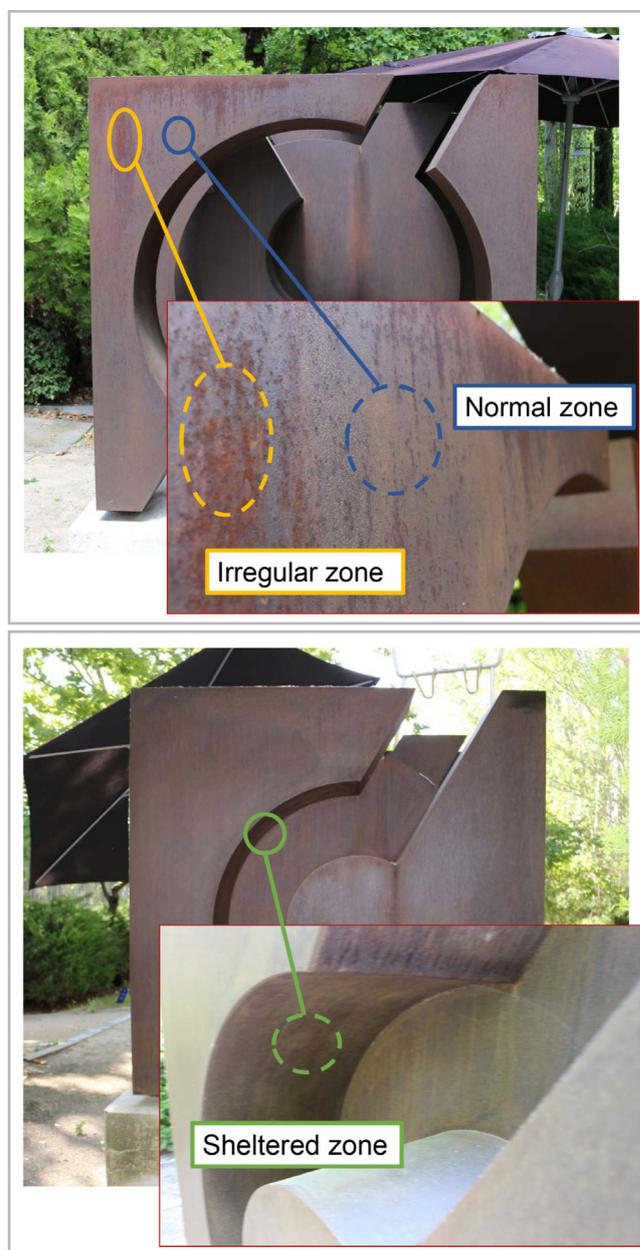
The aim of this work is to analyze the protective ability of the sculpture patina in areas with different time of wetness and different visual surface heterogeneities to study the effect that it may have on the development of the rust.

## Methodology

### —1. Zones of analysis

The sculpture *Once Módulo* is placed at the Museo de Escultura de Leganés (south of Madrid, Spain). The museum is outdoors and inside of a park. The environment could be classified as urban atmosphere of corrosivity category C2 for plain carbon steel, according to ISO 9223. The sculpture has a complex geometry with areas of different time of wetness. Two of these areas were chosen for analysis: a vertical one labeled as Normal zone and another area labeled as Sheltered zone with less exposure to rainwater. In the vertical area it is possible to distinguish differences in color and texture in the patina,

so a third zone was chosen in this area and labeled as Irregular zone. The three zones of analysis are shown in [figure 2]. Although the number of measurements is low for statistical purposes, in this work only comparative study has been taken into account.



**Figure 2.** - Details of the three zones of analysis (solid circles) and magnifications (dashed circles). Normal zone (blue), Irregular zone (yellow) and Sheltered zone (green).

—2. Techniques

The protective ability of the rust in the different areas of the sculpture was measured by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). EIS is a very useful technique because it provides information about the corrosion process as well as the protective behavior of the patina, however its application for in situ analysis is complicated due to the difficulties of placing an electrochemical cell with a liquid electrolyte on the usually curved, rough and non-vertical surfaces of the sculptures (Ramírez Barat and Cano, 2018). To perform EIS analysis directly over the patina of the metallic sculpture, a portable electrochemical cell was designed (Cano et al., 2014, Ramírez Barat et al., 2018). In this study, the electrochemical cell consists of a stainless-steel mesh as counter electrode, a Ag/AgCl electrode as a reference and the electrolyte is an artificial rain prepared in the laboratory according to the pollutants of Madrid; the electrolyte was gelled with 3% agar. EIS analysis have been performed with a Gamry Reference 600 potentiostat, the sequence applied was 1800 seconds of Open Circuit Potential (OCP) and EIS from 100 kHz to 10 mHz with an amplitude of 10 mV. The fit of the results was made with Zview software.

EIS results have been analyzed with reference to the patina thickness, which has been measured with an Elcometer 456 gauge, using a probe for ferrous materials in the same areas tested for EIS.

Finally, as aesthetical properties are a matter of importance in cultural heritage, color has been measured in the same areas with a Konica Minolta spectrophotometer CM-700-d. Differences between two colors are a subjective matter, but a way to measure them is with the parameter ΔE calculated with the differences in the CIEL\*a\*b\* sphere coordinates with the following formula.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)}$$

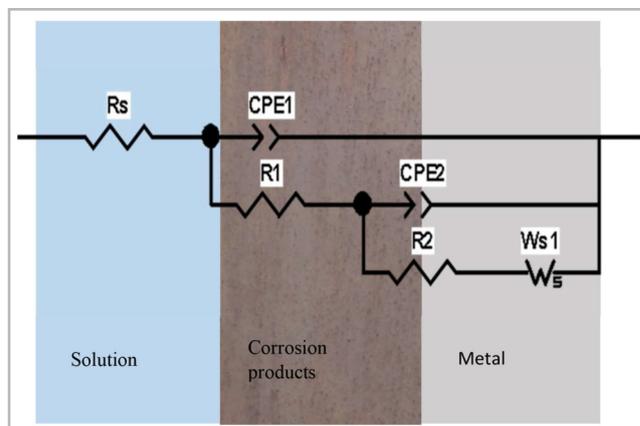
To evaluate the differences in color, the previous formula has been applied. Variation of the L\* parameter (brightness) and a\* and b\* parameters (green- yellow and blue-red axes respectively) have been calculated for the three measured zones, therefore, it is possible to compare the color obtained in the three zones of analysis among each other.

**Results and discussion**

—1. Electrochemical impedance spectroscopy

To obtain information about the measured systems it is useful to fit the results to an equivalent circuit. The equivalent circuit provides information of each electrical component, which can be associated with the different

parts of the measured system. Fitting is not an easy task, many equivalent circuits have been tested but the best results and physical meaning were obtained with the one proposed by Dhaiveegan et al. (2014) and shown in figure 3.



**Figure 3.-** Equivalent circuit proposed and its representation in the corrosion layer.

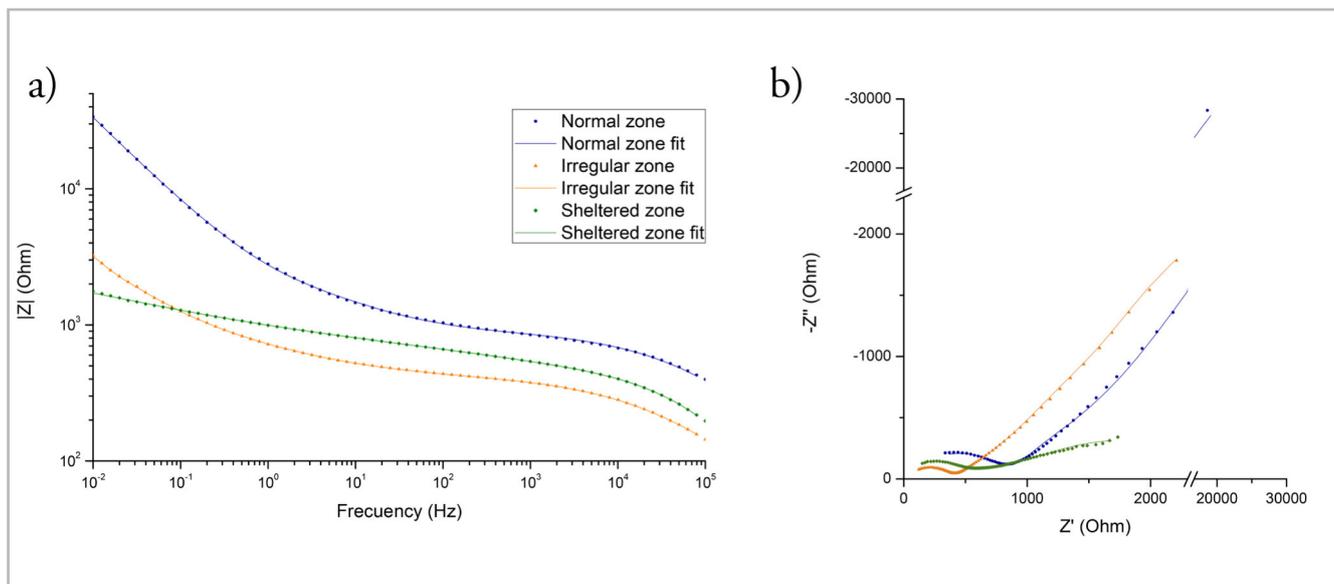
In the equivalent circuit, Rs represents the ohmic drop; CPE1 and R1 are the constant phase element and the resistance of the corrosion products respectively; CPE2 and R2 represent the constant phase element associated to the electrochemical double layer and the charge transfer resistance of the corrosion process; and Ws is the Warburg impedance associated with diffusion of the species through the diffusion layer. In this work we are going to focus on the resistance of the corrosion products (R1) and the charge transfer resistance (R2) in the three zones of analysis. Representative EIS results are shown in table 1 and experimental data together with the respective fittings are shown in figure 4.

The different fittings show a very good Chi square as well as a good fit in the graphs. The resistances of the corrosion products (R1) have low errors although the resistances of the charge transfer process (R2) have higher errors. All errors are acceptable, even for the R2 for the Sheltered zone, the higher error, it is lower than the differences between different zones.

According to the results of the resistance of the corrosion products (R1), the Normal zone has a resistance value that is approximately twice the other two zones (the

**Table 1.-** Resistances of the equivalent circuit obtained for the three analyzed areas of the sculpture *Once Módulo*

	R1 (Ohm)	R1 error (%)	R2 (Ohm)	R2 error (%)	Chi square
Normal zone	894.8	1.03	1637	24.29	4.39E-4
Irregular zone	417.3	0.43	1005	22.67	6.95E-5
Sheltered zone	428.3	10.02	240.9	61.22	1.35E-4



**Figure 4.-** Impedance module plot (a) and Nyquist plot (b) for the three zones of analysis of the sculpture *Once Módulo*.

Irregular and the Sheltered). This fact indicates that the corrosion products have a higher protective effect in this area.

The Irregular and Sheltered zones have very similar values of R1 so this two corrosion layers have similar protective properties. The charge transfer resistance (R2) is also higher in the Normal zone, with Sheltered zone being the least resistant. Results show a better protective ability in the Normal zone while the Sheltered zone is more susceptible to suffer corrosion processes.

Results do not necessary indicates that the sculpture *Once Módulo* is at risk but that there are areas within the sculpture that are more susceptible to atmospheric corrosion. The artwork is placed outdoors in a park of Leganés with probably little pollution, which suggests that the environment is optimal for this material (Morcillo et al., 2019). Therefore, at the time the analysis were made, there is no need to think that the sculpture is at any kind of risk that may compromise its conservation.

—2. Thickness

The thickness of the patina was measured in fifteen different points in each of the three analyzed areas. The average thickness and standard deviation are shown in table 2.

**Table 2.-** Results of patina thickness for the three analyzed areas in the sculpture *Once Módulo*.

Normal zone (µm)	Irregular zone (µm)	Sheltered zone (µm)
103.7 ± 21.88	56.7 ± 9.46	43.1 ± 7.21

The Normal zone has close to the double of the thickness than the other two areas, which is in accordance with the higher resistance shown by EIS results of the corrosion layer (R1). Although the Irregular zone had a rough aspect and was expected to be thicker, the thickness of its patina is more similar to the Sheltered zone than to the Normal zone. Authors have measured the thickness of their own hair following the experiment performed by (Diez, 2015), values between 50 and 60 µm were obtained. Although these patinas are very thin, there is not much difference from a patina developed for five years in a rural environment (Díaz et al., 2018). This indicates that the corrosivity of the environment of the park in the Museum is low.

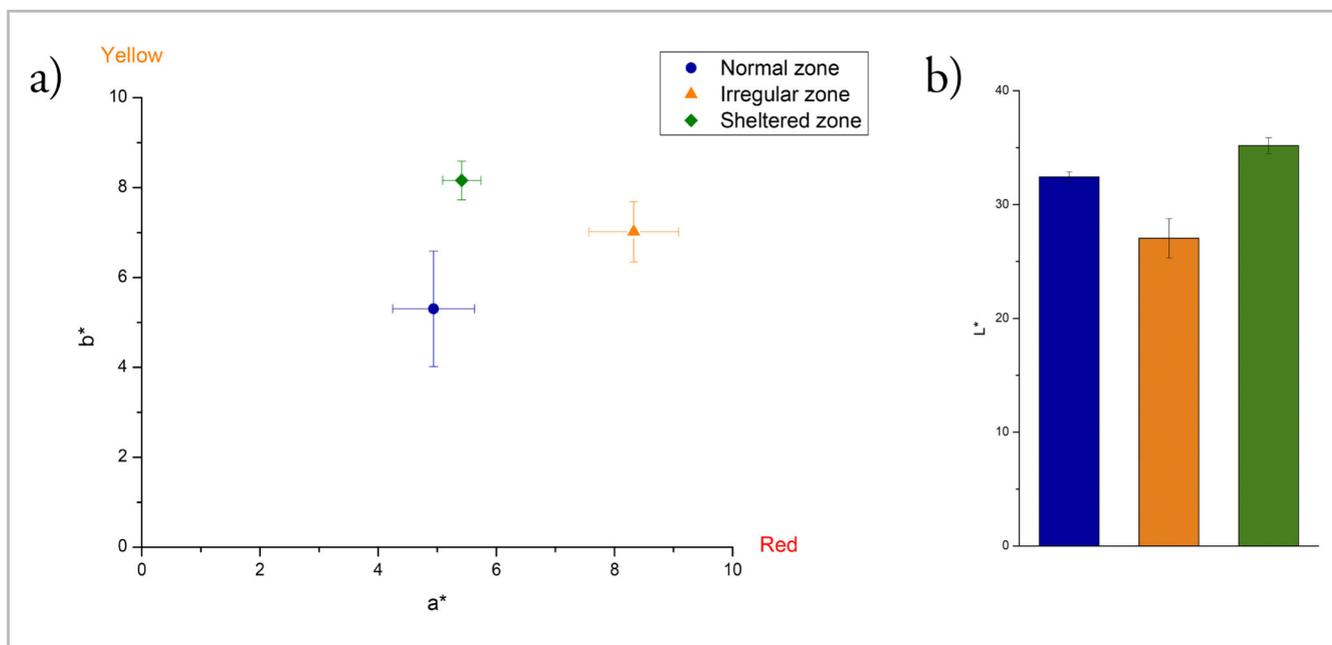
The results of the resistance of the corrosion products are in agreement with the patina thickness and indicate that, although the Normal and the Irregular zone are very close in the sculpture and have same exposure to rainwater, they have notable differences in their behavior against atmospheric corrosion. The Sheltered zone, with less time of wetness, has the poorest protection against atmospheric corrosion but, as mentioned above, its risk to suffer severe atmospheric corrosion processes will depend on the environment.

—3. Color

Color has been analyzed in fifteen different points around the zone of analysis. Results are reported using the CIEL\*a\*b\* sphere where L\* parameter represents the luminosity (being the value 100 white and 0 black) and the a\* and b\* parameters represents the content in green (negative a\*) and red (positive a\*) and the content of blue (negative b\*) and yellow (positive b\*). Results are shown in table 3 and in figure 5.

**Table 3.-** L\*a\*b\* results for the three zones of analysis.

	L*	a*	b*
Normal zone	32.4 ± 0.4	4.9 ± 0.7	5.3 ± 1.3
Irregular zone	27.0 ± 1.7	8.3 ± 0.8	7.0 ± 0.7
Sheltered zone	35.2 ± 0.7	5.4 ± 0.3	8.2 ± 0.4



**Figure 5.-** Chromatic parameters a\* and b\* (a) and luminosity parameter L\* (b) .

As a\* and b\* have positive values it means that the tone of the patina tends to orange, however the values are quite low, so the colors are dull. Also, the L\* values are closer to the center of the sphere (50), so the colors are grayish and weak. Comparing the three zones of analysis, the Irregular zone has higher values in parameters a\* and b\* and a lower value of L\*, it is the most vivid color with a darker tone. Data of color differences ΔE between the three zones of analysis are shown in table 4.

According to the bibliography, if ΔE is higher than 1 (Ghelardi et al., 2015) the color differences are perceptible for the human eye. In the case of study all the zones have differences much greater than 1, being the Irregular zone the most different one with a ΔE = 6.6 with the Normal zone and ΔE = 8.7 with the Sheltered zone. This is in accordance with initial observations as this area was analyzed due to

the differences in a visual inspection. According to the EIS analysis, in this case, the visual differences are related to different protective abilities against corrosion.

**Conclusions**

The use of WS in cultural heritage has some peculiarities that have to take into account; among them, the design of the sculptures may yield differences in the protective ability of the patinas. It has been proved that Sheltered zones develop the less protective corrosion products although the risk to suffer damage will depend on the atmosphere to which it is exposed. In this case of study and at the time analysis were performed, there is no risk for the sculpture due to the low pollution of the atmosphere.

**Table 4.-** ΔE results of the three areas of analysis in the sculpture Once Módulo

ΔE	Normal zone	Irregular zone	Sheltered zone
Normal zone	-	6.60	3.99
Irregular zone	6.60	-	8.72
Sheltered zone	3.99	8.72	-

Under a visual analysis, some heterogeneities are evident in the surface and may be related to less protection against corrosion. Changes in color and thickness have reveal differences in the protective characteristics of the rust. A full documentation of the history of the artworks and a complete study of the sculptures are necessary in order to assure the preservation of WS.

### Acknowledgments

Authors acknowledge Juan Carlos Roldán for his work in field measurements and his work with audiovisual material. Rosa María Izquierdo from the Museo de Escultura de Leganés and Pilar García from the Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofia for their kind support and patience. And to the Agencia Estatal de Investigación for the grant BES-2015-071472 and to Comunidad de Madrid for the project TOP-HERITAGE CM (S2018/NMT\_4372) for financial support.

### References

CANO, E., CRESPO, A., LAFUENTE, D., RAMIREZ BARAT, B. (2014). "A novel gel polymer electrolyte cell for in-situ application of corrosion electrochemical techniques". *Electrochemistry Communications*, 41:16-19. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2014.01.016>

CRESPO, A. RAMÍREZ-BARAT., B. CANO, E. (2016). "Artificial patinas in contemporary weathering steel sculpture". In *International Conference YOCOUCU. V International Conference of Youth in Conservation of Cultural heritage*. Madrid.

DHAIVEEGAN, P., ELANGO VAN, N., NISHIMURA, T., RAJENDRAN, N. (2014). "Electrochemical Characterization of Carbon and Weathering Steels Corrosion Products to Determine the Protective Ability Using Carbon Paste Electrode (CPE)". *Electroanalysis*, 26, 2419-2428. <https://doi.org/10.1002/elan.201400240>

DÍAZ, I., CANO, H., CHICO, B., DE LA FUENTE, D., MORCILLO, M. (2012). "Some clarifications regarding literature on atmospheric corrosion of weathering steels". *International Journal of Corrosion*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/812192>

DÍAZ, I., CANO, H., CRESPO, D., CHICO, B., DE LA FUENTE, D. MORCILLO, M. (2018). "Atmospheric corrosion of ASTM A-242 and ASTM A-588 weathering steels in different types of atmosphere". *Corrosion Engineering Science and Technology*, 53: 449-459. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2018.1500978>

DIEZ, A. (2015). *Cómo medir el grosor de un pelo usando un láser casero* [Online]. [https://www.elespanol.com/omicro/tecnologia/20150425/medir-grosor-pelo-usando-laser-casero/28497157\\_0.html](https://www.elespanol.com/omicro/tecnologia/20150425/medir-grosor-pelo-usando-laser-casero/28497157_0.html): El Español. [Accessed 07/03 2017].

GHELARDI, E., DEGANI, I., COLOMBINI, M. P., MAZUREK, J., SCHILLING, M., KHANJIAN, H., LEARNER, T. (2015). "A multi-analytical study on the photochemical degradation of synthetic organic pigments". *Dyes and Pigments*, 123: 396-403.

GÓMEZ, P. (2016). Amador Rodríguez Menéndez [Online]. <http://www.esculturaurbana.com/paginas/ama.htm#p>. [Accessed 21/10 2019].

MORCILLO, M., CHICO, B., DÍAZ, I., CANO, H., DE LA FUENTE, D. (2013). "Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review". *Corrosion Science*, 77: 6-24. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.08.021>

MORCILLO, M., DÍAZ, I., CANO, H., CHICO, B., DE LA FUENTE, D. (2019). "Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts". *Construction and Building Materials*, 213: 723-737. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.334>

RAMÍREZ BARAT, B., CANO, E. (2018). "In Situ Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements and their Interpretation for the Diagnostic of Metallic Cultural Heritage: A Review". *ChemElectroChem*, 5: 2698-2716.

RAMÍREZ BARAT, B., CANO, E., LETARDI, P. (2018). "Advances in the design of a gel-cell electrochemical sensor for corrosion measurements on metallic cultural heritage". *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 261: 572-580.

SCOTT, J. (1991). "Conservation of weathering steel sculpture". In: *Saving the twentieth century: the degradation and conservation of modern materials*, Ottawa, Canada. Canadian Conservation Institute.

STRATMANN, M., BOHNENKAMP, K., ENGELL, H. J. (1983). "An electrochemical study of phase-transitions in rust layers". *Corrosion Science*, 23: 969-985. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(83\)90024-0](https://doi.org/10.1016/0010-938X(83)90024-0)

### Author/s



**Ana Crespo Ibáñez**

[a.crespoibanez@cenim.csic.es](mailto:a.crespoibanez@cenim.csic.es)

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Ana Crespo obtained her bachelor degree in Chemistry with specialization in Chemistry of Materials in 2011 from the Complutense University of Madrid. During her bachelor she started the study of materials in cultural heritage with the project "Spectroscopic analysis of additives of concrete" at the Institute for the Structure of Matter. She continued her academic training with the master degree in Materials Science and Engineering in 2013 from Carlos III University of Madrid, where she obtained the award of basic science and engineering for the design of a portable electrochemical cell with gel-electrolyte, carried out at the CENIM. After working in the UK she returned to Spain to start her PhD at the CENIM with the project "Characterization and evaluation of artificial patinas in weathering steel sculpture". Her work is focused on the study of natural and artificial patinas in weathering steel sculpture with Raman spectroscopy and

electrochemical techniques. During her PhD she made an internship at Commissariat à l'énergie atomique de Saclay (France) studying Raman mapping and EDS analysis in rust; she has participated in 8 national and international projects, 1 of them as principal investigator at the synchrotron SOLEIL; 8 publications in congress, 7 of them international; she has collaborated in specialized training courses and postgraduate courses with Carlos III University of Madrid, Pablo de Olavide University of Seville, Menéndez Pelayo International University. She is currently writing her PhD thesis that hopefully will be finished at June 2020.



**Blanca Ramírez Barat**

[blanca.ramirez@csic.es](mailto:blanca.ramirez@csic.es)

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Postdoctoral researcher in the group “Corrosion and Protection of Metals in Cultural Heritage and Construction (COPAC)” at the Nacional Centre for Metallurgical Research (CENIM-CSIC), Madrid, Spain. After receiving her BA in Fine Arts (conservation), she graduated in Chemistry at the Complutense University in Madrid and completed her PhD in Materials Science and Engineering at the Carlos III University in Madrid. Her research is focused in the application of electrochemical techniques for conservation assessment and diagnosis in metallic cultural heritage and her doctoral thesis has been dedicated to the development of an electrochemical cell for in situ measurements on cultural heritage. She is also involved in several projects, networks and activities related to Heritage Science such as the Spanish Network of Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage (TechnoHeritage), the National Plan for Research Conservation in Cultural Heritage (PNIC), CSIC’s Interdisciplinary Thematic Platform Patrimonio Abierto: Investigación y Sociedad, PTI-PAIS (Open Heritage: Research and Society) or the Spanish Node of the Research Infrastructure for Heritage Science (ERIHS.es).

<https://orcid.org/0000-0001-5306-4057>



**Iván Díaz Ocaña**

[ivan.diaz@cenim.csic.es](mailto:ivan.diaz@cenim.csic.es)

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

He received his Bachelor’s degree in materials chemistry and his PhD, with a distinction “cum laude”, from the Complutense University in Madrid. His doctoral thesis was one of the first in-depth research conducted in Spain on atmospheric corrosion of weathering steels, incorporating nickel in its composition. During his PhD, he received several pre-doctorate research scholarships to complete his training in the characterization of rust at the Old Dominion University (USA) and University of Antioquia (Colombia). He has a solid background in electrochemical and accelerated corrosion tests and its research focus is on indoor and outdoor atmospheric corrosion of metals.

As a result, he has published around 40 research papers in peer-reviewed journals in the field of atmospheric corrosion and has carried out scientific-technical assistance tasks for the industry. Currently, he is working as postdoctoral researcher in the group “Corrosion and Protection of Metals in Cultural Heritage and Construction (COPAC)” at the Nacional Centre for Metallurgical Research (CENIM-CSIC), Madrid, Spain.



**Emilio Cano**

[ecano@cenim.csic.es](mailto:ecano@cenim.csic.es)

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Emilio Cano is Tenured Scientist at the National Center for Metallurgical Research (CENIM) of the Spanish National Research Council (CSIC) in Madrid, leading the research group “Corrosion and Protection of metals in cultural heritage and construction” (COPAC). He graduated in Fine Arts Conservation in 1996 and obtained his PhD in 2001 from the Complutense University of Madrid, after an internship at the Canadian Conservation Institute (CCI), Ottawa. As heritage scientist, his work has focused in the study of corrosion and protective systems for the metallic Cultural Heritage, atmospheric corrosion in museums and exhibitions; and the application of electrochemical techniques and corrosion inhibitors for the conservation of the cultural heritage. He has published more than 125 scientific articles (88 in JCR/Scopus indexed journals), and presented at more than 100 scientific conferences. He has participated in 33 national and international research projects (6th and 7th Framework Programmes and Horizon 2020 from the EU), being PI in 14 of them in the last 10 years. These projects and several research contracts have been developed in collaboration with the most relevant institutions working on conservation of cultural heritage (Instituto del Patrimonio Cultural de España, Patrimonio Nacional, Museo del Prado, Museo Guggenheim Bilbao, Museo Arqueológico Nacional, Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, etc.). Spanish Representative in the Executive Board of the Joint Programming Initiative “Cultural Heritage and Global Change: a Challenge for Europe” from 2011-2017. Assistant Coordinator of the International Council of Museums-Conservation Committee (ICOM-CC) Metal Working Group since 2012; Coordinator of the Spanish Network for Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage (Technoheritage) since 2015, Fellow of the International Institute of Conservation (IIC) and member of the Spanish group of the IIC (GE-IIC); coordinator of the Spanish Node of the European Research Infrastructure on Heritage Science (E-RIHS).

<https://orcid.org/0000-0002-8716-3931>

<http://www.cenim.csic.es/index.php/presentacion-copac>



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.761>

# Conservation to overcome oblivion. New methods for the survival of lost heritage memory

María José Merchán, Emiliano Pérez

**Abstract:** Unfortunately, it sometimes happens that heritage buildings and structures unearthed during the construction of new infrastructures cannot be adequately conserved once dug out. Before the eternal doubt, keeping or covering them, the economic aspect often takes precedence. Luckily, when the decision is to hide it again, technology offers the possibility of acquiring, modelling and storing the 3D data of the remains and allows their later visualization with a very realistic appearance. Therefore, the memory of these remains destined to be forgotten survives beyond the archives of the professionals who documented them. In this paper, the opportunities opened by Augmented and Virtual Reality applications for the preservation and dissemination of re-covered, or even lost, remains will be explained through the finding came about in the works performed for renovating an old road in Fuente del Maestre (Spain).

**Keywords:** conservation, cultural heritage, 3D modelling, augmented/virtual reality

## Conservación para superar el olvido. Nuevos métodos para la supervivencia de la memoria del patrimonio perdido

**Resumen:** A veces sucede que, desafortunadamente, los edificios históricos desenterrados durante la construcción de nuevas infraestructuras no pueden conservarse adecuadamente una vez excavados. Ante la eterna duda, mantenerlos o cubrirlos, el aspecto económico muy a menudo tiene prioridad. Por suerte, cuando la decisión es ocultarlo nuevamente, la tecnología ofrece la posibilidad de adquirir, modelar y almacenar los datos 3D de los restos para su posterior visualización de forma muy realista. De esta manera, el recuerdo de estos restos destinados a ser olvidados sobrevive más allá de los archivos de los profesionales que los documentaron. En este documento, las oportunidades que se abren gracias a la Realidad Aumentada y la Realidad Virtual aplicadas a la preservación y difusión de aquellos restos que deben ser enterrados de nuevo y que, incluso, llegan a perderse, se explicarán a través del hallazgo que se produjo en los trabajos realizados para renovar una antigua carretera en Fuente del Maestre (España).

**Palabras clave:** conservación, patrimonio cultural, modelado 3D, realidad aumentada/realidad virtual

### Introduction

Defining what conservation means is a very arduous task. It must be considered from a holistic viewpoint: from culture to society, from identity to management. Thus, giving a definition from one of its aspects implies, necessarily leaving apart the others. Conservation has to do with restoration so tightly that people sometimes mix up both terms. But conserving doesn't always imply restoring. In the same way, conservation is related to preservation in such a way that both are often perceived like synonymous. The ICOM, which assumes this quasi correspondence between

the two terms, states: "To preserve means to protect a thing or a group of things from different hazards such as destruction, deterioration, separation or even theft; this protection is ensured by gathering the collection in one place, inventorying it, sheltering it, making it secure and repairing it" (Desvallées & Mairesse 2010: 65). Preserving to ensure the continuity of things implies the recognition that tomorrow's public is equally important than today's (Castriota 2019: 49).

But nowadays, conservation/preservation goes beyond prolonging the heritage assets' physical lives for the far

future. Other values, not always tangible, must also be preserved for the coming generations: what they mean for the identity of the people in the surroundings, their relation with the natural environment, besides their historical, artistic, cultural, political, economic or social value (Hölling 2017:87). In order to get to this end, it is essential to maintain the authenticity of the heritage property (ICOMOS 1994), always following the principles of restoration gathered in successive charters along the years (ICOMOS 2004).

Paradoxically, conservation seems even more necessary when the cultural assets are going to disappear. In these cases, "conservation" plays a very important role in preserving the memory of the heritage for future generations to know it. When the strategy of documenting the cultural property before its disappearance is complemented with well-focused dissemination activities, this type of conservation could mean economic and social improvements for the population of the area. This is the case tackled in this paper, conservation to overcome the oblivion that, sooner or later, goes irretrievably linked to the disappearance.

On this way towards the safeguarding of cultural heritage, technology has come to help and improve the labour of experts in conservation with new multidisciplinary methods (Cozzani 2017, Zhou 2012). Within the most used scientific techniques applied to the cultural heritage, those related to 3D digitizing and modelling (Tucci et al. 2017; Aicardi et al. 2018; Andreu & Serrano 2019), as well as the development of Virtual Reality and Augmented Reality applications have already established useful and recognized methodologies (Bekele et al. 2018) to become essential in all the research, documentation and dissemination stages of the conservation procedures nowadays (Ruiz Bazán & Vita 2017: 208).

Concerning the investigation, the advances produced by these new methods entail a deeper understanding of cultural goods and greater savings in working hours, as well as they also allow real-time monitoring, visualization and intervention without manipulation, since it is a non-invasive/non-destructive technology (Niquet & Mas-Barberà 2018: 6). When talking about documentation, the creation of digital repositories of artworks, monuments and sites ensure their survival along the years. Furthermost, linking this idea of "persistence" with the use of technology for dissemination, it must be said that 3D technology applied to cultural heritage is a very effective method for people to know and remember. It allows providing not only a "copy" of the very goods but also an understandable and enjoyable interpretation, far from the unintelligible fragments they can often see in reality. These two last possibilities, documentation and diffusion, are even more relevant whether the archaeological remains have to be covered again and cannot be seen anymore (Tait 2016). This way, in recent years, it has demonstrated to be very useful in cases of destruction associated with war conflicts and catastrophes since 3D digitization together with the digital fabrication (Merchán et al. 2019) are perfect tools

for preserving and transmitting the heritage to future generations (Ruiz Torres 2017: 148). To perform the entire task, from documentation to dissemination, the existence of interdisciplinary work teams, composed of humanists and technologists, is necessary to achieve the equilibrium between what has to be shown (historical/artistic/social, etc. meaning) and the way it is (which has to do with the technological resources).

As mentioned, among the experiences based on 3D models used for the dissemination of cultural heritage, Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) are the most relevant. Regarding Virtual Reality experiences, two different type of them can be found in literature. On the one hand, some of them use 360° photos and video tours, with a high potential for disseminating the Heritage, since it is valid for a great range of devices (Argyriou et al. 2020; Mah et al. 2019; Njerekai 2019; Sánchez-Aparicio et al. 2019). On the other hand, other experiences make use of 3D environment that can be toured in real time but usually need more specific devices to visualize them. It is worth mentioning some initiatives carried out lately for enabling the visualization of pieces, monuments or sites which have unfortunately disappeared (Pérez et al. 2018) or whose bad state of conservation or some other reasons (distance, inaccessible location, etc.), prevent them to be seen/visited (Pérez et al. 2019). In these cases, VR has proven to be very helpful to bring back this "lost" cultural heritage to people. In spite of this, it is not the most utilized tool when it comes to its dissemination. Firstly, because the viewer's vision is replaced by a virtual world, which makes the real heritage remains happen in a second place. Secondly, the high economic cost of virtual reality equipment must be taken into account. This makes the use of this technology not affordable for many museums, interpretive centres and other cultural institutions.

Regarding Augmented Reality, the most accepted definition is that posed by Azuma (Azuma 1997). He defines an AR system as the one that fulfils all the following properties: (1) combines real and virtual content, (2) in an interactive environment in real-time and (3) is registered in 3D. Unlike VR, the fact that users can visualize added information (virtually created) without losing sight of the main elements of the real world makes the AR applications more suitable to be applied to cultural heritage on most occasions. It is also a more affordable and accessible resource since the most used AR devices are mobile phones or tablets. Hence, the problem of economic cost is overcome. In the last and more sophisticated experiences, the use of specific glasses which do not impede the vision of the "real world" starts to be habitual. They integrate a small screen in the lenses that project the virtual models that must be seen by users. In some of these AR glasses, there are two small screens, one per eye, to create a stereoscopic pair that allows 3D viewing. Likewise, they can also incorporate cameras that analyse the environment to locate the models in a realistic way or that interpret the users' gestures in the case they serve to interact with

the AR application. Although the cost of these devices is becoming increasingly affordable as they become popular, they are still prohibitively expensive.

In the light of the possibilities offered by this 3D technology for the dissemination of “disappearing” heritage and, thus, for the preservation of its memory, an immersive VR experience and an Augmented Reality application are being developed. Both are designed to allow the users to visit and understand those archaeological sites that are hidden from sight, specifically the one known as “La Matilla” (Fuente del Maestre, Spain), which had to be re-covered by the EX-360 road after its excavation.

This paper presents the procedure followed to create these two applications, for which it was necessary to design a method that allowed merging the 3D data acquired by different devices so that to obtain a unique digital model of the site. The content is structured as follows. Firstly, the site of “La Matilla” and its historical context are described. Secondly, 3D data acquisition and modelling are explained. The next section is devoted to detail the procedure followed to design both applications. Afterwards, future work is outlined. Finally, some conclusions are drawn.

#### “La Matilla”. A multicultural archaeological site

During the improvement works of the road EX-360, which links the towns of Fuente del Maestre and Villafranca de los Barros (Badajoz, Spain), some archaeological remains were unearthed at the height of the place known as “La Matilla”.

Located at the foothills of the Sierra de San Jorge, these findings were not a surprise for experts as the existence of a large water storage pond from the Roman period was known to exist in the surroundings since a long time ago. The width and height of the still visible walls, as well as the dimensions of the pool, made experts think that some type of Roman settlement would exist in this zone. Besides, fragments of *sigillata* pottery from different epochs (from 1st to 3rd centuries AD) had been recovered on the surface of the area, reinforcing the idea of a Roman presence in this zone. The importance of the site continued, at least, until the Middle Ages as it is documented the existence of a church of Hispanic-Visigoth origin that survived until the nineteenth century as the hermitage of San Jorge (Pascual 1999: 21).

In spite of this knowledge about the past of this area, when archaeologist arrived there, they just found a diaphanous extension which did not betoken the richness it hid in its subsoil. Thus, employing archaeological methodology, they were able to read the history of the place, from the 20th century remains to those dated in the founding moments of *Augusta Emerita*. In this process, several historical stages were documented (Arabic, Visigoth and late Roman) to which the silos and burials found during the excavation would correspond.

As for the Roman strata, 9 different ceramic ovens and a badly preserved building were documented. Experts think that inside this building the administrative tasks that the management of this pottery industry entailed would have been carried out [figure 1]. The kilns had been excavated in the ground, made of limestone, which has allowed the conservation of much of these substructures. The construction was made of brick, the same material in which were built some semi-circular arches of perfect execution, which were still visible [figure 2]. In some of these ovens, the upper grate was also fairly well preserved. Archaeological analyses of both the structures and the fragments of pottery recovered in the area have confirmed the useful life of this production centre, which would have been in operation between the 1st and 2nd centuries AD (Sánchez González 2019:13-14).

Unfortunately, these remains appeared just under the course of the new road, so the problem of their conservation raised. After proposing several options, most of which meant a considerable increase in time and cost, the political decision was to cover the remains, trying to preserve their integrity as much as possible, according to the recommendation made by the heritage experts at the Junta de Extremadura. However, this meant demolishing the arches so magnificently preserved for centuries. To conserve the memory of the site, the group “3D CO-VIM”, belonging to the University of Extremadura, proposed the digitization of the site and the creation of a 3D model that would allow both the researchers and the public to have a realistic digital copy of this missing heritage. This digital



**Figure 1.-** Aerial photograph of the excavations.



**Figure 2.-** A) Photo of the entrance to the bigger oven (H2)  
B) Photo of one semi-circular arch belonging to the H1 oven.

model would also allow the design and development of some basic AR/VR applications that make possible the visualization of the 3D model.

The procedure followed to reach this goal will be explained in the next sections.

### Digitizing and modelling

#### Digitization process

Nowadays, different technologies are available to undertake a digitalization work: laser scanners, structured-light sensors, photogrammetry, etc. When it comes to choosing among them, it is important to consider several aspects: the basic specifications of the devices, the differences between the outcomes provided by each technology, the lighting conditions, the features of the object/building/space to be digitized and the subsequent use that the acquired data will receive. In this work, we applied the three different technologies we had at our disposal in the acquisition phase: a Faro LS880 Laser-Scanner, an Artec MHT 3D structured-light hand-held scanner and a Nikon D60 digital camera. Technical specifications of the two 3D scanner are summarized in Table 1. Regarding the digital camera, it has a resolution of 10.2 Mpix, a sensor size of 23.6mm x 15.8mm and a we used a lens of 3.06x zoom 18-55mm (27-83mm eq.).

By using these three options, our aim was not to repeat the digitization process three times but to apply each of them selectively. Based on topology, two different environments could be distinguished in the site: the vast exterior area in which the remains were located and the interior of the two better preserved kilns (H1 and H2). The differences in the preservation state, space and light conditions imposed the technology to use in each.

Before starting, we were aware that 3D models obtained through the resulting data generated with the laser scanner would be employed only to document the site, whereas the data obtained using the Artec scanner and the Nikon camera would be applied both for documentation and visualization applications. Given that we have used two technologies to digitize the outside zone, the Faro laser scanner and the Nikon camera, we obtained two different resolutions models of that area: the laser scanner generates a higher resolution model and the photogrammetry a medium-low resolution one, both of them textured but with a significant difference in the quality of the textures. The former model is more suitable for documentation because it provides a more precise reconstruction of the real environment, while the latter is more appropriate for visualization applications, which cannot manage very high-resolution models in real-time. Reducing the higher resolution model allows to obtain a medium-low resolution one, obviously at the cost of an elevated time consumption. Moreover, the quality of textures produced by the Faro laser scanner is poorer than

**Table 1.-** Technical specifications of the 3D scanners employed in the site.

	FARO LS880	ARTEC MHT 3D
		
ACCURACY	+/- 3 mm	0.1 mm
RANGE	Up to 80 m	0.4 to 1 m
DATA ACQUISITION SPEED	120.000 points/s 4 minutes for a full 360° 3D view consisting of 28 million points	500.000 points/s
FIELD OF VIEW	360° Horizontal 320° Vertical	closest range 214 mm x 148 mm furthest range 536 mm x 371 mm

the photos taken by the Nikon camera so that, consequently, the final visualization will be poorer.

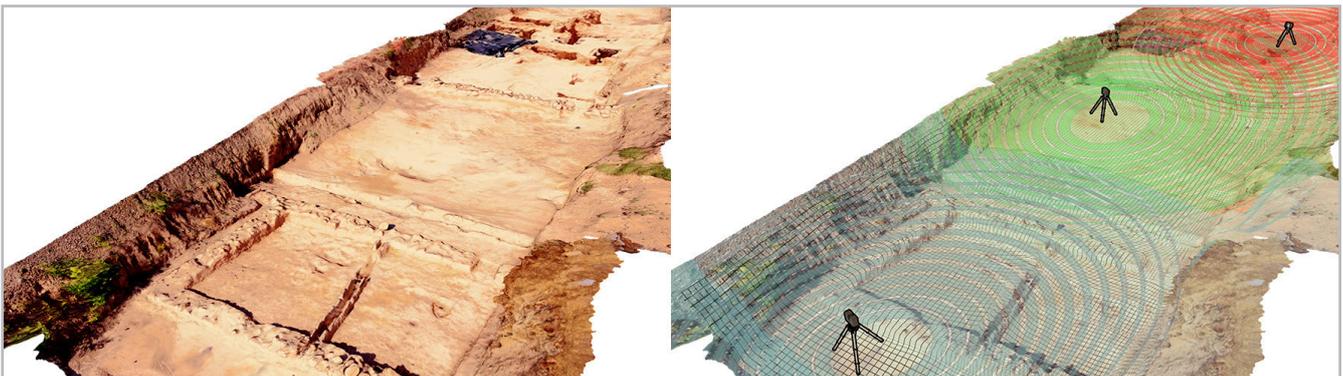
#### *Reconstruction process*

As mentioned before, this step was carried out applying three different technologies, with a specific strategy for each of them. Regarding the laser scanner, after the analysis of the area to be digitized and considering the range of 80 m that the Faro laser scanner offers, the scanning procedure designed consisted of positioning the scanner station in three different points that could cover the whole area. These selected positions can be observed in Figure 3.

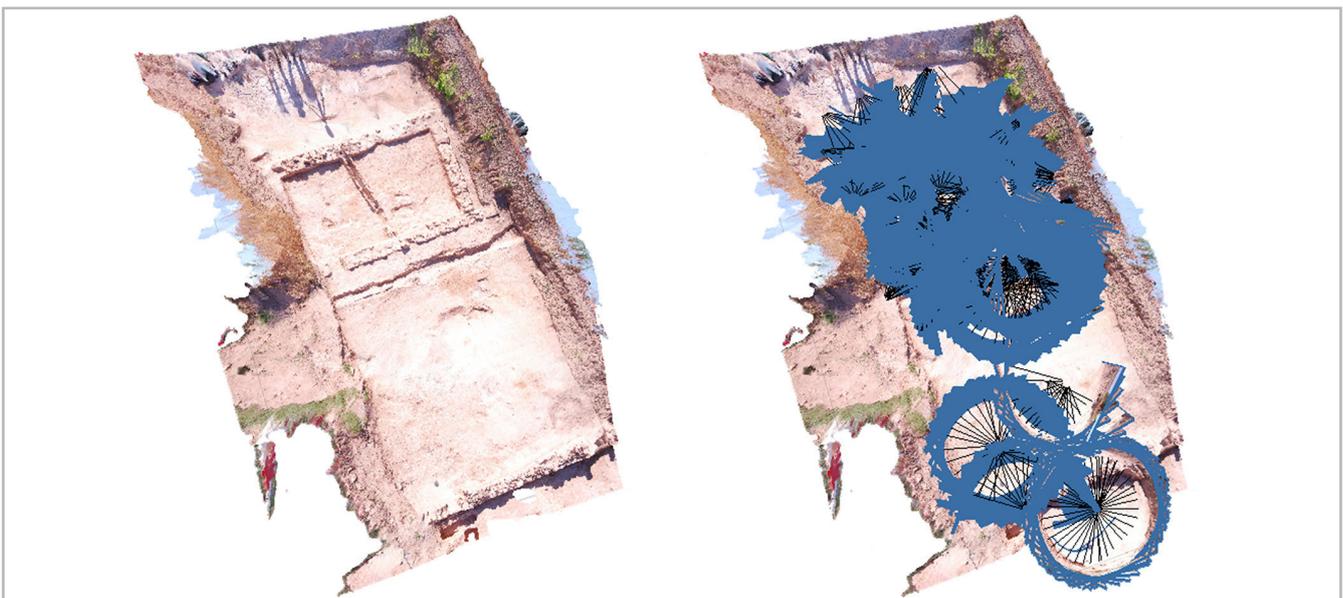
With respect to photogrammetry, it is generally recommended to optimize the number of photos, considering an 50% overlapping between images, in order to avoid the collapse of the workstation in charge of computing the photogrammetry, and to do it using a reasonable time. In that case, since it was known that the

whole site was going to be covered by the future road, the followed strategy in this stage was to generate a bank of images with a great redundancy. The idea was to postpone the manual choice of the optimized bank of images until the 'laboratory' computing stage. Specifically, over 2500 photos were taken along the site. The technician took photos from different tripod positions and, in each position, she rotated the orientation of the camera until completing a circle and applying an approximate. Logically, the density of the tripod positions was higher in that zones where there were more archaeological rests. The Figure 4 can give an idea of the photos' distribution within a portion of the site.

Finally, the interior of the ovens digitization was carried out by iteratively scan and check the remaining parts, until they were completely acquired. At the end, we found that only a few portions in the ceiling were inaccessible to the handy scanner. Moreover, in this part of the site, a bank of images was also taken, in order to have an additional support 3D model to offer the missing information in those inaccessible portions.



**Figure 3.-** Representation of the distribution of laser scanner locations to cover the whole area: on the right, the archaeological site; on the right, the three different locations that were selected



**Figure 4.-** Distribution of the taken photos along a portion of the site, with more density of camera positions in the areas with more rests.

After the digitization process, three packages of 3D data obtained from the three different acquisition technologies were available, as mentioned. Such data were processed independently by means of three different specific software to generate the resulting 3D models. Figure 5 depicts the work scheme that we followed to produce the final textured 3D models starting from the acquisition stage.

Regarding the data acquired with the laser scanner, a coloured 3D point cloud with a linear accuracy of  $\pm 3\text{mm}$  at 25 m, the required steps to obtain the 3D model are: registering of the point clouds; filtering noise and outliers; fusion, which produces a unique point of cloud; compute the mesh that fits such cloud, by triangulating the points; and calculation the texture of that mesh. Except for the triangulation and texture computation, which were carried out using Meshlab, the main software used was Faro Scene.

The structured-light scanner produces a set of textured partial meshes which are portions of the element scanned. The resolution of these acquired data is up to 0.5 mm. These data require some consecutive standard steps: registering in the same reference system; filtering to remove errors and noise; fusion to generate a single mesh, and filling holes. Sometimes it is also necessary to retouch the final surface to equalize and make it up. Finally, it is mandatory to carry out an analysis of the final mesh and repair it to obtain a consistent surface with no errors. In our case, the first three steps were implemented with the Artec Studio software. The filling-holes process was made by applying the algorithm explained in (Pérez et al. 2008), in Matlab. The open software Meshlab was employed to analyse and repair the mesh. And, finally, the occasional surface retouching was done in the Blender software. Also, equalization was

applied to the texture in some specific cases by using the GIMP software.

The last device employed was the Nikon camera, with which a vast set of photos were generated. Since it has a 10 megapixels sensor, the resolution of these images is 3872 x 2592. In this case, the steps that have to be followed to generate de 3D models through photogrammetry were: aligning and pairing each subset of photos; generating the dense point clouds to produce a set of meshes; registering of all the meshes; fusion to obtain a unique surface and generation of the whole texture. Here, it is worth mentioning that photogrammetry does not produce a model as accurate as of the one obtained with the previous technologies in terms of scale. Therefore, the final model must be scaled. The scale factor is obtained by manually measuring some meaningful distances in the previous models, generated using the scanners, that is, in real scale, and applying them to the photogrammetric model. No targets were used during the scanning process, so this entails the search of common accessible points, located in sharp areas, in both models the one generated with scanner and the one generated with photogrammetry. All these steps are done, in a first approach, with the software Agisoft Metashape. Then, to get a fine adjustment, the Artec Studio software offer an interesting tool to be applied. It can compute a non-homogeneous registering process, that is, it can reorient and slightly deform a mesh with the aim of accurately fit the photogrammetry mesh to the reference one: the one generated with scanner.

In the end, a high-resolution textured model of the outdoor area is obtained from the laser scanner data. Also, a medium-low resolution textured model of the same

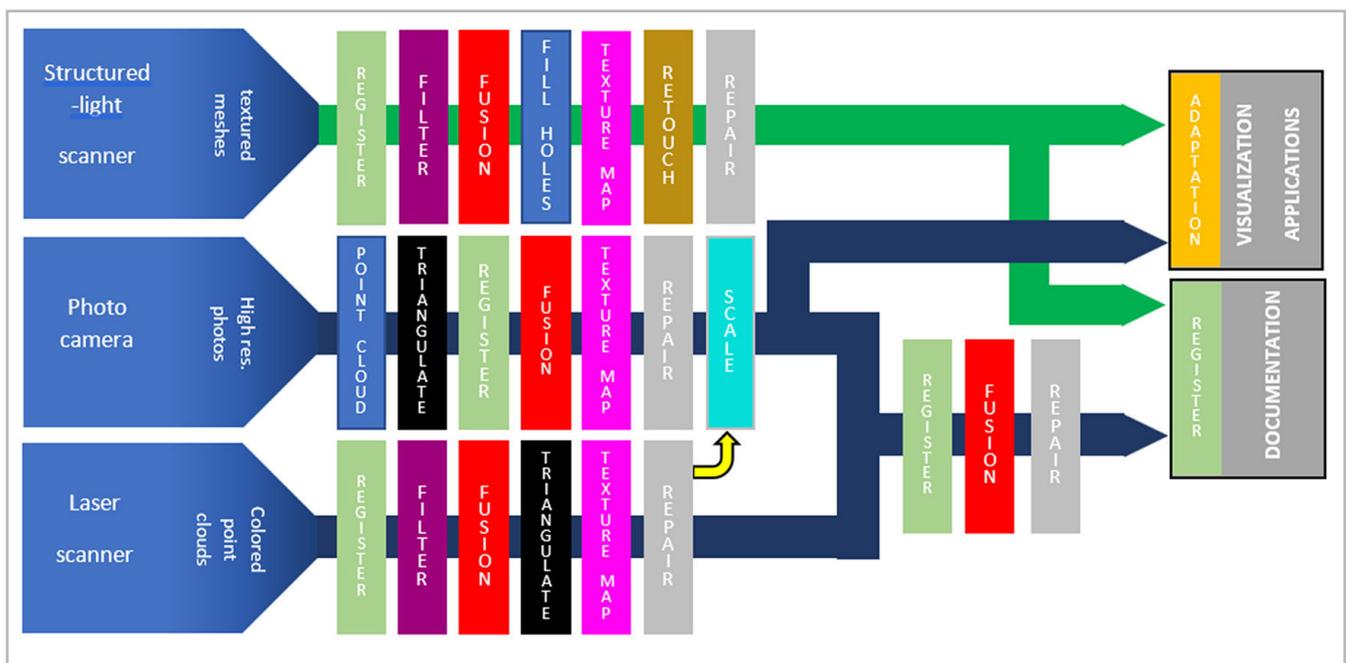
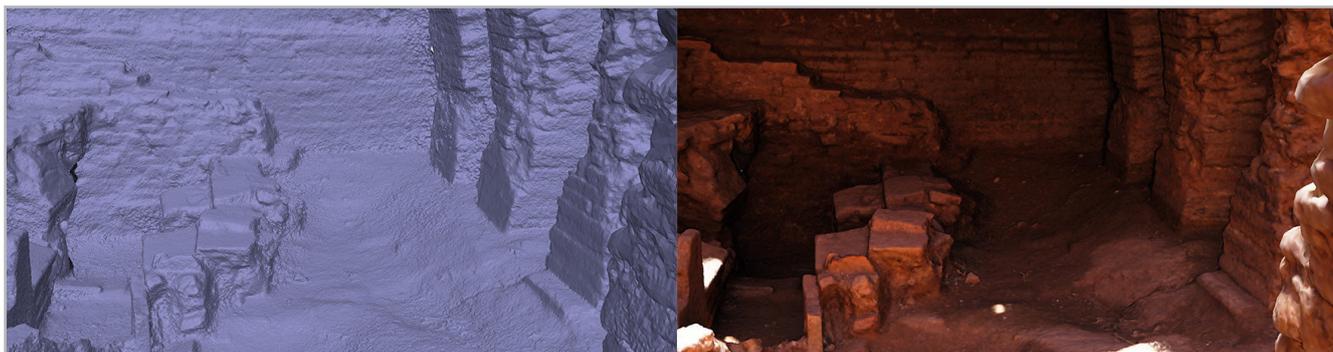


Figure 5.- Scheme of the procedure to obtain the final textured 3D models.



**Figure 6.** - Reconstructed 3D mesh (left) and 3D textured model (right) of the H2 oven, both of them obtained using photogrammetry techniques.

area was generated from photogrammetry techniques. The differences between these two models are the resolution of the final mesh, better in the former one, and the quality of the final texture, better in the latter model. Since the high-resolution model is going to be used for documenting the archaeological site and keep its memory, we decided to improve its texture and complete the parts that were not correctly acquired with the laser scanner using the photogrammetric model. Therefore, both models had to be registered in a common reference system, a fusion process was applied, a repairing step was also carried out and, finally, the improving of the original texture was done with Blender software, by projecting some of the Nikon camera photos onto the geometric model.

The other resulting models of the reconstruction process were those of the interiors of the kilns. These are high-medium resolution textured meshes, generated thanks to the Artec scanner, as well as to the photogrammetry techniques respectively, can be used for both documentation and visualization applications [figure 6].

At this point, there was not a complete model of the entire site available yet since we had created each part separately. For this reason, the integration of all the separated meshes to obtain a unique single mesh of the site became necessary. This integration was done by registering all the models, which entailed the positioning of the kilns in the corresponding location within the exterior model. Although both meshes had overlapping zones, a user-assisted registration was utilized.

### Visualization applications

As said, two different visualization applications were designed: an immersive VR experience and a AR application.

Technically, the visualization of 3D objects in real-time has a strong dependence on both the hardware used and the number and quality (resolution of meshes and textures) of the objects to be visualized. After the digitization process,

explained in previous sections, the quality of the 3D model is high. Therefore, to use the digitized models in real-time visualization it is mandatory reducing their quality, mainly in terms of the resolution of the meshes, to a specific level that can be managed by the hardware. In addition to that, the software used to design and program the visualization applications also imposes some requirements that have to be taken into consideration inescapably.

In the following subsections, the two main steps necessary to develop the visualization applications are summarized: quality reduction and data adaptation, and applications design.

#### *Quality reduction and data adaptation*

Before analysing how to carry out the reduction and adaptation, it is useful to categorize the data to be used in the applications. Thus, the following division was established: category A (laser scanner data); category B (Artec scanner data); category C (photogrammetry data); and, category D (3D modelled synthetic data). We have explained above how the models belonging to these categories were created, except for the ones of category D. We include in that category the 3D elements modelled using Blender software that will be introduced in the visualization as decoration or as support to improve the final result.

As mentioned above, the 3D models belonging to categories A and B are generated in high resolution for the ones and in medium-low resolution the ones of category C. We modelled the 3D objects of category D in medium-low resolution, keeping in mind the requirement of real-time visualization. Moreover, the elements of categories A and C represent the same area of the site, although in different resolutions. Since a high resolution is not needed in the visualization applications, we discard at this point the elements included in the category A. On the contrary, the interior of kilns was just stored in high-resolution (category B elements) and no other lower-resolution data are available. Therefore, before designing the applications, it is necessary to modify the models of categories B and C,

regarding the type of data and their quality (resolution of mesh and resolution and size of texture). This classification and the modifications undertaken are summarized in the table shown in figure 7.

In it, by “type of 3D data” we mean how 3D and colour information is stored, i.e., whether it is a point cloud or 3D mesh and whether there is a texture image that stores colour information (needed for the visualization application) or not. In this case, as the elements of category A were discarded (X sign), the rest of the categories are composed of objects defined by 3D meshes, so it is not necessary to modify the type of data (hence = sign). Concerning the colour, the elements of categories B and C have their own images of textures. Therefore, no modification in this sense is necessary either.

As far as quality is concerned, it is mandatory reducing it for the category B elements. However, in the case of the elements of category C, stored in medium-low resolution, it will depend on the hardware used. As will be explained below, two applications have been developed: a virtual reality application and an augmented reality application. The first one usually runs on desktop PCs, whereas the latter runs on mobile devices. So, the different specifications of both platforms are evident, being less powerful the mobile devices in terms of 3D representation in real-time.

In this respect, since all 3D models are used in both types of applications, a quality reduction must also be applied to the elements of category C.

This quality reduction is implemented in two steps: one first reduction aimed to designing the VR application and a consecutive further reduction to prepare the elements for the AR applications, i.e. to be visualized in much less powerful devices. Every step of that quality reduction consists of reducing the number of triangles composing the 3D meshes, reducing the quality of texture images and group them into bigger images, more optimal for the real-time (Pérez et al. 2018).

*Applications design*

For both the AR and the VR application we have designed proofs of concepts to visualize all the acquired data. The software employed was Unity with added libraries for the use of specific head-mounted displays (Windows Mixed Reality Lenovo Explorer) and the generation of AR mobile applications (ARCore libraries for Android).

Regarding the VR application, it allows the user to explore the entire archaeological site. It is possible to tour all the exterior area and, also, the interior of ovens. Moreover,

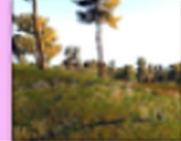
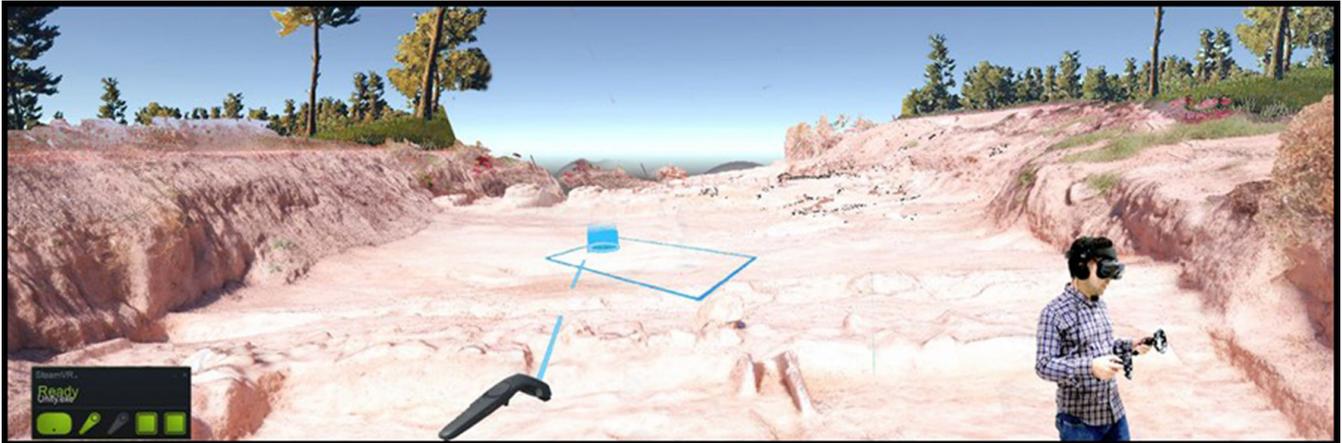
Source	3D data categories	Data adaptation (type of 3D data)	Quality reduction (resolution and color)	VR APPLICATION		3D ADAPTED MODEL		AR APPLICATION	
	Category a 	X	X						
	Category b 	=	↓						
	Category c 	=	↓						
	Category d 	=	=						

Figure 7.- Modifications undertaken regarding the type of data and the quality: “X” ≡ not used; “=” ≡ no adaptation required; “↓” ≡ decrease.



**Figure 8.**- Appearance of the VR experience.

some decoration elements were added to complete the environment where the site is located (vegetation, trees, sky, background) [figure 8].

In concern to the AR application, it also represents the site in real-time, although over the visualization of the mobile device's camera. This permits the instant change of point of view as the user walks. The current application does not need the use of external markers, so it is always possible to visualize the remains independently of the user's location. Additionally, to develop this application, we employed a medium-high specification mobile capable of managing an elevated number of triangles. However, it is not powerful enough to load the whole archaeological site with enough resolution of the interior of the kilns. This is why we had to split the model into portions to offer the user the possibility to load each portion separately. Specifically, we have 3 portions of the exterior area and 2 portions corresponding to the inside of the kilns [figure 9].



**Figure 9.**- AR application used *in situ*.

## Discussion

As said above, the two applications developed are in their initial stages. Although while designing them, we carried out several tests to check some features: look, usability, delay, etc., it is obvious that an experimental study would be necessary. This study must involve different types of users, from experts in heritage to common visitors, from tourism managers to politicians.

The idea is to meet decision-makers to plan a strategy that includes the development and improvement of the applications, the testing with the public and the purchase of the necessary devices. This way, it would be possible to provide the inhabitants of Fuente del Maestre and the surroundings with some tools that allow them to know, enjoy and remember a part of its history that otherwise could fall into the oblivion. Having this type of dissemination tools would also enhance the attraction of tourism to a population that, although it was declared Historic-Artistic Site in 1998, is a little far from the usual touristic routes.

## Conclusions

Sometimes it is impossible to conserve heritage for eternity. Not only because of decisions beyond the experts' criteria, but also with their consent, when the proper preservation of the remains cannot be assured. In these cases, before an announced lost, technology become a perfect ally to overcome the oblivion that the disappearance entails. The better way to preserve the cultural heritage for future generations is, in these cases, keep its memory for the people.

Throughout these pages, we have approached the application of 3D modelling to the documentation, research and dissemination of cultural heritage. Focused on the specific case of the re-covered, and so, lost Roman remains found in the nearby of Fuente del Maestre, the process to acquire 3D data of the whole site with different technologies

was described. As said, choosing a specific technology depends on the features of the structures and the subsequent use that these 3D model generated will receive.

The procedure to merge the different meshes has been also explained, as well as the transformation of those meshes to be utilized to design Virtual and Augmented Reality applications. Afterwards, we make a small digression on how these developed VR/AR experiences are and how they can be visualized. Finally, it describes and shows both the 3D model of the site and the tentative AR application designed and explains the future work to improve the virtual experiences and make them reach the people of nearby towns so that they can know this Roman site and prevent it falls into oblivion.

### Acknowledgements

This work has been supported by the project IB16162 from Junta de Extremadura and European Regional Development Fund (ERDF) "A way to make Europe". The authors would like to thank the members of the Consejería de Movilidad, Transporte e Infraestructuras (Junta de Extremadura) for their willingness and support.

### References

- AICARDI, I., CHIABRANDO, F., LINGUA, A.M., NOARDO, F. (2018). Recent trends in cultural heritage 3D survey: The photogrammetric computer vision approach, *Journal of Cultural Heritage*, 32(1): 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.006>
- ANDREU, J., SERRANO, P. (2019). "Contributions of the digital photogrammetry and 3D modelling of Roman inscriptions to the reading of damaged tituli: An example from the Hispania Tarraconensis (Castiliscar, Saragossa)", *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00091>
- ARGYRIOU, L., ECONOMOU, D., BOUKI, V. (2020). "Design methodology for 360 degrees immersive video applications: the case study of a cultural heritage virtual tour", *Personal and Ubiquitous Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01373-8>
- AZUMA, R.T. (1997). "A Survey of Augmented Reality", *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6 (4): 355–385.
- BEKELE, M. K., PIERDICCA, R., FRONTONI, E., MALINVERNI, E. S., GAIN, J. (2018). "A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage", *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 11 (2): 1–36. <https://doi.org/10.1145/3145534>
- CASTRIOTA, B. (2019). "Authenticity, Identity, and Essentialism: Reframing Conservation Practice". In: *What is the essence of conservation? Materials for a discussion*. F. Mairesse & R. F. Peters (Eds.). ICOFOM: París: 39-48.
- COZZANI, G., POZZI, F., DAGNINO, F.M., KATOS, A.V., KATSOULI, E.F. (2017). "Innovative technologies for intangible cultural heritage education and preservation: the case of i-Treasures", *Personal and Ubiquitous Computing* 21(2): 253-265. <https://doi.org/10.1007/s00779-016-0991-z>
- DESvallées, A., MAIRESSE, F. (Eds.) (2010). *Key concepts of museology*. Armand Colin: París.
- HÖLLING, H. (2017). "The technique of conservation: on realms of theory and cultures of practice", *Journal of the Institute of Conservation*, 40 (2): 87-96.
- ICOMOS (1994). *The Nara document on authenticity*.
- ICOMOS (2004). *International Charters for Conservation and Restoration. Monuments and sites I*. ICOMOS: München.
- MAH, O. B. P., YAN, Y., TAN, J. S. Y., TAN, Y.-X., TAY, G. Q. Y., CHIAM, D. J., WANG, Y.-C., DEAN, K., FENG, C.-C. (2019). "Generating a virtual tour for the preservation of the (in) tangible cultural heritage of Tampines Chinese Temple in Singapore", *Journal of Cultural Heritage*, 39: 202-211. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.04.004>
- MERCHÁN, M.J.; MERCHÁN, P.; SALAMANCA, S.; PÉREZ, E.; NOGALES, T. (2019). "Digital fabrication of cultural heritage artwork replicas. In the search for resilience and socio-cultural commitment", *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 15: e00125. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00125>
- NIQUET, N.D., MAS-BARBERÀ, X. (2018). "El registro 3D como medio para el análisis y difusión del patrimonio escultórico. El caso de la escultura en cera del Écorché", *Ge-conservación*, 13: 5-16. <https://doi.org/10.37558/gec.v13i0.551>
- NJEREKAI, C. (2019). "An application of the virtual reality 360 degrees concept to the Great Zimbabwe monument", *Journal of Heritage Tourism*. <https://doi.org/10.1080/1743873X.2019.1696808>
- PASCUAL, J. (1999). "Fuente del Maestro: Dos mil años de historia". En: *Fuente del Maestro. 100 años de ciudad, 2000 años de historia*. Pascual, J. (coord.). Excmo. Ayto. Fuente del Maestro: 13-53.
- PÉREZ, E., SALAMANCA, S., MERCHÁN, P., ADÁN, A., CERRADA, C., CAMBERO, I. (2008). "A Robust Method for Filling Holes in 3D Meshes Based on Image Restoration". In: *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, 10th International Conference, ACIVS 2008, Bourennane, S. et al. (Eds.)*. Springer: 742-751. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88458-3\\_67](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88458-3_67)
- PÉREZ, E., MERCHÁN, M.J., MORENO-RABEL, M.D., MERCHÁN, P., SALAMANCA, S. (2018). "Touring the Forum Adiectum of Augusta Emerita in a virtual reality experience". In: *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*, Ioannides, M. et al. (Eds.). Springer: 548-559.

PÉREZ, E, MERCHÁN, M.J., SALAMANCA, S. AND MERCHÁN, P. (2019). "Virtual reality to allow wheelchair users touring complex archaeological sites in a realistic manner. Towards their actual social integration", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9: 597-604. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-597-2019>

RUIZ BAZÁN, I., VITA, G.E.E. (2017). "The utility of the application of new three-dimensional technologies for the study and dissemination of heritage from a historical technical perspective: case studies", *Ge-conservación*, 11: 208-203. <https://doi.org/10.37558/gec.v11i0.480>

RUIZ TORRES, D. (2017). El uso de tecnologías digitales en la conservación, análisis y difusión del patrimonio cultural. *Acción Cultural Española (AC/E)*.

SÁNCHEZ-APARICIO, L. J., MORENO-BLANCO, R., MARTÍN-JIMÉNEZ, J. A., RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P., MUÑOZ-NIETO, A. L., AND GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2019). "Smartwall: A new web-based platform for the valorization of the medieval wall of Ávila", *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15: 1055–1062. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1055-2019>

SÁNCHEZ GONZÁLEZ, L.M. (2019). "A high-roman-empire alfarera industry between Villafranca de los Barros and la Fuente del Maestre", *El Hinojal, Revista de Estudios del Muvi*, 12: 8-21.

TAIT, E., LAING, R., GRINNALL, A., BURNETT, S., ISAACS, J. (2016). "(Re)presenting heritage: laser scanning and 3D visualisations for cultural resilience and community engagement", *Journal of Information Science*, 42(3): 420–433. <https://doi.org/10.1177/0165551516636306>

TUCCI, G, BONORA, V, CONTI, A, FIORINI, L. (2017). "High-quality 3D models and their use in a cultural heritage conservation project", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W5: 687-693. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-687-2017>

ZHOU, M., GENG, G., WU, Z. (2012). *Digital Preservation Technology for Cultural Heritage*. Springer.



**Emiliano Pérez**

[emilianoph@unex.es](mailto:emilianoph@unex.es)

School of Industrial Engineering of the University de Extremadura, Badajoz, Spain

Is an Associate Lecturer at the School of Industrial Engineering of the University de Extremadura, Badajoz, Spain. He has worked as researcher in 5 R&D projects and has made more than 20 contributions in conferences and journals. He focuses his research on 3D Computer Vision and Virtual Reality: pattern recognition, modelling, representation and reconstruction of 3D objects, 3D sensors applied on cultural heritage, virtual simulation.



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.753>

## Author/s



**María José Merchán**

[mjmerchan@unex.es](mailto:mjmerchan@unex.es)

School of Industrial Engineering of the University de Extremadura, Badajoz, Spain

Works as a researcher at the School of Industrial Engineering of the University de Extremadura, Badajoz, Spain. She works on the application of technologies for problem-solving in the field of Cultural Heritage. She collaborates with the National Museum of Roman Art and has taken part in several national and international R & D projects. She has generated more than 20 technical contributions on prestigious journals and conferences.

# Analysis of urban vulnerability as a tool for cultural heritage preservation. The cases of the medium-sized historical ensembles in Andalusia

Daniel Navas-Carrillo, Blanca del Espino Hidalgo, Juan-Andrés Rodríguez-Lora, Teresa Pérez-Cano

**Abstract:** This paper presents the urban vulnerability assessment as a complementary resource in heritage preservation policies, through the analysis of the thirty-nine medium-sized cities that have been listed as Historical Ensemble in Andalusia (Spain). The research seeks to make a sequential approach that addresses, from the general –the conceptual framework on urban vulnerability and the characterization of the analysis sample– to the particular –the analysis of the socio-economic, socio-demographic or residential vulnerability applied to the intermediate scale which has not been in-deep studied yet–. For this, it proposes to adopt the methodology implemented by the Spanish Ministry of Development in the Atlas of Urban Vulnerability, providing a territorial lecture of the results. The study concludes that medium-sized cities do not present a level of vulnerability lower to the largest ones but detecting specific urban weaknesses that should be addressed to improve the response of these cities to heritage preservation.

**Keywords:** Baetica, cultural heritage, heritage conservation, intermediate cities, urban heritage, urban planning, vulnerability indicators

## Análisis de la vulnerabilidad urbana como herramienta de protección del Patrimonio Cultural. El caso de los Conjuntos Históricos en ciudades medias de Andalucía

**Resumen:** Este artículo propone evaluar la vulnerabilidad urbana como herramienta complementaria en las políticas de protección patrimonial mediante el análisis de las treinta y nueve ciudades medias declaradas Conjunto Histórico en Andalucía (España). La investigación intenta realizar una aproximación secuencial que aborda desde lo general, el marco conceptual sobre vulnerabilidad urbana y la caracterización de la muestra analizada, hasta lo concreto, el análisis de la vulnerabilidad socioeconómica, sociodemográfica y residencial en la escala intermedia, aún no estudiada en profundidad. Para ello, se propone adoptar la metodología implementada por el Ministerio de Fomento de España en el Atlas de Vulnerabilidad Urbana, proporcionando una lectura territorial de los resultados. El estudio concluye que las ciudades medias presentan un nivel de vulnerabilidad que no es inferior al de las de mayor tamaño, sin embargo, se identifican ciertas debilidades que deberán ser abordadas para mejorar la respuesta de estas ciudades a la conservación de su patrimonio.

**Palabras clave:** Baetica, ciudades intermedias, conservación patrimonial, indicadores de vulnerabilidad, patrimonio histórico, patrimonio urbano, planificación urbana

### Introduction

#### —Research definition

This research proposes the inclusion of urban vulnerability assessment as an additional tool to be considered in the cultural heritage preservation policies. This hypothesis is based on the fact that, just as other external aggressors are taken into account in preventive conservation, the urban weaknesses should also be considered. The social, economic and residential

weaknesses could reduce the capacity as a collective that cities have for preserving their heritage. This vision utterly implies an urban approach to the heritage of these cities, beyond the individual assessment of their cultural assets. This vision is also aligned with the change produced on the concept of heritage in recent decades. Attention has shifted from primarily objective considerations to the subject which demands it (Ruiz Castillo 2004: 18).

For this purpose, this work has adapted the methodology provided by the Spanish Ministry of Development in

the Atlas of Urban Vulnerability. This methodology has been validated through its application in different urban contexts of the Spanish geography (Temes, 2014; Antón-Alonso & Porcel, 2017; Rodríguez Peña, 2017; De Santiago Rodríguez, 2018). However, it has had a more significant impact on the analysis of the largest cities (Hernández Aja, Rodríguez Alonso, Rodríguez Suárez, 2018), finding a gap in the urban vulnerability analysis of the so-called medium-sized cities. In this sense, the research tries to identify the specific vulnerability issues of these intermediate urban scale, which differ from those of large cities.

Accurately, the weight of the system of medium-sized cities in the functional organisation is a fundamental characteristic that defines Andalusia; geographical framework analysed in this research. Andalusia is the most populous and the second-largest region in Spain, and approximately 60% of the autonomous territory is under the influence of a medium-sized city representing in population terms close to 15% of the inhabitants in the whole region. Besides, the historical relevance of the Andalusian medium-sized cities has been evidenced in national and international references (Madoz 1846-1850; Braun and Hogenberg 1572-1618). These circumstances have led to propose an analysis taking territorial organisation factors into account, according to the particular geographical characteristics, the historical evolution, the spatial planning or the specific legislation of each territory. In this sense, it seeks to provide a comparative study among different urban scales, which has not been developed yet.

On this regard, it is also important to mention that current territorial planning international strategies defend a polycentric model based on medium-sized cities. These cities not only favour a lower consumption of resources but also generate a more immediate relationship with the nearby rural environment. They contribute to avoid depopulation and acquire a key position in mitigating and adapting to climate change. Endowed with practically the same essential urban services as the large cities, they lack environmental problems, which ultimately means the increase of the population's quality of life (Del Espino Hidalgo & Navas Carrillo, 2018:146).

—*Urban vulnerability and its repercussion on heritage preservation*

The term vulnerability applied to urban dimension arises during the cold war linked to the need for intervention in many eastern cities (Bankoff, 2019). In general terms, we can define it as a state of high exposure to certain risks and uncertainties, in combination with a reduced ability to protect or defend oneself against those risks and uncertainties and cope with their negative consequences (United Nations,

2003). Consequently, the term vulnerability has been widely accepted as the socio-economic risks that could affect society (Bankoff et al., 2004). Since this point of view, it has entered into a variety of disciplines such as disaster risk analysis (Wisner et al., 2004), natural hazard geographical research (Weichselgarnter, 2001; Cannon, 2008; Ran et al., 2020), climate change impacts (Fussel, 2007; Lankao & Qin, 2011; Singh, 2017) or social-environmental approaches (Krellenberg et al., 2016). Thus, the vulnerability is currently related to resilience, a concept particularly extended in urban and regional planning in recent years (Cardoso, 2018; Faulkner, 2020). Terms that are in opposite sides (Godschalk, 2003), but should not be characterized as antonyms (Patel et al., 2020).

The vulnerability has also been applied to topics regarding social inclusion (Levron, 2010), such as, poverty, gender, class, caste, ethnicity, disability or elderly (Twigg, 2015). This perspective can be extended to urban studies. When done, it is inexorably linked to the application of preventive actions towards the inclusion of inhabitants (Ministerio de Fomento, 2012). It should be noted that their study has increased since 2008 due to the consequences of the economic crisis (Matesanz Parellada, 2017:29). Thus, the urban vulnerability can be understood as that process of unrest in cities produced by the combination of multiple dimensions of disadvantage, in which any hope of upward social mobility (to overcome their social condition of exclusion) is seen as extremely difficult to achieve. On the contrary, it carries a perception of insecurity and fear of the possibility of downward social mobility, of worsening of their current living conditions (Aguacil, 2006:161). However, it can be affirmed that the concept of urban vulnerability refers both to the increase of threats and risks that affect society and to the weakening of mechanisms to deal with such problems (Aguacil et al., 2014:18). In that sense, we can relate vulnerability to concepts largely addressed as the right to the city proposed by Henri Lefebvre (1968). Lately, it has been developed and reclaimed by social movements to fight against contemporary urban issues such as commodification and capitalism of the city, the decrease of social interaction and the rise of spatial inequalities and exclusion (Harvey, 2003).

As can be seen, urban vulnerability is, in short, directly related to the traditional dimensions of sustainability: economic balance, social equity and environmental resilience. However, a fourth dimension has been proposed as the centre or conceptual framework for the previous triangle: culture (Hawkes 2001). It is understood as to how our ancestors have adapted to the constant changes in environmental conditions throughout the cycles and have thus left a legacy to our times: cultural heritage, which must be understood as a source of inspiration, innovation and creativity

to face current challenges. This approach evidences the need of including cultural heritage in sustainable development frameworks (UNESCO 2018), what necessarily must be connected to urban vulnerability assessment of the built cultural heritage, that is, the historical centres of the cities. Consequently, this work aims to evaluate urban vulnerability over a selection of urban areas – the historical centres and, particularly, the protected ones – of an urban category pointed out as an example of sustainability and equilibrium – medium-sized cities.

### **The system of medium-sized cities of Andalusia as a case study**

#### *— Definition of a medium-sized city*

Medium-sized cities have been considered from the European directives as to the urban category with the best qualities for urban-territorial sustainability (European Union 2011: VII), what has encouraged the increase of their protagonism in territorial planning and development strategies, as well as to in framework policies. In the second half of the 20th century, many countries of the European Union focused part of their development policies on the dynamization of medium-sized cities. The first attempts derive from the theory of the central places of Walter Christaller (1933), extended by Auguste Lösch (1940) and from the concept of the pole of development in the regional scope used by Perroux (1955). Hirschman (1958) would formulate a theoretical body to be used in territorial planning for the promotion of the later called intermediate cities.

Currently, their defence is based on the sustainability of a polycentric territorial model against metropolization processes (Vilagrasa 2000). In this sense, in recent years, this urban category has aroused particular interest in the quality of life it presents, as it lacks many of the environmental problems of large cities, as well as in the very scale of the city that makes it more humane and accessible. On the other hand, medium-sized cities favour a more rational use of resources, guaranteeing access to specialised goods and services in conditions like those carried out in large urban areas (Llop Torné and Hoeflich de Duque 2007: 10). As for their definition, it should not be done exclusively in demographic terms, but understood by their strategic position within the functional organisation of a nearby region or regional scope, and far from the synergies of the principal regional centres, as stated in the Unesco Report on Intermediate Cities (Bellet Sanfeliu and Llop Torné 1999). According to it, the concept of the medium-sized city goes beyond the mere intermediate position between the large metropolitan areas and the rural sphere. It is necessary to consider the socio-economic and cultural conditions of each territory, which will determine the different municipal roles, regardless of the number of

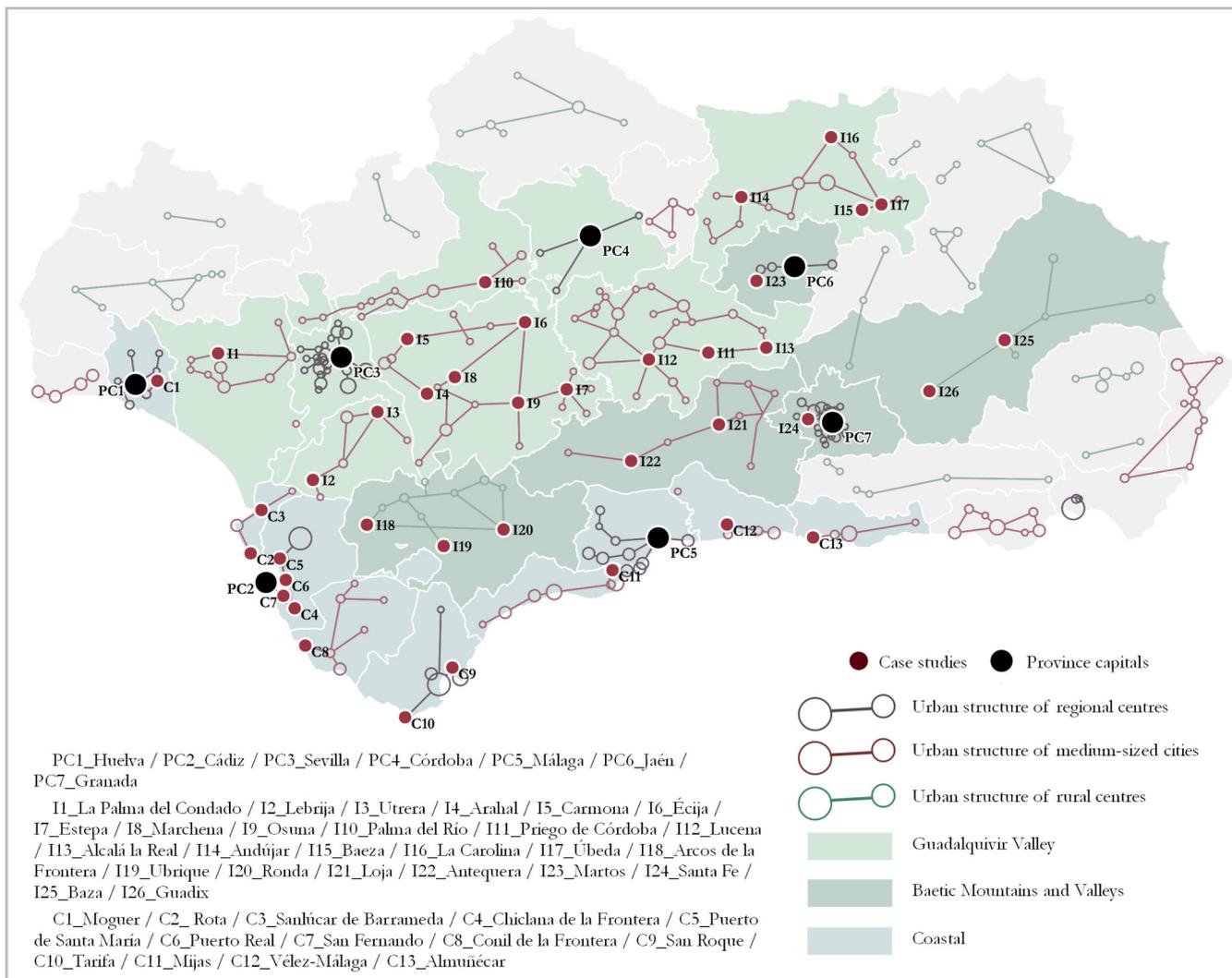
inhabitants. For Bellet and Beltrão, (2009: 43), “medium-sized cities articulate the territory and function as reference centres for a more or less immediate territory”.

In the case of Andalusia, they are officially recognised by the Regional Spatial Plan (approved by Decree 206/2006, of 28 November), which proposes a hierarchical territorial structure – the System of Cities – distinguishing three categories: Regional Centres, Medium-sized Cities and Rural Areas. This classification has been made based on demographic size, diversity and dynamics of its economic base and functional weight. Although the size of a medium-sized city should not be measured in absolute terms, in Andalusian, it would correspond to populations between 100,000 and 15,000 inhabitants, coinciding with the hypothesis of Merinero and Lara (2010: 2).

#### *— Cultural heritage characterization of the Medium-sized cities of Andalusia*

This study follows the Andalusian Regional Spatial Plan, in Spanish *Plan de Ordenación Territorial de Andalucía* (Junta de Andalucía, 2006). This document includes a total of sixty-one medium-sized cities in the Andalusian geography [figure 1]. The research has selected those that have been or are in the process of being listed as Historical Ensemble. This classification means public recognition and legal protection of their heritage values as a whole. In the past, this responsibility exclusively corresponded to the Government of Spain. Currently, the Regional Government is also in charge to classify a city as Historical Ensemble.

The selected cities have been analysed according to their position in the territory. It has been necessary to distinguish between interior and coastal geographic domain due to the different evolution they have experienced during the 20<sup>th</sup> century. Special mention requires coastal cities since their development has been mainly boosted by mass tourism since the 60s. Out of the forty medium-sized cities in inner Andalusia (Del Espino Hidalgo 2015: 62), twenty-six (65%) have been listed as Historical Ensembles or are in process [table 1]. Besides, out of the twenty-one medium-sized cities located on the Andalusian coast (Navas-Carrillo et al., 2019: 250-251), thirteen (61.9%) have been listed or are under study. In addition to the individual built heritage assets, this classification assesses the urban, spatial and landscape configuration of these thirty-nine cities analysed as a whole. International agencies as UNESCO also has recognised the heritage value of several of these medium-sized cities. For instance, Úbeda and Baeza (Jaen) are listed on the World Heritage List as “Renaissance Monumental Ensembles of Úbeda and Baeza” (UNESCO 2003: 121), or the “Antequera Dolmens Site” (UNESCO 2016: 223), located in the Province of Málaga.



**Figure 1.-** Andalusian Urban System. Source: Compiled by the authors based on the Spatial Plan of Andalusia (Junta de Andalucía, 2006).

**Table 1.-** Geographic Domain, Territorial Unit and Medium-sized Cities listed as Historical Ensemble in Andalusia. Source: Compiled by authors based on data from the Spatial Plan of Andalusia (Junta de Andalucía, 2006) and the Institute of Statistics and Cartography of Andalusia (IECA, 2019).

Geographic Domain	Territorial Unit	Medium-sized cities according to the Spatial Plan of Andalusia
Inner	Aljarafe-Condado-Marismas	La Palma del Condado (10,761 inhabitants)
	Bajo Guadalquivir	Lebrija (27,524 inhabitants) Utrera (50,728 inhabitants)
	Campaña y Sierra Sur de Sevilla	Arahal (19,526 inhabitants) Carmona (28,531 inhabitants) Écija (39,873 inhabitants) Esteba (12,505 inhabitants) Marchena (19,457 inhabitants) Osuna (17,560 inhabitants)
	Guadalquivir Valley	Palma del Río (21,064 inhabitants)
	Campaña y Subbético de Córdoba y Jaén	Lucena (42,605 inhabitants) Priego de Córdoba (22,408 inhabitants) Alcalá la Real (21,605 inhabitants)
	Centro Norte de Jaén	Andújar (36,793 inhabitants) Baeza (15,841 inhabitants) La Carolina (15,261 inhabitants) Úbeda (34,345 inhabitants)

Table 1.- (continuation)

Geographic Domain		Territorial Unit	Medium-sized cities according to the Spatial Plan of Andalusia
Inner	Baetic Mountains and Valleys	Serranías de Cádiz y Ronda	Arcos de la Frontera (30,700 inhabitants) Ubrique (16,597 inhabitants) Ronda (33,877 inhabitants)
		Depresiones de Antequera y Granada	Loja (20,342 inhabitants) Antequera (41,239 inhabitants)
		Regional Centre of Jaén	Martos (24,215 inhabitants)
		Regional Centre of Granada	Santa Fe (15,157 inhabitants)
		Altiplanicies Orientales	Baza (20,412 inhabitants) Guadix (18,422 inhabitants)
Coastal		Regional Centre of Huelva	Moguer (22,088 inhabitants)
		Costa Noroeste de Cádiz	Rota (29,109 inhabitants) Sanlúcar de Barrameda (68,684 inhabitants)
		Regional Centre of Bahía de Cádiz-Jérez	Chiclana de la Frontera (84,489 inhabitants) Puerto de Santa María (88,405 inhabitants) Puerto Real (41,627 inhabitants) San Fernando (95,979 inhabitants)
		La Janda	Conil de la Frontera (22,529 inhabitants)
		Regional Centre of Bahía de Algeciras	San Roque (31,218 inhabitants) Tarifa (18,162 inhabitants)
		Costa del Sol	Mijas (82,742 inhabitants)
		Vélez-Málaga y Axarquía	Vélez-Málaga (81,643 inhabitants)
		Costa Tropical	Almuñécar (26,514 inhabitants)

## Methodology

### — Criteria for its application to the study sample

To meet the defined objectives, a system of medium-sized cities of heritage character has been chosen as a case study: those officially recognised in Andalusia purposing their preservation. That is, listed as Historical Ensembles according to what is indicated by Law 14/2007 on the Historical Heritage of Andalusia (Junta de Andalucía 2007). For this purpose, it has been necessary to determinate the criteria based on what urban vulnerability needs to be addressed.

In the case of the Spanish official framework, the Ministry of Development has developed a methodology to try to objectively analyse Urban Vulnerability through twenty urban indicators and from four perspectives (socio-demographic, socio-economic, residential and subjective). The resulting product can be checked on a web application, namely Atlas of Urban Vulnerability, firstly published in 2011. The methodology was reviewed to become part of the Urban Vulnerability Observatory

in 2015, thanks to the approval of the Land and Urban Rehabilitation Law (Ministerio de Fomento 2015). This digital tool is playing a key role in the development of urban regeneration policies, including the Integrated Sustainable Urban Development Strategies (SUDS) as the result of implementing the Europe 2020 strategy to the field of urban development (Matesanz Parellada, 2018: 92).

This work adopts the methodology provided by the aforementioned Atlas using the data supplied by the Spanish National Statistics Institute in the most recent Population and Housing Census (2011). Although it is a statistical study based on 9% of regular residents, it is the last unified analysis for the set of Spanish municipalities and, therefore, with the same criteria for sampling, data collection and result interpretation. The next update is scheduled for release in 2021. Meanwhile, the National Statistics Institute elaborates the Continuous Household Survey annually since 2013. However, its data are grouped by provinces, and, consequently, it is not possible to use them in this research. Besides, the latest version of the Spanish Census does not provide the information needed for Subjective indicators; whose

analysis would require a qualitative approach based on social perception (Ruiz, 2019:34). For this reason, the research has focused on the socio-demographic, socio-economic and residential dimensions. Specifically, the following fifteen indicators have been analysed:

- Socio-demographic vulnerability: Percentage of seniors aged 75 or more (I1), Percentage of families with only a person aged 64 or more (I2), Percentage of families with only an adult and a child (I3), Percentage of foreign population (I4), Percentage of foreign children (I5).
- Socio-economic vulnerability: Percentage of unemployed population (I6), Percentage of unemployed young population (I7), Percentage of contingent workers (I8), Percentage of workers without qualification (I9), Percentage of people without primary education (I10).
- Residential vulnerability: Percentage of dwellings with less than 30 m<sup>2</sup> (I11), Average adequate living area by inhabitant (I12), Percentage of population in dwellings without a toilet or WC (I13), Percentage of dwellings in ruined or deficient buildings (I14), Percentage of dwellings in buildings built before 1940 (I15).

Based on these considerations, the fifteen indicators mentioned above have been applied to the twenty-six medium-sized interior cities and thirteen coastal ones that have been listed as Heritage Ensembles. The numerical and percentage indicator values have been provided for the whole sample using the data supplied by the Population and Housing Census. This study includes a comparative analysis with the eight provincial capitals, which have the role of regional centres within the territorial organization of Andalusia. In order to properly analyse the results, two different general territorial domains should be identified within the set of Andalusian medium-sized cities. The geographical position, the substantial economic and demographic development or the particular dynamics of urban growth makes the coastal territorial structure differs significantly from the inner one, mostly traditionally characterised as agrocities. Besides, the territorial structure of inner Andalusia is marked by the presence of two structuring elements of the Andalusian territory: the Guadalquivir River and the Baetic System.

In the first phase, the complete information has been represented using a sequential colour scheme (the lowest levels in green and the highest ones in red), as shown in Tables 2 and 3. Subsequently, transforming the absolute values into quintiles, the general urban vulnerability index has been calculated, as well as the one corresponding to each of the three dimensions analysed: Socio-demographic, Socio-economic and Residential. The territorial distribution of these values has been represented through Geographic Information Systems, which has allowed to provide a territorial lecture of the urban vulnerability in Andalusia [figure 2].

### 3. Results

— *Urban heritage protection. Urban planning as a preservation tool*

Before evaluating the degree of heritage preservation that characterizes the analysed cities, it is necessary to expose the legal framework that currently regulates it. In Spain, the heritage preservation is carried out by different public administrations in various development levels: Central, Regional and Local Governments. The Government of Spain, through the Heritage Law, in force since 1985, can list heritage elements as *Bien de Interés Cultural* –hereafter BIC- (Cultural Interest Asset), the highest level of protection in the country. These elements can be listed as Monuments, Historical Gardens, Historical Ensembles, Historical Sites or Archaeological Areas.

Furthermore, heritage preservation can also be articulated since the regional level. Thus, in the case of Andalusia and after the transfer of competences in heritage matters in 1984, the first Andalusian Heritage Law was approved in 1991 (Junta de Andalucía 1991), updated in 2007 (Junta de Andalucía 2007). According to this law, the Cultural Interest Assets also be listed as Places of Ethnological Interest, Places of Industrial Interest, or Heritage Areas. Besides, it introduces a second level of heritage protection called *Bien de Catalogación General* –hereafter BCG- (General Cataloguing Asset). Both of them, and those Andalusian movable assets listed in the *Inventario General de Bienes Muebles del Patrimonio Histórico Español* (General Inventory of Movable Property of the Spanish Historical Heritage), are included in the *Catálogo General del Patrimonio Histórico Andaluz* –hereafter CGPHA- (General Catalogue of the Andalusian Historical Heritage).

Nonetheless, Local Governments has also a significant role in the safeguarding of heritage due to their proximity to the asset to be preserved. According to the *Ley de Ordenación Urbanística de Andalucía* –hereafter LOUA- (Andalusian Urban Planning Law), each municipality is obliged to include heritage preservation measures in the different urban planning instruments approved. In this sense, it is relevant to clarify that the Spanish legislation considers several urban development levels, whose impact on heritage preservation –given the scope of the measures- is consequently uneven. The first instrument to be considered is the *Plan General de Ordenación Urbana* –hereafter PGOU- (General Urban Development Plan). In some cases, general urban planning is regulated by the so-called *Normas Subsidiarias* –hereafter NNSS- (Urban Subsidiary Rules). They are repealed instruments, but which are still used in small towns after being updated according to the LOUA's requirements.

On a second level, the *Planes Especial de Protección* – hereafter PEP- (Preservation Urban Plans) should be mentioned. According to Article 14 of the LOUA, these plans have, among other purposes, to conserve, protect

and improve the urban environment and, primarily, the bearer or expressive heritage of urban, architectural, historical or cultural values. In both instruments, the heritage preservation is mainly articulated through the so-called Protection Catalogues, which contain the detailed list and the precise identification of the assets and spaces that, due to their value, must be subject to particular conservation. Its formulation and approval can also be carried out independently.

According to the aforementioned urban and heritage preservation policies, the set of case studies have been analysed distinguishing again between interior and coastal geographic domain. As table 2 shows, 9 out of 26 (34.62%) cities studied in inner Andalusia are still regulated with NNSS, 5 of them have initiated the drafting of their PGOU, but they have not been approved definitely. 15 out of 26 (57.69%) of the General Plans had been approved before the LOUA's enactment, but all of them have been adapted

to its articulate. Consequently, all the PGOU and NNSS include heritage preservation measures, although only 21 of them include a protection catalogue. In parallel, 10 out of 26 (38.46%) cities have approved a Preservation Plan for their Historical Ensembles.

In the cities analysed in the coast, as table 3 shows, only 1 out of 13 (7.69%) is still regulated by NNSS which were adapted to the current legal framework in 2010. 8 out of 13 (61.54%) General Plans had been approved before the LOUA's enactment, but all of them have been already updated. Consequently, all the PGOU and NNSS include heritage preservation measures, although only 11 of them include a protection catalogue. One of them, the Puerto de Santa María, has approved an additional heritage register. About Preservation Planning for their Historical Ensembles, 10 out of 13 (76.92%) cities have initiated its formulation; nevertheless, only 6 of them (46.15%) have definitely approved it.

**Table 2.-** Heritage protection by urban planning in medium-sized interior cities. Source: Compiled by authors based on the Regional Government's Planning Database (Junta de Andalucía, 2019).

MEDIUM-SIZED INTERIOR CITY	CURRENT URBAN PLAN	PROTECTION CATALOGUE	ADAPTATION TO LOUA	PROTECTION URBAN PLAN	ADDITIONAL REGISTER
Arcos de la Frontera (Cádiz)	PGOU 1994 PGOU 2014 <sup>(1)</sup>	Yes	2010	2007	-
Ubrique (Cádiz)	NNSS 1987 PGOU 2015 <sup>(1)</sup>	Yes	2010	No	-
Lucena (Córdoba)	PGOU 1999	Yes	2008	No	-
Palma del Río (Córdoba)	PGOU 2005	Yes	-	No	-
Priego de Córdoba (Córdoba)	PGOU 2015	Yes	-	No	-
Baza (Granada)	PGOU 2010	Yes	-	No	-
Guadix (Granada)	PGOU 2002	Yes	2010	No	-
Loja (Granada)	NNSS 1993	Yes	2009	No	-
Santa Fe (Granada)	NNSS 1998	Yes <sup>(2)</sup>	2009	No	-
La Palma del Condado (Huelva)	PGOU 2005	Yes	-	No	-
Alcalá la Real (Jaén)	PGOU 2005	Yes	-	No	-
Andújar (Jaén)	PGOU 2010	Yes	-	No	-
Baeza (Jaén)	PGOU 2011	Yes	-	1990	-
La Carolina (Jaén)	NNSS 1993	Yes	2011	No	-
Martos (Jaén)	PGOU 2013	Yes	-	No	-
Úbeda (Jaén)	PGOU 1996	Yes <sup>(2)</sup>	2009	1989 <sup>(3)</sup>	-
Antequera (Málaga)	PGOU 2010	Yes <sup>(2)</sup>	-	1993	-
Ronda (Málaga)	PGOU 1991	Yes <sup>(2)</sup>	2010	-	-
Arahal (Sevilla)	NNSS 1994 PGOU 2019 <sup>(1)</sup>	Yes	2009	2014	-
Carmona (Sevilla)	NNSS 1983 PGOU 2012 <sup>(1)</sup>	Yes	2009	2009	-
Écija (Sevilla)	PGOU 2009	Yes	-	2002	-
Estepa (Sevilla)	NNSS 1988	Yes	2011	-	-
Lebrija (Sevilla)	PGOU 2016	Yes	-	2018	-
Marchena (Sevilla)	NNSS 1995 PGOU 2007 <sup>(1)</sup>	Yes	2009	1994	-
Osuna (Sevilla)	NNSS 1985 PGOU 2017 <sup>(1)</sup>	Yes <sup>(2)</sup>	2009	-	-
Utrera (Sevilla)	PGOU 2001 PGOU 2015 <sup>(1)</sup>	Yes	2008	2009 <sup>(4)</sup>	-

NNSS = Urban Subsidiary Rules | PGOU = General Urban Development Plan | LOUA = Andalusian Urban Planning Law (2002)  
<sup>(1)</sup> provisional approval | <sup>(2)</sup> incomplete | <sup>(3)</sup> updated in 2000 | <sup>(4)</sup> updated in 2018

**Table 3.-** Heritage protection by urban planning in medium-sized interior cities. Source: Compiled by authors based on the Regional Government’s Planning Database (Junta de Andalucía, 2019).

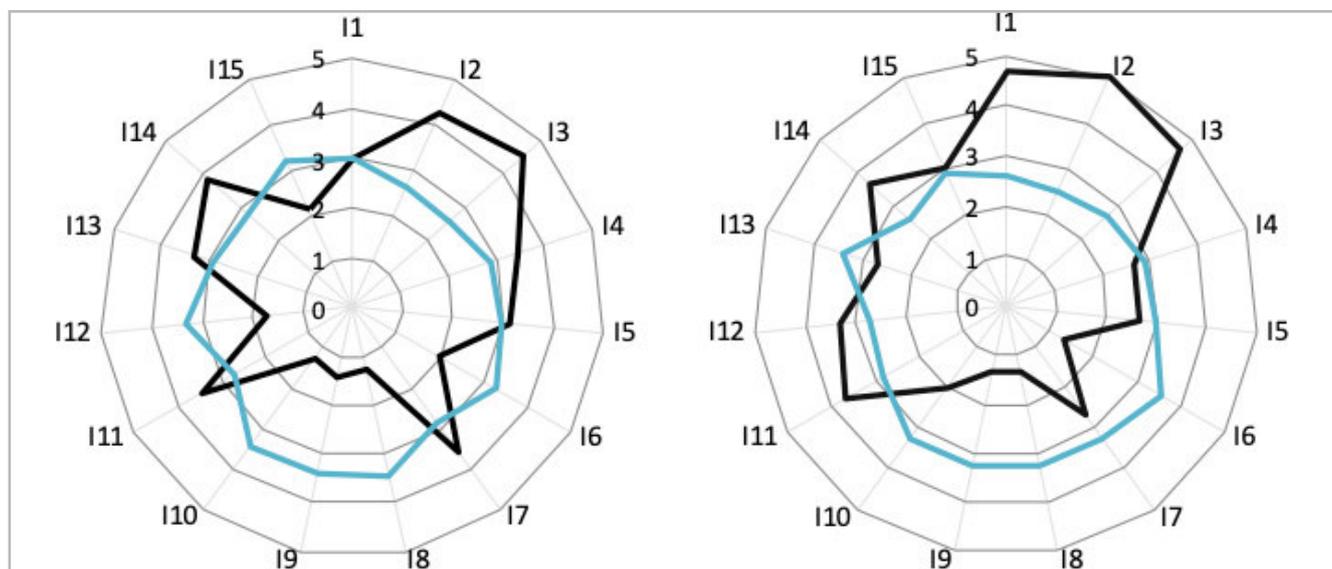
MEDIUM-SIZED COASTAL CITY	CURRENT URBAN PLAN	PROTECTION CATALOGUE	ADAPTATION TO LOUA	PROTECTION URBAN PLAN	ADDITIONAL REGISTER
Chiclana de la Frontera (Cádiz)	PGOU 2016	Yes	-	-	-
Conil de la Frontera (Cádiz)	PGOU 2005	No	2013	2003 <sup>(1)</sup>	-
El Puerto de Santa María (Cádiz)	PGOU 2012	Yes	-	2009 <sup>(1)</sup>	2015
Puerto Real (Cádiz)	PGOU 2009	Yes	-	1997	-
Rota (Cádiz)	PGOU 1994	Yes	2009	2019 <sup>(1)</sup>	-
San Fernando (Cádiz)	PGOU 2011	Yes	-	2008	-
San Roque (Cádiz)	PGOU 2000	Yes	2009	2009	-
Sanlúcar de Barrameda (Cádiz)	PGOU 1996	Yes	2011	-	-
Tarifa (Cádiz)	PGOU 1989	Yes	2010	2012	-
Almuñécar (Granada)	PGOU 1987	Yes <sup>(2)</sup>	2009	2013	-
Moguer (Huelva)	NNSS 1992	Yes	2010	-	-
Mijas (Málaga)	PGOU 1999	Yes <sup>(2)</sup>	2010	2019 <sup>(1)</sup>	-
Vélez-Málaga (Málaga)	PGOU 1996	No	2009	2008 <sup>(3)</sup>	-

NNSS = Urban Subsidiary Rules | PGOU = General Urban Development Plan | LOUA = Andalusian Urban Planning Law (2002)  
<sup>(1)</sup> provisional approval | <sup>(2)</sup> incomplete | <sup>(3)</sup> updated in 2014

The medium-sized coastal cities present average levels of vulnerability in the three dimensions that have been analysed. All the indicators are comprised between the second and fourth quintile. It should be noted that their socio-demographic vulnerability is lower to the regional centres. This fact is especially significant in the percentage of the elderly population (I1-I2) and the percentage of single-parent families (I3). By the contrary, their socio-economic vulnerability is slightly higher (I6-I10). Although they are characterised for certain uniformity, some general conclusions can be drawn. In average, they also present medium levels of vulnerability in the three dimensions. The results are similar to the coastal cities; being the indicators comprised between the second and fourth quintile. The socio-demographic vulnerability (I1-I5) is lower to the regional centres and the socio-economic vulnerability

slightly higher (I6-I10). The residential vulnerability can be considered equivalent in both cases since half of the indicators are slightly higher in medium-sized cities and the other half in the regional centres [figure 2].

In inner Andalusia [table 3], two particular situations can be recognised based on the intensity and level of consolidation of these territories: Guadalquivir Valley (high intensity) and Baetic Mountains and Valleys (moderate intensity). In the first case, the territorial unities of the Campiña de Sevilla and the Bajo Guadalquivir should be highlighted. As table 3 shows, cities such as Arahal, Carmona, Écija, Lebrija, Marchena, Osuna or Utrera stand out for higher values in socio-economic vulnerability (I6-I10) compared to the rest of the dimensions except for Estepa. This city also has high levels of socio-economic vulnerability, but exclusively in



**Figure 2.-** Average levels of urban vulnerability in medium-sized cities (blue) and regional centres (black) in inner and coastal Andalusia. Source: Compiled by the authors based on data from Spanish Statistical Office (INE, 2011).

indicators I7 to I8. These data do not mean that the other values are in minimum positions. Thus, cities as Estepa, Lebrija, Marchena or Osuna show high levels of residential vulnerability, specially I15.

Besides, for the cases of Estepa and Lebrija, high levels are observed in indicators I12, I13 and I14. In the North-Centre of Jaén, the principal characteristic is the vulnerability levels of La Carolina. In this case, most of the indicators are at low levels. 9 out of 18 (50%) are under the first percentile except for indicators I6 and I13 which levels are close to the maximum. Furthermore, Priego de Córdoba stands out among the group of cities that constitute the Campiña and Subbética de Córdoba-Jaén. This medium-sized city has almost non-existent levels of residential vulnerability,

on the contrary, has maximum levels in I4, I5, I8, I9 and I10 indicators. La Palma del Condado and Palma del Río, the only example analysed in their related territorial unit, are characterized by having most of their values at minimum levels.

In the Baetic Mountains and Valleys, five territorial units have been analysed. Among the case studies, Baza highlights as the city that presents the highest number of indicators at maximum levels at the axis drawn by the cities inserted in the Altiplanicies Orientales and the Depresiones de Antequera y Granada. Mainly those related to residential issues, although some indicators of socio-economic and socio-demographic vulnerabilities also have maximum values. Antequera presents the lowest

**Table 3.-** Urban vulnerability in medium-sized cities (blue) and regional centres (black) in inner Andalusia (percentage figures). Data has been represented using a sequential colour scheme (the lowest levels in green and the highest ones in red). Observations: <sup>(1)</sup> no foreign children registered; <sup>(2)</sup> no dwellings with less than 30 m<sup>2</sup> registered; <sup>(3)</sup> no dwellings without a toilet or WC registered. Source: Compiled by the authors based on data from Spanish Statistical Office (INE, 2011)

Ciudades	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15
<b>Cádiz</b>	9,08	4,18	5,71	1,74	0,11	19,03	59,71	34,40	20,12	9,74	0,73	31,51	1,38	15,08	22,78
<i>Arcos de la Frontera</i>	6,34	2,34	3,81	2,20	0,59	28,47	61,56	55,87	55,83	17,01	0,60	30,74	1,62	4,57	11,55
<i>Ubrique</i>	7,62	3,05	4,44	0,86	0,24	18,28	46,11	47,74	12,38	20,12	0,47	34,35	1,18	5,83	9,38
<b>Córdoba</b>	8,32	3,61	5,71	2,68	0,37	17,75	51,22	31,05	17,41	9,91	0,14	33,24	0,62	6,76	6,14
<i>Lucena</i>	7,05	2,69	4,18	5,38	0,61	21,36	47,10	38,57	27,55	14,63	0,17	34,68	2,26	4,62	2,46
<i>Palma del Río</i>	7,69	3,24	4,01	5,59	1,40	19,72	46,61	48,47	45,72	17,83	0,00 <sup>(2)</sup>	33,79	0,52	1,10	2,72
<i>Priego de Córdoba</i>	10,97	3,74	6,02	2,63	0,92	19,61	43,80	44,48	39,85	18,65	0,00 <sup>(2)</sup>	40,28	0,72	3,36	8,05
<b>Granada</b>	9,72	4,79	6,67	7,01	1,24	15,93	53,49	29,60	14,27	7,73	0,33	38,43	0,46	5,49	5,61
<i>Baza</i>	9,31	3,62	4,37	9,59	2,51	17,44	49,47	35,92	22,59	13,32	0,00 <sup>(2)</sup>	43,78	0,52	5,50	7,25
<i>Gnádix</i>	9,86	3,64	3,61	3,67	0,82	17,43	51,23	37,46	25,06	11,61	1,35	36,96	0,28	14,84	22,02
<i>Loja</i>	8,87	4,46	4,01	5,67	1,70	19,76	37,33	43,99	40,84	19,34	0,50	39,74	0,44	8,71	7,77
<i>Santa Fe</i>	7,74	2,09	8,70	4,35	0,00 <sup>(1)</sup>	18,59	53,33	38,14	23,36	9,65	1,50	38,27	0,44	1,86	6,02
<b>Huelva</b>	7,26	3,18	5,95	4,90	0,82	18,87	56,12	36,76	23,73	8,11	0,09	31,70	0,62	11,81	4,52
<i>La Palma</i>	7,77	2,55	4,30	3,45	0,57	16,87	39,63	40,86	31,47	8,32	0,00 <sup>(2)</sup>	37,15	0,28	4,55	12,69
<b>Jaén</b>	8,00	3,98	6,50	2,93	0,43	15,38	61,05	30,49	17,41	8,75	0,00 <sup>(2)</sup>	35,16	0,53	3,66	4,15
<i>Alcalá la Real</i>	11,98	5,08	3,41	4,89	0,99	15,84	46,46	41,65	33,83	21,45	0,23	42,09	1,09	4,15	4,67
<i>Andújar</i>	8,76	3,70	4,81	2,68	0,44	21,29	58,99	38,54	29,98	17,42	0,00 <sup>(2)</sup>	35,67	0,31	8,32	4,12
<i>Baeza</i>	9,15	4,26	3,98	4,47	0,18	17,00	40,32	38,81	19,63	13,56	0,00 <sup>(2)</sup>	40,33	0,00 <sup>(2)</sup>	1,05	7,37
<i>La Carolina</i>	7,25	2,61	4,47	2,42	0,00 <sup>(1)</sup>	19,99	43,78	32,67	23,90	13,16	0,00 <sup>(2)</sup>	36,25	0,18	0,98	6,39
<i>Martos</i>	10,21	3,82	4,33	4,56	1,37	17,32	42,16	39,16	33,72	16,99	0,00 <sup>(2)</sup>	38,97	0,50	5,91	13,15
<i>Úbeda</i>	8,79	3,26	5,31	2,98	0,36	18,16	49,61	33,09	15,25	11,03	0,12	39,68	0,19	3,86	10,49
<b>Málaga</b>	7,21	3,52	6,18	7,84	1,39	18,73	51,99	31,83	21,33	9,40	0,30	33,15	0,70	4,42	3,90
<i>Antequera</i>	8,17	3,37	4,98	4,56	0,93	3,65	52,82	33,05	28,07	14,76	0,00 <sup>(2)</sup>	34,65	1,65	6,42	5,41
<i>Ronda</i>	8,48	3,50	5,76	4,15	0,63	20,93	51,95	37,32	21,32	12,82	0,44	35,56	0,88	3,53	8,02
<b>Sevilla</b>	8,28	3,95	5,51	5,12	0,94	16,54	50,20	29,21	16,79	7,85	0,22	32,97	0,54	4,81	4,55
<i>Arahal</i>	7,28	1,77	2,64	1,39	0,21	24,32	60,04	49,05	52,23	16,93	0,18	34,29	0,00 <sup>(2)</sup>	5,00	4,33
<i>Carmona</i>	7,54	2,22	4,79	2,98	0,83	24,31	57,00	44,61	47,50	14,57	0,00 <sup>(2)</sup>	36,33	1,18	1,69	7,30
<i>Écija</i>	7,14	3,14	7,05	2,97	1,05	23,32	57,25	44,97	35,63	15,41	0,03	33,93	1,12	2,86	4,58
<i>Estepa</i>	7,30	0,35	3,90	3,78	0,00 <sup>(1)</sup>	15,06	57,88	47,30	27,25	14,62	0,17	42,35	1,50	1,50	11,95
<i>Lebrija</i>	6,20	2,42	4,29	2,44	0,20	23,05	55,36	44,15	30,52	15,99	0,17	33,71	1,01	4,27	7,12
<i>Marchena</i>	7,67	2,98	5,04	3,86	0,10	21,26	59,19	46,50	42,83	17,55	0,00 <sup>(2)</sup>	36,14	0,00 <sup>(2)</sup>	2,27	7,37
<i>Osuna</i>	8,48	2,34	3,79	1,70	0,17	20,10	57,28	47,38	51,91	16,26	0,12	38,77	0,00 <sup>(2)</sup>	6,34	11,58
<i>Utrera</i>	6,24	2,22	4,94	2,47	0,50	25,15	62,16	41,23	32,47	13,84	0,35	35,56	0,38	2,61	5,07
<b>Regional centres</b>	8,26	3,93	6,09	4,92	0,82	17,42	55,43	32,05	18,94	8,60	0,28	33,82	0,71	7,54	7,59
<i>Medium-sized cities</i>	8,23	3,02	4,65	3,68	0,67	19,55	51,09	41,96	32,72	15,26	0,25	37,08	0,70	4,45	8,03

levels of this region. However, it has two maximums in indicators concerning building matters (I13 and I14). Among the medium-sized cities of the Serranía de Cádiz and Ronda, Arcos de la Frontera has the highest values, mainly in the socio-economic dimension. In this sense, the similarity that exists between this city and Conil de la Frontera and Sanlúcar de Barrameda should be pointed out. These two coastal cities of the province of Cádiz also have maximum values in these indicators. Nevertheless, Ubrique is characterised by a higher level of vulnerability in residential areas. Finally, Santa Fe and Martos are located under the influence of a regional centre (Granada and Jaen, respectively). This fact makes them have similar patterns of behaviour as them. Just in the case of Martos, the indicators concerning population age (I1) and building age (I14-I15) are exceptionally higher than in Jaen.

On the other side, in the territorial domain of the Andalusian coast [table 4], the regional plan recognises eight territorial units mainly constituted by medium-sized cities. Two of these units are characterised by economic and productive factors: Costa del Sol and Poniente Almeriense (Navas-Carrillo et al., 2017:300). They appear as strongly anthropized units that have a monofunctional model (tourism or greenhouse agriculture). Within these two territorial units, the study sample only includes the city of Mijas. Highly polarised levels of vulnerability characterise this city. The vulnerability level in most of the indicators is minimum, even non-existent. However, the socio-demographic indicators (I2-I5) and the ones related to the housing surface (I11-I12) reach maximum values.

Meanwhile, the rest of the cases are less populated territorial units. Their functional model relates the two previous economic pillars – tourism and agriculture – with other development factors of urban, industrial and commercial economies. We highlight the case of Sanlúcar de Barrameda (Northwest Coast of Cadiz), Conil de la Frontera (La Janda), Vélez-Málaga (Axarquía) and Almuñecar (Costa Tropical), since they are the primary functional centres of their respective territories. The first two cities present high vulnerability in indicators 6 to 10, relating to economic aspects. This weakness is seen as a risk factor for heritage preservation. The situation in Vélez-Málaga and Almuñecar is not favourable either. Both stands out for high levels of vulnerability, except for indicators linked to the employment (I8) and the state of dwellings (I14) in Vélez-Málaga, and the young unemployment (I7) and the number of single-parent families (I3) in the case of Almuñecar. In any case, analysed as a whole, high vulnerability implies a generalized risk in both cases.

Other coastal cities as Chiclana de la Frontera, Puerto Real, San Fernando, San Roque, Tarifa, Puerto de Santa María or Moguer have also been included in the sample. It should be explained that they can be classified as medium-sized cities considering population criteria exclusively. However, these cities are under the strong influence of a nearby regional centre. This fact encourages their response to urban vulnerability differs from the previous ones. The case of San Fernando should be highlighted. As table 4 shows, it has the same pattern of behaviour as Cádiz, but having vulnerability indexes lightly inferior.

**Table 4.-** Urban vulnerability in medium-sized cities (blue) and regional centres (black) in coastal Andalusia (percentage figures). Data has been represented using a sequential colour scheme (the lowest levels in green and the highest ones in red). Observations: <sup>(1)</sup> no dwellings with less than 30 m<sup>2</sup> registered. Source: Compiled by the authors based on data from Spanish Statistical Office (INE, 2011)

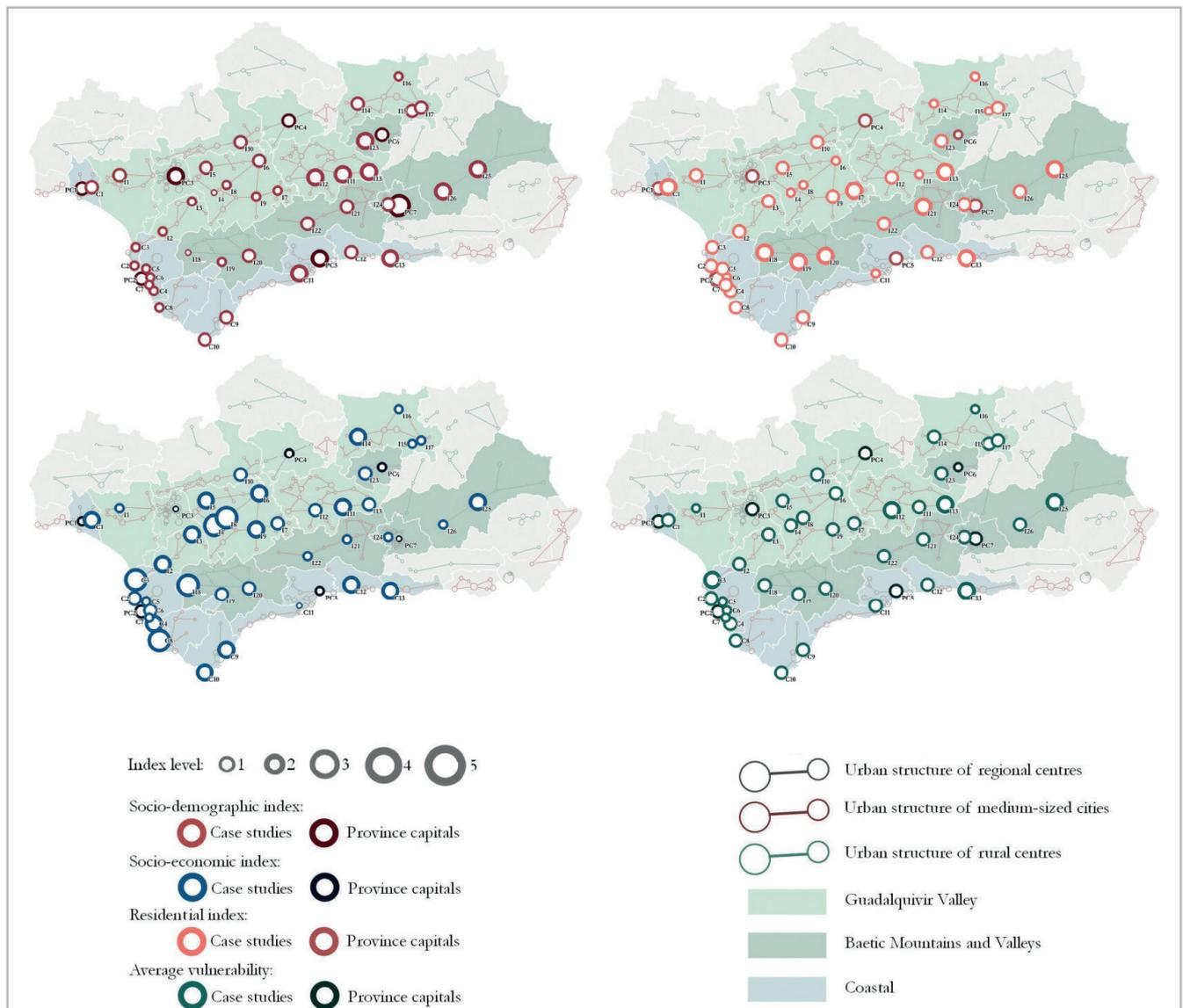
Ciudades	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15
<b>Cádiz</b>	9,08	4,18	5,71	1,74	0,11	19,03	59,71	34,40	20,12	9,74	0,73	31,51	1,38	10,81	22,78
<i>Chiclana de la Fr</i>	4,33	1,22	5,66	4,51	1,13	24,25	62,31	38,89	24,06	9,47	0,05	34,47	1,74	4,36	2,77
<i>Conil de la Fr.</i>	5,45	1,06	3,79	6,41	0,69	25,63	63,41	41,80	37,07	15,31	1,28	30,22	1,14	1,75	4,85
<i>Puerto de Sta. María</i>	5,00	2,81	5,70	4,33	0,73	20,45	53,08	32,81	21,21	7,55	0,22	33,66	0,96	15,36	7,15
<i>Puerto Real</i>	4,61	1,87	5,30	2,34	0,86	20,58	55,07	39,19	20,72	9,15	0,53	31,55	0,80	3,18	4,64
<i>Rota</i>	5,15	2,62	3,50	4,18	0,29	19,30	54,62	36,70	26,70	11,24	0,14	30,73	1,42	3,03	7,75
<i>San Fernando</i>	5,96	2,40	6,02	1,51	0,39	18,94	56,63	34,53	17,53	7,33	0,21	30,12	0,97	5,54	6,77
<i>San Roque</i>	5,52	1,39	5,34	15,24	2,21	21,66	59,69	37,02	27,75	10,15	0,23	39,45	0,98	14,82	4,46
<i>Sanlúcar de Bda.</i>	5,66	2,00	6,15	1,36	0,04	26,12	63,45	47,29	35,22	14,92	0,73	29,31	1,31	5,79	5,79
<i>Tarifa</i>	6,72	0,94	5,44	8,73	1,30	21,92	53,42	42,89	21,33	14,15	0,53	30,88	1,14	3,04	14,82
<b>Granada</b>	9,72	4,79	6,67	7,01	1,24	15,93	53,49	29,60	14,27	7,73	0,33	38,43	0,46	5,49	5,61
<i>Almuñecar</i>	8,99	3,80	4,75	18,02	1,86	24,63	58,95	40,33	36,02	11,19	0,49	34,19	5,04	4,69	7,46
<b>Huelva</b>	7,26	3,18	5,95	4,90	0,82	18,87	56,12	36,76	23,73	8,11	0,09	31,70	0,62	11,81	4,52
<i>Moguer</i>	3,88	1,79	5,02	23,62	3,98	20,88	60,00	57,07	50,38	11,47	0,84	35,93	0,32	6,37	11,33
<b>Málaga</b>	7,21	3,52	6,18	7,84	1,39	18,73	51,99	31,83	21,33	9,40	0,30	33,15	0,70	4,42	3,90
<i>Mijas</i>	5,43	2,76	6,23	35,38	4,37	19,18	43,29	30,21	14,20	6,37	0,51	35,93	0,63	0,75	0,63
<i>Vélez-Málaga</i>	6,27	2,72	5,23	11,11	1,75	22,00	57,13	36,35	27,81	12,09	0,00 <sup>(1)</sup>	34,80	1,15	3,06	5,98
<b>Regional centres</b>	8,67	4,16	6,19	5,53	0,92	17,90	55,06	31,94	18,57	8,95	0,46	34,36	0,85	6,90	10,76
<i>Medium-sized cities</i>	5,76	2,13	5,26	9,43	1,30	22,05	56,75	38,17	25,80	10,74	0,41	32,94	1,44	5,45	6,09

**Discussions and conclusions**

After analysing the results obtained, clear divergences can be observed between the vulnerability indexes that characterise each city of the sample. However, there is evidence of common trends or behaviour patterns in the set of cities under research, many of them since a territorial lecture. Most of the medium-sized cities highlight for their vulnerability in indicators I6 to I10 associated with socio-economic aspects, in contrast to regional centres or those intermediate cities close to them. The level of indicators I7, related to youth unemployment, is especially significant in the provinces of Cádiz and Jaén, and lower in the provinces of Granada and Jaén. In fact, as figure 3 shows, the territorial units of western Andalusia present a higher average level of socio-economic vulnerability. Mainly, the medium-sized cities studied in the Campiña y Sierra Sur de Sevilla, in the Bajo Guadalquivir, Costa Noroeste de Cádiz, and the regional centre of Bahía de Cádiz. By contrast, the case studies in the provinces of Bahía de Granada, Málaga, Córdoba

and Jaén have higher average levels of socio-demographic vulnerability (I1-I5). The regional centres also show high vulnerability indexes, highlighting the case of Granada.

In the case of residential vulnerability (I11-I15), there is a more uniform territorial distribution of values [figure 3]. However, slightly lower values are identified in many of the cities that have been analysed in the Guadalquivir valley. This fact reflects that settlements with a more significant relationship with the natural environment contribute to social equity to a greater extent than in province capitals, being something that affects the state of the houses. In this sense, the data obtained are considered positive since they involve greater social cohesion and a sense of belonging to a site. There intangible factors are of vital interest to the effective heritage safeguard. However, figure 3 also shows that in the vast majority of case studies, the values obtained in the three dimensions are compensated. As a result, the average vulnerability reaches medium levels, both in intermediate cities and regional centres.



**Figure 3.-** Socio-demographic (red), socio-economic (blue), residential (green) and average (green) vulnerability in medium-sized cities (light colour) and regional centres (dark colour) in Andalusia. Source: Compiled by the authors based on data from Spanish Statistical Office (INE, 2011)

The data also allow extracting significant differences between the cities analysed in inland and coastal Andalusia. The majority of medium-sized interior cities have high levels of uneducated population, probably due to their configuration in the past as agricultural cities. This lower level of education could lead to a lower knowledge in heritage matters, so it would be desirable to promote the training and information of society to bring it to know, value and respect its historical legacy.

Coastal cities stand out for having the highest levels of economic vulnerability (I6-I10) and levels of foreigners (I4). The economic weakness can be perceived as a risk factor for heritage preservation; however, the influence of the foreign population would require more in-depth analysis. Among other issues, it will depend on the greater or lesser contribution of them to the socio-economic level of the city, for example, if the number of foreigners is compared between the Costa del Sol and the Costa Tropical in Granada. Consequently, the positive and negative effects of tourism must also be considered. The development of coastal cities has been characterised by sun-and-beach tourism. However, cultural tourism has recently been promoted as an alternative, beginning to play an essential role in preserving the heritage and promoting urban regeneration also in coastal cities. Nevertheless, cultural tourism can also carry certain risks for heritage conservation when it becomes the predominant activity in high-value areas such as the Historical Ensembles hindering their normal performance.

To conclude, the results obtained generally show that the medium-sized cities of Andalusia do not present a level of vulnerability lower to the regional centres. Consequently, both would have a similar heritage management capacity. However, several urban weaknesses have been identified, which would demand complementary analysis, for instance, expanding the study to the whole Andalusian territory or updating it with future census data. Likewise, it could also imply a comparative analysis with other national and international contexts. Future lines of research that would contribute to a better understanding of urban vulnerability and improve the efficiency of the tools currently used for cultural heritage preservation.

### Acknowledgements

This paper has been developed under the R&D project entitled Urban Heritage Characterisation and Cultural Tourism Model in Medium-Sized Cities. Potentialities and Challenges for its Internationalisation: Inner Baetica, funded by the competitive call of the State Plan 2013- 2016 Excellence – R&D Projects of the Ministry of Economy and Competitiveness of the Government of Spain (HAR2016-79788-P).

### References

- ALGUACIL GÓMEZ, J. (2006): "Barrios desfavorecidos: un diagnóstico de la situación española". En: *V Informe FUHEM de políticas sociales: La exclusión social y Estado de Bienestar en España*: 155-168. Madrid: FUHEM-Icaria.
- ALGUACIL GÓMEZ, J.; CAMACHO GUTIÉRREZ, J., HERNÁNDEZ AJA, A. (2014). "La vulnerabilidad urbana en España. Identificación y evolución de los barrios vulnerables". *EMPIRIA. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, 27: 73-94. <https://doi.org/10.5944/empiria.27.2014.10863>
- ANTÓN-ALONSO, F., PORCEL, S. (2017). "Transformación de barrios y densidad institucional: un análisis de la vulnerabilidad urbana en el Área Metropolitana de Barcelona". *Seminario Internacional Las grandes ciudades en transformación. Dinámicas residenciales, segregación y vulnerabilidad*. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- BANKOFF G., FRERK G., HILHORST, D. (2004). *Mapping Vulnerability: Disasters, Development & People*. London: Earthscan
- BANKOFF, G. (2019) Remaking the world in our own image: vulnerability, resilience and adaptation as historical discourses. *Disasters*. 43 (2): 221– 239. <https://doi.org/10.1111/disa.12312>
- BELLET SANFELIU, C., BELTRÃO SPOSITO, M. E. (2009). *Las ciudades medias o intermedias en un mundo globalizado*. Lleida: Universitat de Lleida.
- BELLET SANFELIU, C.; LLOP TORNÉ, J. M. (1999). *Ciudades Intermedias y Urbanización Mundial*. Lleida: UNESCO, Ayuntamiento de Lleida, UIA, Ministerio de Asuntos Exteriores.
- BRAUN, G., HOGENBERG, F. (1572-1618). *Civitates Orbis Terrarum*. Colonia.
- CANNON, T. (2008). *Reducing People's Vulnerability to Natural Hazards: Communities and Resilience*. Bonn: United Nations University – World Institute for Development Economics Research
- CARDOSO, M. M. (2018). "Estudio de la vulnerabilidad y la resiliencia en la ciudad de Santa Fe, Argentina: El rol de los servicios urbanos en general y del transporte de pasajeros en particular". *Revista de geografía Norte Grande*, 73: 133-159. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022019000200133>
- CHRISTALLER, W. (1993). *Die zentralen Orte in Süddeutschland* (Central Places in Southern Germany). Translated by J. Fischer. New Jersey: Prentice-Hall.
- DE SANTIAGO RODRÍGUEZ, E. (2018). "Herramientas de diagnóstico para las intervenciones de regeneración urbana integrada en la ciudad consolidada: ejemplos de España". *Limaq. Revista de Arquitectura de la Universidad de Lima*, 4: 219-246. <https://doi.org/10.26439/limaq2018.n004.2658>

- DEL ESPINO HIDALGO, B. (2018). *Las ciudades medias del centro de Andalucía. Análisis territorial y evaluación de su sostenibilidad*. Sevilla: Editorial de la Universidad de Sevilla.
- DEL ESPINO HIDALGO, B., NAVAS-CARRILLO, D. (2018). "Planeamiento estratégico local y evaluación del Desarrollo Urbano Sostenible Integrado en ciudades medias". *Gestión y Análisis de Políticas Públicas*, 20: 143-163. <https://doi.org/10.24965/gapp.v0i20.10481>
- HERNÁNDEZ AJA, A., RODRÍGUEZ ALONSO, R., RODRÍGUEZ SUÁREZ, I. (Dir.) (2018). *Barrios vulnerables de las grandes ciudades españolas*. 1991/2001/2011. Madrid: Instituto Juan de Herrera (IJH).
- EUROPEAN UNION (2001). *Cities of tomorrow: Challenges, visions, ways forward*. Online: [http://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docgener/studies/pdf/citiesoftomorrow/citiesoftomorrow\\_final.pdf](http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/citiesoftomorrow/citiesoftomorrow_final.pdf) (accessed 19th October 2019)
- FAULKNER, J.; MURPHY, E. & SCOTT, M. (2020). *Developing a holistic 'vulnerability-resilience' model for local and regional development*. European Planning Studies. First published Online. <https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1720612>
- FÜSSEL, H. M. (2007). "Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research". *Global Environmental Change* 17: 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002>
- GODSCHALK, D. R. (2003). "Urban hazard mitigation: creating resilient cities". *Natural hazards review*, 4(3): 136-143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2003\)4:3\(136\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2003)4:3(136))
- HARVEY, D. (2003). "The right to the city". *International journal of urban and regional research*, 27(4): 939-941. <https://doi.org/10.1111/j.0309-1317.2003.00492.x>
- HAWKES, J. (2001). *The fourth pillar of sustainability. Culture's Essential Role in Public Planning*. Melbourne, Australia.
- HIRSCHMAN, A. O. (1958). *The strategy of economic development*. New Haven: Yale University Press.
- JEFATURA DEL ESTADO. (1985). "Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español". In: *BOE núm. 155, de 29 de junio de 1985*. Reference: BOE-A-1985-12534. Madrid.
- JUNTA DE ANDALUCÍA (2002). "Ley 7/2002, de 17 de diciembre, de Ordenación Urbanística de Andalucía". Pag. 25.084-25.145. In: *BOJA, núm. 154, de 31 de diciembre de 2002*. Sevilla: Junta de Andalucía.
- JUNTA DE ANDALUCÍA (2006). *Plan de Ordenación del Territorio de Andalucía*. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía.
- JUNTA DE ANDALUCÍA (2007). "Ley 14/2007, de 26 de noviembre, del Patrimonio Histórico de Andalucía". Pag. 6-28. In: *BOJA, núm. 248, de 19 de diciembre de 2007*. Sevilla: Junta de Andalucía.
- JUNTA DE ANDALUCÍA. (1991). "Ley 1/1991, de 3 de julio, de Patrimonio Histórico de Andalucía". Pag. 5573-5586. In: *BOJA, núm. 59, de 13 de julio de 1991*. Sevilla: Junta de Andalucía.
- JUNTA DE ANDALUCÍA. (2019). "Consulta de planes urbanísticos y territoriales de Andalucía", en SITU@ Difusión de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de Andalucía. Online: <http://ws041.juntadeandalucia.es/medioambiente/situadifusion/pages/search.jsf> [consult: 19th October 2019]
- KRELLENBERG, K., WELZ, J., LINK, F., BARTH, K. (2017). "Urban vulnerability and the contribution of socio-environmental fragmentation: Theoretical and methodological pathways". *Progress in Human Geography*, 41(4): 408-431. <https://doi.org/10.1177/0309132516645959>
- LANKAO, P. R., QIN, H. (2011). "Conceptualizing urban vulnerability to global climate and environmental change". *Current opinion in environmental sustainability*, 3(3): 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.12.016>
- LEFEBVRE, H. (1968). *Le droit à la ville* (Vol. 3). Anthropos: Paris.
- LEVRON, E. (2010). *Identification of Vulnerable People in Urban Environments: Assessment of Sustainable Livelihoods and Urban Vulnerabilities*. Palaiseau: Action Contre la Faim International.
- LLOP TORNÉ, J. M., HOEFLICH DE DUQUE, S. (2010). *Ciudades intermedias*. Barcelona: Secretariado de la Red Mundial de Ciudades y Gobiernos Locales Unidos.
- LÖSCH, A. (1940). *The Spatial Organization of the Economy*. London: Encyclopædia Britannica
- MADOZ, P. (1846-1850). *Diccionario Geográfico Estadístico Histórico de España y sus posesiones de Ultramar*. Madrid.
- MATESANZ PARELLADA, Á. (2017). *Políticas urbanas y vulnerabilidad*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- MATESANZ PARELLADA, Á. (2018). "Evolución de los parámetros del enfoque integrado en las políticas de regeneración urbana en los barrios vulnerables en España". *Gestión y Análisis de Políticas Públicas*, 20: 82-99. <https://doi.org/10.24965/gapp.v0i20.10488>
- MERINERO RODRÍGUEZ, R., LARA DE VICENTE, F. (2010). *Las Ciudades Medias del interior de Andalucía. Caracterización y retos para el desarrollo turístico en un nuevo entorno*. Córdoba: Aecit.
- MINISTERIO DE FOMENTO. (2012). *Análisis urbanístico de Barrios Vulnerables en España Sobre la Vulnerabilidad Urbana*. Madrid: Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- MINISTERIO DE FOMENTO. (2015). *Atlas de la Vulnerabilidad Urbana en España 2001 y 2011. Metodología, contenidos y créditos*. Madrid: Ministerio de Fomento. Gobierno de España.

NAVAS-CARRILLO, D., PÉREZ CANO, M. T., DEL ESPINO HIDALGO, B., ROYO NARANJO, L. (2019). "Dualidad Turística Residencial de las ciudades medias del litoral andaluz". In: *TOURISCAPE, Turismo y Paisaje*, pp. 247- 260. Madrid: Tirant Lo Blanch.

NAVAS-CARRILLO, D.; ROSA-JIMÉNEZ, C., PÉREZ CANO, M. T. (2016). *Between Historic Sites and New Tourist Destinations: The Development of the First Periphery in Medium-Sized Andalusian Coastal Cities*. <https://doi.org/10.30958/ajt.3.4.3>.

PATEL, R., SANDERSON, D., SITKO, P., DE BOER, J. (2020). "Investigating urban vulnerability and resilience: a call for applied integrated research to reshape the political economy of decision-making". *Environment and Urbanization*. First published Online. <https://doi.org/10.1177/0956247820909275>

PERROUX, F. (1955). "Note sur la notion de poles croissance". *Économie Appliquée*, 8: 307-320.

RAN, J., MACGILLIVRAY, B. H., GONG, Y., HALES, T. C. (2020). "The application of frameworks for measuring social vulnerability and resilience to geophysical hazards within developing countries: A systematic review and narrative synthesis". *Science of The Total Environment*, 711 (134486): 1:16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134486>

RODRÍGUEZ PEÑA, V. (2017). *Análisis de la vulnerabilidad social-urbana en Valladolid: Una aproximación Geográfica*. Universidad de Valladolid.

RUIZ, A. (2019). "El potencial de la percepción social aplicada al análisis de la vulnerabilidad en planificación urbana". *EURE. Revista De Estudios Urbano Regionales*, 45(136): 31-50. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612019000300031>

RUIZ CASTILLO, J. (2004). "Los fundamentos de la protección: el efecto desintegrador producido por la consideración del Patrimonio Histórico como factor de desarrollo". *Patrimonio cultural y derecho*, 8: 11-36.

SINGH, C., DESHPANDE T., BASU, R. (2017). "How do we assess vulnerability to climate change in India? A systematic review of literature". *Regional Environmental Change*, 17: 527-538. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1043-y>

TEMES, R. (2014). "Valoración de la vulnerabilidad integral en las áreas residenciales de Madrid". *EURE. Revista De Estudios Urbano Regionales*, 40(119): 119-149. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612014000100006>

TWIGG, J. (2015). *Disaster Risk Reduction*. London: Overseas Development Institute

UNESCO. (2003). "Renaissance Monumental Ensembles of Úbeda and Baeza". In: *Decisions adopted by the 27th sesión of the World Heritage Committee*. Paris: UNESCO.

UNESCO. (2016). "Antequera Dolmens Site". In: *Report of the decisions adopted during the 40th session of the World Heritage Committee*. Istanbul: UNESCO.

UNESCO. (2018). *Reshaping cultural policies: advancing creativity for development*. Online: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000260678> [consult: 19th October 2019]

UNITED NATIONS. (2013). *Report on the world social situation, 2003. Social Vulnerability: Sources and Challenges*. New York: United Nations Reproduction Section.

VILAGRASA, J. (2000). *Ciudades medias y ciudades intermedias: posicionamiento en la red urbana y procesos urbanos recientes*. Online: <http://www.etsav.upc.es/personals/monclus/cursos/ibarz.htm> [consult: 19th October 2019]

WEICHSELGARNTER, J. (2001) "Disaster mitigation: The concept of vulnerability revisited". *Disaster Prevention and Management: An International Journal* 10: 85-95.

WISNER, B., BLAIKIE P., CANNON, T., DAVIS, I, (2004). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. London: Routledge.

---

#### Author/s



**Daniel Navas-Carrillo**  
[dnavas@us.es](mailto:dnavas@us.es)  
University of Seville (Spain)

Is a PhD Researcher at the Urban and Regional Planning Department of the University of Seville (Spain). He holds a PhD in Architecture (2020), a MSc in Heritage and Architecture (2017) and a MSc in Innovation in Architecture (2016). His research aims to analyse the urban growth experienced in the third quarter of the 20th century in medium-sized cities from a heritage perspective. He has received several prizes such as the Urbanism and Architecture Biennale Research Award (2016) and the Young Researcher TechnoHeritage Award (2019).



**Blanca del Espino Hidalgo**  
[blanca.espino@juntadeandalucia.es](mailto:blanca.espino@juntadeandalucia.es)  
Andalusian Institute of Historical Heritage

Is a full-time PhD Researcher at the Andalusian Institute of Historical Heritage, Centre of Built Heritage, Department of Projects. She holds a PhD in Architecture (2015), a MSc in Heritage and Architecture (2011) and a MSc in Sustainable Cities and Architecture (2013). She has been a pre-doctoral and post-doctoral researcher and assistant professor at the University of Seville (Spain). Her research is focused on cultural heritage sustainability, mainly on urban and territorial dimensions, including landscape and social components.



**Juan-Andrés Rodríguez-Lora**  
jrodriguez91@us.es  
University of Seville (Spain)

Predocctoral Researcher at the Urban and Regional Planning Department of the University of Seville (Spain). He holds a Degree in Architecture (2016), a MSc in Heritage and Architecture (2018) and is currently studying a MSc in Urbanism, Urban Planning and Urban Design (2020). His research focuses on contemporary heritage preservation from an urban perspective. He has received several awards, such as the Extraordinary Degree Award (2016).



**Teresa Pérez-Cano**  
tpcano@us.es  
University of Seville (Spain)

Is a full-time Professor at the Urban and Regional Planning Department of the University of Seville (Spain) since 1995. Permanently collaborating with several Master and Doctorate programmes, she has been the director of more than 29 doctoral theses. Co-founder and director of the research group HUM-700 Heritage and Urban and Territorial Development in Andalusia. Focused on urban planning preservation, the group has conducted several types of research, urban plans, and professional advisory on classed buildings, monuments, historic centres, and landscapes. She has leaded several R&D projects on medium-sized cities in Andalusia



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.754>

# Heritage monitoring and surveillance using Sentinel satellite data in the Lower Alentejo (Portugal)

Steffan Davies, Martino Correia, Ricardo Cabral

**Abstract:** In this article, the potential of Satellite Remote Sensing (SRS) for large-scale monitoring of archaeological sites is analysed. This analysis focuses on the Portuguese Lower Alentejo region, where multiple sites have been destroyed over the last years, mainly due to intensive agriculture. The development of a surveillance system based on data from the Sentinel 1 and Sentinel 2 satellite constellations, named SENSEOS, had its pilot application in this region during the first half of 2019. In a vast region where authorities lacked the proper resources to timely detect events endangering the integrity of heritage sites, this system tried to overcome these issues. By using Synthetic Aperture Radar (SAR) and optical data, it was possible to detect such events through a technique labelled Normalized Difference Amplitude Index (NDAI). The identification of these changes on the surface, associated with potentially destructive events, contributed to minimize the damage and destruction of archaeological sites..

**Keywords:** sentinel, satellite remote sensing, heritage monitoring, archaeological site preservation, NDAI, amplitude index change detection, archaeology

## Monitorización y vigilancia del patrimonio utilizando datos de satélite Sentinel en el Bajo Alentejo (Portugal)

**Resumen:** Se analiza el potencial de la teledetección satelital para monitoreo a gran escala de sitios arqueológicos. Este análisis se centra en la región portuguesa del Bajo Alentejo, donde se han destruido múltiples sitios en los últimos años debido a la agricultura intensiva. El desarrollo de un sistema de vigilancia basado en datos de las constelaciones de satélites Sentinel 1 y Sentinel 2, SENSEOS, tuvo su aplicación piloto en esta región durante el primer semestre de 2019. En una región donde las autoridades carecían de los recursos adecuados para detectar eventos a tiempo, poniendo en peligro la integridad de los sitios, este sistema intentó superar estos problemas. El uso de radar de apertura sintética (SAR) y datos ópticos permitió detectar eventos a través de una técnica denominada Índice de Diferencia Normalizada de Amplitud (NDAI), identificando cambios en la superficie asociados con eventos destructivos y minimizando la destrucción de los sitios arqueológicos.

**Palabras clave:** sentinel, teledetección por satélite, monitorización del patrimonio, preservación de sitios arqueológicos, NDAI, detección de cambio de índice de amplitud, arqueología

### Introduction

This study was developed in the scope of a partnership between the Research Centre for Archaeology, Arts and Heritage Sciences of the University of Coimbra (CEAACP) and THEIA, a university spin-off company. The European Space Agency provided funding for this project through the Business Incubation Centre (ESA-BIC), with an incubation period at ESA-BIC Portugal between September 2017 and August 2019. The project resulted in the creation of a satellite monitoring and early warning system for archaeological heritage, called SENSEOS. The team has been developing

the SENSEOS project as a pilot programme with two Portuguese public authorities, the Regional Department of Culture of Alentejo (DRCAAlentejo), and the Regional Department of Culture of Algarve (DRCAAlgarve), in order to assess the benefit of implementing an early warning system based on satellite remote sensing. The project has been monitoring 1396 archaeological sites in the Alentejo region, and 5 in Algarve. Every 6 days, all parties receive a report and, in the event of potential hazard, a risk map with observations or further interpretation is provided, if necessary. In order to share the results our data processing, SENSEOS project includes a WebGIS platform containing

all the information, including archaeological site locations and their associated risk level.

The use of satellite remote sensing and Synthetic Aperture Radar (SAR) in the field of archaeology is not a recent phenomenon. While the technology is related to the popular Ground-penetrating Radar used widely in archaeology for non-invasive prospection (Conyers 2006), it differs in the fact that it offers a much larger field of view in exchange for image definition and visible features, while offering a much lower cost and completely remote approach. The first SRS studies applied to archaeology were published in the second half of the 1970s, and the first archaeological studies using SRS were published in the beginning of the 1980s, but the low resolution of the Landsat 1 satellite restricted their potential to the identification and study of paleolandscapes (Parcak 2009: 22). The same time period applies to the use of SAR systems in archaeological research, which were installed on aircraft and used for the study of anthropic landscapes where aerial photography proved to be unreliable (Adams, Brown, Culbert 1981). It was later during the 21st century that news applications of SRS applied to archaeology started to take form, in large part due to the increase in resolution of optical sensors such as Quickbird II, which allowed for an approach of SRS as a tool for archaeological prospection (Lasaponara & Masini 2005) as the resolution slowly approached that of aerial photography. SRS as a tool for heritage conservation and protection is the most recent of SRS developments in archaeology, enabled by the use of very high-resolution SAR sensors. One example of such an approach was applied in the city of Homs in Syria, which analysed the damage to public infrastructure and heritage caused by the armed conflict in the area (Tapete *et al.* 2015). The study presented in this article represents a continuation of this last approach of using SRS as a method of identifying and preventing damage to heritage sites.

The main area of interest for this study is the Alentejo region in the South of Portugal, focusing on the Lower Alentejo area. Alentejo has a geographical extension of 31,551.2 km<sup>2</sup> corresponding to approximately one third of the country's landmass. It is also home to thousands of archaeological sites and features, with 1064 documented sites in the municipality of Beja alone. The landscape of the Alentejo region, of a rural and agricultural nature, has been changing at a rapid pace, due to the substitution of cereal based crops and dryland farming with intensive plantations of, mainly, olive and almond groves. New sources of water, supplied through the construction of dams and the Alqueva irrigation system, have enabled this process to take place (Morgado 2019). Despite the economic and agricultural benefits of this development, great concern has been placed on the possible consequences it might have on public health and the environment (Lusa 2019). The new availability of water for the purpose of irrigation has led to the introduction of more profitable crop species that require the intervention of highly mechanized

procedures. The conversion of dryland fields into intensive olive and almond groves relies on the use of these types of mechanized invasive methods for soil revolution, involving practices such as deep ploughing. Traditional farming practices, which rely on the use of animals or light mechanized procedures, rarely disturb deep soil layers located at a depth of more than half a metre (Dunker *et al.* 1994: 38). This means that most archaeological sites have remained relatively unharmed despite being located within agricultural fields and plantations. Now, with intense mechanization of agricultural practices, the continued existence of intact archaeological sites, many of which remain unexcavated, is under a serious threat. The large extension of numerous agricultural fields, combined with the lack of labour to supervise landscape transformation adequately in critical areas containing archaeological features, presents a serious problem. In order to give an appropriate response to this situation, it is necessary to develop a system capable of quickly identifying events that threaten cultural heritage. The synoptic view of satellite images, combined with short revisit times of the Sentinel satellite constellation, could provide a solution to this problem, and have great potential as tools for continuous monitoring of large areas of interest.

## Methodology

This study employed Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar and Sentinel-2 Multispectral Data. The main advantage of radar systems like Sentinel-1 is the fact that they are capable of observing the Earth's surface in any type of weather conditions (Patel *et al.*, 2010, p. 244). Passive optical systems like Sentinel-2 provide information from multiple wavelengths but are highly vulnerable to clouds, which can make it impossible to view the surface under certain weather conditions. Sentinel-1's Synthetic Aperture Radar is an active sensor that provides its own source of illumination. This allows the satellite to produce an image based on its own light that returns to the sensor after being reflected from a target, in a process that is called backscatter. A number of different factors, such as surface morphology, surface characteristics, vegetation and soil humidity (Chen *et al.*, 2018, pp. 71-72), influence the intensity of the *backscatter*. Because agricultural practice affects all of these factors, it was hypothesized that radar data could serve as an indicator of agricultural activity in the proximity of archaeological sites. It would then be possible to use optical information as supporting data to extract further details whenever possible. The frequency of new satellite images, called revisit time, is 6 days for radar and approximately 5 days for optical data. All radar and optical data are derived from twin sister satellites (Sentinel-1A & Sentinel-1B for radar, Sentinel-2A & Sentinel-2B for optical), which have identical equipment, ensuring compatibility of image products and avoiding secondary effects and bias seen when using different systems with different resolutions when calculating indexes (Obata *et al.* 2012a; Obata *et al.* 2012b).

For this approach, we used a method we have referred to as NDAI, or Normalized Difference Amplitude Index. The way it functions is similar to the commonly used NDVI, or Normalized Difference Vegetation Index, widely employed in optical images since the 1990s (X. Zhang et al. 2006). The main difference is that instead of comparing the index between Red and Infrared pixel values (Carlson & Ripley 1997: p. 241), we compare the intensity values of radar pixels between two different acquisition dates. For this approach, we relied on the open source software environments SNAP (Sentinel Application Platform) and QGIS (Quantum Geographic Information System). Using GRD (Ground Range Detected) Sentinel-1 products, the first step is to import the dataset into the SNAP environment and apply a pre-processing workflow to calibrate and correct the data. For this process we used a similar workflow to the one presented by F. Filiponi (2019), without the need to convert the product to dB (decibel) at the end of operations, and using the stack tool instead of DEM (Digital Elevation Model) assisted co-registration (spatial alignment) of image pixels. Through SNAP, we apply Precise Orbits to allow for high precision co-registration, remove Thermal Noise and Border Noise to eliminate artifacts and noise in the backscatter signal, Calibrate to Sigma Nought to correct for incidence angle variations in backscatter and standardize images across the stack, apply noise filtering using the Lee Sigma algorithm with the default parameters to reduce speckle, correct the product geometry using the Range-Doppler Terrain Correction to remove SAR geometric distortion, and stack the results using the Create Stack tool with the Initial Offset Method option set to Product Geolocation. Using the resulting stack of images, we apply the Band Math tool to produce the NDAI products (one for each polarisation) based on the following algorithm, where ImageB and ImageA refer to the oldest and most recent image, respectively:

$$\frac{(\text{ImageA}-\text{ImageB})}{(\text{ImageA}+\text{ImageB})}$$

Optionally, and to reduce processing time in the GIS environment during the vectorisation procedure, it is advisable to filter out unwanted data through the Band Math Operator, using the following algorithm. Where  $NDAI_{layer}$  is the input NDAI product and x and y are the maximum and minimum desired values (such as -0.5 and 0.5), respectively:

$$(if\ NDAI_{layer} \leq x\ \vee\ NDAI_{layer} \geq y\ then\ NDAI_{layer}\ else\ NaN)$$

This algorithm can be understood as: "if the input NDAI layer pixel is less or equal to x or greater or equal to y, then preserve its value, otherwise reclassify as null". The result will filter out values regarded by the user as noise or unwanted data, which will be ignored by the vectorisation tool. The above formula reclassifies the NDAI input by maintaining pixel values that are below or equal to x or above or equal to y, and all the others in between are given a null value.

Using the Band Select tool, the NDAI products are separated from the stack and exported as GeoTIFF / BigTIFF format.

The NDAI GeoTIFF products can now be imported into QGIS. For manual inspection, the rasters are given a single band pseudocolor style based on discrete values (increments or decrements of 0.1 in a -1 to 1 range). For automated inspection, the NDAI rasters need to be reclassified based on a rules table (Table. 1) and vectorized to convert them into vector format. For reclassification, it was necessary to multiply NDAI values by 100 using the SNAP Band Math tool before exporting in order to transform the normalized values from float to integer format with two decimal places of precision (in QGIS 3.4, the GRASS 7 r.reclassify tool only worked properly with integer values). A rules table (table 1) was used to reclassify the image pixels to integer values ranging from 1 to 10.

After this process, the image is simplified and it is possible to cross the areas of interest that are defined by some type of geometry (such as buffers) with the vectorized pixels of the NDAI processing using the Select by Location tool. The output will be based on the geometric predicate (Boolean criteria) the user defines in the selection process, which in this case would be the intersect predicate (returns TRUE if the intersection between vector features does not result in an empty set).

**Table 1.-** Example of a rules table used for reclassifying NDAI rasters into discrete values.

-100	thru	-90	=	1	Very High Loss
-90	thru	-80	=	2	High Loss
-80	thru	-70	=	3	Medium Loss
-70	thru	-60	=	4	Low Loss
-60	thru	-50	=	5	Very Low Loss
-50	thru	50	=	6	Noise
50	thru	60	=	7	Very Low Gain
60	thru	70	=	8	Low Gain
70	thru	80	=	9	Medium Gain
80	thru	90	=	10	High Gain
90	thru	100	=	11	Very High Gain

We normalized the data in order to allow us to work within the same ranges between different periods of observation, even if the degree of changes is different between image pairs. We filtered out a portion of the resulting data close to the value of zero (in an interval such as -0.5 and 0.5) in order to remove variations caused by noise or not very significant changes on the surface. This normalized data is subsequently categorized according to the severity of changes between image pairs, in order to allow the detection of different levels of changes in the landscape that could correspond to different kind of agricultural or physical events on the surface. Ploughing, for example, could produce a different pixel value compared to events

such as irrigation or germination. In order to assess if surface change may have affected the archaeological sites, the information derived from the change detection processing is crossed with geographical information of archaeological sites in the area. A buffer is created around these sites in order to define a “sensitive area”, and if the buffer crosses an area with identified changes, it is added to a selection along with all the other affected elements. These can then be extracted onto a layer and exported to be displayed on Google Earth or Google Maps.

## Results

### —Pisões

The archaeological site of Pisões is a partially excavated roman *villa*, containing a complex arrangement of structures of a domestic, agricultural a funerary nature, including four mausoleums (Pereira, Soares & Soares 2013). The *villa* incorporates an advanced water supply, storage and distribution system which would have been necessary for the bathing and pool facilities, as well as the requirements for agricultural production (Serra 2008: 505). The site has suffered from a lack of maintenance that has led to its degradation over the years, despite its cultural importance (Dias 2017). Agricultural activity destroyed the unexcavated portion of the site, containing important features such as an aqueduct located underneath a water reservoir in a field to the Northeast, at an unknown date (Lemos 2018). To test our approach and to try to determine a time interval for these destructive events, a historical analysis was performed using archive imagery.

Observation of Sentinel 2 time series from 2017 shows that most of the surface transformations occurred during the second trimester of the year. Evidence that supports this observation includes the disappearance of the water reservoir in the Northeast of the excavated site, between the 5<sup>th</sup> and 15<sup>th</sup> of April 2017. This water reservoir was located in very close proximity to the roman aqueduct identified at the site. Clear images are not available from Sentinel-2 until the 15<sup>th</sup> of May 2017. At this point, there seems to have been a unification of this field plot with another one adjacent to it in East-Northeast direction that had contained a small grove. These changes are indicators of possible preparation of land for future plantation.

For radar analysis, we applied NDAI processing to Sentinel-1 satellite data. Pairs of images with a temporal baseline of approximately one month, beginning in 2014, were analysed. Of the changes verified in these images, the most intense correspond to an event of relatively high values between the 5<sup>th</sup> of October and the 4<sup>th</sup> of November 2017. Thereafter we processed the products chronologically situated between these two dates, with a temporal baseline of 6 days. Results show

that the event occurred between the dates of 11<sup>th</sup> and the 17<sup>th</sup> of October 2017. Histograms of the output of NDAI processing corresponding to these dates [figure 1] show that values peak at or close to 0, indicating good quality of inputs. The area corresponding to higher value NDAI pixels fits within the boundaries of the plot and shares the same shape [figure 2]. It is not known what happened during this time, but changes in other fields could indicate agricultural activity.

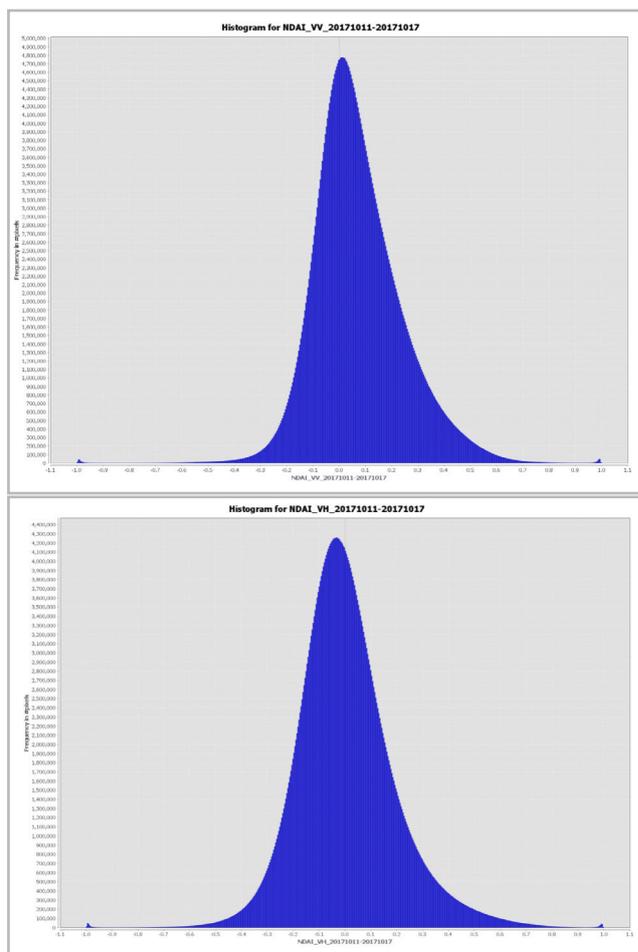


Figure 1.- NDAI Histogram for both polarizations (VV & VH) representing pixel values and pixel frequency corresponding to the dates of 11 to 17 October 2017. They peak close to the value of 0 (no change in amplitude)..

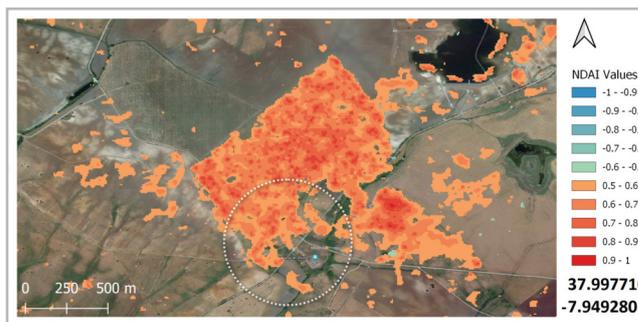


Figure 2.- Results of radar signal processing for Pisões, using NDAI change detection. Amplitude gain is shown as red, amplitude loss as blue. Archaeological context is within the circle.

**Quinta do Estácio 10**

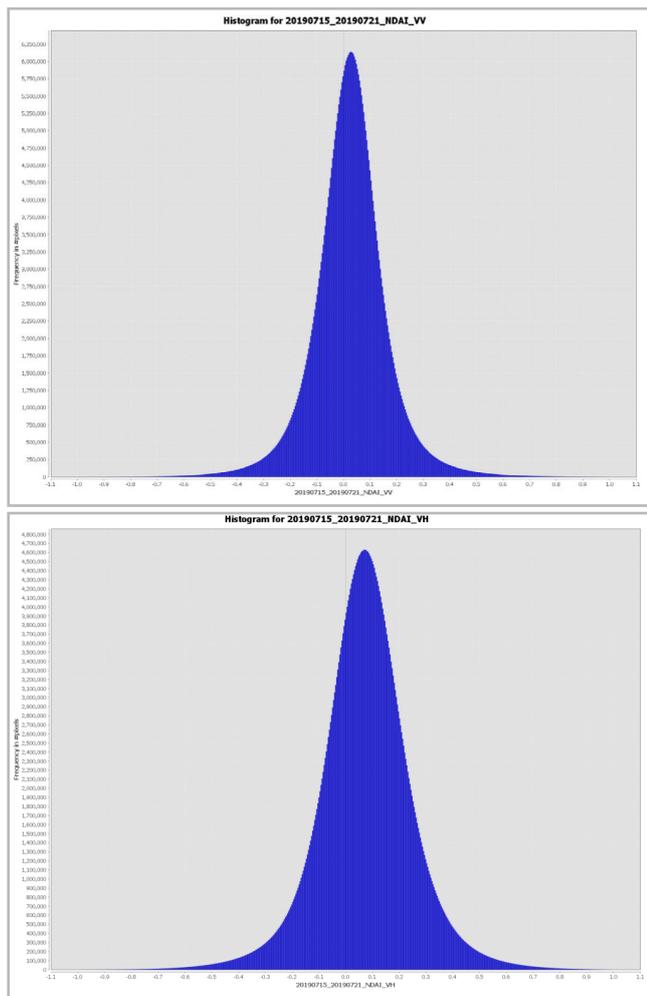
The site called *Quinta do Estácio 10* is an archaeological context from the Roman period, located in Salvada e Quintos (Beja, Portugal). Archaeological trial trenching revealed a series of archaeological structures related to the transportation of water, as well as a concentration of archaeological materials, mostly ceramic building materials and pottery shards (Omniknos Arqueologia n.d).

Two Sentinel-1 images corresponding to the dates of the 15<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> of July 2019 were processed using the NDAI workflow. Histograms of NDAI results [figure 3] show that most values are equal or close to 0, indicating good quality of both input images for each polarization. The results show evident patches in the field that encloses the archaeological site and also in the field immediately to the South [figure 4]. There is the possibility that some of these spots are present due to the buildings that exist adjacent to the paths. A person was dispatched to the location in order to confirm if these results

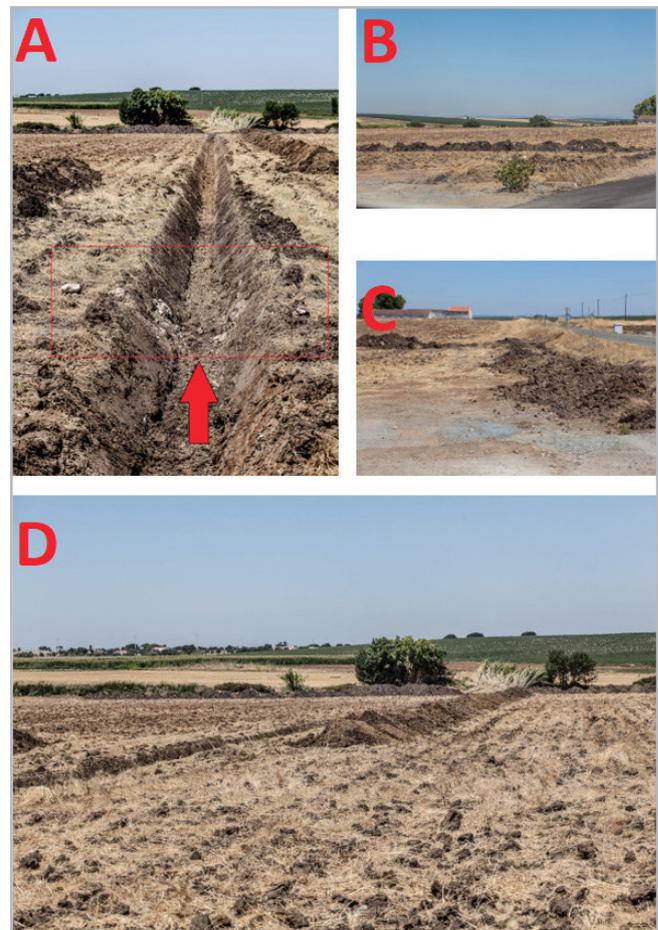


**Figure 4.-** Results of radar signal processing for *Quinta do Estácio 10*, using NDAI change detection. Amplitude gain is shown as red, amplitude loss as blue. Archaeological context is within the circle.

represented changes on the surface of the field where the archaeological site was located. Inspection of the site revealed intense soil mobilization including the opening of deep trenches in both perpendicular and parallel orientation in relation to the nearby river [figure 5]. Harrowing had also occurred on the site but its effects were superficial. The surplus soil that resulted from these activities was deposited in the field. Assessment of the location revealed damage to at least one of the foundations of the roman aqueduct.



**Figure 3.-** NDAI Histogram for both polarizations (VV & VH) representing frequency of pixel values corresponding to the date of 15 to 21 July 2019. They peak close to the value of 0 (no change in amplitude).



**Figure 5.-** Ground observation of the site of *Quinta do Estácio 10*. Photo A: Damage to archaeological features. Photo B, C, D: Different perspectives of the damage to the site

## Conclusión

This work highlights one of the main advantages of satellite data applied to Archaeology, which is the ability to perform large-scale territorial analysis and monitor destructive events on thousands of sites on a weekly basis, with a potentially global application. The results of these tests have validated the possibility of using satellite remote sensing data as a tool for monitoring archaeological sites. We believe, however, that it is necessary to use this approach in conjunction with local authorities for inspection and validation of results, in order to eliminate false positives and respond swiftly to destructive events before they affect heritage sites or before further damage is done. As such we recognize this approach as a tool to be used in articulation with additional means, in a wider comprehensive strategy for heritage protection. The main advantage of this methodology is the low cost for this type of service due to the free availability of Sentinel data, low operational costs associated with remote sensing processing, and the ability to use completely open source software for data processing. This is in contrast to traditional means of surveillance, with high logistical costs, derived from the extensive use of technicians on the ground when covering very large areas. The implementation of this technique will require cooperation with the entities responsible for archaeological conservation at a national or regional level, in order to have access to the databases containing the geographical positions of identified heritage sites and to ensure a swift and appropriate response to the identified occurrences. Future developments can include the incorporation of machine learning and automated cross-correlation of information from Sentinel-1 such as phase coherence, and Sentinel-2 such as NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) or NDWI (Normalized Difference Water Index) in order to discard false positives and identify the nature of the changes that are visible with this type of approach.

## References

- ADAMS, R. E. W., BROWN, W. E., CULBERT, T. P. (1981). "Radar mapping, archaeology, and ancient Maya land use.", *Science*, 213(4515): 1457-1468.
- CARLSON, T. N., RIPLEY, D. A. (1997). "On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index", *Remote sensing of Environment*, 62(3): 241-252.
- CHEN, F., YOU, J., TANG, P., ZHOU, W., MASINI, N., LASAPONARA, R. (2018). "Unique performance of spaceborne SAR remote sensing in cultural heritage applications: Overviews and perspectives", *Archaeological Prospection*, 25(1): 71-79. <https://doi.org/10.1002/arp.1591>
- CONYERS, L. B. (2006). "Ground-penetrating Radar for Archaeological Mapping", In: Wiseman J., El-Baz F. (eds) *Remote Sensing in Archaeology. Interdisciplinary Contributions to Archaeology*. Springer, New York, NY
- DIAS, C. (2017). "Villa romana de Pisões é agora a luxuosa casa das ervas daninhas", *Público*, 17 July. <https://www.publico.pt/2017/07/17/local/noticia/villa-romana-de-pisoos-foi-descoberta-ha-50-anos-e-esta-coberta-de-ervas-daninhas-1779095>. [accessed: 25/10/2019].
- DUNKER, R., VANCE, S., HOOKS, C., DARMODY, R. (1994). "Use of Cone Penetrometer Data to Evaluate Prime Farmland Rooting Media", *Reclamation and Revegetation*, 3: 38-47. <http://doi.org/10.21000/JASMR94030038>
- FILIPPONI, F. (2019). "Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow", *Proceedings*, 18(1): 11. <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06201>
- LASAPONARA, R., MASINI, N. (2005). "QuickBird-based analysis for the spatial characterization of archaeological sites: Case study of the Monte Serico medieval village", *Geophysical Research Letters*, 32(12).
- LEMOS, N. (2018). "Zona envolvente à villa romana de Pisões terá sido fortemente afetada pela plantação de um olival intensivo", *Diário do Alentejo*, 29 January.
- LUSA (2019). "Culturas intensivas no Alqueva geram receios que agricultores dizem infundados", *RTPNotícias*, 13 July. <https://www.rtp.pt/noticias/economia/culturas-intensivas-no-alqueva-geram-receios-que-agricultores-dizem-infundados-n1160161>. [accessed: 25/10/2019].
- MORGADO, M. (2019). "Olival no Alentejo: a revolução agrária 4.0 à volta do Alqueva", *Sapo*, 24 February. <https://24.sapo.pt/economia/artigos/olival-no-alentejo-a-reforma-agraria-4-0-a-volta-do-alqueva>. [accessed: 25/10/2019].
- OBATA, K., MIURA, T., YOSHIOKA, H. (2012). "Comparison of scaling effects in fraction of vegetation cover between algorithms based on linear mixture model using VI", *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: 1002-1005*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6350821>
- OBATA, K., MIURA, T., YOSHIOKA, H. (2012). "Analysis of the Scaling Effects in the Area-Averaged Fraction of Vegetation Cover Retrieved Using an NDVI-Isoline-Based Linear Mixture Model", *Remote Sens*, 4: 2156-2180. <https://doi.org/10.3390/rs4072156>
- OMNIKOS ARQUEOLOGIA (n.d.). "Execução do Circuito Hidráulico Baleizão - Quintos e respetivos Blocos de Rega - Quinta do Estácio 10", Field Report. <https://biblioteca.edia.pt/BiblioNET/Upload/PDFS/M03406.pdf> [accessed: 25/10/2019]
- PARCAK, S. H. (2009). *Satellite remote sensing for archaeology*. London & New York: Routledge.
- PATEL, V. M., EASLEY, G. R., HEALY JR, D. M., CHELLAPPA, R. (2010). "Compressed synthetic aperture radar", *IEEE Journal of selected topics in signal processing*, 4(2): 244-254. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2009.2039181>

PEREIRA, C., SOARES, A.M.M., SOARES, R.M. (2013). "Os mausoléus da villa romana de Pisões: a morte no mundo rural romano", *Revista Portuguesa de Arqueologia*, 16: 303-321.

SERRA, M. (2008). "Novos dados para o conhecimento da Villa romana de Pisões (Beja)", *Vipasca*, 2: 503-507.

TAPETE, D., CIGNA, F., DONOGHUE, D.N. AND PHILIP, G. (2015). "Mapping changes and damages in areas of conflict: from archive C-band SAR data to new HR X-band imagery, towards the Sentinels", En *Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop*, Frascati, Italy, 23-27 March 2015, Ouwehand L., Ed., ESA Publication SP-731. <https://doi.org/10.5270/Fringe2015.pp149>

ZHANG, X., G. YAN, Q. LI, Z-L. LI, H. WAN, AND Z. GUO (2006). "Evaluating the fraction of vegetation cover based on NDVI spatial scale correction model.", *International Journal of Remote Sensing*, 27(24): 5359-5372. <https://doi.org/10.1080/01431160600658107>



**Ricardo Cabral**  
[ricardo@theia.pt](mailto:ricardo@theia.pt)  
 THEIA; CEAACP Coimbra, Portugal

Ricardo Cabral holds a Licentiate Degree in Archaeology and History and is currently a PhD Candidate in Archaeology at the University of Coimbra. Between 2010 and 2019 he was an Invited Assistant Professor at the Faculty of Letters of the University of Coimbra. He is currently a researcher at the Centre of Studies in Archaeology, Arts and Heritage Sciences of the University of Coimbra, conducting research in Near Eastern Archaeology, where he coordinates the Kani Shaie Archaeological Project (Iraq) and participates in the Iraq Emergency Heritage Management Training Scheme, a British Museum project. He is also co-founder and managing-partner of the company THEIA, which works on the application of digital and technological solution to Archaeology and Cultural Heritage.

## Author/s



**Steffan Clent Ap Davies**  
[steffan@theia.pt](mailto:steffan@theia.pt)  
 THEIA; CEAACP Coimbra, Portugal

Steffan Davies holds a Licentiate degree in Archaeology and a Master's degree in Archaeology and Territory, with a specialization in Archaeogeography, both by the University of Coimbra (Portugal). He is a researcher in the Centre of Studies in Archaeology, Arts and Heritage Sciences of the University of Coimbra (CEAACP), and is currently working at the Portuguese company THEIA in Research and Development, in fields such as Satellite Remote Sensing, Computer Programming, Virtual Reality and Digital Heritage.



**Martino Correia**  
[martino@theia.pt](mailto:martino@theia.pt)  
 THEIA; CEAACP Coimbra, Portugal

Martino Correia has graduate in "Archaeology and History" by the University of Coimbra (Portugal), with a Master's degree in "Archaeology and Territory" by the same University and a post-graduation in "European Heritage, Digital Media and the Information Society" carried out at the Universities of Coimbra and Salento (Lecce, Italy). He is a researcher in the Centre of Studies in Archaeology, Arts and Heritage Sciences of the University of Coimbra and was an Invited Assistant Professor at the Higher School of Education of Coimbra. He is also co-founder and managing-partner of the company THEIA, which works on the application of digital and technological solution to Archaeology and Cultural Heritage.



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.755>

# The performance of shelters for the conservation of archaeological sites in dry and warm climates: the case of Complutum

Cristina Cabello Briones

**Abstract:** Excavated archaeological sites are frequently exposed to damaging environmental conditions, which could lead to rapid decay especially for vulnerable heritage such as mosaics. One of the most common solutions is the construction of shelters; however, some may not behave as expected, either because they do not protect adequately or induce decay. An environmental monitoring programme was undertaken inside and outside the two types of shelters at the Roman archaeological site of Complutum (Alcala de Henares, Spain) from May to September in 2018 and 2019. Hourly temperature and relative humidity readings collected by data loggers, together with rainfall data from a local meteorological station, have been comparatively assessed to better understand the consequences of sheltering in dry and warm areas. The results indicate that both shelters are avoiding further decay by keeping a more stable environment in relation to outside, although the more enclosed structure would be the most suitable one.

**Keywords:** Preventive conservation, built heritage, archaeological remains, covers, environmental monitoring, temperature, relative humidity

## El comportamiento de las cubiertas para la conservación de yacimientos arqueológicos en climas secos y cálidos: el caso de Complutum

**Resumen:** Los yacimientos arqueológicos excavados se exponen frecuentemente a condiciones ambientales dañinas, que pueden llevar a un rápido deterioro especialmente en el patrimonio vulnerable como los mosaicos. Una de las soluciones más comunes es la construcción de cubiertas; sin embargo, algunas pueden no comportarse como se esperaba, bien porque no protegen adecuadamente bien provocan daño. Se ha realizado un programa de monitoreo ambiental dentro y fuera de los dos tipos de cubiertas del yacimiento arqueológico romano de Complutum (Alcalá de Henares, España) desde Mayo a Septiembre del 2018 y 2019. Las lecturas de temperatura y humedad relativa recogidas cada hora por data loggers, junto con los datos de precipitación de una estación meteorológica local, se han evaluado comparativamente para entender mejor las consecuencias de cubrir en áreas secas y cálidas. Los resultados indican que ambas cubiertas están evitando futuro deterioro al mantener un ambiente más estable en relación con el exterior, aunque la estructura más cerrada sería la más adecuada.

**Palabras clave:** Conservación preventiva, patrimonio construido, restos arqueológicos, cubiertas, monitoreo ambiental, temperatura, humedad relativa

### Introduction

Archaeological excavations imply uncovering the remains; therefore, affect the conservation of both delicate features and archaeological sections (Barrio Martín 2012). Shelters have been largely used as preservation strategies for exposed archaeological sites because, as opposed to other systems such as backfilling, provide with protection and the possibility of still visiting the site during ongoing excavations (Roby 2006). Their main purpose is to act as barriers (Doehne and Price 2010), thus avoiding the rain and reducing, consequently, the

moisture content in porous inorganic materials, which primarily composed the archaeological remains that are left *in situ*. Shelters can also stabilize the environmental conditions for long-term conservation; however, if not properly built, they may not provide protection or even induce decay on the remains by, for example, modifying microclimatic parameters and favouring salt crystallization or biocolonisation (Aslan 1997; Cabello Briones 2018). In those situations, improvements should be made, and the possibility of dismantling the shelters considered (Curteis 2018). The evaluation of existing covers must take place regularly to corroborate their protective function and the

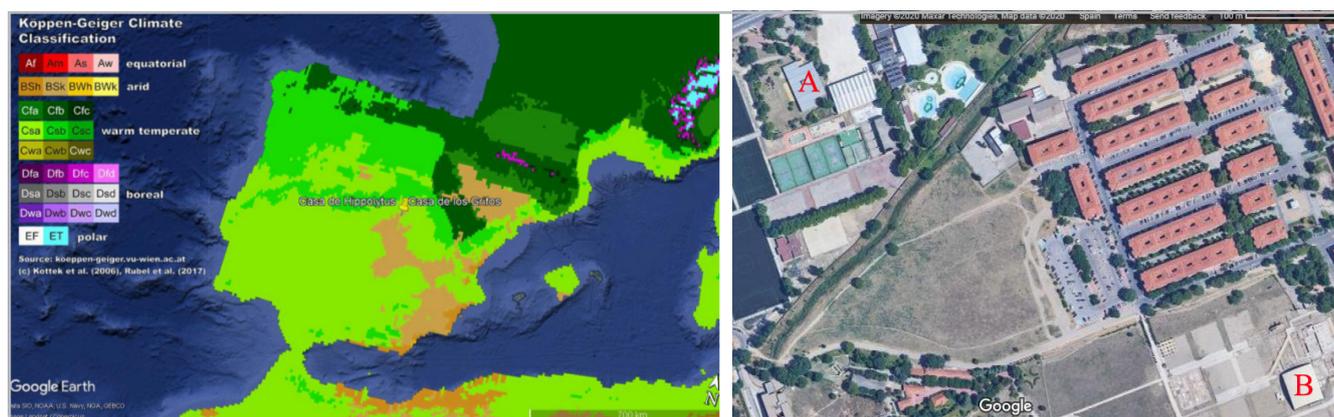
presentation of results from individual cases, which in general is still very limited, offers significant contributions to current discussions, such as the suitability of the shelter design (Pesaresi and Stewart 2018).

Complutum (40° 28' 26.146" N, 3° 23' 16.49" W) is a Roman archaeological site part of the historic precinct of the modern city of *Alcalá de Henares* (Comunidad de Madrid, Spain) [figure 1]. The site, which main construction materials are rammed earth, masonry and brick, is decorated with mural paintings and mosaics. Complutum was declared of cultural interest under the Spanish legislation in 1992, which implies the maximum protection, and included in the UNESCO World Heritage list in 1999. *Alcalá de Henares*, located in the centre of the Iberian Peninsula, is defined as a cold semi-arid climate (BSk) according to the Köppen-Geiger classification. This area is characterised by relatively wet winters, but mainly hot and dry summers. This is important as the climatic location of a site conditions the decay mechanisms (Cabello Briones and Viles 2017).

Currently, there are two areas of the site covered with shelters: the House of Hippolytus and the House of the

Griffins [figure 2]. A summary of the construction details is presented in table 1. The House of Hippolytus is a more enclosed structure while the other one, built later in time, is in line with the worldwide tendency of building shelters without lateral claddings (Cabello Briones 2016). A major difference between enclosed and open shelters is that the second ones are usually lighter structures that avoid deep foundations and the subsequent possibility of decay for the unexcavated archaeological remains.

At the start of the study, the conservation state of the ruins inside the shelters at Complutum was identified as stable by visual surveying [figure 3]. This could be related to the regular maintenance carried out by the Archaeological Service in charge of the site since the construction of the shelters. This includes, among other actions, a monthly cleaning of surfaces, and the application of biocides (octyl- isotiazol and aluminium salts) and consolidates (ethyl silicate) at least once per year (Argea Consultores 2017). Conversely, there are relevant signs of long-term and recent decay outside the shelters, mainly in the form of physical and biological deterioration, which indicate that these types of weathering would also affect the covered areas if left exposed.



**Figure 1.-** Geographical location of the site with the Köppen climate classification (left), and an aerial view of the House of Hippolytus (A) and the House of the Griffins (B) (right)



**Figure 2.-** The shelters at the House of Hippolytus (left) and the House of the Griffins (right) viewed from outside (Photos: C. Cabello Briones)

**Table 1.-** Comparative between the House of Hippolytus and the House of the Griffins in terms of construction characteristics

	<i>House of Hippolytus</i>	<i>House of the Griffins</i>
<b>Year of construction</b>	1999	2011
<b>Covering area</b>	1318 m2 approx.	1300 m2 approx.
<b>Type of shelter</b>	Partially enclosed shelter	Semi open shelter
<b>Description</b>	Enclosure with strip footings and load bearing walls	Dome-shape steel structure with reduced lateral cladding
<b>Construction materials</b>	Cover: galvanized steel sheets in the outer part and hydrophobic agglomerate wooden boards in the inner part. Walls: galvanised expanded metal meshes in the upper part and bricks in the lower part.	Cover: sandwich system of pre-coated steel sheets and 90 mm fiberglass panels. Lateral claddings (hanging from the structure without touching the floor): galvanised expanded metal meshes in the upper part and 1 mm galvanized corrugated sheets.
<b>Architects</b>	Juan Pablo Rodríguez Frade	Pablo Latorre González-Moro and Leandro Cámara Muñoz
<b>References</b>	Rodríguez Frade 2001	Sánchez Montes & Rascón Marqués 2012



**Figure 3.-** View from inside of the House of Hippolytus (left) and the House of the Griffins (middle), and a detail of the remains located at the House of Mars (right), exposed without covering (Photos: C. Cabello Briones)

It is generally agreed that visual surveys are necessary in order to have an initial understanding of the possible problems affecting a site but the complexity related to the great variety of materials, restoration treatments and condition states of the remains makes them unreliable for an objective comparison. Therefore, in-depth evaluation of the shelters should also imply a monitoring programme over a representative period of time (Pesaresi and Stewart 2018).

Most of the environmental assessments on shelters have studied temperature and relative humidity (RH) (Demas 2013). These variables are involved in wetting and drying events, salt crystallization, biological attack, and hygric and thermal expansion and contraction of building materials and structures (Torraca 2009), which are the mechanisms highly responsible for the decay at exposed archaeological sites (Curteis 2018).

A temperature and RH monitoring, together with a study on rainfall, is especially useful for dry and warm climates, characterised by intense solar radiation, which in the case of central Spain can reach a mean daily of 16MJ/m<sup>2</sup>, and sometimes short but intense rain spells (De Castro et al. 2005). Building materials under solar radiation absorb energy during the day, which result in expansion, while at night, contract and release infrared radiation. Thermal cycles, which include both diurnal and seasonal, cause stresses due to the repetitive changes of dimensions, especially in materials with anisotropic thermal behaviours or with different thermal expansion coefficients (Torraca 2009). In addition, high surface temperatures result in a faster drying, which reduces the risk for biocolonisation but favours the crystallization of salts already present in the ruins. Therefore, frequent wet/dry cycling lead to differential stresses, which could induce cracking, detachment or flaking (Doehne and Price 2010).

An environmental assessment primarily based on temperature and relative humidity readings outside and inside the shelters at Complutum has been undertaken during two consecutive years. The data from the warmest months have been comparatively assessed to determine if the shelters are providing adequate conditions for the preservation of the archaeological remains. The results will help to better understand the consequences of sheltering in dry and warm areas, and establish which type of shelter could be the most suitable option in that case.

## Research methods

This study presents the results of an environmental monitoring programme of four months per year (from 17<sup>th</sup> May to 17<sup>th</sup> September) in 2018 and 2019. The research was undertaken using small data loggers (Lascar Electronics,

accuracy= 0.55 °C, 2.25%RH), synchronised to provide with hourly air temperature and RH values, and based on the method used by Cabello Briones (2017). Inside the two shelters, the loggers were placed just under the centre of the cover to obtain representative data of the most protected areas. They were deposited on the top of site columns to avoid losing information by vandalism or perturbing the visitors of the site, which remained open during the monitoring time. Another logger was located outside the House of the Griffins also over a pillar, but in this case, this corresponds to a reconstructed vertical section of the site. For information about precipitation and climatic trends in the area, data was provided by a nearby meteorological station (Red de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid, CAM code 28005002).

Non-parametric Mann-Whitney-Wilcoxon tests were undertaken to compare daily means and standards deviations of temperature and RH. This allowed determining if there were statically significant differences among the studied locations.

## Results

### —Temperature

Alcalá de Henares is included in the cold semi-arid regime [figure 1], which implies that annual mean temperatures are below 18 °C. In 2018, the mean temperature was 14.63 °C, slightly lower than the next year, 15.22 °C. However, temperatures from just the monitoring period [table 2] keep this site closer to the Mediterranean climate (Csa classification), characterised by extremely dry summers and mean temperatures in the hottest months above 22 °C (Agencia Estatal de Meteorología 2011).

The hottest months corresponded to August 2018 (max T outside =41.50 °C) and July 2019 (max T outside =43

**Table 2.-** Mean temperatures and standard deviations (°C) outside, and inside the shelters at the House of the Griffins and Hippolytus from May to September 2018 and 2019

	2018			2019		
	<i>House of the Griffins</i>	<i>Outside</i>	<i>House of Hippolytus</i>	<i>House of the Griffins</i>	<i>Outside</i>	<i>House of Hippolytus</i>
<i>May</i>	18.39 (3.24)	18.73 (4.16)	17.96 (2.79)	19.36 (4.80)	19.94 (4.82)	19.04 (4.23)
<i>June</i>	22.49 (5.76)	22.83 (6.31)	22.01 (5.41)	24.55 (5.72)	25.22 (7.66)	24.28 (5.26)
<i>July</i>	26.53 (4.21)	26.65 (4.47)	25.98 (3.71)	28.59 (4.48)	29.60 (4.96)	28.32 (3.95)
<i>August</i>	27.81 (4.54)	28.70 (4.93)	27.18 (3.98)	26.56 (4.61)	27.46 (4.61)	26.28 (4.11)
<i>September</i>	24.48 (4.00)	26.57 (6.12)	23.72 (3.21)	25.26 (4.27)	27.54 (5.01)	24.82 (3.50)

°C). The number of times the outer temperature exceed 35 °C during those months was 65 in August (8.74% of total readings for this month) and 119 in July (15.19%). However, high temperatures were also very frequently recorded inside the House of the Griffins: 43 for August 2018 (5.78%) and 55 for July 2019 (7.39%). While the number was considerably reduced inside the House of Hippolytus: 21 (2.82%) and 28 (3.76%) for those months.

Statistical tests on daily mean temperatures certified that temperature outside was significantly warmer than inside both shelters in 2018 and 2019. On the other hand, higher mean temperatures were recorded systematically inside the House of the Griffins in comparison with the other cover (U=7750, p-value < 2.2e<sup>-16</sup> for 2018, and U=5379.5, p-value = 8.2e<sup>-14</sup> for 2019).

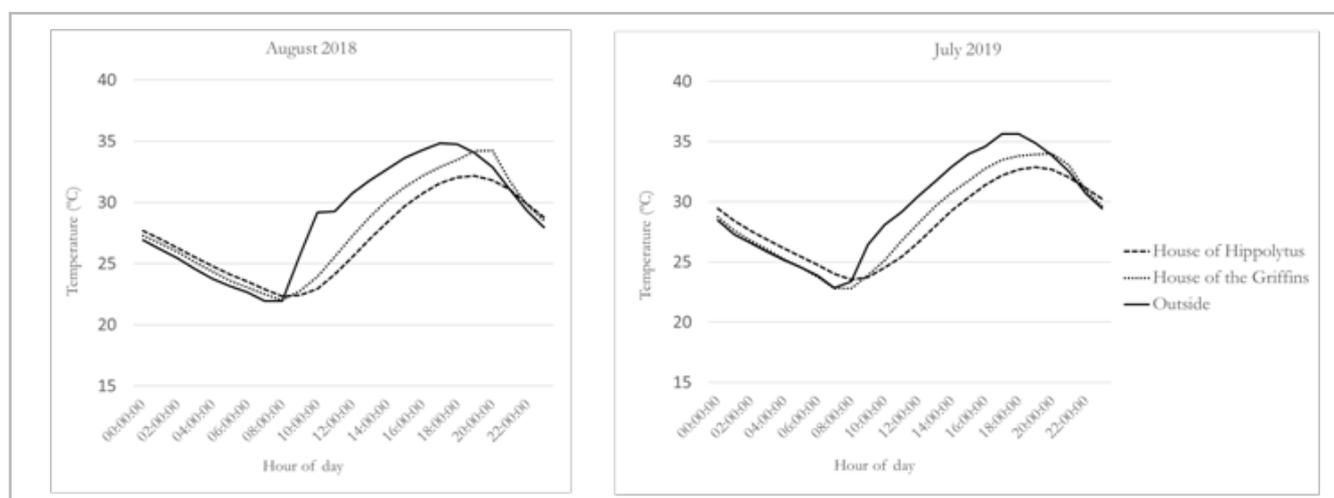
In addition to extreme temperature values, another key element in the decay of archaeological sites is the extent of the diurnal differences between maximum and minimum temperatures [table 3], which are associated with solar

heating and night cooling events. The greatest diurnal variances were recorded outside, but if both shelters are compared, the data obtained from the House of Hippolytus indicate that this shelter is performing more efficiently, minimising the temperature range.

These differences are clearly seen in the representation of the hourly means of temperature in August 2018 and July 2019, which were the warmest months of the monitoring period [figure 4]. These graphs also show when the minimum and maximum temperatures are reached. From sunrise (at 7:25 in average in August and 6:57 in July), temperatures increase steadily mainly outside of the shelters. On the contrary, the covers avoid direct sunlight on the ruins and keep the inner temperatures lower in relation to outside. However, after sunset (at around 21:42 in August and 21:10 in July), temperatures inside both shelters are slightly higher than outside, revealing a reduced greenhouse effect. The shelters probably limit the transmission to the sky of the IR radiation emitted to the ruins by night, and cause an increase in the temperature inside (Torraca 2009).

**Table 3.-** Monthly means and standard deviations (°C) of the daily temperature differences (Tmax-Tmin) outside, and inside the shelters at the House of the Griffins and Hippolytus from May to September 2018 and 2019

	2018			2019		
	House of the Griffins	Outside	House of Hippolytus	House of the Griffins	Outside	House of Hippolytus
May	8.43 (2.33)	10.87 (2.41)	6.77 (1.87)	11.57 (3.71)	11.60 (3.22)	9.50 (2.90)
June	10.22 (2.99)	11.55 (2.35)	8.37 (2.51)	11.60 (2.77)	14.43 (7.89)	9.42 (1.87)
July	12.08 (1.94)	12.35 (1.76)	9.92 (1.54)	12.24 (2.41)	15.71 (6.54)	9.98 (2.22)
August	12.98 (1.80)	13.47 (2.00)	10.00 (1.47)	13.11 (3.07)	13.10 (3.35)	10.21 (1.86)
September	12.00 (2.73)	15.68 (5.91)	7.62 (1.53)	12.75 (3.66)	15.63 (3.71)	9.63 (1.93)



**Figure 4.-** Hourly means of temperature outside, and inside the shelters at the House of the Griffins and Hippolytus in August 2018 and July 2019, which corresponds to the hottest months of the monitoring programme

The thermal lag between the outdoor and indoor environment during this period was of around 3 hours if maximum temperatures are compared. The temperature peak in August 2018 and July 2019 was recorded at around 17:00 outside and 20:00 inside the shelters [figure 4], without great difference between the covers in this aspect. Together with the expected thermal inertia of the architectural remains, which time-shift and flatten out temperature fluctuations, there is a surprising increase in temperature inside the House of the Griffins around 20:00, which is associated with sunlight coming in from the west side and reaching the ruins under the central part of the shelter. Therefore, the more open structure of this shelter increases the risk of decay for the mural paintings located in that area, vulnerable to sudden heating and ultraviolet radiation (Camuffo 2019).

Additionally, the data concerning the House of the Griffins complement the one obtained by Martínez Garrido et al. (2016) between December 2014 and July 2015. In that study, it was re-corded a daily thermal lag of approximately 5 hours. More specifically, during the warmest months, the highest outdoor temperature was documented at 13:00 and the inner one at 19:00.

#### —Precipitation and Relative Humidity

The total rainfall in Alcalá de Henares from May 2018 to 2019 was 398.60 mm, which confirms that this is a region with a low precipitation rate. In addition, the 70% of the annual precipitation was collected in autumn and winter, so this area can be also classified by its dry summers (Agencia Estatal de Meteorología 2011). Specifically, between May and September 2018, it was recorded 134.50 mm, and 100.20 mm during the same period in 2019. The maximum values of daily rainfall, 17.80 mm and 32.20 mm respectively, were logged at the end of the summer (12<sup>th</sup> September 2018 and 15<sup>th</sup> September 2019).

During the second case, 21.4 l/m<sup>2</sup> were just collected in an hour (from 13:00 to 14:00) which indicates that around 20% of the total rainfall could concentrate in heavy events.

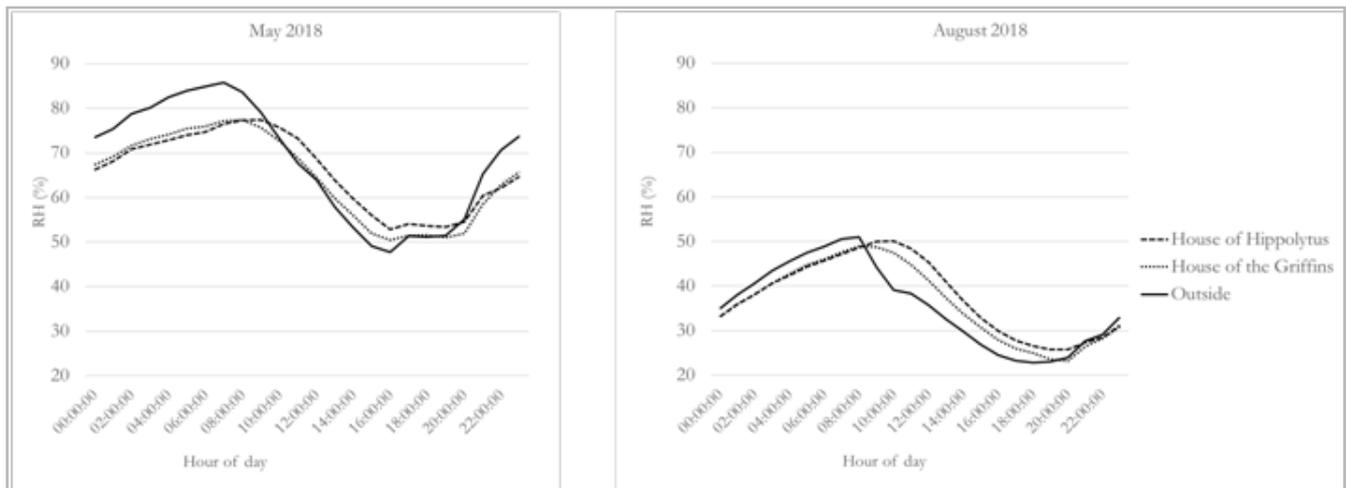
On the other hand, the mean RH in Alcalá de Henares was 46.16% in 2018, while 37.46% in the following year. Inside the shelters, RH values during the monitoring period were also low (below 65%), mainly in 2019 [table 4], following the annual trend.

Statistical tests on daily mean RH values showed that outside was significantly drier than inside both shelters, especially if compared with the House of Hippolytus ( $U= 1316.5$ ,  $p\text{-value} = 1.784e^{-10}$  for 2018, and  $U= 208$ ,  $p\text{-value} < 2.2e^{-16}$  for 2019). In addition, there were more variability on the RH data outside than inside the House of Hippolytus, which indicates that the shelter created a more stable environment in this respect. In the case of the House of the Griffins, this was only true for 2018, as there was no significant difference in relation to outside in 2019 ( $U= 3605$ ,  $p\text{-value} = 0.14$ ). If both shelters are compared, the House of the Griffins had higher RH fluctuations ( $U= 1149.5$ ,  $p\text{-value} = 1.08e^{-11}$  for 2018, and  $U= 512.5$ ,  $p\text{-value} = 2.2e^{-14}$  for 2019). Nevertheless, as Martínez-Garrido et al. (2016) sustain for the 2014-15 period, it seems for the range of RH variations that the shelter at the House of the Griffins also has a stabilising effect.

As expected for this type of climate, the RH outside drops during daytime because of the intense solar radiation. This effect is less pronounced inside the shelters although both followed the outside environment [figure 5]. Additionally, the maximum values were reached in May 2018 followed by September, so during those months there is a higher probability than RH crosses critical thresholds such as the 71% (at 20°C) for mirabilite hydration (Viles 2005), which is considered very damaging for stone monuments (Grossi and Esbert 1994).

**Table 4.-** Monthly means and standard deviations of daily RH values (%) outside, and inside the shelters at the House of the Griffins and Hippolytus from May to September 2018 and 2019

	2018			2019		
	House of the Griffins	Outside	House of Hippolytus	House of the Griffins	Outside	House of Hippolytus
May	63.34 (14.85)	66.40 (21.46)	64.56 (14.26)	39.55 (11.12)	37.34 (10.57)	39.94 (9.97)
June	51.76 (16.63)	52.14 (18.80)	52.61 (16.20)	32.96 (11.14)	31.76 (12.12)	33.13 (10.51)
July	36.17 (11.10)	36.31 (11.80)	36.94 (10.93)	31.67 (9.99)	29.98 (9.79)	32.52 (9.20)
August	36.42 (11.62)	35.63 (12.84)	37.66 (11.84)	36.66 (14.62)	35.38 (14.10)	38.09 (13.95)
September	49.27 (11.62)	46.65 (16.69)	51.09 (12.05)	42.72 (9.83)	38.24 (9.57)	44.16 (9.16)



**Figure 5.-** Hourly means of RH outside, and inside the shelters at the House of the Griffins and Hippolytus in May and August 2018, which corresponds to the wettest and driest months of the monitoring programme

## Discussion

The data from May to September in 2018 and 2019 indicate that outside temperatures represent the most extreme values during days and nights, and shelters were found to have lower maximum temperatures and higher minimum ones in comparison to the outer environment. In addition, these conditions imply a contrasted thermal regime based on large temperature swings between day and night. However, the differences between maximum and minimum temperatures inside the sheltered areas were lower than outside, although relatively high in the House of the Griffins. Nevertheless, a diurnal temperature variance of around 12°C is probably negligible for thermal stress if compared with other studies on stone heritage (Al-Omari *et al.* 2014). Even if surface temperatures are considered equivalent to air temperatures with an approximate increase in 20°C (Bonazza *et al.* 2009), isolation weathering has only been found relevant for thermal cycles over 40-50°C (Lazzarini and Tabasso 1986; Viles 2005; Brimblecombe 2014) and this threshold is far from the mean temperature variations found at any of the positions in Complutum.

The climatic conditions of the area, characterised by a low precipitation rate, contribute to the dry environment found both outside and inside the shelters. A low RH (below 65% as a generally accepted limit) is beneficial for the conservation of the remains as it avoids biocolonization by many species of fungi, moss or algae (Caneva *et al.* 1991). The environment inside the House of Hippolytus was slightly more humid, as previously showed by Cabello Briones and Barrio Martín (2019), but still below that limit in average.

High temperatures and dry environments favour physical deterioration, specially salt weathering, which is more intense in locations with wide diurnal temperature and RH variations (Gutiérrez Elorza 2005). In this sense, the impact of decay is reduced inside the shelters. However,

the regular restoration and maintenance of the site makes it difficult to determine the exact decay mechanism in sheltered areas. The environmental data points to different patterns if compared with exposed conditions. Shorter drying periods outside due to higher temperatures and wide RH ranges could lead to salt efflorescences on the surface while salts may accumulate inside the shelters due to slower evaporation time (Dohene and Price 2010). Although a drier environment means that it is unlikely that critical salt crystallisation thresholds are reached, a further study in this matter, taking into account specific salt mixtures, is recommended.

Therefore, the results show that the environmental conditions inside both shelters mirrored the daily cycles recorded outside but the covers were able to minimise the temperature effects on the ruins reducing the peaks and subsequently the daily range. This has been additionally seen in the study of the House of the Griffins undertaken by Martínez Garrido *et al.* (2016). The explanation may well be that shelters act as a barrier blocking the solar radiation and therefore reducing heating on the remains. This is a benefit also seen in other cases (Cabello Briones, 2016) and represent a key element for warm climates with intense sun and low humidity, making this preventive conservation solution highly suitable for Mediterranean countries.

The two types of shelters built in Complutum represent different approaches towards the conservation of the Roman archaeological site. The cover at House of the Griffins is a partially open shelter while at the House of Hippolytus can be described as a partially enclosed one. If both shelters are compared, the conditions inside the House of the Griffins followed more closely the outer conditions. The more open structure and the insufficient roof insulation of this shelter could be the reason. However, the higher mean temperatures and the diurnal temperature ranges are not enough to consider an imminent damage for the remains. However, isolated temperature peaks from sunlight

coming through the sides, as it happened at certain times of the day at the House of the Griffins, support the idea that an open shelter without proper lateral cladding may be a less effective solution for this climate. The deficiencies of this shelter can be related to the fact that it was originally designed as provisional.

## Conclusion

The results indicate that outside the shelters there were higher temperatures, more frequent temperature and RH fluctuations, and greater diurnal temperature ranges. These conditions are probably the responsible of the physical decay observed in the uncovered ruins and, therefore, the archaeological remains at Complutum would be in worst state of conservation if the shelters had not been built. Therefore, both shelters are avoiding further decay by keeping a more stable environment in relation to outside, although, in sight of the results, the cover at the House of Hippolytus would be the most suitable design.

Warm and dry areas are present in around 40% of the Spanish territory (Agencia Estatal de Meteorología 2011) and other Mediterranean countries with extremely valuable archaeological heritage such as Italy and Tunisia. A partially enclosed shelter with appropriate roof insolation and without restriction of air circulation could be the key for improving shelters in those locations as long as it is able to reduce temperature and RH fluctuations and avoid temperature extremes.

## Acknowledgment

The author would like to thank Dr. Joaquín Barrio, Director of the Service for Conservation, Restoration and Scientific Studies of Archaeological Heritage (SECYR-UAM) for his support, and Dr. Sebastián Rascón, Municipal Archaeologist of Alcalá de Henares and manager of Complutum for allowing the study at the Roman archaeological site.

## References

ARGE CONSULTORES. (2017). *Servicio de mantenimiento arqueológico y restauración preventiva del conjunto monumental de la ciudad romana de Complutum y otros espacios arqueológicos de Alcalá de Henares*. Project report. Alcalá de Henares: Servicio Municipal de Arqueología.

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA. (2011). *Atlas climático ibérico: temperatura del aire y precipitación (1971-2000)*, Madrid: Instituto Nacional de Meteorología.

AL-OMARI, A., BRUNETAUD, X., BECK, K., AL-MUKHTAR, M. (2014). "Effect of thermal stress, condensation and freezing-thawing action on the degradation of stones on the Castle of Chambord, France", *Environmental Earth Sciences*, 71: 3977-3989. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2782-4>

ASLAN, Z. (1997). "Protective Structures for the Conservation and Presentation of Archaeological Sites", *Journal of Conservation and Museum Studies*, 3: 16-20.

BARRIO MARTÍN, J. (2012). "Nuevos enfoques y criterios de restauración y conservación del Patrimonio Arqueológico". In *Ensayos en torno al patrimonio cultural y al desarrollo sostenible en Chile y España*, Blánquez, J. et al. (coords.). Madrid: Universidad Autónoma, 437-454.

BONAZZA, A., SABBIONI, C., MESSINA, P., GUARALDI, C., DE NUNTIIS, P. (2009). "Climate change impact: Mapping thermal stress on Carrara marble in Europe", *Science of the Total Environment*, 407: 4506-4512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.04.008>

BRIMBLECOMBE P. (2014). "Environment and Architectural Stone". In *Stone in Architecture*, Siegesmund, S. and Snethlage, R. (eds.). Berlin: Springer, 317-347. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-45155-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-45155-3_5)

CABELLO-BRIONES, C. (2016). *The Effects of Open Shelters on the Preservation of Limestone Remains at Archaeological Sites*, Doctoral Thesis, University of Oxford.

CABELLO-BRIONES, C. (2017). "How to evaluate shelters for archaeological sites: some recommendations based on the use of exposure trial", *Ge-conservación*, 11: 34-41. <https://doi.org/10.37558/gec.v11i0.442>

CABELLO-BRIONES, C., VILES, H.A. (2017). "Deterioration at Archaeological Sites in Different Climatic Locations", *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, 11-6: 816-828. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1300710>

CABELLO- BRIONES, C. (2018). "Descubrir para cubrir: ¿Son las cubiertas sobre yacimientos arqueológicos realmente beneficiosas?". In *¿Y después? Control y mantenimiento del Patrimonio Cultural, una opción sostenible; Proceedings of the 6th GEIIC Congress (Vitoria, 20-22 September 2018)*. Vitoria: Grupo Español del IIC, 386-390.

CABELLO-BRIONES, C., BARRIO MARTÍN, J. (2019). "Two shelters under review: Preliminary results from the Roman archaeological site of Complutum". In *International Conference of IV International Congress Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage (Seville, 26-30 March 2019)*. Leiden: Balkema/CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429345470-43>

CAMUFFO, D. (2019). *Microclimate for Cultural Heritage: Measurement, Risk Assessment, Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*. Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02191-2>

CANEVA, G., NUGARI, M.P., SALVADORI, O. (1991). *Biology in the Conservation of Works of Art*. Rome: ICCROM.

CURTEIS, T. (2018). "The use of environmental survey and monitoring in the design and evaluation of archaeological shelters". In *Protective shelters for archaeological sites; Proceedings of SYMPOSIUM (Herculaneum, 23-27 September 2013)*. Rome: The British School: 40-50.

DE CASTRO, M.J., MARTÍN-VIDE, M., BRUNET, M. (2005). *The climate of Spain: Past, present and scenarios for the 21st century*. Madrid: Publicaciones Ministerio de Medio Ambiente.

DEMAS, M. (2013). "Protective Shelters for Archaeological Sites". In *Mosaics In Situ. An Overview of Literature on Conservation of Mosaics In Situ*, Roby, T. and Demas, M. (eds.). Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

DOEHNE, E., PRICE, C. A. (2010). *Stone Conservation: An Overview of Current Research*, Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

GROSSI, C.M., ESBERT, R. M. (1994). "Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica", *Materiales de Construcción* 44 (235): 15-30.

GUTIÉRREZ ELORZA, M. (2005). "Weathering processes and resulting forms". In *Climatic Geomorphology*. Amsterdam: Elsevier, Chapter 11, 241-258.

MARTÍNEZ-GARRIDO, M.I., ERGENÇ, D., FORT, R. (2016): "Wireless monitoring to evaluate the effectiveness of roofing systems over archaeological sites", *Sensors and Actuators A*, 252: 120-133. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.10.038>

LAZZARINI, L., TABASSO LAURENZI, M. (1986). *Il restauro della pietra*, Padova: Cedam.

PESARESI, P., STEWART, J. (2018). "Shelters evaluation, monitoring and maintenance in the context of archaeological site management". In *Protective shelters for archaeological sites; Proceedings of SYMPOSIUM (Herculaneum, 23-27 September 2013)*. Rome: The British School: 58-82.

ROBY, T. (2006). "The Conservation of Mosaics in Situ: Preserving Context and Integrity". In *Stories in Stone. Conserving Mosaics of Roman Africa. Masterpieces from the National Museums of Tunisia*, Abed, A. B. (ed.). Los Angeles: The Getty Conservation Institute: 101-114.

RODRÍGUEZ FRADE, J. P., MADARIAGA MÉNDEZ, A., RASCÓN MARQUÉS, S. (2001). "Cubierta para las ruinas arqueológicas de la Casa de Hippolytus Complutum" [Online], In *Memoria para el Premio Calidad a la Estética, Dirección General de Arquitectura y Vivienda de la Comunidad de Madrid*. <http://www.madrid.org/bdccm/premios/PDF/LIBRO2001-2000/T3.pdf> (Accessed November 2018).

SÁNCHEZ MONTES, A.L., RASCÓN MARQUÉS, S. (2012). "Musealización del proceso de excavación de la Casa de los Grifos (Alcalá de Henares, Madrid). La Casa de los Grifos en el contexto de los yacimientos musealizados en España". In *VIII Jornadas de Patrimonio Arqueológico en la Comunidad de Madrid, (15-16 November 2011)*. Madrid: Comunidad de Madrid.

TORRACA, G. (2009). *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

VILES, H.A. (2005). "Microclimate and weathering in the central Namib Desert, Namibia", *Geomorphology*, 67-2: 189-209.

## Author/s



### Cristina Cabello Briones

[cristina.cabello@uam.es](mailto:cristina.cabello@uam.es)

Servicio de Conservación, Restauración y Estudios Científicos del Patrimonio Arqueológico, Universidad Autónoma de Madrid, Spain

Cristina Cabello Briones holds a PhD in Geography and the Environment from the University of Oxford. Her thesis is on the effects of open shelters on the preservation of limestone remains at archaeological sites. She also has an MA in Preventive Conservation from the University of Northumbria at Newcastle, a BA in Heritage Conservation from Escuela Superior de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Madrid, and a BA in Art History from Universidad Autónoma de Madrid.



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.756>

# Coberturas sostenibles en excavaciones arqueológicas. Metodología de aplicación al caso de mosaicos en el Conjunto Arqueológico de Itálica (Santiponce, Sevilla)

M. Ordóñez-Martín, J.C. Gómez de Cózar

**Resumen:** Es conocido que uno de los retos del trabajo arqueológico, es el de evitar o reducir los efectos del llamado “trauma de excavación”, donde la modificación acelerada de condiciones higrotérmicas, junto al efecto de la radiación solar, altera las condiciones de equilibrio del objeto soterrado. Esto lleva a la necesidad de cobertura de yacimientos arqueológicos durante la excavación, realizada frecuentemente mediante sistemas fijos o desmontables más propios del mundo productivo o industrial, de alta huella ecológica, y con efecto limitado, garantizando en su mayoría únicamente situaciones de sombra. No obstante, entendemos que es posible dar una solución global desde la arquitectura a los numerosos requerimientos del objeto excavado, tales como: necesidad de coberturas con mínimos apoyos, coberturas ligeras de gran adaptabilidad a la evolución de la excavación, limitación de costes, o necesidad de control de las condiciones higrotérmicas del espacio cubierto mediante procedimientos limpios que minimicen el impacto medioambiental.

**Palabras clave:** Sostenibilidad, conservación preventiva, coberturas activas, excavación arqueológica, diseño paramétrico, control higrotérmico

## Sustainable coverage in archaeological excavations. Methodology of application to the case of mosaics in the Archaeological Ensemble of Italica (Santiponce, Sevilla)

**Abstract:** One of the challenges of the archaeological work is to prevent or reduce the effects of the “excavation trauma”, where the accelerated changes of hygrothermal conditions together with the effect of solar radiation, alter the equilibrium conditions of the buried object. This leads to the need for a coverage during excavation of archaeological sites which is most often performed by fixed or removable systems that come from the productive or industrial world. They have high ecological footprint and limited impact, and ensure, mostly, only shady situations. But we understand that it is possible to provide a global solution from architecture to the numerous requirements of the excavated object, such as: covering systems with minimal supports, light covers highly adaptable to excavation changes, limited budget, or the control of hygrothermal conditions of the covered space through clean procedures that minimize environmental impact.

**Keywords:** Sustainability, preventive conservation, active coverages, archaeological excavation, parametric design, hygrothermal control

### Introducción

Es habitual entender la arquitectura de rápido montaje, como elemento accesorio en las intervenciones patrimoniales, en situaciones transitorias, como “medio auxiliar”, por su cualidad de ligereza o poca materialidad. Esta visión, hace que la convivencia de esta arquitectura con el bien patrimonial sea a través de una relación de superposición. Nosotros planteamos, sin embargo, que dichas propiedades de: ligereza, transformabilidad y rápida respuesta, permiten superar el concepto de elemento accesorio, y convertirse en elementos complementarios al

objeto a proteger, especialmente en situaciones transitorias, frecuentes en la actividad arqueológica. Esto puede lograrse gracias a sus cualidades de fácil desmontabilidad, reciclabilidad y escasa huella (Gómez de Cózar *et al.* 2019).

Este trabajo, pretende establecer una metodología de intervención asociada a la cobertura de yacimientos arqueológicos, dentro de la conservación preventiva de los mismos, entendiendo esta como la acción de “garantizar la conservación y el mantenimiento de los bienes culturales, aplicando todos los medios posibles externos a los mismos” (Frazzi 2002; 95-111).

En el caso del objeto excavado, la conservación preventiva supondrá las acciones necesarias para atenuar el "trauma de excavación" (Díaz Martínez 2005; 110-130). Los objetos enterrados, permanecen en un ambiente diferente para el que fueron creados, llegando con el paso del tiempo a una situación de equilibrio con las nuevas condiciones mecánicas, físicas, de exposición a luz, temperatura, humedad, microorganismos, presencia de oxígeno, etc. Al excavar, quedan expuestos a nuevas condiciones de abundancia de oxígeno, CO<sub>2</sub>, contaminantes del aire, acidez de lluvias, luz, oscilaciones de temperatura y humedad, etc. Estas nuevas condiciones, suponen un shock para el objeto excavado. Será pues objetivo de la intervención de conservación, evitar al máximo estos procesos de degradación, con medidas que disminuyan los desequilibrios entre el objeto y el nuevo ambiente. (Lacayo 2001;453-457).

La acción de conservación requiere conocer los factores de alteración del objeto excavado, que pueden ser de origen antrópico o ambientales (físicas, químicas o biológicas) (Giles; Bouzas; Pinto 2003).

Desde la arqueología, diversos autores coinciden en que la cobertura es la única actuación que permite la pervivencia de las estructuras y elementos que forman los yacimientos, (Díaz Martínez 2005;119), planteándose los requerimientos de sus coberturas, destacándose los siguientes:

- Intervenciones con mínimos apoyos y grandes luces.
- Solución compatible con la evolución de la excavación, realizadas por fases, con sistemas de tipo modular.
- Cubiertas parciales reversibles que supongan soluciones neutras de fácil desmontaje.
- Coberturas que no compitan con los restos a proteger, diferenciándose claramente los añadidos.
- Coberturas que garanticen una protección solar efectiva.

### Objetivos de la investigación.

Teniendo en cuenta que el objetivo primordial de la intervención patrimonial, ha sido la recuperación de la materialidad y los valores del objeto a proteger, a partir de un estudio basado en la metodología pluridisciplinar (Price 1984; Carrera 2018), esta investigación, plantea los siguientes objetivos para establecer una metodología de intervención que permita dar respuesta a los requerimientos de protección de los objetos arqueológicos en proceso de excavación, garantizando unas condiciones de conservación efectivas, evitando los fenómenos de "trauma de excavación" por procesos de: heladicidad, cambios bruscos de temperatura o humedad e incidencia de radiación solar directa, y que permitan abrir dicha intervención, a acciones de interpretación.

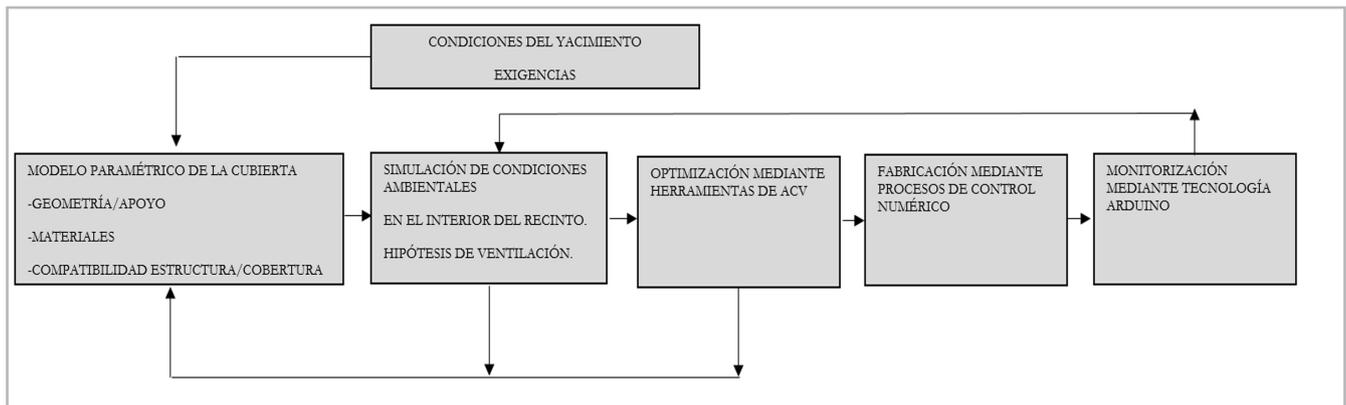
Desde el punto de vista específico, se plantean los siguientes objetivos:

- Uso de la arquitectura ligera y de rápido montaje como elemento no sólo de protección sino de puesta en valor del elemento patrimonial. Tal como se ha indicado anteriormente, los parámetros habituales que definen a este tipo de sistemas (Gómez de Cózar *et al.* 2017) son: capacidad de adaptación a condiciones de contorno variables, reversibilidad y mínimo impacto medioambiental, idóneos para cubrir yacimientos.
- Control ambiental del espacio cubierto durante su intervención, mediante procedimientos pasivos que no requieran energía o que ésta sea mínima y pueda obtenerse mediante fuentes renovables (Hoyano; Jiang 2009;1119-1127).
- Comprobación de la minimización del impacto medioambiental de la solución propuesta mediante herramientas de Análisis del Ciclo de Vida.

### Metodología propuesta.

Para alcanzar los objetivos que definen esta aportación, se ha diseñado la siguiente metodología original que, correctamente aplicada, permitirá la intervención en cualquier yacimiento arqueológico que necesite salvaguardar una superficie inferior en condiciones higrotérmicas adecuadas:

- Análisis del yacimiento a cubrir atendiendo a la singularidad de sus restos, naturaleza, posición, geometría, planificación de excavación, potencial de lugares del suelo que pueden ser utilizados como apoyos, condiciones de temperatura y humedad anuales y estudio visual de contorno que permita plantear la posibilidad de que la cobertura permanezca una vez terminadas las tareas de excavación y/o puesta en valor.
- Desarrollo de una cubierta ligera y de rápido montaje basada en un sistema espacial de dos capas sobre mínimos apoyos. A partir de las condiciones de contorno establecidas en el punto anterior, mediante software paramétrico, determinando la geometría específica de la cubierta. Las dos capas permiten generar una cámara de aire (controlada) que posibilitará el control higrotérmico del espacio protegido. Comprobación como estructura de la cubierta para optimizar su materialidad.
- Optimización de la cobertura a partir de software de simulación numérico original, que permite simular condiciones ambientales tanto del interior del recinto como de su suelo a partir del control de la ventilación de la cámara de la envolvente.
- Análisis del Ciclo de Vida de la solución planteada, conforme a las normas ISO 14040 (UNE-EN ISO 14040 2006), ISO 14044 (UNE-EN ISO 14044 2006) y EN 15978 (UNE-EN 15978 2012), atendiendo tanto a energía incorporada como a la operacional en categoría de GWP (calentamiento global) con objeto de validar la solución de diseño. En el caso de que el impacto sea excesivo, la solución deberá reconfigurarse (geometría,



**Gráfico 1.-** Esquema de la metodología propuesta.

materiales y ciclos de ventilación) para minimizar su impacto.

- Fabricación de la cubierta mediante procedimientos de control numérico, permitiendo un mínimo tiempo de fabricación.
- Control in situ, mediante monitorización basada en tecnología Arduino. De este modo, el modelo numérico de simulación de las condiciones ambientales del recinto podrá calibrarse en función de las condiciones reales del recinto.

Este artículo, desarrolla la metodología descrita atendiendo a los apartados que tienen que ver con la creación paramétrica del modelo, a su simulación numérica y a su comportamiento medioambiental mediante herramientas de ACV. [gráfico 1].

### Emplazamiento y estudio de condiciones de contorno

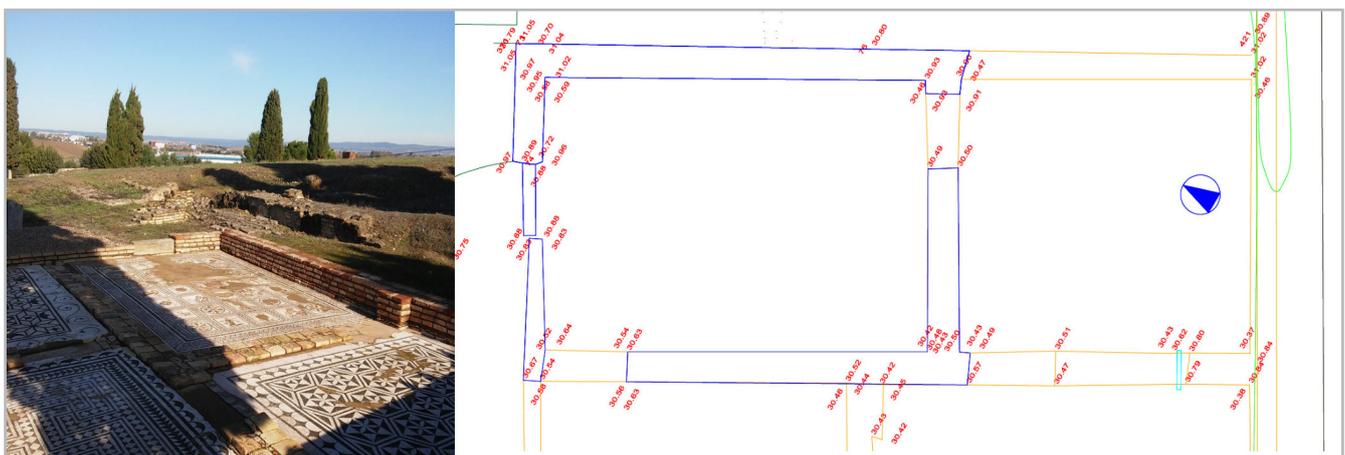
La aplicación de la metodología de estudio se aplicará como primer modelo, en un yacimiento arqueológico del sur de España, concretamente el Conjunto Arqueológico de Itálica, en la localidad de Santiponce, (Sevilla). Dicho estudio surge de las necesidades de protección de mosaicos en procesos de restauración acometidos por el

Conjunto. El Plan Director del yacimiento (año 2001) prevé en el apartado de mosaicos, ante la escasez de recursos, su cobertura mediante geotextiles y arena, entendiendo que dos de los agentes generadores de mayor deterioro son los cambios de humedad y temperatura. No obstante, aboga por la implantación de cubiertas físicas en altura previo estudio paisajístico.

Por otra parte, se plantea desde el Conjunto, la idoneidad de implantación de un sistema de cobertura experimental temporal, con el fin de contrastar resultados de monitorización con actuales coberturas efímeras instaladas, cubiertas convencionales a base de estructura metálica y materiales plásticos de sombra.

El emplazamiento elegido responde, además, al estudio de las condiciones de contorno (accesibilidad, estado de conservación, perfil climático, etc.), optándose por mosaico perteneciente a la conocida como “Casa de Neptuno”.

Se procederá al levantamiento planimétrico del objeto arqueológico y de su entorno, con el fin de diseñar un prototipo que responda a las condiciones de mínima huella en su instalación, así como de absoluta reversibilidad de la intervención [figura 1].



**Figura 1.-** Fotografía de emplazamiento y levantamiento planimétrico.

El mosaico elegido es adyacente a otros tres pertenecientes al mismo conjunto doméstico, y presenta una delimitación irregular en cuanto a la altura de arranques de muros que lo delimitan, fruto de intervenciones de consolidación realizadas. Esta situación, ligada a la topografía irregular de su entorno inmediato, condicionará la generación del modelo de cobertura.

### Generación paramétrica de modelo de cubierta, comprobación estructural y fabricación mediante tecnología CNC.

Una vez definidas las condiciones de contorno, se procede a la generación del modelo geométrico de la cobertura. Para dicha generación, se emplea software original de diseño paramétrico, que permite generar geometrías ilimitadas pudiendo variar en tiempo real los diversos parámetros que las condicionan.

La herramienta de diseño permite actuar sobre los parámetros definitorios del sistema, basado en la "Patente Florín" (Gómez de Cózar; García Diéguez 2001). [figura 2].

Estos son:

- Variación del número de módulos de la malla tridimensional, generando modelos de mayor o menor extensión, adaptándose a la geometría y tamaño del área a proteger.
- Modificación del canto de la malla, lo cual permitirá

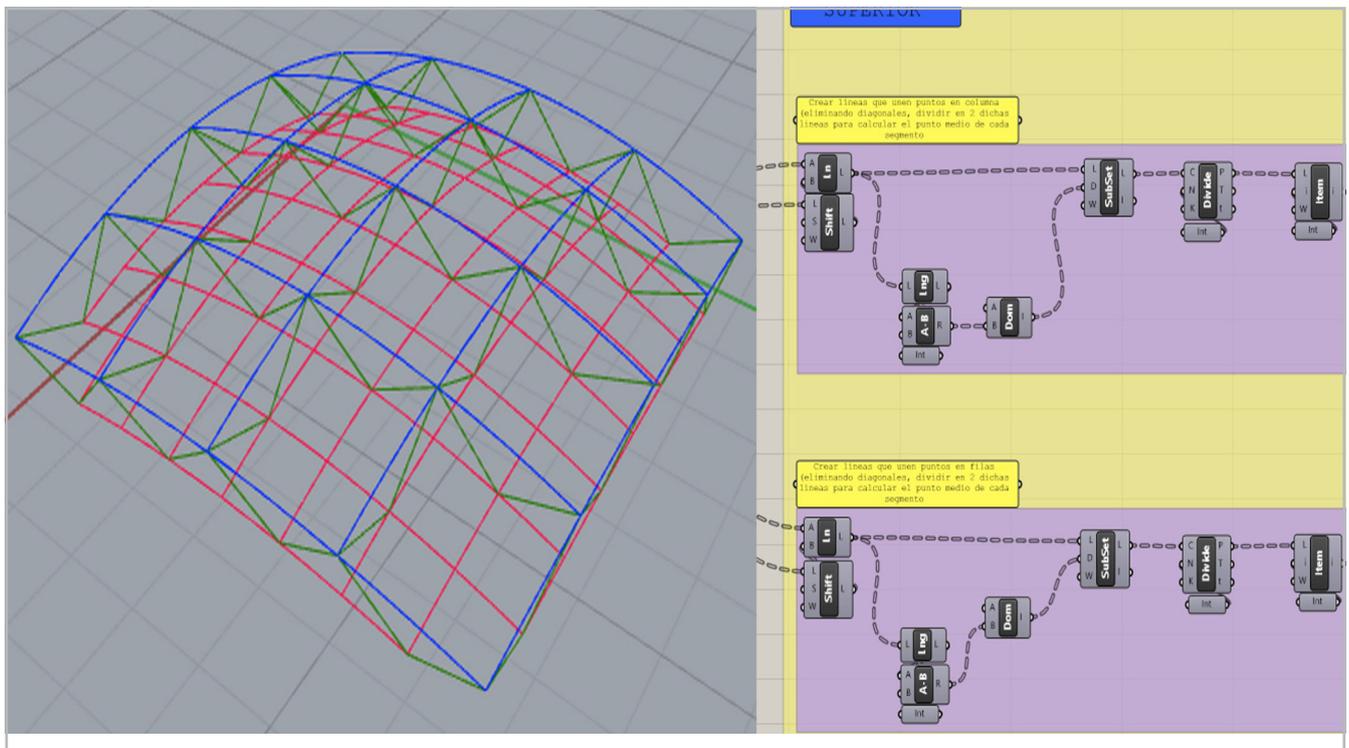
adecuarse a las necesidades del yacimiento en cuanto a luz máxima entre apoyos, así como a las acciones previstas (peso propio del textil de cobertura, cargas de nieve, etc.).

• Variaciones sobre la curvatura de la malla estructural esférica, permitiendo actuar sobre la estabilidad, limitando las deformaciones, especialmente ante acciones eólicas.

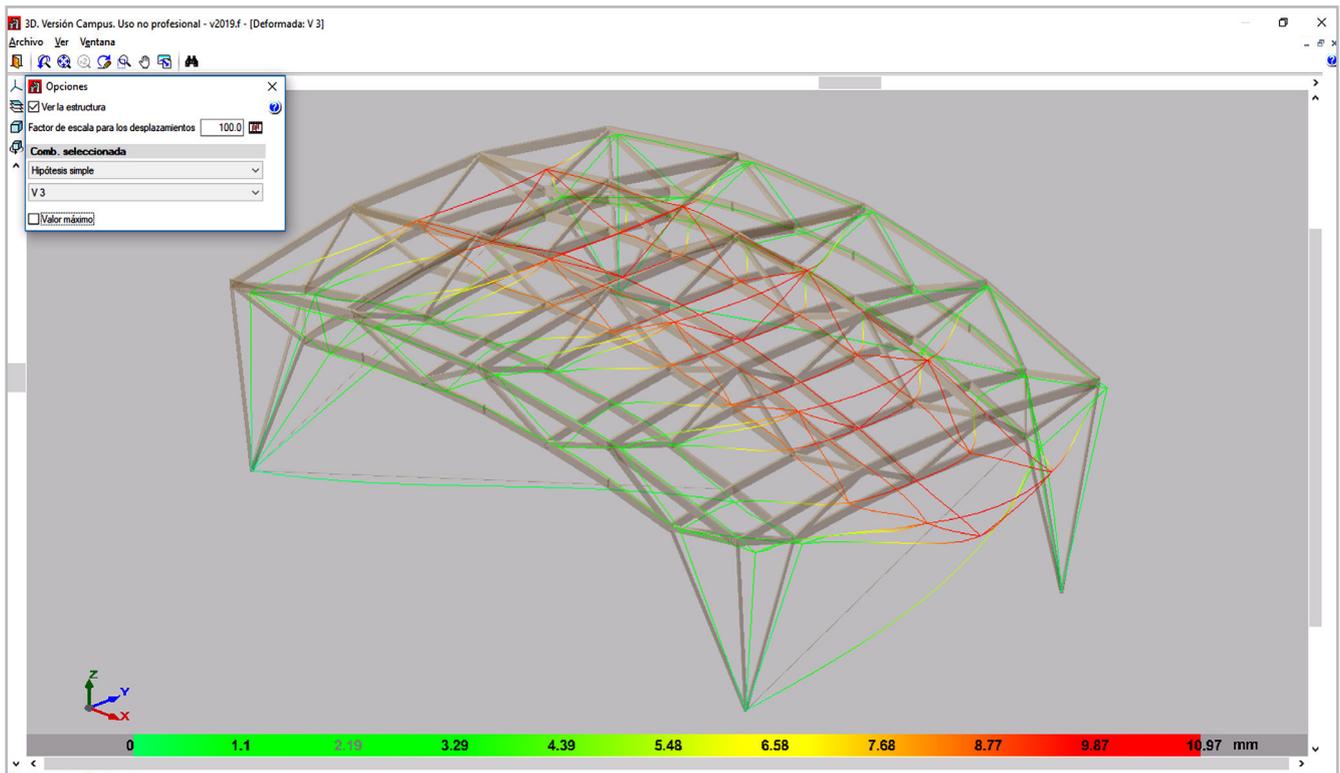
Posteriormente a la generación, será necesaria la comprobación estructural de la malla y el dimensionado de las distintas barras que la componen (rombos, aspas y diagonales).

Igualmente, se deberán dimensionar los apoyos de dicha cubierta, condicionados a la geometría del terreno existente, con la premisa de ejecutar un número mínimo de apoyos, y siempre externos al objeto excavado.

Para dicho dimensionado, se emplea software de cálculo matricial espacial de mallas de barras, desarrollado por Cype Ingenieros S.A. Dicha herramienta, permite el dimensionado de las barras de la malla estructural en limitando los estados límites últimos y de servicio para materiales como acero, aluminio o madera. En el caso de estudio, se fijarán los parámetros de resistencia mecánica relativos a panel de fibras de densidad media (MDF), previendo la ejecución de barras y nudos mediante la combinación de piezas de dicho material, hasta conseguir la sección resistente necesaria. Se chequearán igualmente las deformaciones debidas especialmente a



**Figura 2.-** Pantalla de control de parámetros de generación de la malla estructural, *Sistema Florín*, de la cubierta mediante herramienta Grasshopper.



**Figura 3.-** Salida de resultados de software de cálculo matricial (deformada ante acción eólica).

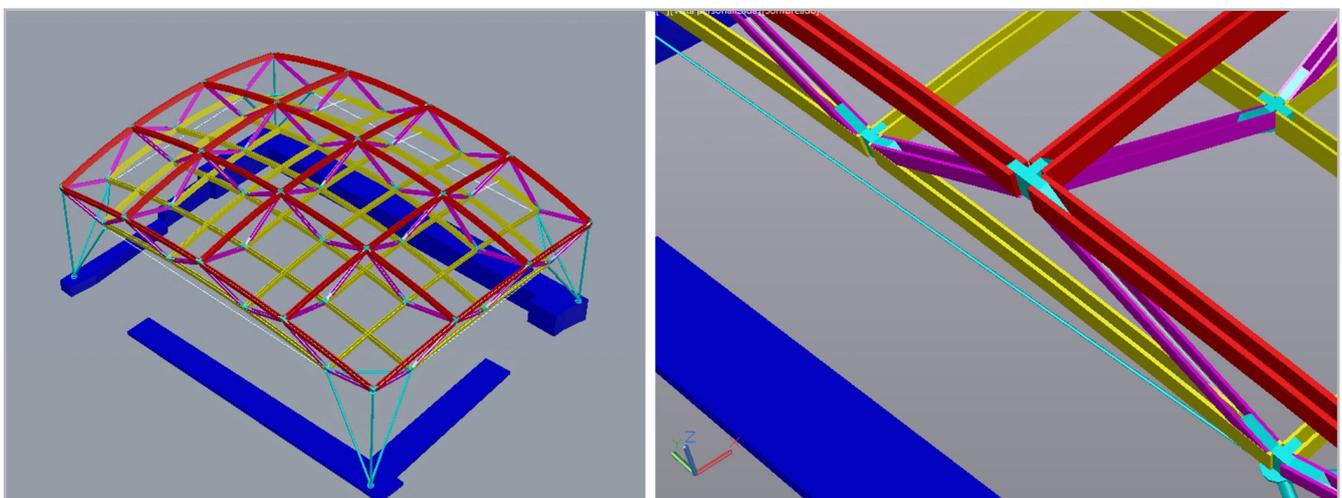
la acción de viento, [figura 3], considerando si procede la colocación de sistemas ligeros de arriostramiento mediante atirantado, ya que se trata de un sistema de uniones articuladas, consiguiendo con ello apoyos sencillos de escasa incidencia en el suelo.

Como consecuencia del dimensionado estructural, y trasladando los resultados de secciones de barras y nudos al modelo generado paramétricamente, se contará con un modelo virtual con dimensiones reales que puede ser trasladado al sistema de fabricación correspondiente.

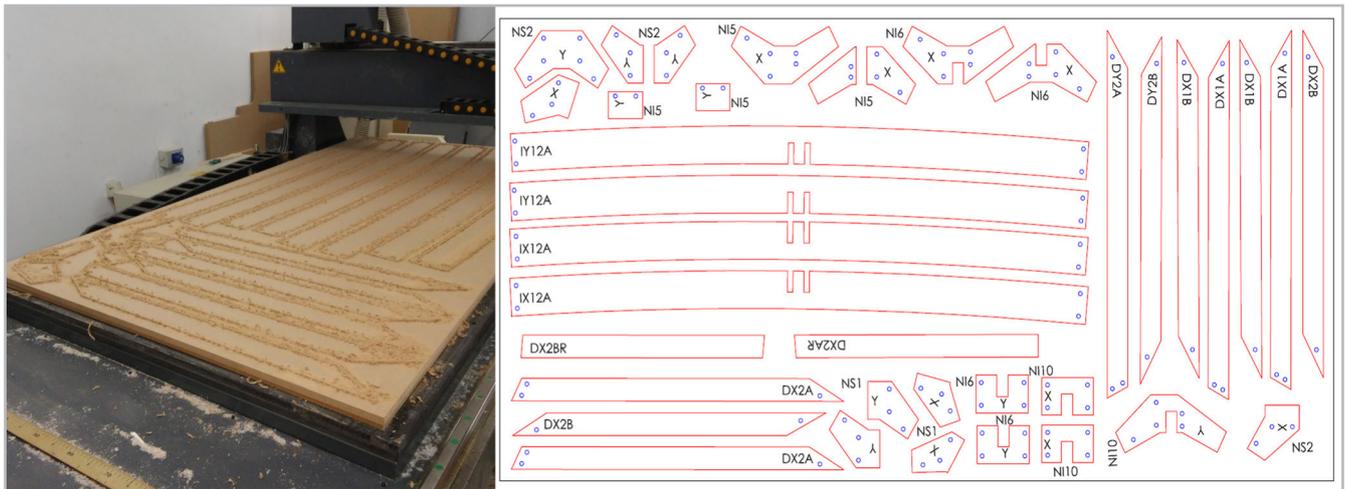
Para el caso de estudio, y con el fin de limitar el empleo de material en base a criterios de ligereza y mínima huella ecológica, se opta por el diseño de secciones de barras

formadas por dos perfiles separados, unidos puntualmente en el centro de la luz de los mismos, consiguiendo la inercia necesaria. Para el caso de los nudos, se opta por la unión de dos piezas de forma directa atornilladas, lo cual confiere rigidez al mismo, y facilita la unión con el sistema de barras [figura 4].

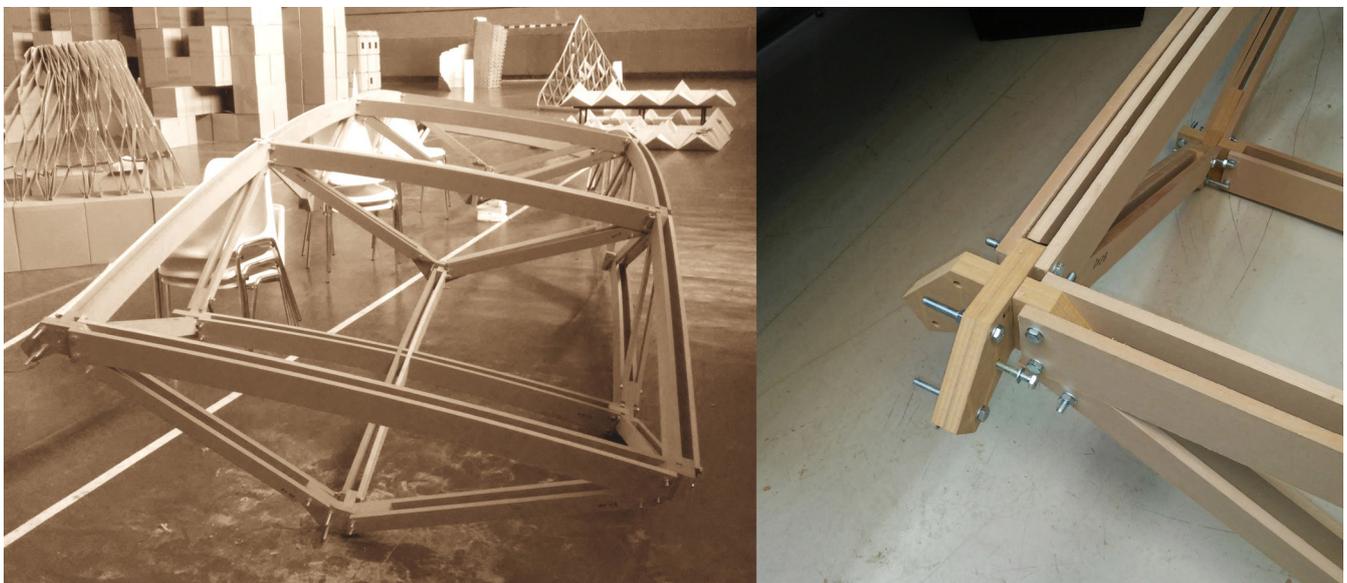
Finalmente, la generación paramétrica del modelo, y la obtención de un modelo físico digital, permite la fabricación del prototipo de cubierta del yacimiento mediante sistemas de fabricación industrializados, garantizando unos cortos tiempos de fabricación con alta exactitud dimensional de los elementos. Por otra parte, permitirá el rápido transporte y montaje del mismo, ya que se trata de sistema modular ensamblable configurado para unas condiciones de contorno concretas.



**Figura 4.-** Evolución del modelo alámbrico al modelo físico dimensionado.



**Figura 5.-** Panel de despiece codificado y proceso de fabricación en fresadora de control numérico.



**Figura 6.-** Fase de montaje de tres módulos de cubierta en taller/ detalle de unión atornillada en cara superior.

La prefabricación en taller de elementos modulares, permite igualmente realizar las correcciones del modelo necesarias debidas a modificación de parámetros durante las labores previas a los trabajos de montaje, incluso debidas a necesidades surgidas durante el proceso de rehabilitación, permitiendo en tiempo real, la modificación de parámetros geométricos de la cubierta (luz, número de módulos, canto de la mallas, etc.), e incluso la extensión de la misma en casos de ser necesario, realizándose la modificación de parámetros en la herramienta de generación, y la nueva obtención del modelo físico digital para su envío a taller.

Como sistema de fabricación, se opta por el empleo de equipo de fresado por control numérico (CNC). Dicho equipo, propio de la pequeña industria de taller metálico y de carpintería, permite el empleo de pequeños recursos con gran economía de fabricación. En el caso de este estudio, se ha empleado el equipo de fresado existente en el Taller de Fabricación Digital de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla.

Para la fabricación se han empleado paneles de tablero de densidad media (MDF), de 20 mm de espesor, con dimensiones adaptadas al equipo de fabricación (1,22 x 2,44 m). El modelo digital, ha sido despieceado en paneles codificados que son interpretados por la tecnología CNC. La codificación permitirá su posterior instalación en obra como kit de montaje [figura 5].

Con el fin de chequear el proceso, se ha realizado un test de montaje de un primer prototipo en taller, permitiendo la verificación de la coordinación dimensional de barras y nudos, así como la calibración de tolerancias dimensionales en el montaje de las uniones atornilladas. Igualmente, se ha realizado chequeo de estabilidad de los módulos ante solicitaciones previstas, así como ante fenómenos de segundo orden como es el caso del pandeo local de barras, previéndose los rigidizadores necesarios. Igualmente se han instalado los elementos para el futuro anclaje y tensado de las láminas textiles estructurales que constituirán la envolvente. [figura 6].

## Simulación mediante CFD

Paralelamente al proceso de fabricación del prototipo, se ha diseñado una herramienta de cálculo original que permita procesos de simulación energética. El estudio tiene como objetivo, elaborar un método analítico que permita documentar la capacidad de las envolventes de doble capa previstas como material de cobertura en yacimientos, para garantizar un control efectivo de variables ambientales mediante sistemas pasivos de mínimo consumo energético.

Será pues necesario, para la aplicación de la metodología de conservación preventiva basada en: diagnóstico, cuantificación de agentes potenciales, estimación de riesgos, proposición de medidas correctoras y monitorización (Carrera 2018), la posibilidad de cuantificar y modelizar los siguientes parámetros ambientales, aplicando un método microclimático (Baglioni; Cacace; Valpuesta 2018):

- Temperatura seca exterior.
- Temperatura seca en el interior del espacio cubierto y en el interior de la cámara de aire formada por la envolvente de doble capa.
- Temperatura superficial de la envolvente y del objeto a proteger (mosaico).
- Humedad relativa interior en espacio cubierto y cámara de la envolvente.
- Velocidad del aire exterior, en interior de la cámara y en interior del espacio cubierto.
- Radiación solar incidente sobre la cubierta.

Para la citada simulación, se ha desarrollado una herramienta de cálculo basada en software de código abierto (PDE), concretamente se empleará la aplicación FreeFem (Chacón 2010), consistente en software para resolver ecuaciones diferenciales empleando método de elementos finitos (FEM).

El modelo de cálculo parte de la definición de límites o bordes cuyos nodos de contacto comparten valores idénticos, permitiendo generar mapas de evolución de parámetros higrotérmicos mediante ecuaciones de continuidad, empleando la dinámica de fluidos computacional (CFD).

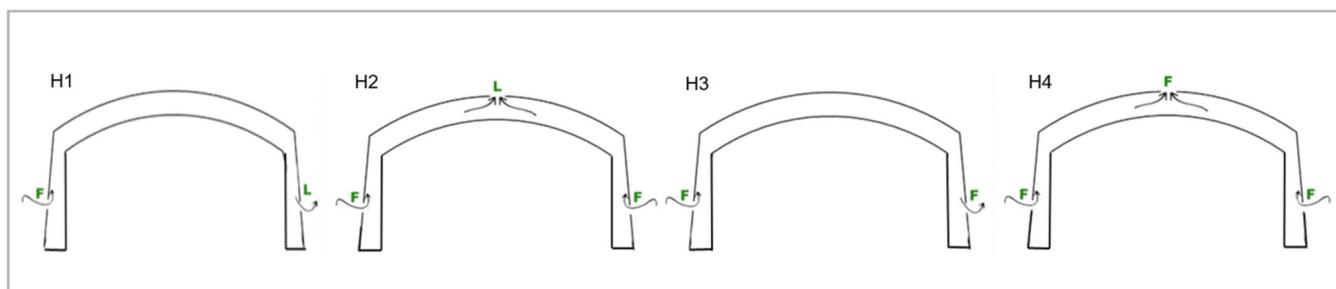
Los límites o bordes serán los correspondientes a las diversas capas de textil estructural formado por entramado de fibra de poliéster y protección de polifluoruro de vinilideno de 0.78 mm de espesor que constituyen la envolvente de doble capa prevista, y que envuelve a la estructura soporte del prototipo. Tendremos pues cuatro límites o bordes que encerrarán las áreas de cálculo (bordes interior y exterior de cubierta, y bordes interior y exterior de envolvente vertical) [figura 7].

La densidad de la malla de nodos y la discretización de las áreas o dominios de cálculo se ajustará a la geometría y a la necesidad de definición de puntos singulares como son las aberturas de admisión-extracción de aire previstas en el modelo [figura 8].

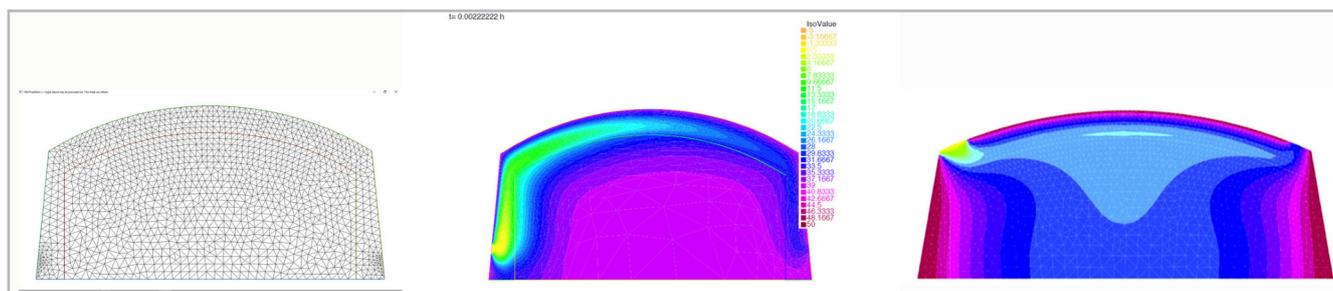
La herramienta diseñada, permite la simulación de variación de parámetros como  $T^a$  y humedad relativa, mediante actuación sobre la velocidad del aire en la cámara que forman las dos capas de la envolvente, partiendo de parámetros de condiciones ambientales:  $T^a$  exterior, humedad relativa, radiación solar incidente, velocidad del viento, etc., así como de las características propias de la envolvente (transmitancia térmica, transmisión, reflexión y absorción solar, factor solar y porcentaje de paso de la luz).

Se ensayan en el modelo de flujos, diversas opciones de admisión y extracción de aire forzado mediante pequeños ventiladores en línea axiales [figura 7], disponiendo aberturas en puntos singulares (envolvente vertical y cubierta), según hipótesis prediseñadas y a ejecutar en el futuro modelo físico a escala 1:1. Detallamos a continuación algunas hipótesis consideradas:

- H1: Admisión forzada unilateral en envolvente vertical y extracción libre en extremo contrario de dicha envolvente.
- H2: Admisión forzada bilateral en envolvente vertical, y extracción libre en envolvente de cubierta.
- H3: Admisión forzada unilateral en envolvente vertical y extracción forzada en extremo contrario de dicha envolvente.
- H4: Admisión forzada bilateral en envolvente vertical, y extracción forzada en envolvente de cubierta.



**Figura 7.-** Esquema de bordes e hipótesis de flujos de aire forzados (F), y libres (L).



**Figura 8.**- Modelo de malla discretizada, y modelos de mapas de  $T^a$  y velocidad del aire para hipótesis forzada.

Para cada hipótesis, el modelo reporta mapas de evolución estacional y horaria de distribución de temperatura y velocidad de aire, tanto en espacio cubierto como en cámara, ante los diversos flujos estáticos (únicamente debidos a fenómenos de convección por diferencia de temperatura en el espacio cubierto), y ante flujos dinámicos (con circulación de aire forzada en el interior de la cámara formada por la envolvente de doble capa, con diversidad de posición de aberturas [figura 8].

### ACV de la solución propuesta

Tal como se ha indicado, este trabajo se enmarca en una línea de investigación que vincula el diseño del elemento arquitectónico a su influencia en la minimización de su impacto medioambiental en todas las fases de su ciclo de vida (Gómez de Cózar, 2019).

El siguiente cuadro ilustra el modelo arquitectónico utilizado y su relación con las diferentes fases del ciclo de vida de una edificación a efecto de minimizarlas.

En un trabajo anterior (Gómez de Cózar, 2017) se procedió

FABRICACIÓN	→	LIGEREZA
CONSTRUCCIÓN	→	RÁPIDO MONTAJE
USO	→	ESTRATEGIAS PASIVAS ENERGÍAS RENOVABLES
DEMOLICIÓN	→	REVERSIBLE
DISPOSICIÓN FINAL	→	RECICLABLE

a comparar el impacto medioambiental, mediante herramientas de ACV, de una cubierta resuelta con el *Sistema Florín* frente a otros sistemas cotidianos y usuales que tenían las mismas dimensiones y cubrían la misma superficie. En el estudio reseñado, la estructura de la cubierta *Florín*, estaba resuelta de forma íntegra en acero galvanizado. En este artículo, se actualiza el análisis en función de la materialidad elegida para la estructura (fundamentalmente, paneles de MDF y tornillería de acero zincadas) asumiendo que todos los modelos que se comparan tienen la misma envolvente (doble capa de membrana textil de malla y urdimbre del poliéster revestida con PVC).

El análisis se ha realizado conforme a ISO 14040 (UNE-EN ISO 14040 2006), ISO 14044 (UNE-EN ISO 14044 2006) y

EN 15978 (UNE-EN 15978 2012), siguiendo el siguiente procedimiento:

### Alcance y objetivos (Scope and goal definition)

El objetivo fundamental en todos los casos analizados ha sido determinar el impacto medioambiental de la edificación proyectada. Siguiendo la bibliografía más actual (Galán Marín *et al.* 2015), (Asdrubali, F. *et al.* 2017) se ha considerado el *Riesgo de calentamiento global* (GWP), como el indicador de impacto más relevante.

### Límites del sistema

En función de EN 15978 (UNE-EN 15978 2012) se han seleccionado las fases más relevantes para el análisis del ciclo de vida de una edificación:

- Fase de producción. Incluye materias primas (A1), transporte de materiales a fábrica (A2) y fabricación de materiales (A3).

- Fase de construcción/deconstrucción. Incluye transporte a lugar de construcción/montaje/obra (A4), proceso constructivo (A5), proceso de de-construcción (C1) y transporte a lugar de disposición final (C2).

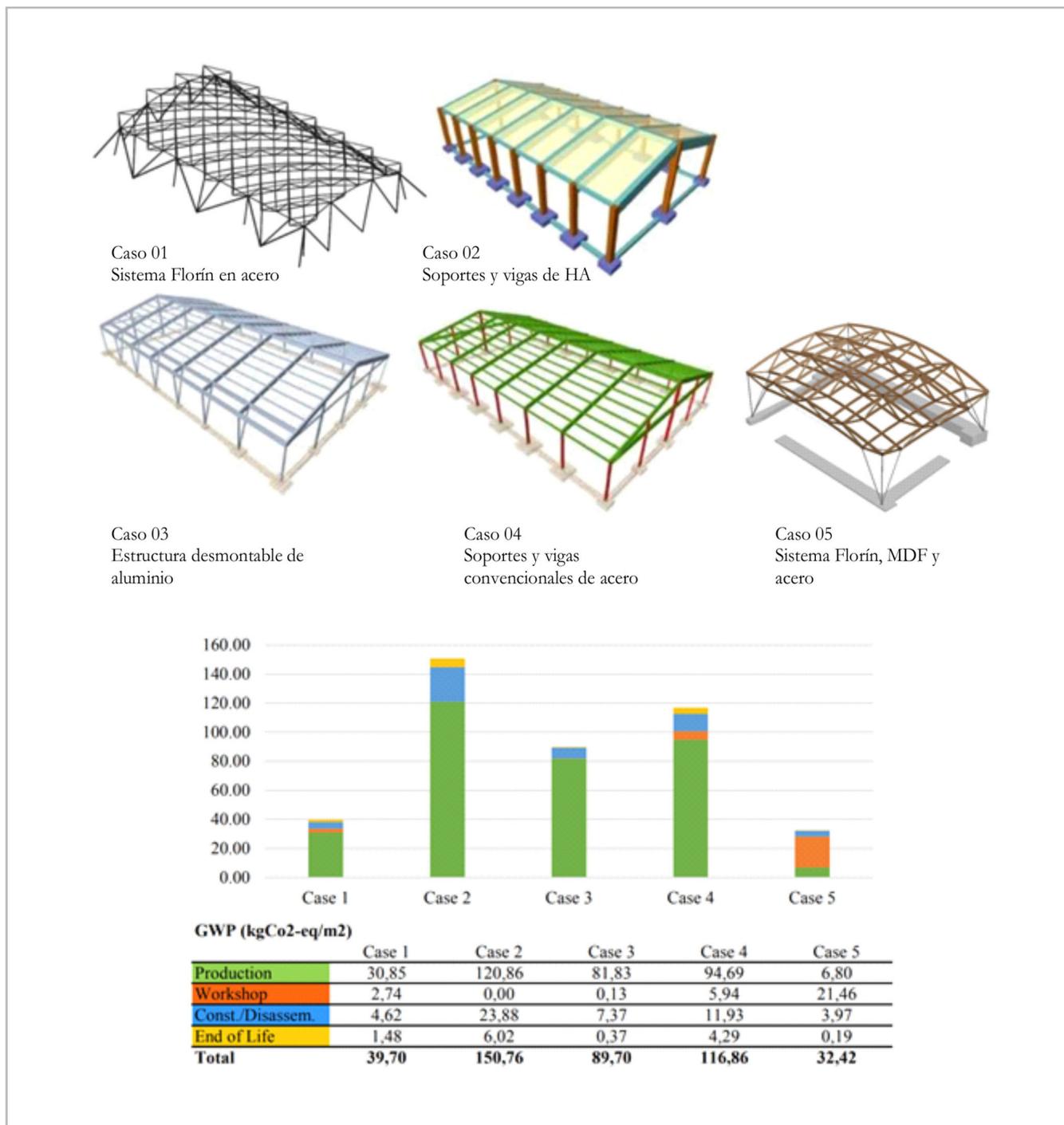
- Fase de final de vida. Incluye procesado de residuos para reúso, recuperación y/o reciclado (C3) y disposición final (C4).

En todos los casos se ha considerado una duración de la edificación de 50 años.

Las etapas B1 a B7, relacionadas con fase de uso (energía operacional) no se van a incluir en el presente estudio porque, gracias al uso de estrategias pasivas de diseño, su impacto es despreciable.

### Asignación

Se ha elegido un escenario de reciclado de todos los materiales. Los impactos unitarios asociados a esta fase se han obtenido de la base de datos Ecoinvent 2.0 (Frischknecht, R *et al.* 2007).



**Gráfico 2.-** Evaluación del impacto del ciclo de vida. Modelos comparados y resultados.

**Unidad funcional**

En todos los casos se ha considerado como unidad funcional el sistema constructivo/estructural completo incluyendo su cimentación. En todos los casos, los resultados de expresan por metro cuadrado de edificación cubierta.

**Limitaciones y suposiciones**

Para la cuantificación de la energía demandada durante las fases de construcción y deconstrucción se han cuantificado

todos los procesos. En todos los casos se ha considerado un escenario de disposición final de reciclaje de todos los productos empleados.

1. *Inventario del ciclo de vida* (life cycle inventory, LCI): Consiste en la cuantificación de materiales, procesos y elementos incluidos en el sistema según ISO 14044 (UNE-EN ISO 14044 2006). Se siguen las indicaciones de García Martínez (García Martínez, A. 2010), clasificando el inventario en tres fases:
  - Inventario de materiales.

- Inventario de transportes y procesos de construcción y deconstrucción.

- Inventario de procesos de final de vida.

Los valores de impacto asociados a transportes, construcción y deconstrucción se obtienen a partir del inventario de procesos que se han seguido en las operaciones referenciadas y de los valores de impacto unitarios asociados a cada proceso.

2. *Evaluación del impacto del ciclo de vida* (life cycle impact assessment, LCIA): A partir de la cuantificación de materiales y de procesos, la evaluación del impacto del ciclo de vida se ha calculado a partir de los diferentes valores unitarios de impacto, según la categoría considerada, establecidos en la base de datos Ecoinvent 2.0. Siendo esta la base de datos de uso más extendido entre la comunidad científica europea. Contiene los valores de impacto asociados a los materiales, elementos y procesos en cada etapa de su ciclo de vida.

3. *Interpretación de resultados*: En cada caso se han interpretado los resultados estableciendo relaciones entre el modelo arquitectónico/constructivo planteado y los diferentes valores de impacto medioambiental obtenidos.

Los resultados se han repercutido por metro cuadrado de superficie edificada: Modelos 1, 2, 3 y 4: 610,00 m<sup>2</sup>; Modelo 5: 40,32 m<sup>2</sup>.

Conforme a los criterios establecidos en el punto anterior, comparando los resultados obtenidos con tres sistemas diferentes y también utilizados con frecuencia (estructura de hormigón armado, estructura de aluminio y estructura de acero laminado), los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el diseño realizado es el que más minimiza el impacto medioambiental respecto a las opciones restantes. En el gráfico 2 se observan los resultados obtenidos.

### Discusión de resultados

Tras los primeros procesos de generación paramétrica, simulación estructural, higrotérmica y de análisis de ciclo de vida, del modelo, podemos realizar el siguiente análisis:

- Desde el punto de vista del diseño, optimización y comportamiento mecánico: En la optimización estructural, se han seguido criterios de diseño y elección de perfiles basado en: elección de secciones con inercia suficiente y mínimo consumo de material que garanticen la ligereza del sistema, unificación de secciones que permitan fabricación y montaje de mínima complejidad, o uniones entre elementos de rápido montaje y desmontaje, obteniendo como solución óptima la compuesta por trípodes de apoyo a base de perfiles tubulares de acero, y malla de cubierta a base de perfiles dobles de tablero MDF de igual sección en la totalidad de los módulos, previéndose perfil

triple únicamente en una barra en los módulos de apoyo en los trípodes. La citada solución supone un peso total de la estructura de 226,50 kg, con una repercusión por superficie cubierta de 5,61 kg/m<sup>2</sup>.

Realizando la comparativa con opciones de fabricación en materiales tradicionales de la construcción ligera como el acero y el aluminio, se obtiene una masa total de 500,90 Kg en caso del empleo de perfiles huecos tubulares de sección circular, y de 299,23 Kg en caso de emplear perfilera tubular de aluminio extruido, suponiendo una repercusión de 12,42 y 7,42 kg/m<sup>2</sup> respectivamente, revelándose la solución elegida como la óptima para los parámetros de partida.

- En cuanto a control higrotérmico en el espacio cubierto y objeto arqueológico: Tras la primera fase de simulación, con las hipótesis de aperturas y forzado de flujos de aire descritos [figura 8], podemos analizar los primeros resultados, destacando los siguientes:

En cuanto a valores obtenidos en periodo estival, se observa que el movimiento de aire en el interior de la cámara de la envolvente, permite la disminución de la temperatura interior del espacio cubierto entre 0,5 y 4 °C, y en torno a 2°C a nivel del suelo (objeto excavado), para velocidades iniciales de impulsión de aire en la cámara de 13 m/s, y un periodo máximo de funcionamiento del sistema de 4 horas, obteniéndose los valores máximos de atenuación para la hipótesis H4 [figura 8], siendo forzada tanto la admisión por envolvente vertical, como la extracción por cubierta, consiguiendo una distribución más uniforme de T<sup>a</sup> interior del espacio cubierto, así como una velocidad de aire residual más elevada en el interior de la cámara, en torno a 6,5 m/s.

En lo que se refiere al periodo de invierno, las primeras simulaciones han revelado que el mantenimiento de velocidades de aire bajas (inferiores a 0,50 m/s según escala de Beaufort), mediante el cierre de aberturas de la envolvente, permite que no exista disminución de la T<sup>a</sup> debida a efectos eólicos en el interior de la cámara, favoreciendo el recalentamiento del aire ocluido en la misma debido a la radiación solar directa, con la consiguiente transmisión de calor a través de la capa textil interior, y el mantenimiento de la T<sup>a</sup> seca del espacio cubierto en valores positivos en dicho periodo.

- Relativas a minimización del impacto medioambiental en función de su comparación a otros sistemas constructivos: Como se puede observar en el gráfico 2, las diferentes soluciones que se han comparado aumentan el impacto medioambiental 1,21 veces (caso 1, Sistema Florín resuelto en acero), 4,54 veces (caso 2, hormigón armado), 2,77 veces (caso 3, aluminio) y 3,57 veces (caso 4, acero laminado) respecto a la solución diseñada (caso 5).

Las causas fundamentales de la reducción de impacto son:

-Naturaleza de los materiales elegidos. Las propiedades naturales del material elegido y su mínima industrialización plantean un potencial mínimo de impacto unitario. La ventaja de poder conseguir cantidades suficientes en un radio de acción cercano minimiza los impactos asociados a transportes.

-Extrema ligereza de la solución. Gracias al diseño de la malla espacial, en función del proceso de optimización que se ha seguido, se consigue un elemento muy ligero. La ligereza repercute en las tareas de fabricación, transportes y montaje.

-Se trata de un sistema de rápido montaje que potencia el trabajo en taller y minimiza el trabajo en obra.

-El sistema es reversible y reciclable al 100,0%.

Cuando se comparan las dos soluciones (casos 1 y 5) que se han resuelto con Sistema Florín, se observa que la solución realizada en madera mejora los resultados que se obtienen con la solución en acero (1,21 veces). Esta situación todavía podría mejorar más en función del tipo de tratamiento que se dé a la madera a efectos de garantizar su durabilidad en ambientes húmedos (clases de servicio 2 y 3 conforme a CTE DB SE M).

De este modo, se pone de manifiesto el beneficio medioambiental que se obtiene al utilizar el modelo constructivo desarrollado en función a otras alternativas posibles.

## Conclusiones

Tras el desarrollo de la metodología propuesta y del análisis de los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- El uso de sistemas ligeros y de rápido montaje, como el Sistema Florín, contruidos a partir de materiales adecuados, se configura como la opción más idónea de cobertura de yacimiento. La elección de materiales en cada caso de estudio será fundamental atendiendo no sólo a la naturaleza de éstos sino también a su necesidad de ser protegidos con otros productos para garantizar su durabilidad. Las herramientas de diseño paramétrico creadas, unidas a la fabricación digital, permiten obtener soluciones originales y optimizadas en cada caso en función de las necesidades particulares de cada yacimiento. En cada caso, aunque el sistema sea el mismo, la geometría final estará adaptada a las condiciones reales del yacimiento.
- La incorporación de doble capa de membrana a un sistema constructivo que fue creado con ese fin, permite tener un control higrotérmico aceptable del espacio cubierto sin apenas consumo energético, empleado medidas pasivas de acondicionamiento ambiental.



**Figura 9.-** Sondas y equipamiento a instalar en el prototipo construido.

Las simulaciones que se han realizado a partir de las herramientas originales creadas ponen de manifiesto el beneficio de esta tecnología a la hora de conseguir temperaturas adecuadas tanto en el interior del recinto como en su suelo.

- Se ha demostrado, como los dos puntos anteriores tienen gran repercusión en el Análisis del Ciclo de Vida realizado en cuanto a la minimización del impacto medioambiental conseguido. Cuando se sigue la metodología propuesta, se ha podido comprobar que el elemento resultante es el que menos impacto produce en relación a otros sistemas habituales, en las mismas condiciones de uso, con los que se ha comparado.

## Desarrollos posteriores a la redacción de este artículo. Futuras líneas de investigación

Dentro del estudio del prototipo, y una vez sea instalado en el emplazamiento propuesto, se procederá a la monitorización del mismo, con el fin de contrastar los datos de simulación del modelo de cálculo CFD. Para ello, se recurrirá a tecnología compatible con software de código abierto "Arduino" (Evans 2007), colocándose sondas de temperatura y humedad en el exterior del mismo, en interior de cámara de la envolvente textil, y en el interior del espacio cubierto. Igualmente se prevé el uso de dinamómetro y piranómetro, para obtener lectura de parámetros exteriores de velocidad del aire y radiación solar incidente, así como de pequeños equipos de ventilación que permitan modificar la velocidad del aire en la cámara, e incluso la transferencia de aire de la misma al espacio interior [figura 9]. La comparación de los datos obtenidos por el conjunto de sondas y equipamiento permitirá la gestión de una gran base de datos de parámetros de condiciones ambientales del espacio cubierto ante la variabilidad de las condiciones exteriores estacionales, y las condiciones activas de intervención

sobre el mismo, permitiendo así la calibración del modelo de cálculo.

## Referencias

AA.VV. (2008). *Deplorable Emergency System*. La Coruña: Netbiblo S.L.

AA.VV. (2003). *Taller de Conservación Preventiva en Excavaciones Arqueológicas in Situ*. Cádiz: Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras de Cádiz.

ASDRUBALI, F., et al. (2017). "Abrevies of Structure, Termo-Physical. Acoustic, and Environmental Propperties of Wooden Materials for Buiding Applications", *Building and Environment*, 114: 307-332.

BAGLIONI, R., CACACE, C., VALPUESTA, S. (2018). "Diseño y Evaluación de una Metodología de Estudio y Gestión Medioambiental de Bienes Culturales". En *VI Congreso GE IIC*, Vitoria-Gasteiz: Grupo Español del IIC: 198-205.

CARRERA, F. (2018). "Conservación Preventiva en Yacimientos Arqueológicos, ¿Empezamos?". En *VI Congreso GE IIC*, Vitoria-Gasteiz: Grupo Español del IIC: 376-384.

CHACÓN, E. (2010). "Notas sobre FreeFem++ 2D y 3D: traducción del manual de F. Hecht, en Departamento de Ecuaciones Diferenciales y Análisis Numérico, Facultad de Matemáticas, Universidad de Sevilla. <http://freefem.org/ff++/ftp/freefem++Spanish.pdf>

DÍAZ MARTÍNEZ, S. (2005). "La Conservación de los Yacimientos Arqueológicos In Situ", *Boletín Arkeolan*, 13: 110-130.

EVANS, B. (2007). *Arduino Programming Notebbok*. San Francisco: Creative Commons.

FRAZZI, P. (2002). "Conservación preventiva para objetos arqueológicos históricos en contextos urbanos", *Estudios Ibero Americanos de la Universidad Pontificia de Rio Grande do S*, 26 vol XXVIII: 95-111.

FRISCHKNECHT, R., JUNGBLUTH, N., HANS-JÖRG, A., et al. (2017). *Implementación of life cycle impacto assessment métodos: data v2.0*. Dübendorf: Rolf Frischknecht, Niels Jungbluth.

GALÁN MARÍN, C., RIVERA GÓMEZ, C., GARCÍA MARTÍNEZ A. (2015). "Embodied Energy on convencional load-Bea ring salles versus natural stabilized e Art ha blocs", *Energy and Building*, 97: 146-154.

GARCÍA MARTÍNEZ, A. (2010). *Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de edificios. Propuesta metodológica para la elaboración de Declaraciones Ambientales de Viviendas en Andalucía*. Sevilla: Universidad de Sevilla.

GÓMEZ DE CÓZAR, J. C., GARCÍA DIÉGUEZ, R. (2001). *Sistema Florín. Estructuras Desplegables de Dos Capas*. Sevilla: DCA1 Universidad de Sevilla.

GÓMEZ DE CÓZAR, J. C. (2007). "Textile Architecture?". En *III International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*, Barcelona: International Centre for Numerical Methods in Engineering: 293-296.

GÓMEZ DE CÓZAR, J. C., GARCÍA MARTÍNEZ A., ARIZA LÓPEZ, I., et al. (2017). "Lightweight and Quickly Assembled: the Most Eco-Efficient Model for Architecture", *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, Vol. 5. Núm. 4: 539-550. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N4-539-550>

GÓMEZ DE CÓZAR, J. C., GARCÍA MARTÍNEZ A., ARIZA LÓPEZ, I., et al. (2019). "Life cycle assessment as a decision-making tool for selecting building systems in heritage intervention: Case study of Roman Theatre in Itálica, Spain", *Journal of Cleaner Production*, 206: 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.169>

JIANG, HE., AKIRA, HOYANO. (2009). "Measurement and simulation of the thermal environment in the built space under a membrane structure", *Building and Environment* ,44: 1119-1127. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.08.003>

KRAUEL, J. (2010). *Arquitectura Digital, Innovación y Diseño*. Barcelona: S.A. Leading International Key Services

KRONENBURG, R. (2008). *Portable architecture: design and technology*. Basel: Birkhäuser.

LACAYO, T.E. (2001). "Factores de Alteración in-Situ. Conservación Preventiva del Material Arqueológico". En *XV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, Guatemala: J.P. Laporte, H. Escobedo y B. Arroyo: 453-457.

PRICE, S. (1984). *La Conservación en Excavaciones Arqueológicas*. Roma: ICCROM.

## Autor/es



**Manuel Ordóñez Martín**  
maormarq@us.es  
Universidad de Sevilla. E.T.S. Arquitectura

Profesor Asociado Universidad. Máster en Arquitectura y Patrimonio Histórico. 2012. Profesor Máster en Proyecto de Instalaciones en Arquitectura. (2011- actualidad). Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1. Universidad de Sevilla. E.T.S. Arquitectura. Grupo de Investigación TEP 130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía. Doctorando con tesis en redacción: Análisis y Desarrollo de Coberturas Temporales Eficientes en Yacimientos Arqueológicos. Producción científica más relevante. [https://investigacion.us.es/sisius/sis\\_showpub.php?idpers=7429](https://investigacion.us.es/sisius/sis_showpub.php?idpers=7429)



**Juan Carlos Gómez de Cózar**  
[gcozar@us.es](mailto:gcozar@us.es)  
Universidad de Sevilla. E.T.S. Arquitectura

Profesor Titular de Universidad. Director del Master Universitario en Innovación en Arquitectura: Tecnología y Diseño. Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1. Universidad de Sevilla. E.T.S. Arquitectura. Grupo de Investigación TEP 130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía. Autor de varias patentes y de numerosos trabajos de transferencia que desarrollan la línea de investigación: "Forma, materialidad y arquitectura. búsqueda de modelos constructivos ligeros, de rápido montaje y reversibles que minimicen el impacto medioambiental". Producción científica más relevante:

[https://investigacion.us.es/sisius/sis\\_showpub.php?idpers=5478](https://investigacion.us.es/sisius/sis_showpub.php?idpers=5478)



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.757>

# Evaluación de riesgos, monitorización y simulación de edificios patrimoniales

Carmen M.<sup>a</sup> Muñoz González, Ángel Luis León Rodríguez, Jaime Navarro Casas, Jonathan Ruiz Jaramillo, Catherine Teeling

**Resumen:** Los edificios religiosos son una parte importante del patrimonio cultural, son documentos de nuestra herencia y tenemos la necesidad de preservarlos. Las condiciones ambientales en el que están inmersos estos edificios son determinantes para la preservación y conservación del patrimonio mueble que contiene. Originalmente, la mayoría de estos espacios no estaban acondicionados, pero actualmente, estos edificios están siendo climatizados para proporcionar el confort térmico a los feligreses y para mejorar las condiciones del clima interior y la preservación del patrimonio mueble. El objetivo principal de esta investigación ha sido analizar las condiciones ambientales de edificios religiosos en un clima Mediterráneo, mediante el uso de monitorización y simulación para evaluar y mejorar la preservación del patrimonio cultural de estos edificios. Este estudio aporta las herramientas para la optimización de la calidad ambiental para la preservación y conservación del patrimonio mueble e inmueble y para su aplicación en futuros proyectos de rehabilitación patrimonial.

**Palabras clave:** Patrimonio, monitorización, simulación, riesgo, condiciones ambientales

## Evaluación de riesgos, monitorización y simulación de edificios patrimoniales

**Abstract:** The churches are an important part of Cultural Heritage; these need to be preserved. The indoor environmental conditions of these spaces are decisive for the preservation and conservation of the movable heritage. The originally churches were not conditioned, but currently, these buildings are being air-conditioned to provide thermal comfort to parishioners and to improve indoor weather conditions. The main objective of this research project has been to analyse the environmental conditions of religious buildings in a Mediterranean climate, through the use of monitoring and simulation to evaluate and improve the preservation of the Cultural Heritage of these buildings. Finally, this study provides the subject expert, the tools for the optimization of environmental and energy quality, in the refurbishment project.

**Keywords:** Heritage, monitoring, simulation, risk, environmental conditions

## Introducción

El estudio higrotérmico de espacios religiosos proto-barrocos se enmarca dentro una fase de estudios de investigación que tiene por objeto la futura rehabilitación de dichos espacios, y se pretende sirva de base para conocer el estado de conservación, los fenómenos de degradación que sufren algunas obras de arte y analizar previamente las consecuencias de las posibles intervenciones en los edificios.

Los procesos de degradación son resultado de la interacción de diversos parámetros ambientales tanto del exterior como el interior (Muñoz-Gonzalez 2016).

Uno de los objetivos de este estudio fue aportar datos que pudieran dar explicación a la degradación actual de los espacios religiosos analizados, debido a las condiciones ambientales interiores, a los factores climatológicos, el uso actual, etc. La observación de los parámetros ambientales interiores (obtenidos con una previa monitorización del espacio de estudio) desde un punto de vista de la dinámica ambiental, permite conocer el funcionamiento ambiental del espacio interior (Erhardt & Mecklenburg 1994), (Magrini 2016). Debido a la naturaleza oscilante del clima, el proceso de monitorización se debe realizar para un periodo de varios años lo que permite un conocimiento más detallado de la interacción de los materiales y obras

de arte con el clima interior (Wessberga & Vyhřídál). Igualmente, debido a la influencia de la masa humana en la degradación y el confort térmico del espacio, este estudio ahonda en el conocimiento más detallado del uso de estos espacios y la interacción de las personas con el ambiente interior (Camuffo *et al.* 2010).

Un elevado porcentaje de edificios patrimoniales son contenedores de una riqueza inestimable de nuestro patrimonio cultural. Estos espacios albergan un patrimonio mueble, tan importante como el que se puede encontrar en espacios expositivos, los museos. En este ámbito poco a poco se han ido imponiendo diferentes estrategias de conservación, al menos como planteamiento teórico. Sin embargo, otros espacios como por ejemplo, los religiosos, son instituciones que no disponen de estructuras técnicas y administrativas permanentes para la conservación de los bienes que acopian, a pesar de que en la mayoría de los casos, muchos de ellos están inscritos en el Registro General de Bienes de Interés Cultural o forman parte del Inventario General de Bienes Muebles (DIRECCIÓN GENERAL DE BELLAS ARTES Y BIENES CULTURALES Y DE ARCHIVO Y BIBLIOTECA 2009).

Además de las carencias en medios técnicos, es preciso considerar otra particularidad que puede determinar de forma importante la conservación del patrimonio, que es su carácter de patrimonio en uso. Generalmente, los espacios de culto están vinculados a ritos y tradiciones con un importante seguimiento popular en el que enlazan, además, elementos del patrimonio inmaterial que requieren asimismo una aproximación especial en cuanto a los requerimientos de conservación.

En los últimos treinta años, las iglesias están disminuyendo drásticamente, sobre todo en el occidente de Europa. Asimismo, muchos de estos espacios han tenido que ser usados para fines alternativos con el fin de disponer de algunos ingresos extras. El uso original de las iglesias está siendo modificado y actualmente a estos espacios, hoy por hoy, no se les exigen un acondicionamiento ambiental, como al resto de otras edificaciones que albergan actividades de uso público. Hoy en día muchas de ellas se utilizan para conciertos y otros eventos musicales, exposiciones, etc. (Mosoarca *et al.* 2017)

Durante siglos el clima interior de las iglesias había venido determinado principalmente por el clima exterior. Sin embargo, en la actualidad muchos de estos espacios están siendo equipados con novedosas tecnologías (diseñadas para una arquitectura contemporánea) para mejorar las condiciones de confort de los feligreses (Berardinis, Rotilio & Capannolo 2017).

Igualmente, si el funcionamiento de estas técnicas ambientales fuese continuo, existiría una alta demanda de energía debido al gran volumen e inercia térmica

que presentan estos edificios. Precisamente por razones económicas la mayoría de las iglesias emplean un sistema de climatización para períodos de tiempo limitados, concretamente cuando las personas están presentes. Pero esta estrategia de climatización puede tener un efecto adverso sobre la conservación del edificio y sus objetos interiores (Balocco & Colaianni 2018).

Los problemas a los que se enfrenta la conservación de estos espacios están relacionados con la evaluación de riesgos, la aplicación de control y el seguimiento de las condiciones ambientales, una vez implementados los sistemas de acondicionamiento ambiental. En la mayoría de los casos, la implantación de las instalaciones de acondicionamiento ambiental deriva de dos necesidades principales, una es la económica (de la instalación, uso y mantenimiento) y la segunda es el confort térmico. Sin embargo, los requisitos de conservación en pocas ocasiones son considerados (Muñoz 2016).

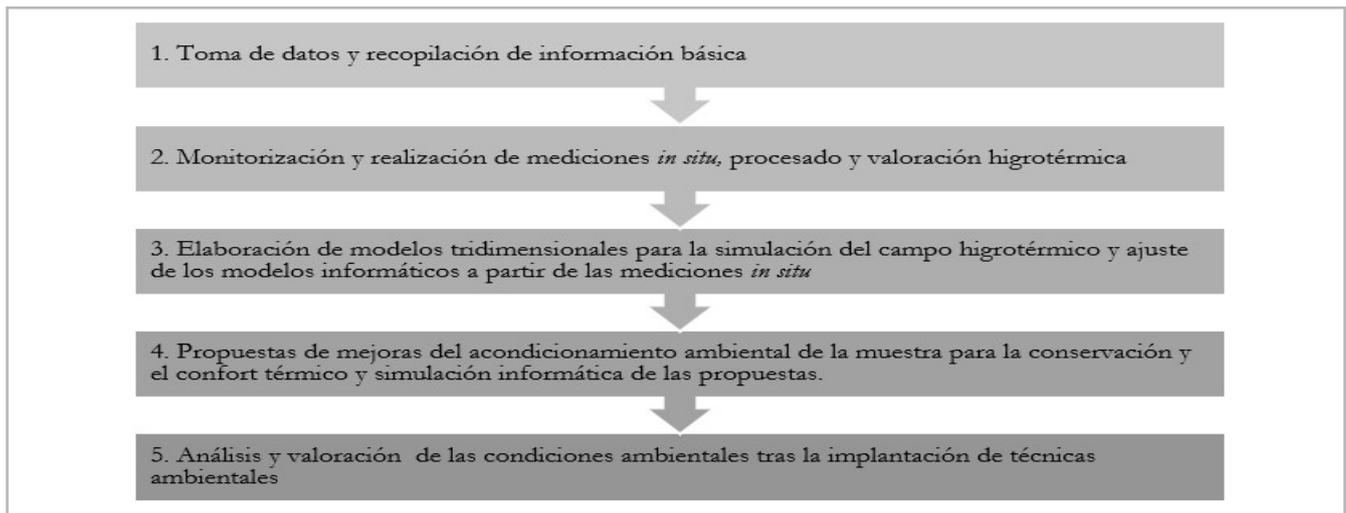
Por esto, resulta relevante el presente trabajo, donde se propone profundizar en el conocimiento del acondicionamiento higrotérmico de espacios religiosos. Se pretende con ello, ofrecer a los técnicos competentes las pautas de diseño que le permitan predecir la conducta higrotérmica de estos espacios antes y después de la aplicación de técnicas ambientales.

## Metodología

Este trabajo de investigación se desarrolló siguiendo un método experimental, depurado durante años de trabajo por parte de miembros del grupo de investigación TEP 130, adscrito al Instituto Universitario de Arquitectura y ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla. Este método combina las formulaciones analíticas, las medidas experimentales realizadas *in situ* y la utilización de técnicas de simulación mediante ordenador para conocer y predecir el comportamiento higrotérmico de los espacios.

El método desarrollado para el análisis de cada iglesia objeto de estudio puede ser desglosado en cinco fases, las cuales se suceden cronológicamente.

- En la primera etapa del estudio se realiza una recopilación de información básica de la muestra de estudio. La documentación histórica permite conocer las circunstancias que propiciaron la construcción del edificio, su propia evolución y del entorno hasta nuestros días.
- Una segunda etapa, el seguimiento del ambiente interior cuya finalidad es proporcionar datos objetivos de parámetros higrotérmicos para realizar la evaluación y diagnóstico del estado de conservación del patrimonio cultural y el confort térmico. Las iglesias fueron monitorizadas durante veintidós meses, excepto la iglesia de nuestra señora de la Victoria, que por mantenimiento



**Figura 1.-** Fotografía de emplazamiento y levantamiento planimétrico.

y obras solo se pudo hacer un seguimiento ambiental durante dieciséis meses.

- En la tercera etapa se elaboran los modelos tridimensionales para la simulación del campo higrotérmico. Los datos de la monitorización se emplean para generar los modelos de simulación informática, elaborando modelos digitales tridimensionales de cada caso de estudio. Estos modelos espaciales reproducen cada edificio y su entorno, desde el punto de vista geométrico, climático y constructivo, empleando para ello el programa informático Design Builder.

Este modelo informático se valida a partir de las mediciones *in situ*. La metodología de validación se basa en la comparación de un importante número de datos horarios registrados *in situ* con los resultados obtenidos de la simulación informática una vez generado el modelo.

- Una cuarta etapa donde se desarrollan propuestas de mejoras del acondicionamiento ambiental de la muestra mediante la aplicación de técnicas ambientales pasivas y activas en los modelos de simulación, para la conservación y el confort térmico.

- Finalmente, en la quinta etapa se analiza y valora los resultados obtenidos de los modelos informáticos para determinar la adecuación de las condiciones ambientales para la conservación, confort térmico y eficiencia energética.

El esquema propuesto para la gestión de las condiciones ambientales en ningún caso tiene como objetivo proporcionar soluciones específicas o reglas sobre cómo conseguir estándares de niveles estrictos de dichas condiciones, sino que pretende proporcionar una metodología de trabajo normalizados que permite tomar decisiones adecuadas y coordinadas sobre futuras intervenciones en edificios históricos, sin poner en riesgo el bien patrimonial.

### Caso de estudio

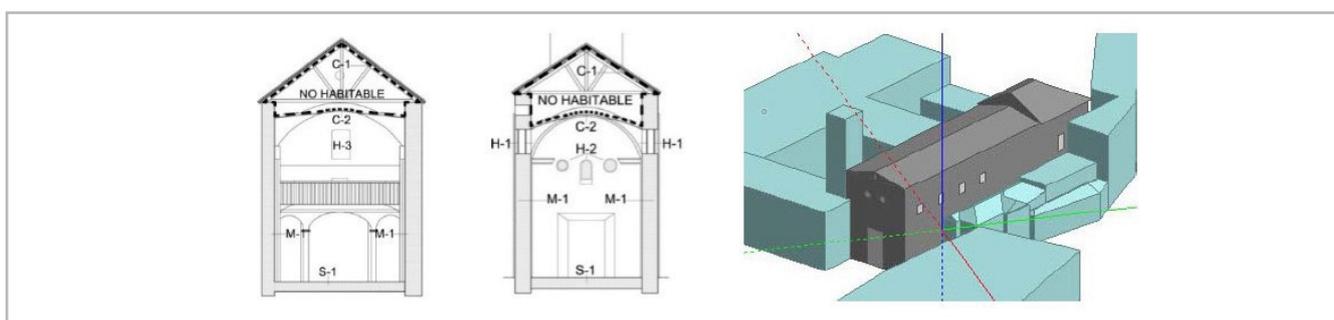
Para este estudio se analizaron tres espacios religiosos que se encontraban en un mismo ámbito geográfico y por lo tanto tenían unas condiciones climatológicas externas muy similares. Los espacios religiosos se encontraban en la localidad de Morón de la Frontera, en la provincia de Sevilla (España). Estas iglesias, forman parte del patrimonio inmueble de Andalucía, algunas de las mismas declaradas BIC (Bien de Interés Cultural), con la categoría de monumento, como es el caso de la Iglesia de San Francisco de Asís

Las iglesias, pertenecían a un mismo periodo constructivo, comprendido entre 1550-1650 para poder realizar un estudio comparativo. Estas presentaban variaciones en cuanto a forma de planta, sistema constructivo de cubierta, huecos de ventanas, etc., factor que enriquecía el estudio, ya que se podía determinar la influencia de estas características sobre el comportamiento higrotérmico en las mismas.

En la figura 2, se muestran las tres iglesias de estudio, la primera, la iglesia de San Francisco de Asís del año 1550, presenta una planta en forma cajón, cubierta por una bóveda de cañón y lunetos reforzados por pares de arcos fajones. La planta está orientada de manera que los muros longitudinales, se encuentran, con una ligera desviación al norte. En los alrededores de la iglesia están adosados las demás dependencias como capillas, casa parroquial y sobre una de las medianeras se levanta el claustro del antiguo monasterio. La segunda, la iglesia Nuestras Señora de la Merced del 1638, de planta cruz latina con una falsa bóveda de cañón con arcos fajones y lunetos que cubren los brazos del crucero, mientras que una bóveda semiesférica sobre pechinas cubre el crucero. Por último, la iglesia Nuestra Señora de la Victoria del año 1584, formada por una nave de cinco tramos, con capillas unidas mediante arcos de medio punto. La nave se cubre con tejado a dos aguas cuyo interior está cubierto con un artesonado de madera. A continuación, se muestra las características constructivas de las iglesias analizadas, véase [tabla 1].



**Figura 2.-** Muestra de las iglesias de estudio. 1) Iglesia de San Francisco 2) Iglesia de Nª Señora de la Merced 3) Iglesia de Nª Señora de la Victoria.



**Figura 3.-** Modelos tridimensionales. 1) Iglesia de San Francisco 2) Iglesia de Nª Señora de la Merced 3) Iglesia de Nª Señora de la Victoria.

**Tabla 1.-** Características constructivas de las iglesias

	<b>San Francisco</b>	<b>Ntr.ª. Señora de la Merced</b>	<b>Ntr.ª. Señora de la Victoria</b>
Muros externos	Mampostería y ladrillos	Mampostería y ladrillos	Mampostería y ladrillos
Bóveda	Piedra y madera	Piedra y madera	-
Cubierta	Tejas árabes, madera y cañizos	Tejas árabes, madera y cañizos	Tejas árabes, vigas de acero, artesanado de madera
Suelos	Mármol	Mármol	Mármol
Ventanas	Vidrio simple	Vidrio doble	Vidrio simple

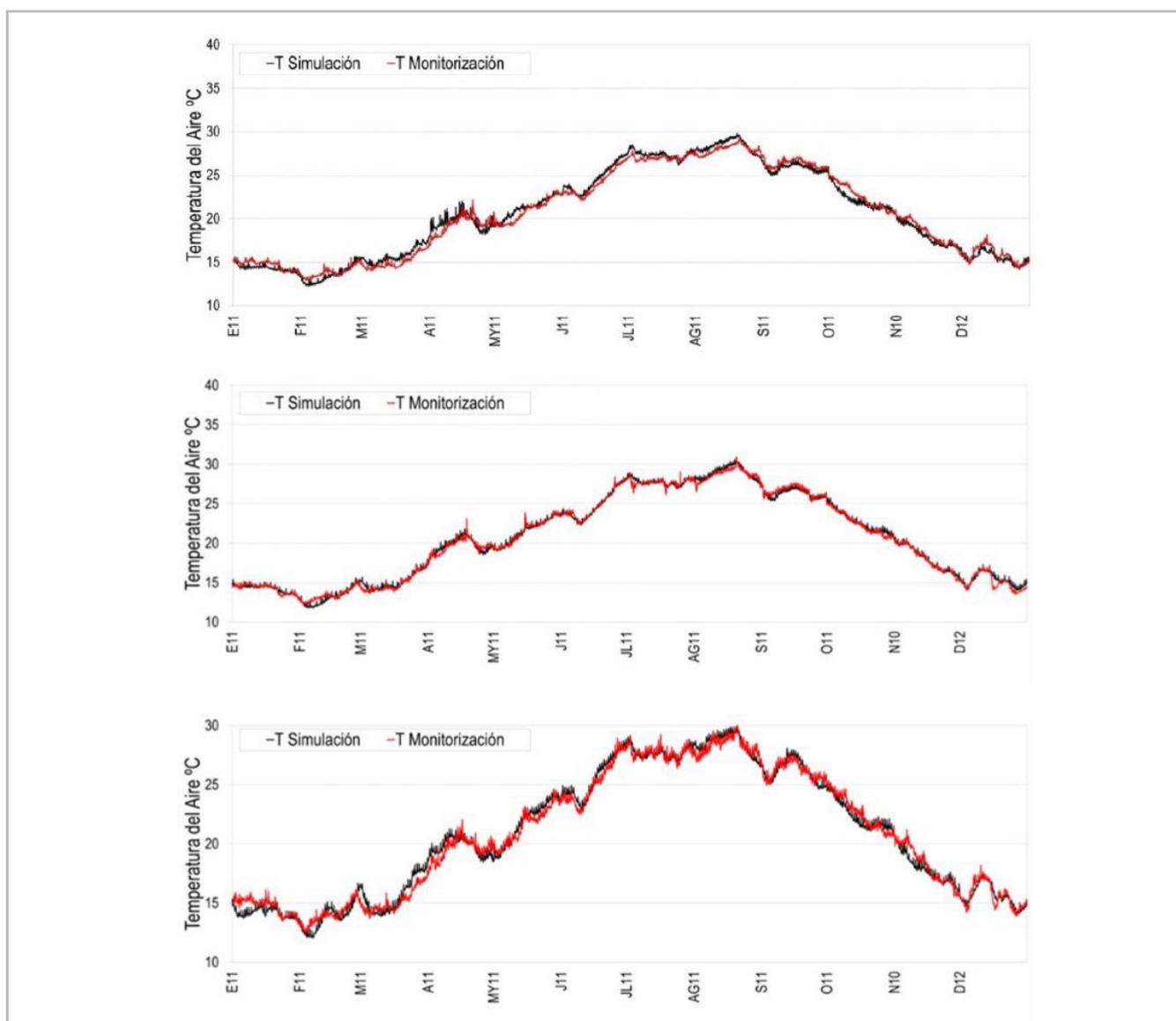
### Elaboración de modelos tridimensionales para la simulación del campo higrotérmico

El interior de estos espacios religiosos fue monitorizado para realizar un seguimiento del ambiente interior para proporcionar así datos objetivos para realizar una evaluación de diagnóstico del estado de conservación del patrimonio inmueble y mueble. Igualmente, uno de los avances en este estudio, fue que estos datos obtenidos de mediciones de temperatura del aire, temperatura superficial, humedad relativa y absoluta y velocidad de aire interior se utilizarían como referencia real para los procesos de validación de las simulaciones de modelos virtuales. Esto nos permitió, tener una herramienta fundamental dentro de la metodología aplicada a los criterios de diseño del acondicionamiento ambiental de edificios patrimoniales.

Los datos de monitorización se emplearon para generar los modelos de simulación informática, elaborando mo-

delos digitales tridimensionales de cada iglesia de estudio. Se realizaron varios modelos espaciales que reproducían cada iglesia y su entorno, desde el punto de vista geométrico, climático y constructivo, empleando el programa informático Design Builder.

Los modelos informáticos tridimensionales tenían un comportamiento higrotérmico muy similar al que había en la realidad. La validación de un modelo consistió en la comparación de los resultados simulados con los datos reales recogidos en un período de tiempo. La metodología de validación se basó en la comparación de un importante número de datos horarios registrados *in situ* con los resultados obtenidos de la simulación informática una vez generado el modelo. Un modelo era válido cuando la variación de las mediciones *in situ* y las del modelo virtual, difería menos de 1 °C de temperatura y 1.5 g/m<sup>3</sup> de humedad absoluta durante el 95 % del tiempo y menos del 5 % de humedad relativa durante el 90 % del tiempo. Véase [figura 4]



**Figura 4.-** Validación de modelo tridimensionales, temperatura del aire. 1) Iglesia de San Francisco 2) Iglesia de N<sup>a</sup> Señora de la Merced 3) Iglesia de N<sup>a</sup> Señora de la Victoria.

## Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados y el análisis global del comportamiento higrotérmico de la muestra en el caso de la aplicación de las técnicas ambientales activas y mixtas.

—*Monitorización y realización de mediciones in situ, proceso y valoración higrotérmica*

Las medidas higrotérmicas llevadas a cabo in situ en cada una de las iglesias objeto de estudio, nos permitió evaluar y caracterizar su comportamiento higrotérmico. Estos edificios se caracterizaban por presentar una elevada inercia térmica, derivada de sus sistemas constructivos. Asimismo, al estar rodeadas de otras edificaciones, la incidencia e influencia solar sobre sus cerramientos exteriores era mínima.

Las mediciones reflejaron que las diferencias de temperatura y humedad relativa interiores (valores promedios) no eran significativos, excepto en los meses más cálidos (finales de primavera, verano y principios de otoño). Véase [figura 5].

En verano, o cuando las temperaturas interiores eran más elevadas, la humedad absoluta interior aumentaba sensiblemente por la evaporación del agua contenida en el suelo y parte inferior de muros (humedad de capilaridad).

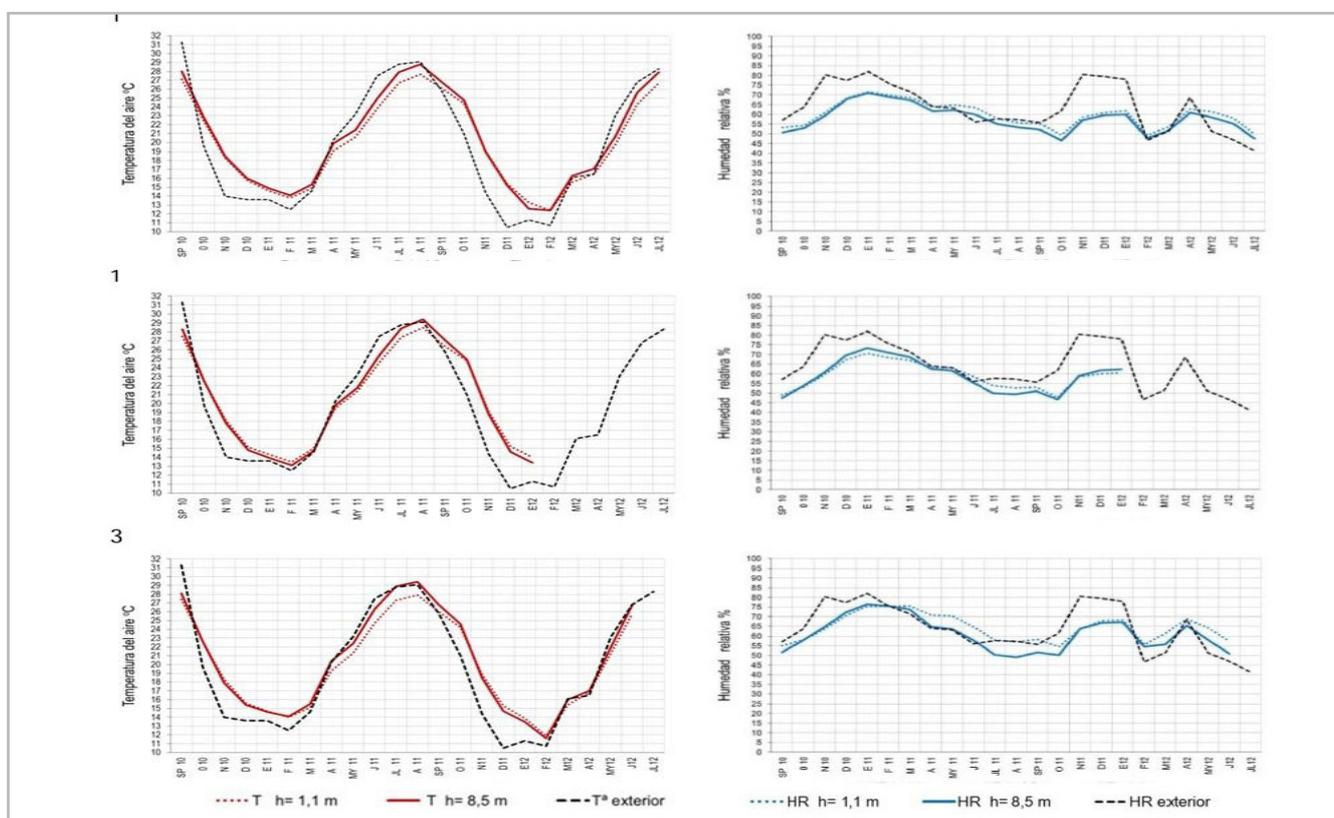
Los meses más fríos y en primavera la temperatura interior tenía una mayor incidencia sobre la humedad absoluta.

Igualmente, se caracterizó la temperatura radiante interior de la muestra de iglesias mediante el empleo de equipos de medida infrarrojas. En los ensayos realizados se observó que en invierno se producía un ligero gradiente térmico vertical en los muros que era apreciable principalmente a últimas horas del día. Esa diferencia de temperatura entre las partes baja y alta se debía a la estratificación del aire y a la influencia de la radiación solar sobre las cubiertas [figura 6]. La diferencia de temperatura oscilaba entre 0.5 °C. En verano, el gradiente térmico era más acusado entre las zonas altas y bajas de la iglesia, en torno a 2.5°C.

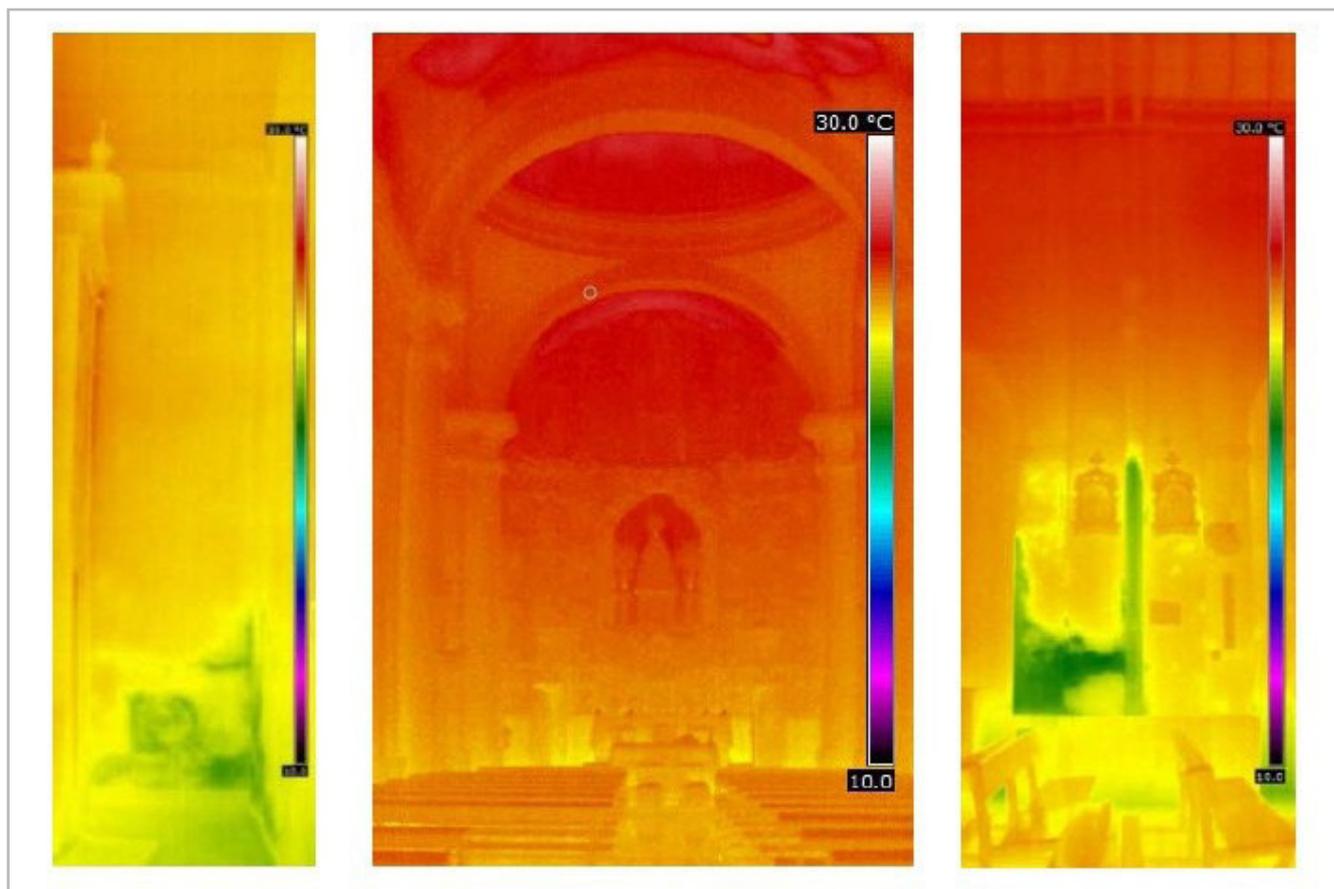
Como era esperable, los únicos flujos de calor significativos de la envolvente se observaban en los elementos constructivos de menor resistencia e inercia térmica: huecos de muros y cubierta.

En todas las iglesias se detectaron humedades de capilaridad en la parte baja de los muros que provocaban evaporación de agua y aumento la de la humedad ambiental interior.

El suelo de las iglesias era la superficie que presentaba una temperatura radiante más baja (entre 21 °C en verano y 14 °C en invierno). Esto generaba que, en verano, este elemento actuara como disipador de cargas térmicas y regulador de temperatura interior.



**Figura 5.-** Valores medidos de T y HR (Promedios mensuales). 1) Iglesia de San Francisco 2) Iglesia de Nª Señora de la Merced 3) Iglesia de Nª Señora de la Victoria.



**Figura 6.-** Temperatura radiante en el mes de junio. 1) Iglesia de San Francisco 2) Iglesia de Nª Señora de la Merced 3) Iglesia de Nª Señora de la Victoria.

<b>IGLESIA SAN FRANCISCO DE ASÍS</b>				
	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO
Sin riesgo	19%	23%	15%	0%
Riesgo bajo	80%	77%	55%	88%
Riesgo alto	1%	0%	30%	12%
<b>IGLESIA NUESTRA SEÑORA DE LA MERCED</b>				
	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO
Sin riesgo	24%	25%	20%	0%
Riesgo bajo	74%	75%	73%	98%
Riesgo alto	2%	0%	7%	2%
<b>IGLESIA NUESTRA SEÑORA DE LA VICTORIA</b>				
	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO
Sin riesgo	14%	13%	6%	14%
Riesgo bajo	81%	87%	69%	81%
Riesgo alto	5%	0%	25%	5%

**Tabla 2.-** Porcentaje de tiempo en riesgo biodeterioro.

En cuanto al riesgo de biodeterioro del contenido mueble de las diferentes iglesias [tabla 2], el análisis de las mediciones in situ puso de manifiesto que durante los meses de primavera y verano era cuando tenía lugar los mayores periodos de riesgo al biodeterioro.

Igualmente, la pluviometría tenía una notable influencia en el aumento del riesgo al biodeterioro. En los años más lluviosos, el porcentaje de datos con riesgo alto al biodeterioro era mayor.

Del análisis del riesgo mecánico sobre el patrimonio mueble de las iglesias se concluyó que las desviaciones de la humedad relativa tenían una mayor incidencia sobre la preservación de las obras de arte, pues el porcentaje de tiempo en riesgo era mayor que en las desviaciones de temperatura. En general, las estaciones que presentan un mayor porcentaje de tiempo en riesgo, debido a las variaciones de la humedad relativa, eran otoño, invierno y primavera.

— *Elaboración de modelos tridimensionales para la simulación del campo higrotérmico y ajuste de los modelos informáticos a partir de las mediciones in situ*

Para validar los modelos de simulación higrotérmica en este tipo de edificios, fue básico fijar adecuadamente la

temperatura del terreno, ya que tenía gran influencia en los resultados. A diferencia de otros investigadores, que proponen considerar los suelos en contacto con el terreno como elementos adiabáticos, en el caso que nos ocupa se comprobó que cuando incluíamos este como adiabático no se validaban los modelos de simulación, especialmente en verano, ya que este componente constructivo actuaba como disipador de calor (Huijbregts, Schellen, Schijndel & Ankersmit 2015). Esto es una condicionante del clima, Mediterráneo, debido a las elevadas temperaturas en los meses de primavera y verano. Para poder validar los modelos de simulación, fue necesario medir in situ la temperatura superficial del suelo y fijar para el terreno una temperatura 2 °C por debajo.

La humedad contenida en los materiales de construcción, que es bastante frecuente en estas construcciones, dificultaba la validación de los modelos, ya que alteraba las condiciones ambientales por el efecto de evaporación del agua en el interior del edificio. Por ello, se consideró necesario utilizar herramientas que permitieran simular este efecto. Así pues, en edificios históricos que presenten humedad en los muros por capilaridad, es necesario utilizar herramientas de simulación que permitan variar la humedad absoluta.

— *Propuestas de mejoras del acondicionamiento ambiental de la muestra para la conservación y el confort térmico y simulación informática de las propuestas*

Las diferentes propuestas de estudio se dividieron en varios bloques, técnicas ambientales pasivas (conjunto de acciones de rehabilitación de la envolvente de la iglesia); técnicas ambientales activas (implementación de sistemas de climatización permanente).

En función a la evaluación de estas técnicas, las especificaciones ambientales para cada edificio tuvieron en consideración un amplio rango de materiales y sus combinaciones. La humedad relativa fue el parámetro más crítico en este campo y en consecuencia debía mantenerse en un nivel determinado tan estable como fuera posible. Al definir el límite del rango definitivo, se supuso las variaciones de HR para limitar daños mecánicos ocasionados por el microclima en materiales orgánicos higroscópicos de acuerdo con la Norma UNE-EN 15757 (UNE-EN 15757, 2011). Igualmente se fijaron los límites superiores para HR para evitar un biodeterioro por

mohos, pudriciones, insectos, etc. Finalmente, según las normativas anteriores y la UNE-E-EN 15759-1 (UNE-E-EN 15759-1 2012) se establecieron los siguientes valores:

El modo de funcionamiento de los diferentes sistemas de climatización vino determinado principalmente por la necesidad de encontrar un equilibrio entre los requisitos para la conservación y el confort térmico, el tipo de utilización del edificio y la eficiencia energética. Los tipos de funcionamiento propuesto fueron los siguientes:

**Funcionamiento 24 horas:** El objetivo era proporcionar un microclima especificado de forma permanente, durante todo el año. El sistema de climatización funcionaba las 24 horas del día.

**Funcionamiento 12 horas:** Se proporcionaba un microclima especificado durante un periodo de tiempo limitado. En este caso el sistema funcionaba sólo durante el día, de 9.00 a.m. hasta 22.00 p.m.

**Funcionamiento régimen de uso de la iglesia:** Proporcionaba unas condiciones ambientales adecuadas únicamente cuando se utilizaba la iglesia, durante la celebración del culto. Debido a la inercia térmica de la iglesia, los sistemas debían encenderse al menos una hora antes de que comenzara la misa.

— *Análisis y valoración de las condiciones ambientales tras la implantación de técnicas ambientales*

Después de aplicar y combinar distintas técnicas ambientales pasivas y activas se observó que las propuestas de acondicionamiento ambiental que solían llevarse a cabo en los espacios religiosos situados en zonas climáticas más frías (norte y centro de Europa), no tenían la misma validez de aplicación en climas templados (clima Mediterráneo), debido a que las primeras estaban orientadas básicamente para condiciones extremas durante invierno.

Las distintas técnicas ambientales pasivas consideradas en esta investigación no garantizaban el confort a lo largo de un año, especialmente durante las estaciones de invierno y primavera. Las propuestas de rehabilitación que utilizaban exclusivamente técnicas ambientales pasivas no conseguían eliminar totalmente el riesgo mecánico y el riesgo al biodeterioro de los materiales que forman parte del patrimonio mueble.

**Tabla 3.-** Condiciones interiores de diseño para la conservación y el confort humano

Condiciones típicas	Temperatura operativa			Velocidad			Humedad relativa
	mínima	óptima	máxima	mínima	óptima	máxima	
Invierno	20	22	24	0,05	0,15	0,25	30-65%
Verano	23	25	27	0,1	0,25	>0,50	30-65%

Cuando se aplicaban simultáneamente varias técnicas pasivas se lograba paliar los efectos anteriores. La combinación que conseguía los mejores resultados para la preservación del patrimonio era la que contempla la utilización de doble ventana, aislamiento de las cubiertas (bóvedas o artesonados), aislamiento térmico de muros y suelo.

Las intervenciones que incorporaban aislamiento térmico en el suelo de las iglesias repercutían desfavorablemente en el confort térmico de los feligreses, ya que se eliminaba su efecto como disipador térmico durante gran parte del año.

La aplicación de técnicas ambientales activas, en combinación con las pasivas, en régimen de funcionamiento durante 24 h y 12 h, mejoraba las condiciones ambientales originales y disminuía el riesgo de degradación, no existiendo datos propicios para que se produjera el biodeterioro de los de las obras de arte.

Los sistemas activos estudiados que no realizan un control absoluto de la humedad interior (humectación o deshumectación), como era el caso de equipo autónomo, UTA (Unidad de Tratamiento del Aire) a dos tubos y solo ventilación agravaban la situación inicial, ya que los límites establecidos para este parámetro se superaban en primavera, verano y otoño, existiendo, por tanto, riesgo de deterioro del patrimonio mueble.

Cuando los sistemas activos de acondicionamiento ambiental actuaban únicamente cuando el edificio estaba ocupado (régimen de uso), existía riesgo de biodeterioro principalmente en primavera, en torno al 5% del tiempo.

El riesgo de daño mecánico sobre el patrimonio mueble de la muestra, no se producía si los sistemas activos funcionaban durante las 24 h, excepto en aquellos casos donde los equipos no controlan la HR, o cuya función exclusiva era la ventilación de las iglesias. Cuando el periodo de funcionamiento era de 12 h, existía la posibilidad de que las obras sufrieran daños mecánicos durante el 10%-15% del tiempo y con el funcionamiento en régimen de uso durante el 5% -10% del tiempo.

## Conclusiones

Los edificios religiosos son una parte importante del patrimonio cultural, son documentos de nuestra herencia y tenemos la necesidad de preservarlos para el presente y para las futuras generaciones.

Las características esenciales de estos edificios son sus sistemas constructivos (antiguas técnicas de edificación); que no fueron diseñados como viviendas o como espacios de trabajo con un uso discontinuo, y que por su decoración son edificios vulnerables.

Originalmente, la mayoría de los lugares históricos de culto no estaban acondicionados, pero actualmente, estos edificios están siendo climatizados para proporcionar el confort térmico a los fieles y visitantes y para mejorar las condiciones del clima interior para la conservación de los edificios y de su contenido o para lograr una combinación de ambas. No obstante, los requisitos normales de climatización para el confort térmico pueden estar en conflicto con los de la conservación, y por lo tanto se necesita llegar a un equilibrio.

Muchos de estos recintos están siendo equipados de sistemas de acondicionamiento ambiental y, en muchos casos, de forma inadecuada. Así pues, para tratar estas cuestiones debemos cambiar la manera de intervenir en estos edificios existentes, de modo que reduzcamos los impactos negativos en su preservación y en el medioambiente.

Así que, con el fin de hacer frente a estos retos, se desarrolló una metodología que identificara el modo más adecuado de acondicionar estos espacios. La metodología utilizada en este estudio pudo evaluar la aplicación de técnicas ambientales pasivas y activas en las iglesias históricas localizadas en un clima Mediterráneo.

Con este trabajo de investigación se ha procurado contribuir en el aporte de soluciones a un problema funcional que se está produciendo hoy en día y donde las técnicas que se están aplicando no están presentando, en general, resultados óptimos. La aplicación de un método experimental contrastado permitió afirmar que la implementación de las propuestas de rehabilitación ambiental mejoraría las condiciones ambientales para la preservación del patrimonio y el confort humano. Igualmente, se pudo determinar el consumo de la instalación y estudiar previamente la viabilidad del sistema.

El presente trabajo, ha propuesto profundizar en el conocimiento del acondicionamiento higrotérmico de espacios religiosos para ofrecer a los técnicos competentes las pautas de diseño que le permitan predecir la conducta higrotérmica de estos espacios antes y después de la aplicación de técnicas ambientales.

## Referencias

- BALOCCO, C., COLAIANNI, A. (2018). "Assessment of energy sustainable operations on a historical building. The Dante Alighieri High School in Florence". *Sustainability*, 10 (6), 2054: 1-24. <https://doi.org/10.3390/su10062054>
- BERARDINIS, P., ROTILIO, M., CAPANNOLO, L. (2017). "Energy and Sustainable Strategies in the renovation of existing buildings: an Italian Case Study". *Sustainability*, 9 (8) 1472: 1-20. <https://doi.org/10.3390/su9081472>

CAMUFFO, D., PAGAN, E., RISSANEN, S., BRATASZ, L., KOZLOWSKI, R., CAMUFFO, M. V. (2010). "An advanced church heating system favourable to artworks a contribution to European standardisation". *Journal of Cultural Heritage*, 11: 205-219. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.02.008>

DIRECCIÓN GENERAL DE BELLAS ARTES Y BIENES CULTURALES Y DE ARCHIVO Y BIBLIOTECA. (2009). "Conservación preventiva en lugares de culto". Actas de las jornadas celebradas en el Instituto del Patrimonio Cultural de España. Madrid: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

ERHARDT, D., MECKLENBURG, M. (1994). "Relative Humidity re-examined in Preventive conservation. Practice, Theory and Research". London: *The contributions to the Ottawaz II Congress*. Roy, Ashok and Smith, Perry: 32-38.

HUIJBREGTS, Z., SCHELLEN, H., SCHIJNDEL, J., ANKERSMIT, B. (2015). "Modelling of heat and moisture induced strain to assess the impact of present and historical indoor climate conditions on mechanical degradation of a wooden cabinet". *Journal of Cultural Heritage*, 16: 419-427. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.11.001>

MAGRINI, A. Y. (2016). "The energy performance improvement of historic buildings and their environmental sustainability assessment". *Journal Cultural Heritage*. 21: 834-841. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.03.012>

MOSOARCA, M., et. al. (2017). "Failure analysis of historical buildings due to climate change". *Engineering Failure Analysis*, 82: 666-680. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.013>

MUÑOZ, C. (2016). "Air conditioning and passive environmental techniques in historic churches in Mediterranean climate. A proposed method to assess damage risk and thermal comfort pre-intervention, simulation". *Energy and Buildings*, 130: 567-577. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.078>

MUÑOZ-GONZALEZ, C. (2016). "Study of the implantation of the technologies of hygrothermal conditioning in the refurbishment project of churches. The case of Baroque churches in Moron de la Frontera". [PhD thesis]. Sevilla.

UNE-E-EN 15759-1. (2012). "Conservación del patrimonio cultural. Clima interior. Parte 1: Recomendaciones para la calefacción de iglesias, capillas y otros lugares de culto". Madrid.

UNE-EN 15757. (2011). "Conservación del patrimonio cultural. Especificaciones de temperatura y humedad relativa para limitar los daños mecánicos causados por el clima a los materiales orgánicos higroscópicos". Madrid.

WESSBERGA, M., VYHLÍDAL, T. (2019). "A model-based method to control temperature and humidity in intermittently heated massive historic buildings". Sweden: *Building and Environment*, 159 (15): 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.024>

## Autor/es



### **Carmen M.<sup>a</sup> Muñoz González**

[carmenmgonzalez@uma.es](mailto:carmenmgonzalez@uma.es)

Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Profesora Sustituta Interina. Universidad de Málaga

En el año 2008 finalizó sus estudios en la E.T.S de Arquitectura. Compaginando con el trabajo como arquitecta en estudios de arquitectura comenzó el Máster de Arquitectura y Patrimonio Histórico en el año 2008. Ese mismo año se incorporó como colaboradora en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la E.T.S.A. de la Universidad de Sevilla. Actualmente trabaja como profesora en del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Málaga y forma parte del grupo de investigación denominado TEP130: Arquitectura, Patrimonio y sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía, perteneciente al Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI). Ha trabajado como investigadora en varios proyectos de investigación desde el año 2010 hasta la actualidad, TECNOCAI-ACCIONA, Caracterización arquitectónica del parque de ascensores y su huella ecológica, SUB-UMBRA y Rehabilitar el Carmen, Plan de rehabilitación energética del patrimonio residencial malacitano. En el año 2012 comenzó su doctorado con mención internacional, el cual finalizó en 2016. Su trayectoria en el campo de investigación se ha centrado en la línea de Building, Environment & Energy, y especialmente en dos líneas: Energy Efficiency and Lighting.

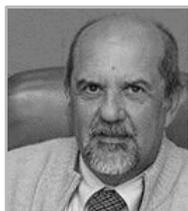


### **Ángel Luis Rodríguez León**

[leonr@us.es](mailto:leonr@us.es)

Departamento de Construcciones Arquitectónicas Profesor Titular Universidad de Sevilla

Desde el año 1996, fecha en la que finalizo sus estudios en la E.T.S. de Arquitectura, forma parte del grupo de investigación denominado TEP130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía, perteneciente al Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación. Mantiene una actividad docente e investigadora desde hace 22 años. Ha sido responsable de varias asignaturas de Acondicionamiento ambiental e Instalaciones del título de Arquitecto, siendo profesor en varios cursos de doctorado y títulos oficiales de máster, tanto de carácter nacional e internacional. En la actualidad es director del Título Propio de la US denominado Máster en Proyecto de Instalaciones en arquitectura: diseño, cálculo y eficiencia energética. Su trayectoria dentro del citado grupo de investigación se ha centrado en la línea: Building, Environment & Energy, y específicamente en dos sub-líneas: Room Acoustics y Energy Efficiency.

**Jaime Navarro Casas**
[jnavarro@us.es](mailto:jnavarro@us.es)

 Departamento de Construcciones  
Arquitectónicas  
Catedrático

Es doctor en Arquitectura y Catedrático de Construcciones Arquitectónicas desde 1984. Ha sido director del Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción (I.U.A.C.C) de la Universidad de Sevilla, director de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla y además de miembro de la Comisión de Investigación de dicha Universidad. Forma parte del grupo de investigación denominado TEP130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía, perteneciente al Plan Andaluz de Investigación. Actualmente, es el arquitecto de la Catedral de Sevilla. Es miembro de la comisión Docente del Máster Arquitectura y Restauración del Patrimonio Histórico. Su trayectoria dentro del citado grupo de investigación se ha centrado en la línea: Building, Environment & Energy, y específicamente en dos sub-líneas: Room Acoustics y Energy Efficiency and Artificial and Natural Lighting.

**Catherine Teeling**
[catherine.teeling@port.ac.uk](mailto:catherine.teeling@port.ac.uk)

 Department Portsmouth School of  
Architecture. Lecture. Creative and Cultural  
Industries. Universidad de Portsmouth

After a career in practice of over 12 years and following the completion of a masters degree in 'Computation in Design' in 1996, Catherine has been working in academia as a senior lecturer in Architecture, firstly at the University of Greenwich teaching post grad level Architecture & as course leader for Masters in Urban Design. Where she secured 249K funding from HEFCE (Higher Education Funding Council of England) for a three year best practice learning and teaching project exploring the 'Creative use of Computers in Design' and established the first Electronic Design Studio (EDS) within a School of Architecture in the UK. The culmination of the project resulted in the first International Symposium on Digital Creativity in 2000. Catherine has worked at UCLA and undertook a six-month sabbatical as a visiting professor at Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston, USA. Where she worked within the Computation Research Group and taught in the School of Architecture MIT. From 2003 she has been a Principal Lecturer and Course Director for masters in Architecture and undergraduate Interior Architecture & Design, at the Canterbury School of Architecture now the University of the Creative Arts.

**Jonathan Ruiz Jaramillo**
[jonaruizjara@uma.es](mailto:jonaruizjara@uma.es)

 Departamento de Construcciones  
Arquitectónicas Profesor Ayudante Doctor  
Universidad de Málaga

Arquitecto por la Universidad de Sevilla y Master en peritación y reparación de edificios. Doctor Arquitecto desde 2012, su tesis doctoral titulada "Comportamiento sísmico de edificios históricos. Las iglesias mudéjares de Sevilla" obtiene el premio Focus-Abengoa en el año 2013. Su labor investigadora se inicia en el año 2006 obteniendo una beca de formación de personal investigador (FPI) en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas en la E.T.S. de Arquitectura de Sevilla en el marco del proyecto de investigación "Obtención de un método que garantice y optimice el empleo de elementos de madera al exterior frente a los agentes medioambientales". En el año 2011 se incorpora como profesor del Área de Construcciones Arquitectónicas de la ETS de Arquitectura de la Universidad de Málaga, donde en la actualidad desarrolla su actividad docente e investigadora. Ha participado en diversos proyectos de investigación como "Comportamiento sísmico de edificios construidos con técnicas tradicionales (fábrica de piedra, ladrillo, adobe, tapial, madera, etc.). Evaluación de la seguridad estructural. Propuesta de técnicas de rehabilitación no destructivas"; "Obtención de un método no contaminante y sustentable que permita la conservación de edificios antiguos construidos en madera. Aplicación al centro histórico de Morelia (México)"; "Restauración de bienes muebles e inmuebles en madera"; "Caracterización de materiales, componentes y estimación de características resistentes de iglesias altioplánicas (adobe y quincha), museo del olivo en quinto (tapial), restos tartésicos del carambolo"; "Norma sísmica. Análisis previo y rehabilitación ante daños de edificios e infraestructuras existentes". En la actualidad, junto a Luis García Pulido, es investigador principal del proyecto "Las atalayas que defendieron el reino nazarí de Granada. Análisis y documentación científica (NAZALAYA)".


<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.758>

# Environmental degradation of Modern non-balanced glasses

Teresa Palomar, Alexandra Rodrigues

**Abstract:** Crizzling is an alteration pathology related to non-balanced glasses (high content of flux oxides and low content of stabilizer ones), which can produce an intense damage such as transparency losses, appearance of drops on the surface or cracking. In this study two case studies (outdoor and indoor environment) were presented. The main alteration agent for these glasses was the water (rain, condensation and environmental humidity). In the outdoor environment, the rain washed away the  $[\text{OH}^-]$  ions formed during the alteration; however, the exposure to cyclic conditions accelerated its alteration rate. In the indoor environment, early stages revealed to consist of an alkali leaching that concentrates on the surface, on specific areas, that were related to water adsorption and consistent with the weeping phenomenon. Cracking and flaking of the surface represents a later stage, occurring specifically in unbalanced compositions.

**Keywords:** Glass, crizzling, natural environment, degradation mechanism

## Degradación ambiental de vidrios modernos no equilibrados

**Resumen:** El *crizzling* es una patología de alteración relacionada con vidrios no equilibrados (con elevado contenido de óxidos fundentes y bajo de óxidos estabilizantes), que puede producir graves daños como pérdida de transparencia, aparición de gotas en la superficie o fisuras. En este estudio, se presentan dos casos de estudio (ambiente exterior e interior). El principal agente de alteración de estos vidrios es el agua (lluvia, condensación y humedad ambiental). En ambiente externo, la lluvia lavó los iones  $[\text{OH}^-]$  formados durante la alteración; sin embargo, la exposición a condiciones cíclicas aceleró su velocidad de degradación. En ambientes interiores, se observó el estado inicial consistente en la lixiviación de los alcalinos a la superficie, en áreas relacionadas con la adsorción de agua y el fenómeno de *weeping*. La formación de fisuras y el desprendimiento de la superficie corresponden a un estado más avanzado que ocurre específicamente en composiciones no equilibradas.

**Palabras clave:** Vidrio, *crizzling*, ambiente natural, mecanismo de degradación

## Introduction

Glass is usually related to a material with high chemical durability. However, its stability depends on the chemical composition and, therefore, the strength and distribution of the chemical bonds in the glass matrix.

Historical glasses are formed by a former oxide ( $\text{SiO}_2$ ), flux oxides which decrease the melting temperature of the glass ( $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$ ), and stabilizer oxides which create bridges in the structure to increase the chemical stability ( $\text{CaO}$  and  $\text{MgO}$ ). The presence of a low content of alkaline oxides, alkaline ions with low ionic radius ( $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+$ )

and the replacement of alkaline ions by  $\text{Ca}^{2+}$  or  $\text{Mg}^{2+}$  induce a high structural packing of the glass that favors their chemical durability (Fernández Navarro 2003). However, if the chemical composition of the glass is not balanced (high content of flux and low content of stabilizers), the chemical resistance decreases, accelerating the degradation rate. These low stable formulas can be due to an incorrect production technology, an over-purification of raw materials or a wrong batch formulation (Kunicki-Goldfinger 2003).

Another important factor for glass alteration is the environmental conditions. In outdoor environments, there are several factors that can react with the glass surface. The

most aggressive ones are rain, wind, pollution, and aerosols (Woisetschläger *et al.* 2000; Munier *et al.* 2002; Melcher and Schreiner 2005; Melcher *et al.* 2008; Gentaz *et al.* 2011; Lombardo *et al.* 2014; Palomar *et al.* 2018; Palomar *et al.* 2019). In an indoor environment, these alteration agents are minimized; however, high environmental humidity and volatile organic compounds (VOCs), mainly the formic acid from the wood of the furniture, can accelerate the alteration mechanism.

The non-balanced glasses are especially susceptible to be altered. Their fast degradation frequently produces transparency loss, color change, the appearance of drops on the surface, salts, alteration layers, cracking, peeling and fracture, among others (Kunicki-Goldfinger 2008). This process, denominated crizzling, has been observed in soda, potash, mixed-alkali and lead silicate glass with low content of CaO and MgO, and predominantly in glasses from the 17<sup>th</sup> to 19<sup>th</sup> centuries from Italy, UK, and Central Europe. The crizzling is a severe pathology on glasses, observed generally in indoor environments; however, it can be also produced in external environments.

The main objective of this study is to characterize the effect of two different atmospheres on historical unbalanced glasses. For that, two sets of historical samples from the Cathedral of Girona, Spain (outdoor environment) and Museu Nacional de Arte Antiga (MNAA), Portugal (indoor environment) were characterized and compared.

### **Characterization techniques**

The glass samples studied were characterized by the following techniques: optical microscopy (OM), X-ray fluorescence (XRF) spectrometry, and micro energy dispersive XRF, besides visual inspection.

OM was carried out by a Leica MZ16 reflected light microscope equipped with a Leica DC300 camera for Girona samples. The microscopic documentation in the case of MNAA replica samples was carried out using a light microscope (Axioplan 2, Zeiss) with digital camera (Nikon DMX). The whole surface area was observed in order to identify surface features.

For Girona samples, semi-quantitative chemical analysis by XRF was carried out by a PANalytical Axios wavelength dispersed X-ray spectrometer equipped with a tube of rhodium of 4 kW and 60 kV. Analytical determinations were undertaken through the standard-less analytical software IQ+ (PANalytical) based on fundamental parameters from synthetic oxides and well-characterized natural minerals. In addition, Sheffield glass nos. 7 and 10 (Society of Glass Technology) are commonly used as internal routine control standards. Powder samples (1 g approx.) for bulk XRF analysis were prepared by grinding body glass fragments, with their most external surfaces removed by polishing, in an agate mortar. After that, pressed boric acid pellets were

made, using a mixture of n-butylmethacrylate and acetone (10:90 wt. %) as binding medium. This methodology agrees with the recommendation of the *Corpus Vitrearum* for the stained-glass analyses.

For MNAA glassworks, the analyses had to be done in situ in the museum, by non-invasive techniques such as portable micro-X-ray fluorescence ( $\mu$ -EDXRF). The analyses were therefore achieved using a portable spectrometer ArtTAX 800, Bruker (Billerica, MA, USA). It operates with a molybdenum (Mo) X-ray source, focusing polycapillary lens and electro-thermally cooled xFlash (Si drift) detector, with 170 eV resolution. The accurate positioning system and polycapillary optics enabled a small area of primary radiation (70  $\mu$ m) at the sample. The excitation and detection paths can be purged with helium to allow the detection of low Z elements down to aluminium. Spectra were acquired under the following conditions: voltage 40 kV, intensity 0.6 mA and live time of 360 s. Helium purging was used to allow the determination of elements down to aluminium. Each glass was analysed in (at least) three different areas. Quantitative analyses were carried out with the WinAXIL program, making use of spectra obtained from glass standards (A, B, C, and D from Corning Museum of Glass, Corning, NY, USA). All CMOG glass standards were used to validate the quantitative procedure.

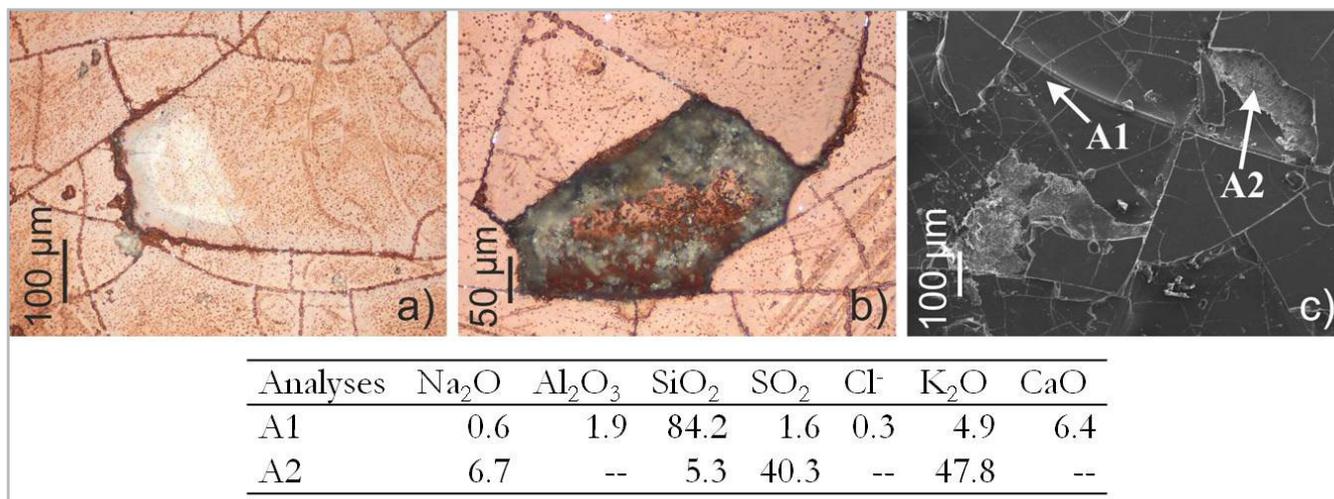
In-depth characterization of the corrosion processes were obtained with the production and use of replica samples, with similar composition to the historical materials. The methodology used for this study was adopted in VICARTE (Glass and Ceramics for the Arts) Research Unit since 2012 (Rodrigues *et al.* 2014), where through historical techniques – by blowing and fire-polishing the surfaces – they become as close as possible to the real historic ones. This revealed to be an important factor for the understanding of the alteration of these surfaces in the initial state, hence the composition of the glass surface is considered, as well as the chemistry of surface layers formed during the glass samples production.

### **Case Studies**

#### *—Crizzling in an outdoor environment: Cathedral of Girona*

The stained-glass rose window “La Asunción de la Virgen María” (“Assumption of the Virgin Mary”) is located in the west façade of the Cathedral of Girona since the 18<sup>th</sup> century. According to some documents from the cathedral, their glasses were imported from Venetia (Italy) (Palomar *et al.* 2011; Palomar 2013).

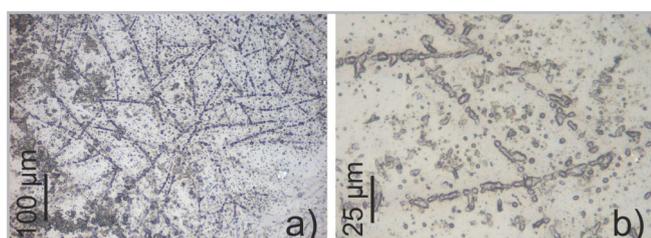
All the analyzed samples presented an advance state of alteration on their external surface. They showed several fissures and crystalline deposits inside some cracks [figure 1 a]. Even, the accumulation of deposits raised the dealkalinized areas that caused their detachment [figure 1 b]. The morphology of the cavity, with conchoidal form,



**Figure 1.-** a) Salts inside the fissures, b-c) detachment produced by salts growth. The attached table shows the results of the EDS microanalyses (wt. %).

pointed out that the detachment was mechanical instead of chemical, where the alteration front use to be continue or semispherical (Palomar 2018). It was also observed new fissures inside some cavities as result of the recurrence of the degradation process. The cracked surface presented a high content of SiO<sub>2</sub>, result of an advanced state of dealkalinization, with crystals of K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [figure 1 c]. The formation of this salt was due to the reaction of the K<sup>+</sup> ions leached from the glass and the SO<sub>2</sub> from the polluted environment. K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> was not detected because it has a higher solubility in aqueous solutions than K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Palomar *et al.* 2017).

Regarding the surfaces exposed to the indoor environment, the surface of the sample G1 was completely fissured, as the outdoor surface, instead of the other three glasses that showed a net of aligned pits [figure 2 a and b]. This uncommon pathology could also be related to the same alteration mechanism but in a lesser degree. The humidity and condensation inside the building produced the dealkalinization process. The tensions between the silica gel layer and the bulk glass were liberated forming fissures. In this indoor environment, the fissures can trap the condensed humidity creating a stationary state inside them. The basic species formed inside the fissures as result of the alkaline attack caused the dynamic breakage of the glass, which forms the aligned pits (Palomar and Llorente 2016).



**Figure 2.-** a-b) Net of aligned pits.

This different mechanism is directly related to the chemical composition of the glasses. All of them were potash-lime silicate glasses with a high content of K<sub>2</sub>O (~23 wt. %), SiO<sub>2</sub> (~65 wt. %), and relatively low content of CaO (~ 5 wt. %) [table 1]. However, small differences in their proportions are responsible for their different degree of alteration. The sample G1 has a higher ratio of alkaline oxides and silica ([K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O]/SiO<sub>2</sub> = 0.42) and the highest ratio between the potash and the calcium oxides (K<sub>2</sub>O/CaO = 4.72). This relatively higher content of alkaline oxides introduced several points of reticular discontinuity that promote hydration and surface dealkalinization, accelerating the degradation process.

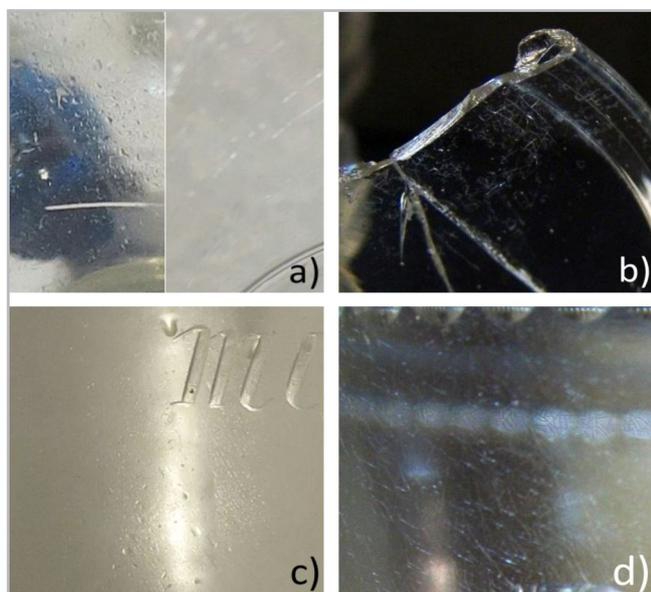
**Table 1.-** Chemical composition of the stained glasses from the Cathedral of Girona

Samples	Chemical composition (wt%)				
	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Others
G1	2.26	62.71	24.01	5.09	5.93
G2	2.20	66.69	22.60	5.29	3.22
G3	1.41	64.55	24.36	5.19	4.49
G4	2.16	67.51	21.68	5.89	2.76

—Crizzling in an indoor environment: Museu Nacional de Arte Antiga (Portugal)

The glass objects in Museu Nacional de Arte Antiga (MNAA), Lisbon, Portugal, presented a high variability of compositions. The case study of the group of glassworks collected by Ferdinand II of Portugal is an especially valuable one. This collection represents a chronology which spanned many centuries, as well as multiple and widespread European production centers (Rodrigues and Martinho 2015). The glass objects with unbalanced compositions in this case were selected from 17<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup> century productions, both Na- and K-rich compositions from the Venetian (or *façon de Venise*) and Bohemian types.

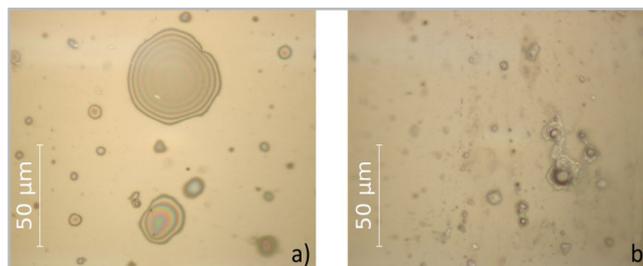
These unbalanced compositions exposed to an indoor environment presented signs of alteration. Museum objects, both with high Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O content, evidenced weeping and crizzling of the surfaces [figure 3 a-d].



**Figure 3.-** a) Weeping (droplets on the surface, left) and crizzling (cracking of the glass, right) on object MNAA1074vid, a Na-rich glass; b) crizzling on object MNAA1079vid, a Na-rich glass; c) weeping phenomenon on MNAA1009vid, probably K-rich glass; d) crizzling phenomenon on MNAA 1043vid, a K-rich glass with PbO.

Due to the impossibility to observe these glasses under the OM, or to perform more invasive analyses, some compositions similar to analyzed glasses were replicated [Table 2] and aged under museum-like conditions (45%, 55%, 65% and 75% RH and room temperature) for the understanding of the early stages of the alteration processes.

The observations made under OM [figure 4 a and b] revealed that in the early stages (1 year exposure), the formations on the surface were consistent with the weeping phenomenon, which often precedes the crizzling (Koob, 2006). This occurred to both Na-rich and K-rich glass types, although to different extents. No crizzling was observed in these early stages.



**Figure 4.-** OM analyses to the MNAA replica materials aged over 1 year. a) Na1 glass; b) K1 glass.

It seems that the cracking and flaking of the surface represents a later stage in an indoor environment, occurring specifically in unbalanced compositions. Moreover, crizzling was also more visible after washing, such as it was in the case of MNAA1079vid [figure 3 b]. When no run-off occurs (indoor environment), the alkaline species can still be partially retained in the alteration layer (Alloteau *et al.*, 2017). If some run-off occurs or if the surfaces are washed, leached and probably even partially retained alkali is removed from the surface. The  $\mu$ -EDXRF analyses performed on the surface of MNAA1079vid and MNAA1043vid clearly evidence a decrease in the alkaline species concentration, and an increase in silica (to around 80 wt. %, which could not have been the original glass composition) [table 3].

**Table 2.-** Chemical composition of the glassworks and replica materials from MNAA, Lisbon.

Samples (n=3)	Chemical composition (wt%)				
	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Others
MNAA1079vid	13.8*	79.0	2.73	3.47	1.0
Na1	17.2	70.5	3.00	5.00	4.3
Na2	14.8	70.5	3.15	5.25	6.3
MNAA1043vid	n.d.	80.0	7.5	1.9	10.6**
K1	-	69.1	18.0	3.5	9.4**

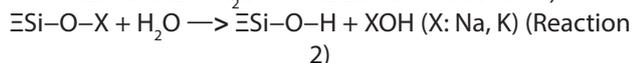
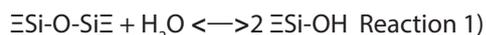
\* - both Na<sub>2</sub>O and MgO, obtained through  $\mu$ -XRF semi-quantification. /\*\* - includes addition of PbO /n.d. - not detected /S - replica materials were produced taking into consideration that the historic glass surfaces analyzed were depleted in alkali and enriched in SiO<sub>2</sub>, as can be seen in the analyses in Figure 1

**Table 3.-** Chemical composition of two very different areas of the surface of the glasswork MNAA1079vid.

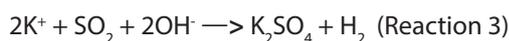
Samples (n=1)	Chemical composition (wt%)						
			Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Others
MNAA1079vid	Min. values	More leached	5.7	84.8	2.7	3.5	3.3
	Max. values	Less leached	14.1	78.3	2.7	3.5	1.4

## Discussion

In both environments, water was the main alteration agent of the unbalanced glasses. The rain (outdoor environment), the condensation water and the high humidity (indoor and outdoor environments) favor the leaching of the alkaline oxides from the glass lattice by the hydrolytic attack (Reaction 1) and the ionic exchange (Reaction 2). As result, a hydrated surface layer and drops of alkaline hydroxide were formed on the surface.



In an outdoor environment, the rainwater can wash the leached ions (alkaline, alkaline-earth and hydroxyl ions) from the glass surface. The removal of hydroxyl ions favors the maintenance of a neutral pH in the glass surface (Palomar *et al.* 2019). In addition, during the drought periods, the alkaline ions leached from the glass can react with the atmospheric gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ), solubilized in rainwater to form crystalline deposits (Reaction 3) (Melcher and Schreiner 2006).



In the indoor environment, the accumulation of the species  $[\text{OH}^-]$  in the surface can cause two different alteration mechanisms. In a humid environment, the hygroscopicity of the alkaline hydroxide (KOH and NaOH) can attract more water accelerating the ionic exchange and the hydrolytic attack (Reaction 1 and 2) (Rodrigues *et al.* 2018a; Rodrigues *et al.* 2018b) and, therefore, the advance of the alteration layer to the glass bulk. However, if the content of  $[\text{OH}^-]$  ions increases  $\text{pH} > 9$ , the siloxane bonds can be broken by the alkaline mechanism (Reaction 4). In both situations, the result is the formation of a thick alteration layer on the glass surface, and, in the worst scenario, it can produce the complete loss of the piece.



If the altered glass piece is moved to an environment with lower humidity, the alteration layer could be fissured and cracked, favoring the detachment of the external layer [figure 1 b] and the drying of the surface drops. If salts are crystallized inside the fissures, they could force the cracks progression and the layer detachment.

In a more controlled and mild environment such as a museum, the evolution of the deterioration processes over time is dependent on the equilibrium (or fluctuations) of the humidity, temperature and its influence to a certain composition. On the other hand, the composition can be determinant for the reactivity with the water in the surrounding environment. This occurs since the hydration of the glass is much dependent on the alkali content (Reaction 2) and type (energies of complexation and

hydration vary) (Alloteau *et al.*, 2019). Due to the lack of washing away of the  $[\text{OH}^-]$  ions trapped in the H-bonding network (or of their precursor  $\text{H}_2\text{O}$  species H-bonded to non-bringing oxygens), a self-catalytic effect of the system towards hydrolysis can sometimes occur (Alloteau *et al.*, 2019). This is enhanced if the alkali content is high, since H-bound species are found in the alkali vicinity. Moreover, if not followed by repolymerization or rearrangement of the structure – being some structure more prone to form a passivation layer than other –, the leaching of the alkali ions can likely contribute to the opening of the porosity of the network and/or to the entrance of more environmental water molecules attracted to the surface by the leached species.

## Conclusions

Glasses with unbalanced composition (flux vs. formers and stabilizers) are very susceptible to environmental agents, mainly the water (rainwater, condensation, and humidity). The excess of alkaline oxides and the low percentage of calcium and magnesium oxides in these glasses favors the ionic-exchange mechanism between the environmental water and the alkaline ions from the glass, which favors the formation of a silica gel layer on the surface. In an indoor environment, alkaline drops are formed and they stay on the surface favoring the alkaline attack, capable of breaking the siloxane  $\text{Si-O-Si}$  bonds in the glass. However, in outdoor environment, the contact with the rainwater is higher but it also removes the basic species. The formation of salts in dry atmospheres is also dangerous since they can force the detachment of the external alteration layer.

## Acknowledgments

The authors acknowledge to Fernando Cortés (Cathedral of Canterbury) for supplying the glass samples and the Cathedral of Santa Maria Foundation of Vitoria-Gasteiz and Cervitrum research group (Institute of History, CSIC) for supporting the study of glass samples. Likewise, they acknowledge the partial financial support of the Fundación General CSIC (ComFuturo Programme), and of the Portuguese Science Foundation (projects Pest-OE/EAT/UI0729/2011, Pest-OE/EAT/UI0729/2014, and SFRH/BD/84675/2012). The authors also wish to acknowledge professional support of the CSIC Interdisciplinary Thematic Platform Open Heritage: Research and Society (PTI-PAIS).

## References

ALLOTEAU, F., LEHUÉDÉ, P., MAJÉRUS, O., BIRON, I., DERVANIAN, A., CHARPENTIER, T., CAURANT, D., (2017) "New insight into atmospheric alteration of alkali-lime silicate glasses", *Corrosion Science* 122: 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.03.025>

- ALLOTEAU, F., MAJÉRUS, O., BIRON, I., LEHUÉDÉ, P., CAURANT, D., CHARPENTIER, T., SEYEUX, A., (2019) "Temperature-dependent mechanisms of the atmospheric alteration of a mixed-alkali lime silicate glass", *Corrosion Science*. Elsevier, 159: p. 108129. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108129>
- FERNÁNDEZ NAVARRO, J. M. (2003). *El vidrio*, Madrid: Editorial CSIC - CSIC Press.
- GENTAZ, L., LOMBARDO, T., LOISEL, C., CHABAS, A. VALLOTTO, M. (2011). "Early stage of weathering of medieval-like potash–lime model glass: evaluation of key factors", *Environmental Science and Pollution Research*, 18: 291-300. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0370-7>
- GIBSON, L. T., WATT, C. M. (2010). "Acetic and formic acids emitted from wood samples and their effect on selected materials in museum environments", *Corrosion Science*, 52: 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.054>
- GIN, S., COLLIN, M., JOLLIVET, P., FOURNIER, M., MINET, Y., DUPUY, L., MAHADEVAN, T., KERISIT, S., DU, J. (2018). "Dynamics of selfreorganization explains passivation of silicate glasses", *Nat. Commun.* 9: 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04511-2>
- KOOB, S. (2006) *Conservation and care of glass objects*. Archetype.
- KUNICKI-GOLDFINGER, J. 2003. "Preventive conservation strategy for glass collections. Identification of glass objects susceptible to crizzling" In: KOZLOWSKI, R. (ed.) *Proceedings of the 5th EC Conference 'Cultural Heritage Research: a Pan-European Challenge'*. Cracow, Poland: Institute of Catalysis and Surface Chemistry, Polish Academy of Sciences, European Community: 301-304.
- KUNICKI-GOLDFINGER, J. J. (2008). "Unstable historic glass: symptoms, causes, mechanisms and conservation", *Studies in Conservation*, 53: 47-60. <https://doi.org/10.1179/sic.2008.53.Supplement-2.47>
- LOMBARDO, T., CHABAS, A., VERNEY-CARRON, A., CACHIER, H., TRIQUET, S., DARCHY, S. (2014). "Physico-chemical characterisation of glass soiling in rural, urban and industrial environments", *Environmental Science and Pollution Research*, 21: 9251-9258. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2853-4>
- MELCHER, M., SCHREINER, M. (2005). "Evaluation procedure for leaching studies on naturally weathered potash-lime-silica glasses with medieval composition by scanning electron microscopy", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 351: 1210-1225. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.02.020>
- MELCHER, M., SCHREINER, M. (2006). "Leaching studies on naturally weathered potash-lime–silica glasses", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352: 368-379. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.01.017>
- MELCHER, M., SCHREINER, M., KREISLOVA, K. (2008). "Artificial weathering of model glasses with medieval compositions–an empirical study on the influence of particulates", *Physics and Chemistry of Glasses - European Journal of Glass Science and Technology Part B*, 49: 346-356.
- MUNIER, I., LEFÈVRE, R., GEOTTI-BIANCHINI, F., VERITÀ, M. (2002). "Influence of polluted urban atmosphere on the weathering of low durability glasses", *Glass Technology*, 43: 225-237.
- PALOMAR, T. (2013). *La interacción de los vidrios históricos con medios atmosféricos, acuáticos y enterramientos*. PhD dissertation, Universidad Autónoma de Madrid (Spain).
- PALOMAR, T. (2018). "Chemical composition and alteration processes of glasses from the Cathedral of León (Spain)", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 57: 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2017.10.001>
- PALOMAR, T., AGUA, F., GARCÍA-HERAS, M., VILLEGAS, M. A. (2011). "Chemical degradation and chromophores of 18th century window glasses", *Glass Technology - European Journal of Glass Science and Technology Part A*, 52: 145-153. <https://doi.org/10.13039/501100004837>
- PALOMAR, T., CHABAS, A., BASTIDAS, D. M., DE LA FUENTE, D. & VERNEY-CARRON, A. (2017). "Effect of marine aerosols on the alteration of silicate glasses", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 471: 328-337. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.06.013>
- PALOMAR, T., DE LA FUENTE, D., MORCILLO, M., ALVAREZ DE BUERGO, M., VILARIGUES, M. (2019). "Early stages of glass alteration in the coastal atmosphere", *Building and Environment*, 147: 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.034>
- PALOMAR, T., LLORENTE, I. (2016). "Decay processes of silicate glasses in river and marine aquatic environments", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 449: 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.07.009>
- PALOMAR, T., REDOL, P., CRUZ ALMEIDA, I., PEREIRA DA SILVA, E., VILARIGUES, M. (2018). "The influence of environment in the alteration of the stained-glass windows in Portuguese monuments", *Heritage*, 1: 25. <https://doi.org/10.3390/heritage1020025>
- ROBINET, L., HALL, C., EREMIN, K., FEARN, S., TATE, J. (2009). "Alteration of soda silicate glasses by organic pollutants in museums: Mechanisms and kinetics", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355: 1479-1488. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2009.05.011>
- RODRIGUES, A., GUTIERREZ-PATRICIO, S., MILLER, A. Z.; SAIZ-JIMENEZ, C., WILEY, R., NUNES, D., VILARIGUES, M., MACEDO, M. F (2014). "Fungal biodeterioration of stained-glass windows", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 90: 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.03.007>
- RODRIGUES, A., MARTINHO, B. (2015) "The Assemblage of a Distinct Glass Collection – The creation and display of the glass and stained-glass collection of Ferdinand II of Portugal", *Revista de História da Arte*, 2: 76–93.

RODRIGUES, A., FEARN, S., PALOMAR, T., VILARIGUES, M. (2018a). "Early stages of surface alteration of soda-rich-silicate glasses in the museum environment", *Corrosion Science*, 143: 362-375. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.08.012>

RODRIGUES, A., FEARN, S., VILARIGUES, M. (2018b). "Historic K-rich silicate glass surface alteration: Behaviour of high-silica content matrices", *Corrosion Science*, 145: 249-261. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.10.010>

TÉTREAU, J., SIROIS, J., STAMATOPOULOU, E. (1998). "Studies of lead corrosion in acetic acid environments", *Studies in Conservation*, 43: 17-32. <https://doi.org/10.1179/sic.1998.43.1.17>

THICKETT, D., LEE, L. R. (2004). *Selection of materials for the storage or display of museum objects*, London: The British Museum

VERHAAR, G., VAN BOMMEL, M. R., TENNENT, N. H. 2016. "Weeping Glass: The Identification of Ionic Species on the Surface of Vessel Glass Using Ion Chromatography". In: ROEMICH, H. & FAIR, L. (eds.) *Recent advances in glass and ceramics conservation 2016*. Paris: International Council of Museums - Committee for Conservation (ICOM-CC).

WOISETSCHLÄGER, G., DUTZ, M., PAUL, S., SCHREINER, M. (2000). "Weathering phenomena on naturally weathered potash-lime-silica-glass with Medieval composition studied by Secondary Electron Microscopy and Energy Dispersive Microanalysis", *Microchimica Acta*, 135: 121-130. <https://doi.org/10.1007/s006040070001>

## Author/s



**Teresa Palomar**  
[t.palomar@csic.es](mailto:t.palomar@csic.es)  
 Institute of Ceramic and Glass (ICV-CSIC)

Doctor in Chemistry in the Autonomía University of Madrid in 2013 and Master in Conservation Science in the Pablo de Olavide University (Sevilla) in 2016. She has developed her scientific career in the Spanish National Research Council (CSIC), the Spanish Centre Foundation of Glass (FCNV) and the Research Unit VICARTE "Glass and Ceramic for the Arts" (Portugal). Currently, she is a postdoctoral researcher in the Institute of Ceramic and Glass (ICV-CSIC) with a contract to the Program Comfuturo "Un COMPromiso público privado con la ciencia y el FUTURO". Her scientific career has been focused on the conservation of inorganic materials from cultural heritage, especially on glass and metal. She has received the Special Mention in the Young Researcher on Conservation Science Award 2018 organized by the Spanish group of the International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works.



**Alexandra Rodrigues**  
[aj.rodrigues@campus.fct.unl.pt](mailto:aj.rodrigues@campus.fct.unl.pt)  
 VICARTE Research Unit "Glass and Ceramic for the Arts"

Master and Ph.D. in Conservation and Restoration, specialization in Conservation Science, by Faculty of Science and Technology NOVA University of Lisbon (FCT-NOVA), in 2019. She has developed her scientific career in FCT-NOVA (Dep. Conservation and Restoration and Research Unit VICARTE "Glass and Ceramic for the Arts"), in collaboration with national cultural institutions such as Museu Nacional de Arte Antiga and National Palace of Pena (Portugal). She is currently a research fellow on the project NanoCStoneH (collaboration between Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, and Instituto Politécnico de Setúbal) granted by the Portuguese Foundation for Science and Technology, focused on the development of nanocomposite materials for consolidation of carbonate stone, and a VICARTE research member. Her scientific career has been focused on the conservation of inorganic materials from cultural heritage, especially on glass and stained-glass (study and characterization of collections; of materials and production techniques; and of glass corrosion processes), and currently also on stone preservation.



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.690>

# Laser-Induced Fluorescence mapping of pigments in *a secco* painted murals

Auxiliadora Gómez-Morón, Rocío Ortiz, Francesco Colao, Roberta Fantoni, Javier Becerra, Pilar Ortiz

**Abstract:** Laser-induced fluorescence is a remote analysis tool, successfully applied to real-time diagnosis of historical artworks, allowing the observation of features invisible to naked eye, as traces of retouches or presence of modern consolidants. Aim of the present paper is to introduce an historical database of pigments with respective binders and consolidants, realized to support the remote identification and mapping of these materials onto a mural in the least invasive way. To this aim, a monochromatic ultraviolet laser source emitting at 266nm with remote scanning has been used in combination with reflectance. Wall painted models have been built with *a secco* technique according to traditional recipes of XVII century. Digital image analysis, principal component analysis and spectral angle mapping have been carried out on data to get the mapping of two selected pigments, blue smalt and red carmine, in a real mural painting (XVII century). This non-invasive technique allowed us to operate remotely, a distance up to 11 m from the artwork. Results are consistent with traditional microanalysis performed to identify major pigments.

**Keywords:** Laser Induced Fluorescence, *a secco* technique database, surface mapping of pigments, smalt and carmine, non-invasive technique, cultural heritage application

## Mapeo de fluorescencia inducida por láser de pigmentos *a secco* de pintura mural

**Resumen:** La fluorescencia inducida por láser es una técnica de análisis a distancia, aplicada con éxito en tiempo real para el diagnóstico de obras de arte, permitiendo la observación de características invisibles al ojo humano, como rastros de retoques o la presencia de consolidantes modernos. El objetivo de este artículo es generar una base de datos de pigmentos históricos con sus respectivos aglutinantes y consolidantes, realizada para respaldar la identificación remota y el mapeo de estos materiales en un mural de la forma menos invasiva posible. Para este objetivo, se ha utilizado una fuente láser monocromática ultravioleta que emite a 266nm con escaneado remoto en combinación con reflectancia. Se realizaron modelos de pintura mural en técnica *a secco* de acuerdo con las recetas tradicionales del siglo XVII. Análisis digital de imagen, análisis de componentes principales y mapeado de ángulo espectral ha sido llevado a cabo para obtener los datos de mapeado de dos pigmentos seleccionados, azul esmalte y rojo carmín en una pintura mural real (siglo XVII). Esta técnica no invasiva nos permitió trabajar de manera remota, a una distancia de 11 m de la obra de arte. Los resultados son consecuentes con los microanálisis tradicionales llevados a cabo para identificar pigmentos mayoritarios.

**Palabras clave:** Fluorescencia ultravioleta inducida por láser, base de datos de técnica *a secco*, mapeado superficial de pigmento, esmalte y carmín, técnica no invasiva, aplicación en patrimonio cultural

## Introduction

Pigments characterization on different painted artwork surfaces has been already proposed by means of several optical and spectroscopic tools, among which there are reflectance (Acquaviva *et al.* 2008), micro-Raman (Bruni *et al.* 2002) and Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) (Fotakis, Anglos & Couris 1997) techniques, utilized either alone or better in combination. However, their categorization based on invasive character and remote applicability, is the most various. In fact, LIBS and micro-Raman are mostly used

in-situ at short distance, being the former micro-destructive and only the latter non-destructive at commonly utilized laser powers. Currently only reflectance is suitable to perform a true non-invasive remote application. The development of additional spectroscopic techniques suitable to remote imaging is therefore advisable.

Laser-induced fluorescence (LIF) resulted a very useful tool in non-destructive analysis in Cultural Heritage (CH) for painted surfaces analysis including pigments with organic binders (Borgia *et al.* 1998; Fotakis *et al.* 1996) and

consolidants (Borgia *et al.* 1998; Fiorani *et al.* 2010). Former researches showed the successful application of this technique to identification of protein based media (Nevin & Anglos 2006; Nevin *et al.* 2006), pigment and acrylic resins (Domingo *et al.* 2001) and biological degradation (Colao *et al.* 2008; Lognoli *et al.* 2002;). The combination of LIF and Fourier Transform Raman Spectroscopy (FT-RS) was already proposed for pigments and patina investigations (Domingo *et al.* 2001; Oujja *et al.* 2012) and also time resolved operating mode was introduced to carry out specific diagnosis on painted surfaces (Comelli *et al.* 2004; Comelli *et al.* 2011). Fast remote scanning of large surfaces by LIF technique was already demonstrated (Cecchi *et al.* 2000), resulting in the major advantage of the technique whenever in situ measurements or sampling are not feasible. The state of the art on LIF application to material recognition and mapping in murals can be summarized as follows:

- Mapping pigments, whose identification is based on Raman or X-Ray Fluorescence (XFR) in situ measurements at selected points.
- Identifying and mapping consolidants, with support of time resolved LIF data acquisition and occasional combination with Raman in situ measurements at selected points.
- Mapping biodegradation with support of time resolved data acquisition and occasional combination local sampling and bio-chemical analysis for classification.

The equipment employed in this work for LIF (LidArt) is a lidar fluorosensor (optical radar detecting LIF signals (Lognoli *et al.* 2003)) capable to collect and spectrally analyse the fluorescence induced by ultraviolet (UV) laser on remote surfaces. It is suitable to fast process data by means of digital image analysis procedures (Carcagni *et al.* 2007) for an optimal space-resolved model (Colao *et al.* 2008) on artworks, in which chemical characteristics invisible to the naked eye are highlighted. Its first version, patented in 2007 (Colao *et al.* 2007) and 2010 with improved tools (Caneve *et al.* 2010), has been employed in the Baptistery of Padua (Fantoni *et al.* 2013). In its latter version this equipment allows to scan surfaces in reflectance and fluorescence mode until 30 m distance with a spatial resolution better than 1 cm, collecting respective hyperspectral images.

The huge amount of collected data implies the use of advanced statistical tools and digital image analysis to process the spectra. In this case, grey scale and false-colour images reconstruction, principal component analysis (PCA) (Rencher 2002) and spectral angle mapping (SAM) (Girouard *et al.* 2004; Rashmi *et al.* 2014) have been employed to process the data acquired on the scanned surfaces.

In spite of the large efforts spent to extract and identify significant features from an automatic image analysis, in some cases the complex structure of the examined painted surface can make difficult to select specific spectral features to work with: these are the cases in which it is worthwhile to

have at our disposal a series of reference spectra prepared according to historical recipes and restoration procedures. Preliminary studies on LIF of pigments following deep UV excitation were already conducted before the development of lidar fluorosensor systems, considering spectrally (Fantoni *et al.* 2000) and/or time resolved (Giardini-Guidoni *et al.* 2000) techniques. Organic molecules, characterized by the presence of conjugated double bonds, metal-aromatics cages, condensed aryl rings, usually have significant fluorescence fingerprints, although their emission wavelength and intensity can be strongly affected by the environmental condition (aggregation state, pH, etc.). This kind of molecules, usually soluble, are prevailing used as colorants in modern products (paints and inks), however a few natural derivatives (e.g. lakes from plants or animals) are well known colorants since the antiquity and are usually classified as organic pigments. Conversely the use of most inorganic pigments, except some of the modern synthetic pigments, date back to very early time in the past, even to the Palaeolithic age (e.g. iron oxides).

In spite of weak luminescence shown by most inorganic pigments alone upon near UV or visible excitation (Burrafato *et al.* 2004), a set of reference spectra prepared according to historical recipes for wall paintings can be extremely useful to support the identification of original materials and to investigate their distribution. Plaster, historically used binders and modern consolidants are indeed fluorescent upon deep UV excitation; the presence of pigments can give rise to additional bands or characteristic modulations in the detected emission due to selective re-absorption, with a mechanism which implies the pigment acting as a kind of "inner filter" (de la Rie & de la Rie 1982). A LIF database of historical pigments including non-fluorescing or scarcely fluorescing inorganic substances is useful provided that it takes into account these considerations.

The novelty in this paper is based on the realization of a database with LIF spectra of historical pigments, prepared according to traditional receipts, together with their binders in order to assess the possibility to map the distribution of pigments on real artwork painted surfaces, such as the one here considered as case study.

## Methods and materials

### —Experimental Apparatus

The lidar fluorosensor used for this study was already operated to collect hyperspectral fluorescence images of large artwork surfaces (e.g. frescos, decorated facades, paintings on different substrates) upon UV excitation either at 266 nm or at 355 nm (Fantoni *et al.* 2013).

The instrument detected the spectral LIF signature characteristic of different chemical compounds laying on the examined surface, including the effect of their mutual interference in the emission – re-absorption pattern,

thus producing a fingerprint suitable to identify different materials utilized on the surface, as needed in planning restoration. In the present work the instrument was operated at 266 nm, which does give rise to fluorescence for most surface coatings and background plaster.

The sensor is based on an imaging spectrograph (Jobin-Yvon CP240) coupled with an intensified charge coupled device (ICCD - Andor iStar DH734) as light detector. The prototype is able to scan an image of 0.7×2.5 m<sup>2</sup> in less than 2 minutes when placed at 11.2 m average distance from the target.

The optical arrangement was characterized by having the spatial and spectral information on two mutually orthogonal directions imaged on the detector's sensitive area, with about 1 mm spatial resolution at 1 m distance and a spectral resolution better than 2 nm. In the setup used for the present measurements, the overall system specifications are: line scanning, horizontal resolution 640 pixels, 0.1 mrad angular resolution, minimum acquisition time per line 200 ms and field-of-view (FOV) aperture 5.7 deg.

In the utilized laser fluence range (< 0.01 mJ/cm<sup>2</sup>) the instrument does not produce any photo-damage on surfaces painted with the *a fresco* or *a secco* technique, as formerly tested in laboratory samples (Colao *et al.* 2008; Raimondi *et al.* 2015). The absence of any photo-degradation on known photo-labile samples (such as white lead paint (Raimondi *et al.* 2015)) in the present database was furtherly checked by optical microscopy inspection after the UV irradiation needed to process LIF signals.

Reference data are acquired by the LIF scanning sensor; the system setup was such to have a spatial resolution of approximately 3x3 mm, and the samples in powder form were put in circular holder with a clear aperture 18 mm approx. In such a way we have not less than 20 spectra simultaneously acquired from the same sample and under the same excitation conditions. The average spectrum is computed as arithmetic mean to increase the S/N ratio.

This lidar fluorosensor can also acquire spectrally resolved reflectance spectra when an appropriate illuminating light is used; from this data a red-green-blue (RGB) reconstructed image in the visible range is produced. To operate in reflectance mode the laser is switched off, a halogen lamp with at less 1000W power is turned on and the optical detector shutter remains opened for the time needed to acquire the image. After calibration, the collected spectra can be used for the computation of standard CIE/lab colorimetric measurements.

#### —Operating modes

During the measurement campaign here reported, the system was sequentially operated in either modes: fluorescence and reflectance mode.

Off line processing of the acquired data is performed to take into account both the wavelength dependent detector efficiency and the spatially dependent collection efficiency. After the calibration we assume to produce images with an efficiency and spatial resolution that are nominally uniform in the entire examined spectral range.

#### —LIF Data analysis

The spectra have been studied by chemometric techniques (PCA) (Rencher 2002) and projection operators (SAM) (Girouard *et al.* 2004; Rashmi *et al.* 2014) and coupled to digital image analysis in order to permit a rapid mapping of the surface by emitted signal similarity.

Major spectral features in LIF spectra are identified by PCA. Although the principal components (PCs) do not possess any direct physical meaning, they can conveniently be described in terms of bands since the overall LIF spectra due to the presence of different surface constituents result from linear combination of PC with appropriate weights (scores).

In the present study PCA is aimed at the identification of prominent spectral features, thus avoiding a manual time-consuming examination of each single spectrum acquired. This procedure has the advantages to be fast and run in a semiautomatic mode, however it has the inconvenience to supply only a global analysis, possibly ignoring the local peculiarities lacking enough statistical significance to be represented in the considered PC. To overcome this drawback, a detailed local analysis can additionally be performed on subsets of the scanned areas, with a separate analysis of the PCs. Once identified, spectral bands are sought for in the acquired LIF spectra, completing the data analysis.

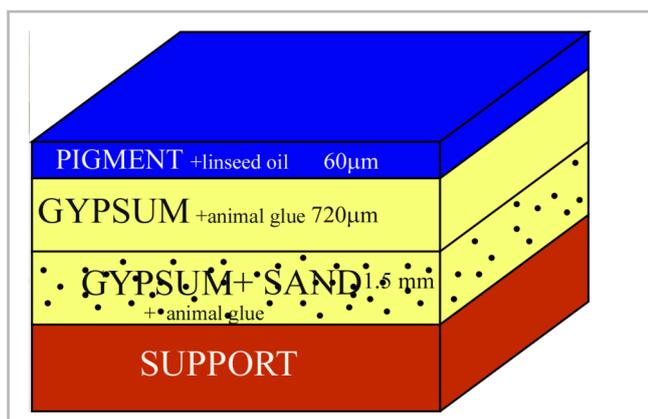
A different method used in the analysis of spectral images, concerns the identification of pixels having a specific spectral content. A typical case is the identification of a given constituent: such task is accomplished either by a band analysis based on spectral deconvolution, or by using spectral mapper algorithms as SAM. This case requires the availability of reliable reference spectra, possibly measured in an analogous matrix in order to account also for interactions among different painted layers. Although the mapper algorithms perform well with a low computational cost, their results based on a partial information are of course less accurate with respect to the complete band analysis procedures, and their application often follows the latter only once major features have been identified.

#### —Database models

Modelling of the wall painting with a secco technique has been performed according to researches carried out by

the Andalusian Institute of Cultural Heritage (IAPH) in the wall painted of Domingo Martínez from the XVII century (Gómez Morón 2008), relevant to the considered case study, and Cenino Cenini's recipes (Cennini 1859) widely used in the Renaissance and the successive periods until the end of XVIII century. The employ of linseed oil as a medium for mural painting was a common practise during the Spanish Baroque, being described this technique by Francisco Pacheco in his treatise *The Art of Painting* in 1649 (Pacheco 1871).

More than forty plaster models have been built in the laboratory to emulate the surfaces of these murals [figure 1] over a primer layer of gypsum. With this purpose, several bricks have been covered with a mixture of gypsum and sand with animal glue binder. The preparation was done with sand from Guadalquivir River (near to Seville) and gypsum in relationship 1:6. The sand has a fineness of  $11.2 \pm 3.6 \mu\text{m}$ . The animal glue (rabbit skin glue) was previously heated with a water bath to acquire a pasty consistency, and then it was added to the mixture gypsum/sand or to the gypsum until saturation



**Figure 1.-** Laboratory preparation of the plaster for a secco painted model scheme of composition and thickness of the plaster respective layers.

in the layer of plaster. The plaster layers were dried a room temperature for two weeks. These layers were the substrate upon which different pigments from KREMER historic pigments [table 1] and products from CTS Srl, have been applied with linseed oil. The colour layer was applied with pigment and linseed oil in ratio 3 (pigment): 1 (linseed). Each model has a surface near 15x5 cm, so it was possible to obtain their LIF signal signature in the considered matrix from the scanned surface. Table I shows the model samples, the mixture compositions and pigments are grouped according to their colours.

The bricks covered by the wall painted models were examined three months after preparation, in order to take into account at least fast aging effects. Note that the binder used, linseed oil in a layer of approximately 60  $\mu\text{m}$  thickness, is known to be fluorescent upon UV laser excitation, giving rise to a spectrum that for the pure sample is slowly changing in intensity and peak position with ageing, where the early effects mostly correspond to blue intensity increase (Miyoshi 1985). For LIF spectral characterization the painted brick has been allocated in a vertical support and scanned at 7 m distance.

All samples listed in Table I showed significant luminescence signal in the examined near UV-visible range, with characteristic modulation (emission or re-absorption) which can be associated to pigments presence in the considered matrix. In order to show examples of the spectra collected, only those relevant to the examined case study (sect. 3.2) are reported in this paper, but the entire data set is available on line as additional material and can be consulted to evaluate the possibility of identifying a single pigment in the presence of others characterized by a similar colour in a real historical sample.

In order to possibly discriminate effects relevant to a specific pigment with respect to those related to

**Table 1.-** Colour, composition and pigments for Database of a secco technique wall painting models. All materials were applied on plaster, as described in the text, with addition of linseed oil. (\*)

Layer color	Common or chemical name (id.#, Kremer order number)
No pigment	Plaster (P1); P1+ linseed oil (P2); P1+ benzyl gel (P22); P1+ tea (P23); P1+ Ammonium citrates (P24, P25); P1+ Paraloid B72 in nitrotoluene -15%- (P26); P1+ DMSO (P27)
White	Lead White (P3, 460009); Calcium White (P4, 58720); Lead Sulfate (P5, 46050); Lithopone (P33, 46100)
Yellow	Lead Tin Yellow (P6, 101009); Orpigment (P35, 10700); Naples Yellow (P17, P32, 431229); Massicot (P36, 43010)
Red/Organge/ Brown	Cinnabar (P7, P21, 10624); Haematite (P8, 48651); Carmine Naccarat made of cochineal (P9, 42100); Red Lead, Minium (P10, 425009); Armenian bole (P28, 40503); Raw Sienna (P11, P12, 40400); Realgar (P31, 10800); Madder Lake (P40, 372141)
Blue	Ultramarine Blue (P13, 45000); Smalt (P14, 10000); Lapis Lazuli (P15, 10500); Azurite (P16, 10200)
Green	Malachite (P18, 10300); Cyprus Green Earth (P29, 17400); Verona Green Earth (P30, 11000); Bavarian Green Earth (P38, 11100); Copper Resinate (P39, 12200)
Black	Manganese Black (P19, 47500); Verdigris (P34, 44450) Ivory Black (P20, 12000); Grape Black (P37, 12015), Furnace Black (P41)

(\*) all spectra collected are available online as additional material

its presence in the considered matrix, the spectral acquisitions were repeated over layers of each pure pigment in powder. Samples were prepared by gently and uniformly pressing a few mm thick layer of each pigment powder in order to fill (2 cm<sup>2</sup> x 2 mm) cylindrical holes on aluminium foil used as holders, which were allocated at 7 m from LIF equipment for remote spectra collection. Comments on pure pigments spectra are reported here only for selected samples (ivory and furnace black, azurite and smalt blue, carmine nacarated made of cochineal, madder lake and cinnabar red) relevant to the real case studied in the on-site application.

—On-site application

On-site measurements were carried out in the vault of the Chapel Our Lady of Good Air that is part of the Palace of Saint Elmo in Seville, the residence of the president of the Andalusian Government. This Chapel of the XVII century had just been restored by the IAPH, employing different non-destructive techniques for diagnosis and restoration monitoring.

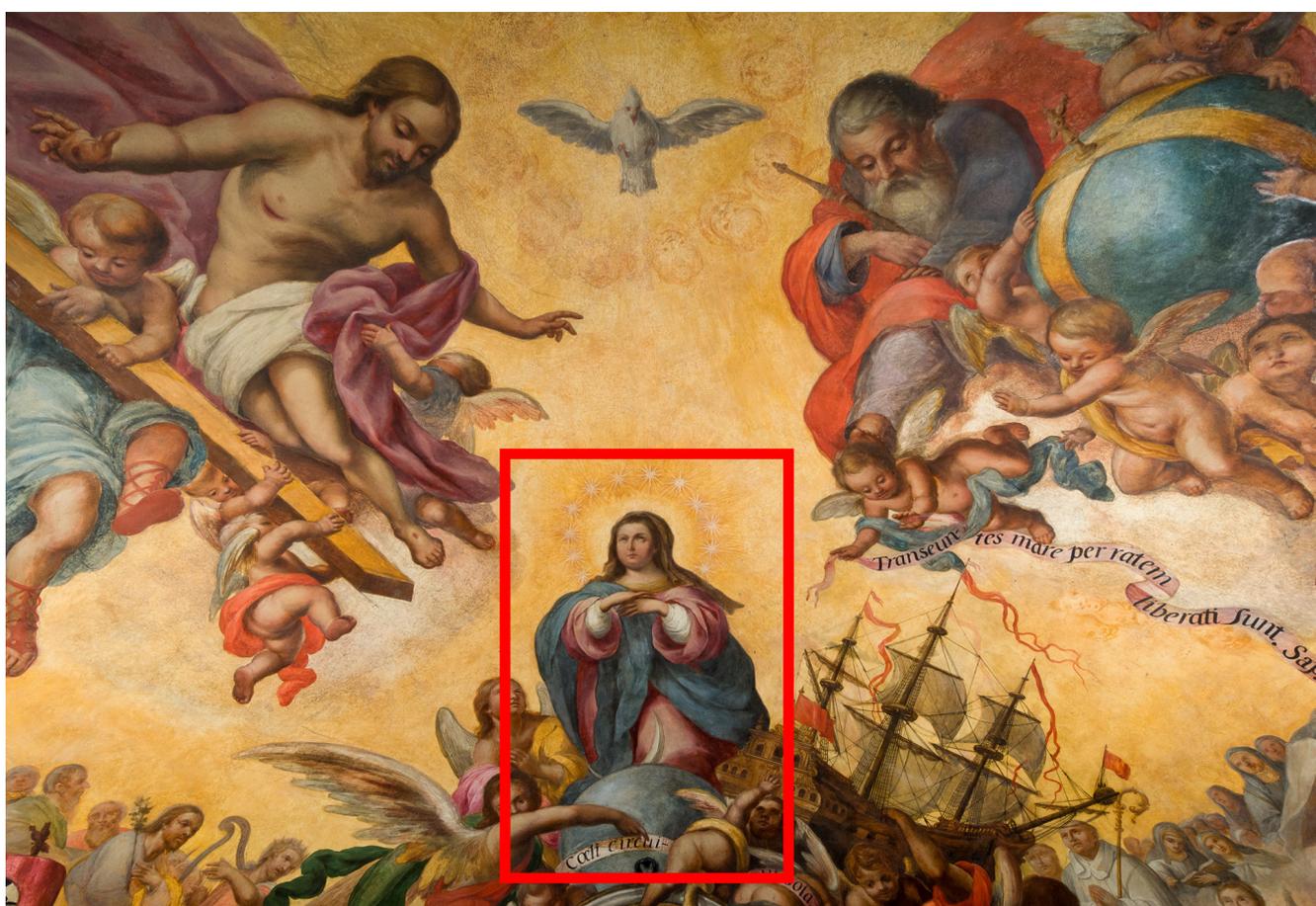
Namely, this work presents the application of LIF database to pigments mapping on the wall paintings the

Glorification of the Virgin from Domingo Martinez after its restoration.

Three images acquisitions were performed on the virgin silhouette [figure 2]; table II shows the image acquisition setting in each scan. The wall painting scanned area was about 2.5 m<sup>2</sup>, while image size in pixel is 128 pixels in height and a variable number of pixels in width [table II].

**Table II.-** Image acquisition settings for three scans

Scans	1-2	3
Gate	500ms	500ms
Gain	230	230
Laser current	100A	OFF
Halogen lamp	OFF	2000W
Optical f-number	3	22
Spectral focus	UV-VIS	VIS
Back-ground	No	No
Lines	600	600
Scan width	11000	11000
Distance	11.2m	11.2m



**Figure 2.-** Scanned zone of the vault of the Our Lady of Good Air (Seville).

— *Traditional Analysis*

To validate the results obtained, the LIF identification was compared with traditional analysis after the sampling performed following the recommendations of the standard UNE-EN-16085:2014 (AENOR 2014). Micrometer-sized samples were taken to analyse the pigment layers. Sampled specimens were examined by optical microscopy (OM), Scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray (SEM-EDX) spectroscopy and X-Ray Fluorescence (XRF) to characterize the substrate; Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and gas chromatography with mass spectrometry (GC-MS) were applied to the binder analysis and to detect occasional presence of modern resins used as consolidants.

It is worth mentioning that, twenty-two samples taken in the vaults correspond to less than 1 cm<sup>2</sup> of investigated surface and sampling required the installation of scaffolding, on the other hand the LidArt apparatus allowed to scan quickly near 7 m<sup>2</sup> without any damage to the murals and without any scaffolding.

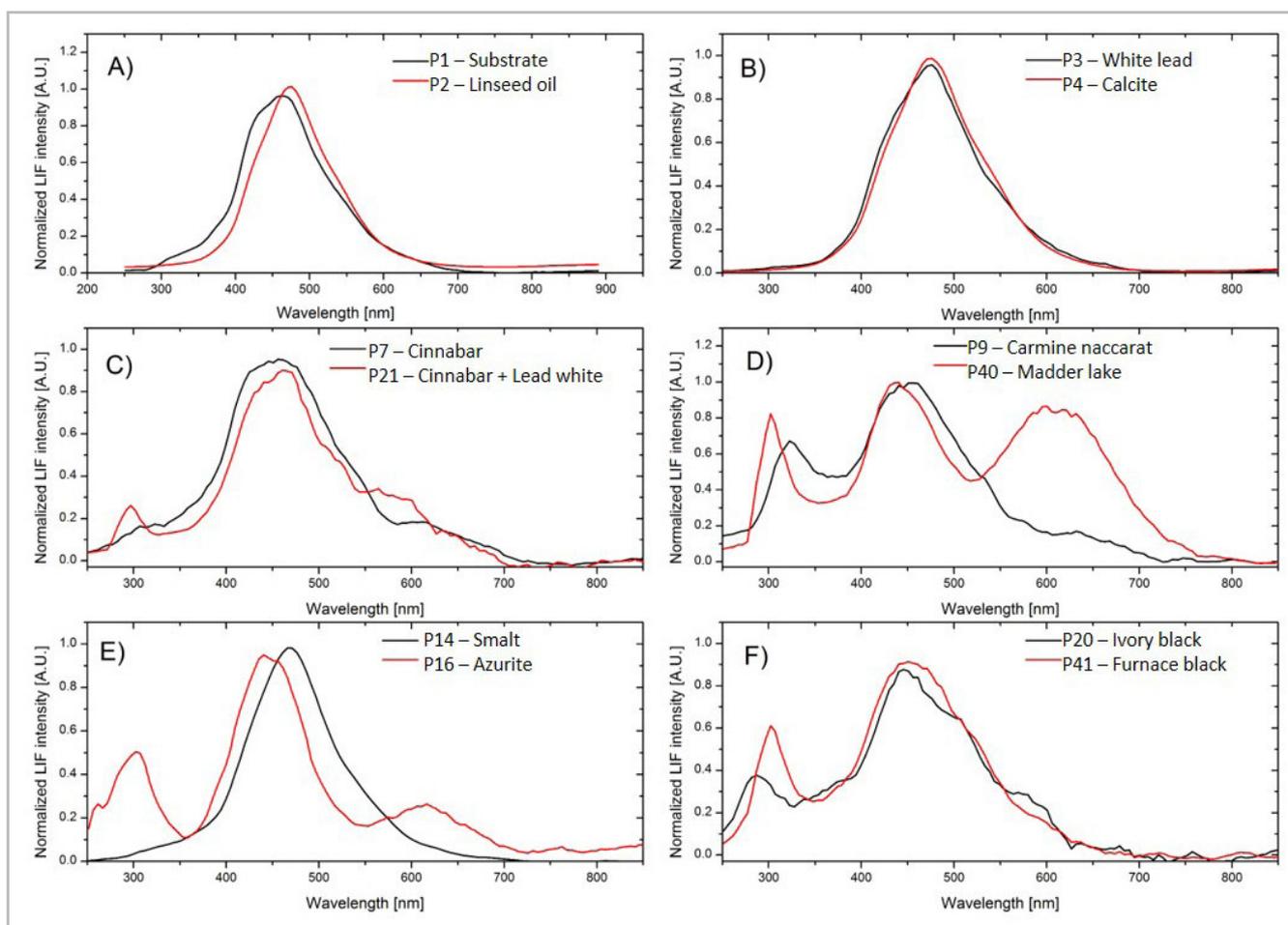
**Results and discussion**

— *LIF study on laboratory samples*

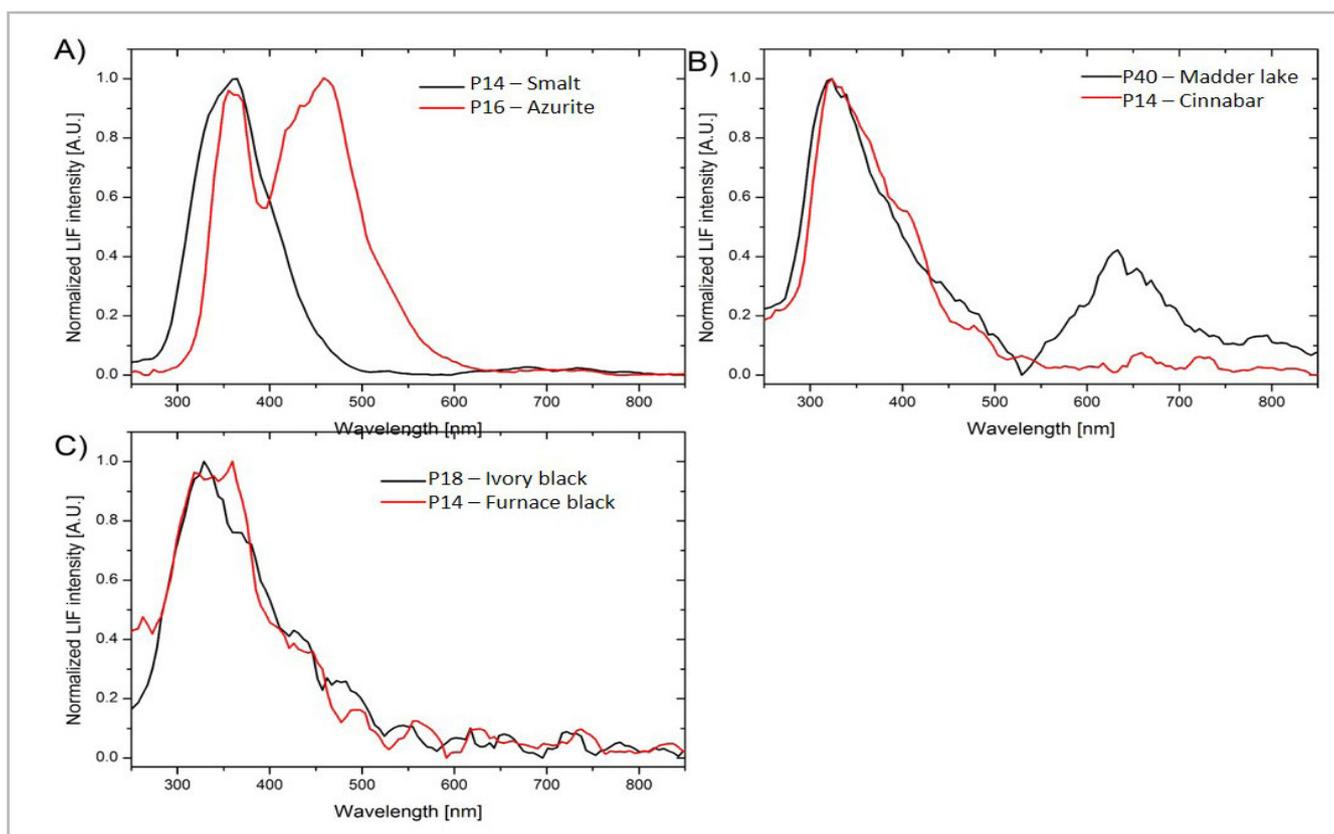
The fluorescence spectra from sample models were collected upon laser excitation at 266 nm. Figures 3 A-F and 4 A-C show the spectra acquired on selected painted plasters, possible references for the case study discussed in the following, and on some involved pure pigments, respectively. The database with all the LIF spectrum of pigments/colorants on plaster with linseed oil has been enclosed as Annex 1.

The spectral emissions, once well distinct features are present, allow for the identification of different pigment/binder mixtures. From sample to sample we observed variations in absolute fluorescence intensity of more than one order of magnitude, however the signal to noise ratio was higher than 20 in all the reported measurements and normalized spectra are plotted.

In case of pigments layered on plaster [figures 3A-F] the fluorescence consists of a broad band centred at 450 nm



**Figure 3.-** Normalized LIF spectra of painted substrates: A – substrate samples: alone (P1, black line) and with linseed oil (P2, red line); B - white samples: lead white (P3, black line) and calcite (P4, red line); C - cinnabar samples: alone (P7, black line) and with lead white (P21 red line); D – red samples: carmine naccarat made of cochineal (P9, black line) and madder lake (P40, red line); E – blue samples: smalt (P14, black line) and azurite (P16, red line); F - black samples: ivory black (P20, black line) and furnace black (P41, red line).



**Figure 4.**- LIF spectra of pigments in powder form: A - blue pigments: smalt (P14, black line) and azurite (P16, red line); B - red pigments: madder lake (P40, black line) and cinnabar (P7, red line); C - black pigments: ivory black (P20, black line) and furnace black (P41, red line).

and width of 200 nm. The substrate and binding media [figures 3A-B] contribute to the total fluorescence with a broadband emission; in particular the spectrum recorded for the substrate alone (curve P1 in figure 3A) shows an emission peaked at around 450 nm. From this observation we deduce that the main contribution to the emitted band is due to the fluorescence of matrix, that is due to the mixture of substrate (gypsum, quartz and calcite) and binding media (animal glue and linseed oil); over the matrix's band, other spectral emissions are due to the pigments and consolidant components.

As an example, figure 3A shows the difference from the white layer of the plaster alone (P1) and its overlap with the binder, linseed oil (P2); while the effect of the presence of calcite and lead white (P3 and P4) applied with linseed oil on the plaster is shown in figure 3B. In both figures the linseed oil application corresponds to a reduction in the intense plaster UV band peaked at 320-400 nm probably for a selective re-absorption (Verri *et al.* 2008; Simonot, Thoury & Delaney 2011). The presence of the considered white pigments, although causing some attenuation, does not seem to further affect the plaster spectral shape; although the lead white has a characteristic broad emission peaked at 400 nm (Giardini-Guidoni *et al.* 2000) which overlaps to the former.

Differences related to various pigment addition can be observed in figures 3 C-F. As a specific feature some

pigments, especially organic pigments such as different types of red, present an additional UV emission band peaked around 300 nm, which is missing for smalt and cinnabar. This band can give a strong indication of the presence of an additional pigment even in small quantity, for instance of lead white to obtain pink from cinnabar red [figure 3C]. The effect of a layer of cinnabar, added either pure or in mix with lead white (curve P7 and curve P21, respectively in figure 3C), is the presence of a characteristic weak band peaked at 610 nm according to Mounier *et al.* (2014), while the addition of white lead give rise to the mentioned UV band and causes some changes in the spectral zone between 450 and 500 nm and a significant reduction of intensity, with the observed increase in signal/noise ratio (SNR).

The spectra of red organic pigments, reported in figure 3D, show distinct features: madder lake samples (P40) has broad bands similar to those describes by Comelli *et al.* (2011) for madder lake (between 600 and 615 nm), while in carmine nacarat made of cochineal (P9) the intense band peaked at 610 nm is replaced by a significant broad shoulder with a maximum around 635 nm. This emission maximum is identified by Comelli *et al.* (2011) as an anthraquinone-based lake of animal origin, for example, cochineal or kermes. These spectral signatures would allow identifying between some red organic pigments and even its origin, although the remote fluorescence

cannot compete with micro-spectrofluorimetry coupled to chemometrics (Nabais *et al.* 2018) in the identification of manufacturing receipt. The relative intensity recorded on the red band between 610-640 nm is however in both cases larger than for the red band of cinnabar red, which is definitely peaked at a longer wavelength (around 650 nm).

Figure 3E shows the difference of spectral features between two inorganic blue pigments: smalt and azurite. Both pigments originate a broad band, not assigned, peaked between 400 and 500 nm. However, in the case of azurite this band appears blue shifted, it is accompanied by secondary emission at longer wavelengths and there is an emerging UV tail from plaster background. Thus, it will be possible to distinguish smalt from azurite. Discrimination of smalt from other blue pigments would be not so straightforward from LIF spectra alone (see supplementary material).

Figure 3F reports results for black pigments: furnace black (P41 curve) and ivory black (P20 curve). The weak spectra recorded in both cases are dominated by the rather uniform absorption of both pigments in the entire visible range (see again the SNR increase with respect to the plaster curve), the only distinct feature seems to be the most intense tail of UV emission peaked around 300 nm recorded for P41 (furnace black), which might be related to the plaster background, so it is difficult to carry out an identification.

From figures 3C-F we can conclude that each coloured layer, although characterized by a weak overall emission, has a spectral signature, as a fingerprint, resulting from the interaction between layers and components with different absorption/emission behaviour in the considered sample model.

The fluorescence observed from each of the pigments painted on the plaster substrate, closely follows what obtained in the measurements from the corresponding pigment in powder form (pure pigment) reported in figure 4, where it should be noticed the lack of the emission band typical of the plaster substrate.

On the powder pigments, despite the peculiar low SNR, some characteristic signatures appear in the visible at least for the considered blue and red colorants [figures 4A-B]. Note that the observed features are not system artefacts, as checked on Spectralon, a standard material which gave rise only to a flat background. The spectra of blue inorganic pigments, azurite and smalt respectively [figure 4A], present distinct features: the smalt spectrum has a single broad band at peaked 390 nm while the azurite shows a second band with comparable peaked at 480 nm. On the other hand, the black pigments considered appear undistinguishable also from their pure pigment spectra [figure 4C].

The difference between the red pigments: cinnabar and madder lake [Figure 4B] is fully consistent with what

observed in case of the same pigments with the binder on plaster, the second band of madder lake peaked at 610 nm emerging very clearly. Two different trends are consistently observed when the spectrum of pure pigments and layers are compared in all analysed samples: on one hand we observe a decrease of the fluorescence emission in the ultraviolet region between 290 and 400 nm on plaster samples, while on the other hand the band at 450-500 nm is modulated because of the simultaneous contributions from pigment emission/absorption and plaster emission. Spectral features emerge clearly on red tail where the plaster contribution is negligible.

These observations suggest that the presence of the substrate alter in a significant way the emitted spectrum related to pigment fluorescence. It is confirmed that an appropriate deconvolution is required to separate the contribution arising from different components, whenever it is possible. Alternatively, a database built with appropriate matrix is necessary to take in account re-absorption and other secondary effects. In fact, strong UV-visible absorption from some pigments may also be responsible for complex features, generating a lack of intensity that cannot be reproduced by a deconvolution based on a simple superposition of positive components.

Summarising, the fluorescence from the plaster alone for a secco technique wall painting, and from the plaster and binder plus pigments, was examined in different experiments, to isolate their spectral contributions in historical matrices. The emission feature of the plaster is an intense band at 450-500nm, and each mixture has an own spectra or fingerprint due to the contribution of different components on the layers. The reference spectra from our laboratory model [figure 3], containing ancient pigments and colorants with their binder on plaster, are proposed to be used as guidelines to select SAM endpoints on on-site wall painted scanned by LIF to discriminate the presence of pigments in the artwork under investigation. A quantitative agreement cannot be expected due to possible differences in the various historical receipts, to long-term aging effects and to possible presence of modern consolidant on the real surface which are known to alter the spectral signatures.

#### — LIF database application on-site

The application of the above described database was carried out on the vault of the Chapel Our Lady of Good Air in Seville (Spain) scanned by our LidArt prototype.

The interpretation of the spectra was simplified by PCA. Five PCs [figure 5A bottom left] show most of the variance of the spectrum in each point analysed of the surface. These PCs have relationship with the main chemical products presents onto the surfaces, they could be considered as a spectral signature (Fiorani *et al.* 2010) containing the spectral information needed to look for at

our pigments-on-plaster database. PCA shows a clear peak at 360nm due to the presence of acrylic products (Paraloid, database P26), as reported in former studies (Fiorani *et al.* 2010; Fantoni *et al.* 2013).

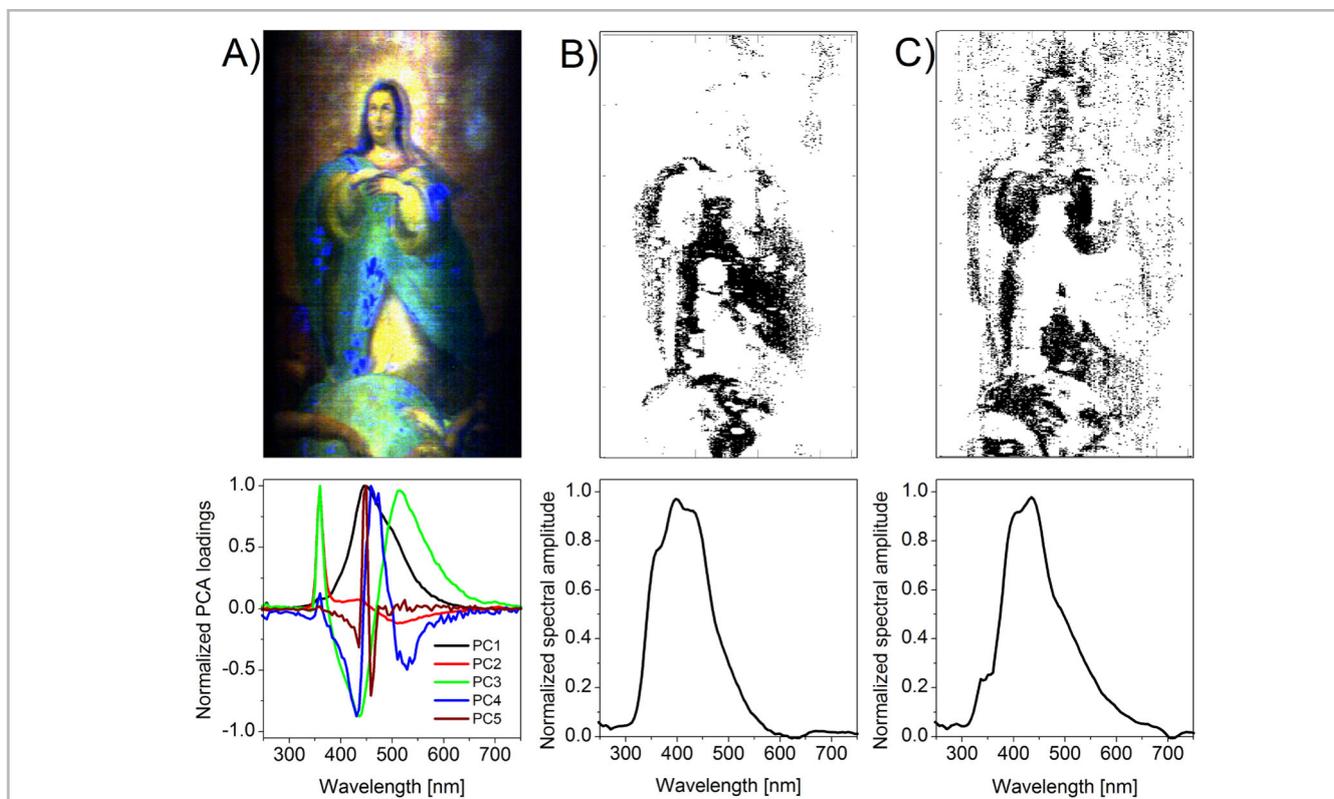
A significant tail on the red, extending above 600 nm in PC3, suggests the widespread presence of a red organic pigment. Other contributions, with signatures between 400 and 500 nm, that are more difficult to understand, require the use of our database with standards on plaster.

With this purpose a spectral analysis was carried out in fixed zones at different points of the images. Spectra collected in the standard database were utilized to perform a two-step mapping procedure based on the SAM algorithm projected onto the entire scanned surface, as described in the following.

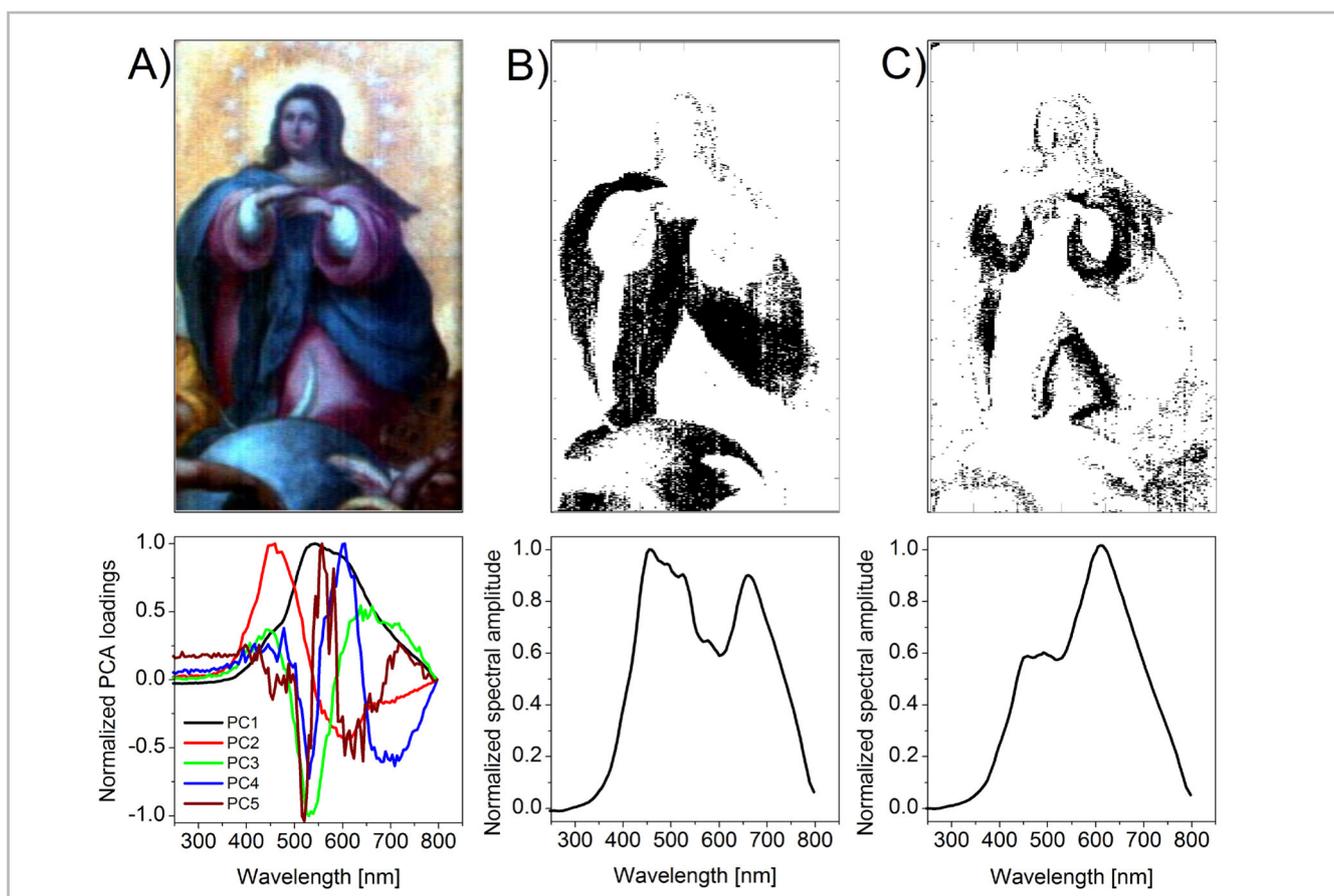
The area studied was first digitalized in a false colour fluorescence image [figure 5A, top] in order to evaluate the spatial accuracy of the scans and to achieve an overview of pigments distribution. Internal reference spectra with characteristic signatures are shown in figure 5B-C (bottom). These spectra have been utilized as endpoints for SAM projections on the entire image with the purpose to better identify different areas. Two regions can be clearly identified [figures 5B-C, top].

Figures 5B-C (bottom) report the spectral signature associated to smalt blue peaked at shorter wavelengths [figure 3E curve P14] and carmine naccarat made of cochineal spectra, the latter characterized by the secondary long wavelength structure peaked around 410 nm [figure 3D curve P9]. The omitted fluorescence emission at 610 nm allowed us to discard the use of madder lake. Despite the evident contribution of a red lake of animal origin (i.e. cochineal), the presence of other red pigments, e.g. cinnabar with a weaker but broader red emission, cannot be ruled out with current LIF measurements.

Red and blue pigments maps [figures 5B and 5C top] match greatly with blue and red colours in the image [figure 2]. The first figure shows the use of blue pigment found in the mantle, meanwhile the second one demonstrates the use of red organic pigment mostly in the red robe, though it appeared also used in other zones as part of colour mixtures specially to create some contrast to the background. The possible identification of red organic pigment as lake of animal origin (probably cochineal) is consistent with the wall painting dating, because of the diffusion of the Mexican cochineal in European countries after the discovery of America (Cardon 2007), although it is well known that cochineal lake was previously used in Europe, for example, Polish, Armenian or Ararat cochineals (Eastaugh *et al.* 2004).



**Figure 5.-** Results from the fluorescence image analysis performed on the scanned wall painting representing the Glorification of the Virgin. A) top figure - RGB false colour image obtained by combining the fluorescence intensities emitted at 515, 445 and 360 nm; bottom figure - PCA of spectra from image; B) top figure - Similarity image mapping with SAM on blue pigmented areas (mainly blue smalt); bottom graph - endpoint spectrum for SAM; C) top figure - Similarity image mapping with SAM on red pigmented areas (mainly carmine); bottom graph - endpoint spectrum for SAM.



**Figure 6.-** Results from the reflectance image analysis performed on the scanned wall painting representing the Glorification of the Virgin. A) top figure - RGB image obtained by combining the reflectance intensities emitted at 600, 500 and 400 nm; bottom graph - PCA of the entire reflectance image; B) top figure - Similarity image mapping obtained on the reflectance with SAM on blue pigmented areas (mainly blue smalt); bottom graph - endpoint spectrum for SAM; C) top figure - Similarity image mapping obtained on the reflectance with SAM on red pigmented areas (mainly carmine); bottom graph - endpoint spectrum for SAM.

For sake of comparison the same type of analysis here reported for fluorescence signatures was also performed with reflectance spectra, available from our remote scanning instruments [figure 6]. In this case no detection of acrylic consolidant was obtained from spectral analysis. Furthermore, although it was possible to map most of the red and the blue components where they dominate, no information on the red addition to background was achieved in this case. This observation stresses the power of the proposed method based on fluorescence as a fingerprint of the entire painted outer layers, since the mapping accounts also for the presence of weak contributions from the red pigment used.

In order to overcome the scarce selectivity of the spectral features appearing in the fluorescence database for some specific cases, such as for instance the examined black pigments, work is in progress to merge data from fluorescence and reflectance spectra since they are sequentially recorded by our instrument in similar environmental conditions and from the same point of view.

In the selected case study was not possible to identify other pigments in the current database, even by using the

combination of fluorescence and reflectance spectra. This is due to the fact that in most of the cases characteristic pigment fluorescence band excited at 266 nm are weak, or even absent, and possibly hindered by matrix effect; in these conditions it is not easy to detect those pigments which are not major components of the examined surface and thus responsible at least for absorption in case of negligible fluorescence.

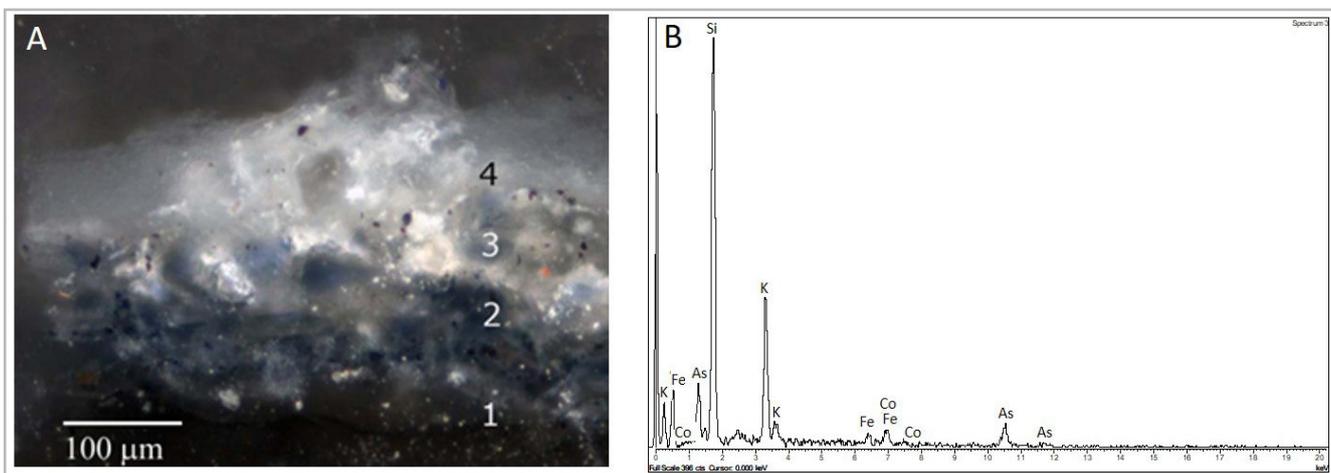
In summary, the data base has been built with the aim to support pigment identification on real historical surfaces. The considered case study offered the chance to identify three families of major pigment: red, blue and black. Results have been obtained on identification (as carmine and smalt) and mapping red and blue, with better sensitivity than in reflectance for the red carmine.

— *Identification of pigments by traditional techniques*

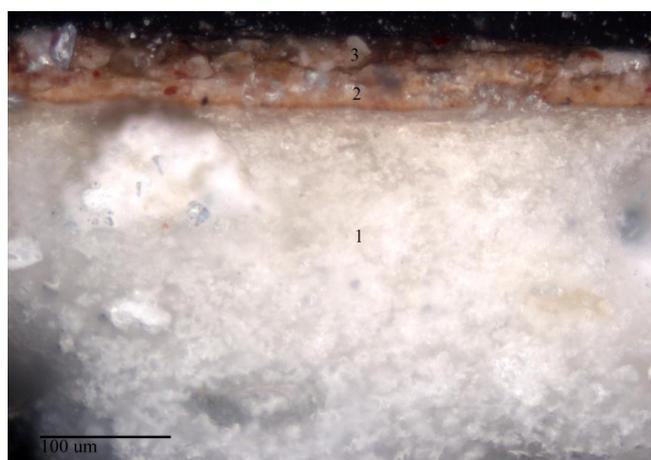
Traditional techniques have been employed, not only to design the database, but also to evaluate the accuracy of the results. Conventional micro-analysis and X-rays techniques revealed that the primer wall painted layer

**Table III.-** Colour Palette of the wall painting vault titled “The Glorification of the Virgin”

White	Blue	Red	Ochre, brown, sienna	Green	Black	Metallic
Lead White, Calcite, Barite	Smalt blue	Red Earth, Cinnabar, Carmine (possible from cochineal)	Yellow pigments with lead and chromium (due to a restoration)	Malachite	Lamp Black, carbon	Gold, Silver, Copper



**Figure 7.-** A-Stratigraphy of blue sample: White primer of plaster (layer 1), Calcite, lead white and blue smalt (layer 2), grains of lead white, calcite and blue smalt (layer 3) in smaller quantities than those identified in layer 2, very thin white layer of calcite (layer 4). B – EDX spectrum where is identified smalt blue (Si, Co, As, K and Fe).



**Figure 8.-** Stratigraphy of red sample: Plaster composed by gypsum (layer 1), lead white, red earth, calcite, carmine and a few grains of gypsum (layer 2), red layer with the same composition of second layer (layer 3).

was formed by a support of gypsum of different thickness mixed with earths, oxalates, quartz and calcite. Domingo Martinez used a secco technique what was confirmed by GC-MS. The binder analysis revealed the presence of animal glue and linseed oil in the outsider surface, meanwhile traces of resins appeared on the outer surfaces in sporadic zones (Gómez Morón 2008). Since gypsum, quartz, calcite (P4) and animal glue are the basis of our reference models while linseed oil is the binder used to mix the pigments, we expect the best correlation between remote LIF data and results from present *in situ* sampling.

The table III summarises the colour palette of the vault, as deduced from the sampling. Mainly inorganic pigments were found: lead white, smalt blue, red earth, cinnabar, yellow lead and chromium, green malachite (copper hydroxi-carbonate), however the organic compound carmine, possible from cochineal, has been utilized as well in most of the red zones. Relevant for this research was the confirmation of the LIF characterization made for the blue pigment of the mantle and the red pigment of the robe of the Virgin. The smalt blue was determined by SEM-EDX with the presence of silicon, arsenic, potassium, iron and copper [figure 7]. In the case of the robe [Figure 8], a punctual analysis of its stratigraphic section by FTIR identified the use of an organic pigment as red colour.

### Conclusions

The work here presented supports the use of database according ancient recipes as LIF standards to carry out LIF mapping on painted surfaces. The results show that LIF is a great diagnostic tool, having the ability to perform spectral analysis on-site and with high speed on very large real painted surfaces, also having the possibility to analyse both organic and inorganic pigments even in the case of not well known fluorescence emission bands on pure substances. Most important from the point of view of the conservators, LIF remote imaging is a completely non-destructive analysis. The availability of a validated LIF spectra database allows minimizing samples collection on wall painting following ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) recommendations (ICOMOS 2003).

The LIF technique is demonstrated to be an effective diagnostic tool on the considered case study (a XVII century *a secco* mural paint). In fact, based on the historical database built, the assignment of two main pigments (smalt and carmine) was confirmed and their distribution onto the image was obtained, furthermore the capability of mapping the identified red pigment was significantly improved with respect to the reflectance imaging. Note that the distribution on a large area of a specific material achieved by LIF imaging, either original pigment or modern consolidant, is a valuable information for conservation scientists even in the least favourable case of not-straightforward assignment requiring additional in situ measurements or samplings.

Nevertheless, LIF remote imaging still requires further study to complete the database of historical pigments of interest, which have not been formerly investigated with detail upon laser excitation in the UV region. The problem of identifying and/or discriminate contribution for plaster and binders could be possibly solved by using multiple UV/visible excitation wavelengths. Possibilities of combined remote utilization, together with other laser spectroscopies (e.g. Raman) are under investigation to detect by vibrational signatures the presence of characteristic non fluorescent groups at the investigated painted surfaces. Moreover, further studied about ageing and fading must be carried out to complete the database.

### Acknowledgements

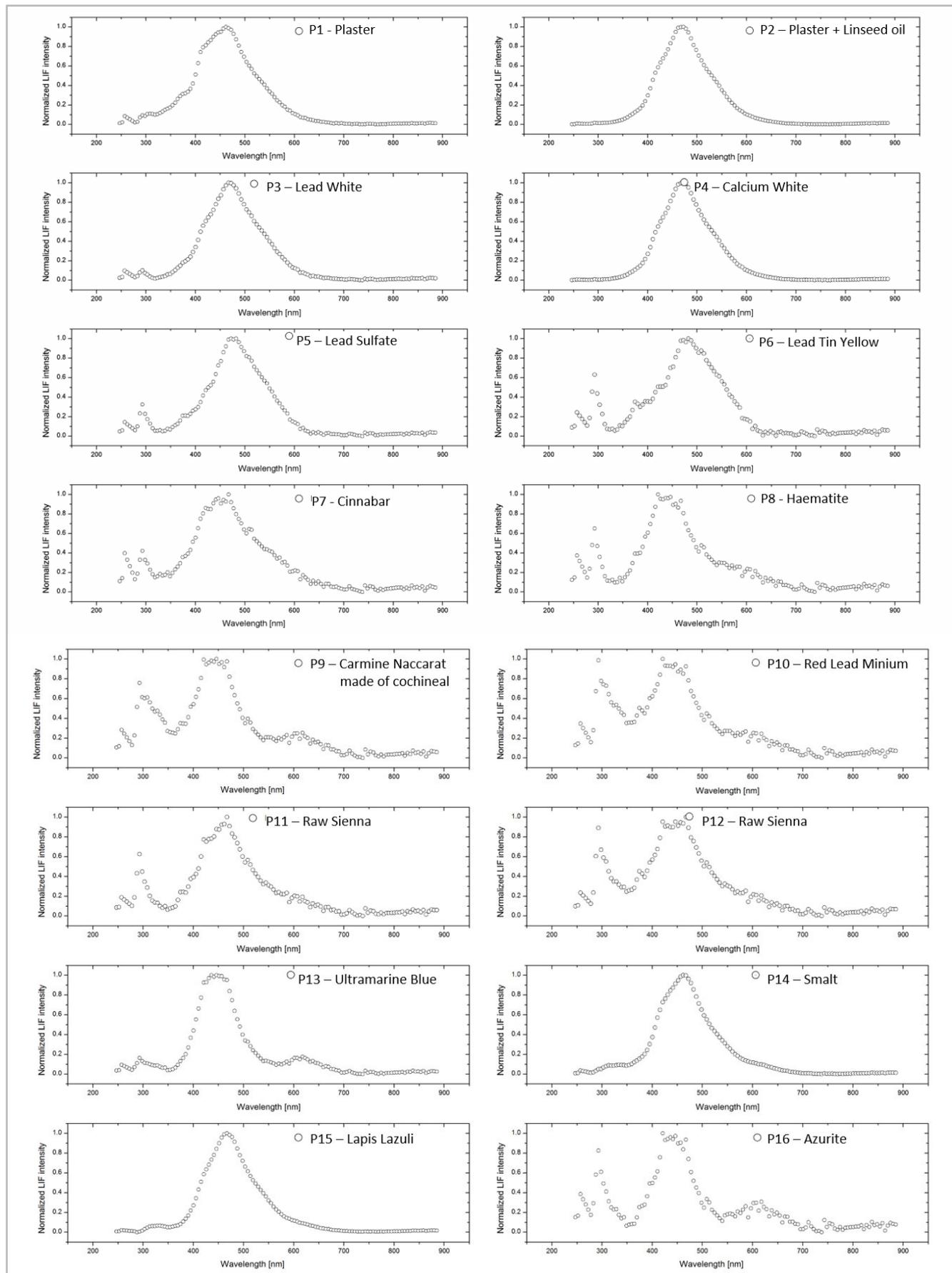
This study has been supported by the agreements IAPH-UPO & UPO-ENEA, José Castillejo (2010) and Technoheritage (2013) grants of Pilar Ortiz and the Project of Excellence of Junta de Andalucía HUM-6775 (RIVUPH). Part of the data analysis was conducted during the COBRA (Conservation of Cultural Heritage based on Radiations and Enabling Technologies) Regional project n. 1031 (LR13/2008) funded by Latium Region.

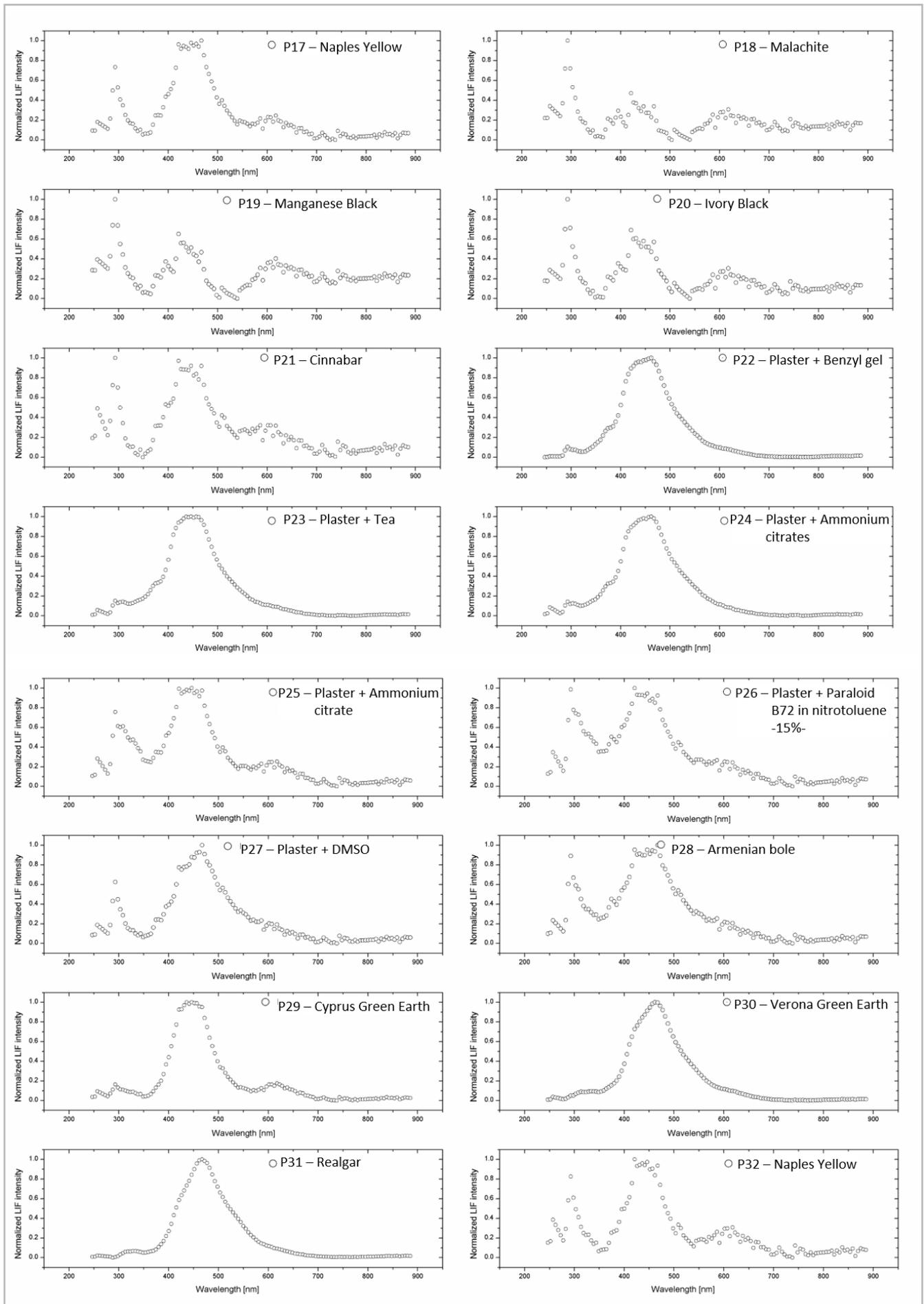
### References

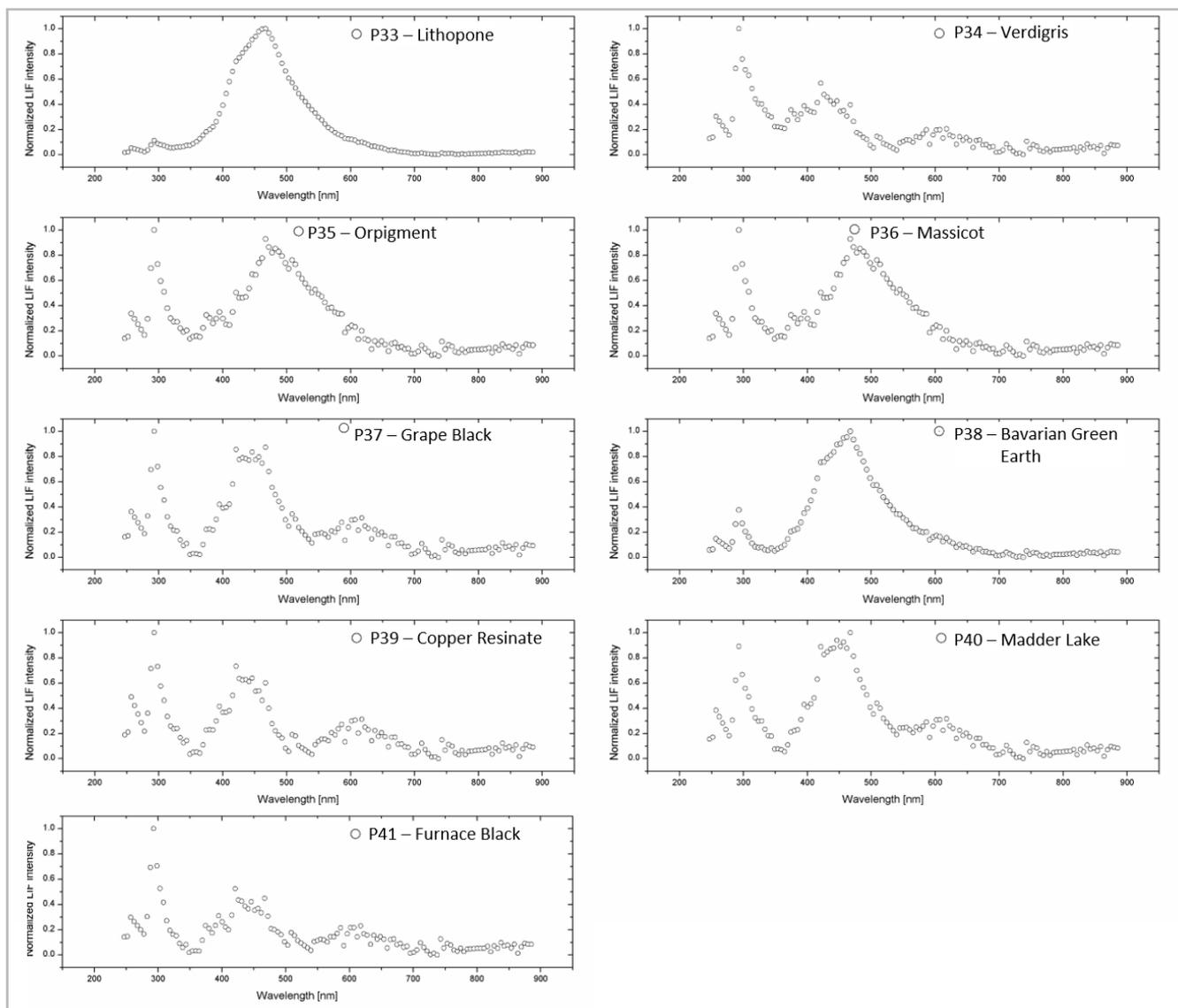
- ACQUAVIVA, S., D'ANNA, E., DE GIORGI, M.L., DELLA PATRIA, A., PEZZATI, L. (2008). "Optical characterization of pigments by reflectance spectroscopy in support of UV laser cleaning treatments." *Applied Physics A*. 92(1):223–227. <https://doi.org/10.1007/s00339-008-4486-2>
- AENOR (2014). UNE-EN 16085. *Conservation of Cultural property. Methodology for sampling from materials of cultural property. General rules.*
- ANGLOS, D., SOLOMIDOU, M., ZERGIOTI, I., ZAFIROPOULOS, V., PAPAZOGLU, T.G., FOTAKIS, C. (1996). "Laser-Induced Fluorescence in Artwork Diagnostics: An Application in Pigment Analysis." *Applied Spectroscopy*. 50(10):1331–1334. <https://doi.org/10.1366/0003702963904863>
- BORGIA, I., FANTONI, R., FLAMINI, C., DI PALMA, T.M., GUIDONI, A.G., MELE, A., GIARDINI GUIDONI, A., MELE, A. (1998). "Luminescence from pigments and resins for oil paintings induced by laser excitation." *Applied Surface Science*. 127–129:95–100. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(97\)00616-8](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(97)00616-8)
- BRUNI, S., CARIATI, F., CONSOLANDI, L., GALLI, A., GUGLIELMI, V., LUDWIG, N., MILAZZO, M. (2002). "Field and Laboratory Spectroscopic Methods for the Identification of Pigments in a Northern Italian Eleventh Century Fresco Cycle." *Applied Spectroscopy*. 56(7): 827–833. <https://doi.org/10.1366/000370202760171482>
- BURRAFATO, G., CALABRESE, M., COSENTINO, A., GUELI, A.M., TROJA, S.O., ZUCCARELLO, A. (2004). "ColorRaman project: Raman and fluorescence spectroscopy of oil, tempera and fresco paint pigments". *Journal of Raman Spectroscopy*. 35(10):879–886. <https://doi.org/10.1002/jrs.1229>
- CANEVE, L., COLAO, F., FIORANI, L., PALUCCI, A. (2010). *Patent No. RM2010A000606.*
- CARCAGNÌ, P., DELLA PATRIA, A., FONTANA, R., GRECO, M., MASTROIANNI, M., MATERAZZI, M., PAMPALONI, E., PEZZATI, L. (2007). "Multispectral imaging of paintings by optical scanning". *Optics and Lasers in Engineering*. 45(3):360–367. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.02.010>
- CARDON, D. (2007). *Natural Dyes - Sources, Tradition, Technology and Science*. London, U.K.: Archetype Publications Ltd.
- CECCHI, G., PANTANI, L., RAIMONDI, V., TOMASELLI, L., LAMENTI, G., TIANO, P., CHIARI, R. (2000). "Fluorescence lidar technique for the remote sensing of stone monuments". *Journal of Cultural Heritage*. 1(1):29–36. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(99\)00120-X](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(99)00120-X)
- CENNINI, C. 1859. *Il libro dell'arte, o Trattato della pittura*. G. Milanese. & F. Le Monnier, Eds. Firenze.
- COLAO, F., FANTONI, R., FIORANI, L., PALUCCI, A. (2007). *Patent No. RM2007A000278.*
- COLAO, F., CANEVE, L., FANTONI, R., FIORANI, L., PALUCCI, A., FANTONI, R., FIORANI, L. (2008). Scanning hyperspectral lidar fluorosensor for fresco diagnostics in laboratory and field campaigns. In *Lasers in the Conservation of Artworks - Proceedings of the International Conference LACONA 7*. CRC Press. 149–155. <https://doi.org/10.1201/9780203882085.pt3>
- COMELLI, D., D'ANDREA, C., VALENTINI, G., CUBEDDU, R., COLOMBO, C., TONIOLO, L. (2004). "Fluorescence lifetime imaging and spectroscopy as tools for nondestructive analysis of works of art". *Applied Optics*. 43(10):2175–2183. <https://doi.org/10.1364/ao.43.002175>
- COMELLI, D., NEVIN, A., VALENTINI, G., OSTICIOLI, I., CASTELLUCCI, E.M., TONIOLO, L., GULOTTA, D., CUBEDDU, R. (2011). "Insights into Masolino's wall paintings in Castiglione Olona: Advanced reflectance and fluorescence imaging analysis." *Journal of Cultural Heritage*. 12(1):11–18. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.06.003>
- DOMINGO, C., SILVA, D., GARCÍA-RAMOS, J.V., CASTILLEJO, M., MARTÍN, M., OUJJA, M., TORRES, R., SÁNCHEZ-CORTÉS, S. (2001). "Spectroscopic Analysis of Pigments and Binding Media of Polychromes by the Combination of Optical Laser-Based and Vibrational Techniques". *Applied Spectroscopy*, Vol. 55, Issue 8, pp. 992–998. 55(8):992–998. <https://doi.org/10.1366/0003702011953135>

- EASTAUGH, N., WALSH, V., CHAPLIN, T. & SIDDALL, R. (2004). *Pigment Compendium: A Dictionary of Historical Pigments - Nicholas Eastaugh, Valentine Walsh, Tracey Chaplin, Ruth Siddall - Google Books*. 3th ed. New York: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- FANTONI, R., PALUCCI, A., RIBEZZO, S., BORGIA, I., BACCHI, E., CAPONERO, MA., BORDONE, A., BUSINARO, L., FERRI DE COLLIBUS, M., FORNETTI, GG., POGGI, C. (2000). "Laser diagnostics developed for conservation and restoration of cultural inheritance". In *SPIE Proceed. Conf. ALT'99*. V. 4070. V.I. Pustovoy & V.I. Konov, Eds. Bellingham: V.I. Pustovoy and V.I. Konov Eds. 2-7. <https://doi.org/10.1117/12.378139>
- FANTONI, R., CANEVE, L., COLAO, F., FIORANI, L., PALUCCI, A., DELL'ERBA, R., FASSINA (2013). "Laser-induced fluorescence study of medieval frescoes by Giusto de' Menabuoi". *Journal of Cultural Heritage*. 14(3 SUPPL):S59-S65. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.10.025>
- FIORANI, L., CANEVE, L., COLAO, F., FANTONI, R., ORTIZ, P., GÓMEZ & MA, VÁZQUEZ. 2010. "Real-Time Diagnosis of Historical Artworks by Laser-Induced Fluorescence." *Advanced Materials Research*. 133-134:253-258. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.253>
- FOTAKIS, C., ANGLOS, D., COURIS, S. (1997). "Laser Diagnostics of Painted Artworks: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in Pigment Identification". *Applied Spectroscopy*, Vol. 51, Issue 7, pp. 1025-1030. 51(7):1025-1030. <https://doi.org/10.1366/0003702971941421>
- GIARDINI-GUIDONI, A., VENDITTELLI, M., FLAMINI, C., FANTONI, R., SCIUTI, S., MELE, A. (2000). "Experimental comparison of three nondestructive testing diagnostics on pigments and ligands." In *Proceedings of the SPIE*, Volume 4070, p. 8-17 (2000). V. 4070. V.I. Pustovoy & V.I. Konov, Eds. 8-17. <https://doi.org/10.1117/12.378149>
- GIROUARD, G., BANNARI, A., HARTI, A., EL., DESROCHERS, A. (2004). "Validated spectral angle mapper algorithm for geological mapping: comparative study between QuickBird and Landsat-TM". In *XXth ISPRS Congress. Istambul*. 599-604.
- GÓMEZ MORÓN, MA. (2008). *Analytical report of the paintings of the San Telmo vaults "Informe analítico de las pinturas de las bóvedas de San Telmo"*. (Internal report). Sevilla (Spain).
- ICOMOS (2003). *Principles for the preservation and conservation-restoration of wall paintings*. Victoria Falls (Zimbabwe): 14a Asamblea General del ICOMOS.
- DE LA RIE, ER 1(982). "Fluorescence of Paint and Varnish Layers (Part III)". *Studies in Conservation*. 27(3):102. <https://doi.org/10.2307/1506145>
- LOGNOLI, D., LAMENTI, G., PANTANI, L., TIRELLI, D., TIANO, P., TOMASELLI, L. (2002). "Detection and characterization of biodeteriogens on stone cultural heritage by fluorescence lidar". *Applied optics*. 41(9):1780-7. <https://doi.org/10.1364/ao.41.001780>
- LOGNOLI, D., CECCHI, G., MOCHI, I., PANTANI, L., RAIMONDI, V., CHIARI, R., JOHANSSON, T., WEIBRING, P., HEDNER, H., SVANBERG, S. (2003). "Fluorescence Lidar imaging of the cathedral and baptistry of Parma". *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 76(4):457-465. <https://doi.org/10.1007/s00340-003-1126-6>
- MIYOSHI, T. (1985). "Fluorescence from Oil Colours, Linseed Oil and Poppy Oil under N2 Laser Excitation". *Japanese Journal of Applied Physics*. 24(Part 1, No. 3):371-372. <https://doi.org/10.1143/JJAP.24.371>
- MOUNIER, A., LE BOURDON, G., AUPETIT, C., BELIN, C., SERVANT, L., LAZARE, S., LEFRAIS, Y., DANIEL, F. (2014). Hyperspectral imaging, spectrofluorimetry, FORS and XRF for the non-invasive study of medieval miniatures materials. *Heritage Science*. 2(1):24. <https://doi.org/10.1186/s40494-014-0024-z>
- NABAIS, P., MELO, MJ., LOPES, JA., VITORINO, T., NEVES, A. CASTRO, R. (2018). "Microspectrofluorimetry and chemometrics for the identification of medieval lake pigments." *Heritage Science*. 6(1):1-11. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0178-1>.
- NEVIN, A. ANGLOS, D. (2006). "Assisted Interpretation of Laser-Induced Fluorescence Spectra of Egg-Based Binding Media Using Total Emission Fluorescence Spectroscopy". *Laser Chemistry*. 2006:1-5. <https://doi.org/10.1155/2006/82823>
- NEVIN, A., CATHER, S., ANGLOS, D., FOTAKIS, C. (2006). "Analysis of protein-based binding media found in paintings using laser induced fluorescence spectroscopy". *Analytica Chimica Acta*. 573-574:341-346. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.01.027>
- OUIJA, M., VÁZQUEZ-CALVO, C., SANZ, M., DE BUERGO, MÁ., FORT, R., CASTILLEJO, M. (2012). "Laser-induced fluorescence and FT-Raman spectroscopy for characterizing patinas on stone substrates". *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 402(4):1433-1441. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-5319-2>
- PACHECO, F. (1871). *The Art of painting "El arte de la pintura"*. Revised ed ed. Madrid: Librería de D. León Pablo Villaverde.
- RAIMONDI, V., ANDREOTTI, A., COLOMBINI, MP, CUCCI, C., CUZMAN, O., GALEOTTI, M., LOGNOLI, D., PALOMBI, L., PICOLLO, M. TIANO, P. (2015). Test measurements on a secco white-lead containing model samples to assess the effects of exposure to low-fluence UV laser radiation. *Applied Surface Science*. 337:45-57. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.02.062>
- RASHMI, S., ADDAMANI, S., VENKAT, RAVIKIRAN, S. (2014). "Spectral Angle Mapper Algorithm for remote Sensing Image Classification". *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 1(4):201-205.
- RENCHER, AC. (2002). *Methods of Multivariate Analysis*. 2nd ed. New York: Wiley Interscience.
- SIMONOT, L., THOURY, M., DELANEY, J. (2011). "Extension of the Kubelka-Munk theory for fluorescent turbid media to a nonopaque layer on a background." *Journal of the Optical Society of America A*. 28(7):1349. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.28.001349>
- VERRI, G., CLEMENTI, C., COMELLI, D., CATHER, S., PIQUÉ, F. (2008). "Correction of Ultraviolet-Induced Fluorescence Spectra for the Examination of Polychromy". *Applied Spectroscopy*. 62(12):1295-1302. <https://doi.org/10.1366/000370208786822296>

**Annex 1.-** LIF spectrum of pigments/colorants on plaster with linseed oil. The name of the pigment and the occasional presence of other additives is specified in Table I. Data are normalized on the maximum, an indication on the relative intensity can be derived from SNR (data scattering around the best fit curve).







**Author/s**



**María Auxiliadora Gómez-Morón**  
[mariaa.gomez.moron@juntadeandalucia.es](mailto:mariaa.gomez.moron@juntadeandalucia.es)  
 Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (IAPH), Seville, Spain

BSc Chemistry 1989-1994 and Master “Quimilaser. Laser application in Chemistry” 2012 (University of Sevilla). Member, since 2016, of the project “Art-Risk (Artificial Intelligence applied to preventive conservation of heritage buildings)” to investigate and develop a new computerized tool for preventive conservation of heritage in urban centres based on models of artificial intelligence. Art-Risk will be available to organizations and companies dedicated to the restoration and rehabilitation. Member, since 1995, of the research group “Remote Sensing and Geochemistry”, with long-term experience in the research line in Archaeometry. Socrates grant at the University la Sapienza, where she worked in the project “Testaccio” (1999). An 18 months training grant at the IAPH (Andalusian Institution for Historical Heritage), from 1.11.1999 to 30.4.2001.

A grant for conservation and restoration of cultural heritage at the Institution for Spanish Historical Heritage (2001). Since 2001, she works at IAPH (Andalusian Institution for Historical Heritage), where she takes part in projects such as Giralddillo’s restoration and is responsible of the project for application of non-destructive analytical techniques for Historical Heritage. Part time professor at University Pablo de Olavide (Sevilla) since 2009, where she has taught three editions of the on-line course of non-destructive analytical techniques for Historical Heritage.



**Rocío Ortiz**  
[rortcal@upo.es](mailto:rortcal@upo.es)  
 Department Physical, Chemical and Natural Systems, University Pablo de Olavide, Seville, Spain

Graduated in Architecture in 2001, she obtained a Master’s degree in Protection of Built Heritage with a project oriented to a case study in Marchena in 2012. In 2014 she earned a Ph.D with European mention in University Pablo de Olavide (Seville).

She is currently working as Professor at the UPO, where she develops research focus on the fields of: Preventive Conservation; Risks and Vulnerability of Patrimony. She is also director of the Mater in Diagnosis of the state of preservation of Cultural Heritage and is responsible of the area of crystallography and mineralogy of the same University. Dr. Ortiz's expertise is in diagnosis of Cultural Heritage, management, e-learning, and her scientific works appeared in 30 books, conference proceedings, and journals. Her research projects have been supported by the European Union, national and regional governments, and private organizations. Dr. Ortiz's research interests have focused on risk and vulnerability of Cultural Heritage, GI applied to Cultural Heritage studies, Construction materials, Urban Planning and hazards and innovation in science teaching with the emphasis on cultural heritage diagnosis



**Francesco Colao**

[francesco.colao@enea.it](mailto:francesco.colao@enea.it)

Department for Fusion and Nuclear Safety Technologies, Division Physical Technologies for Security and Health, ENEA, Frascati, Italy

Specialist in laser applications, signal processing and data acquisition, current interests concern the development of fluorescence lidar for the analysis of pigments, binders and consolidants. Since 1987 he is researcher at ENEA, carrying out research in design and development of remote sensing laser-based systems for atmospheric studies. Known expert in the field of laser spectroscopy and diagnostics, including lidar for atmospheric studies, Raman spectroscopy, visible/UV emission spectroscopy, Laser Induced Fluorescence (LIF). He gained large experience of remote sensing systems for different applications: environmental control of pollutants, and remote diagnostic in the field of cultural heritage. Currently the main activities in the latter field are related to the development of fluorescence lidar, used to monitor the water quality (chemical and biochemical pollution) and the vegetation health (both on phytoplankton species and on green plants), cultural heritage (analysis of pigments, binders and consolidants), application of laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) and lidar remote sensing of the stratosphere. He was involved in the study of LIBS and its application to the field of laser matter interaction and monitoring of soil and water. He has been responsible for several research projects, among these it is worth of mention the followings: application of LIBS to identification of asbestos' fibres in environmental samples (ISPESL programme 2003-04), development of a LIBS system for extraterrestrial soil analysis (ASI programme 2001-02), study of polar stratospheric clouds by lidar remote sensing (2006, 2017-19), development of a LIBS system for use in hostile environment (MURST programme 2004-07), development of an integrated system for drug discovery by laser spectroscopy (CUSTOM – EU FP7 2010-2012), development of LIF system for forensic investigation (FORLAB– EU FP7 2011-2013), development of standoff Raman system for prompt identification of explosive

substances (NATO project RADEX 2014-16, EXTRAS 2018-20). He has been tutoring of thesis and has given lectures to universities and research centers. The results of his researches have been presented at international conferences and published in peer review journals in more than fifty regulars.



**Roberta Fantoni**

[roberta.fantoni@enea.it](mailto:roberta.fantoni@enea.it)

Department for Fusion and Nuclear Safety Technologies, Division Physical Technologies for Security and Health, ENEA, Frascati, Italy

Dr. Roberta Fantoni is the head of the division "Technology Applications for Security and Health" at Fusion and Technology for Nuclear Safety and Security (ENEA). Her role is to coordinate researches in the field of development of applications of ionizing and non-ionizing radiations, including processes and diagnostics based on lasers and particles (electrons, protons) beams for the Industry, Environment, Cultural Heritage and Bio-medicine, and Micro-Nanotechnology. After a degree in chemistry she became a specialist in optoelectronics dealing with laser applications. She is a known expert in the field of laser spectroscopy and diagnostics. Major activities concern applications of the spectroscopic techniques as on-line diagnostics during different process. Recently she coordinated the regional project COBRA dedicated to innovation and technology transfer in Cultural Heritage conservation. Author of 164 scientific papers of peer review papers and 25 book chapters in the field of spectroscopy and laser applications.



**Javier Becerra**

[jbeclun@upo.es](mailto:jbeclun@upo.es)

Department Physical, Chemical and Natural Systems, University Pablo de Olavide, Seville, Spain

PhD in History and Humanities: Europe, America, Arts and Language, degree in Conservation and Restoration and MSc Diagnosis of the State of Preservation of the Historical Heritage. Now, Javier is researcher at the Pablo de Olavide University in Seville, Spain. His research activity has focused on a) studies of new conservation-restoration treatments, especially based on nanomaterials b) vulnerability and risk studies in cultural heritage and c) diagnosis, analytical techniques and interventions in cultural heritage. This scientific production has resulted in a patent, 15 journal publications (10 in high impact indexed journals) and 12 book chapters. The results of the investigations carried out have been presented at 10 international conferences with a total of 18 communications. He has collaborated in the diagnosis of samples from national and international monuments (Villa Adriana in Rome, Medina Azahara, archaeological museum of Écija, churches in Seville, contemporary buildings in La Havana, historical buildings

in Oxford and Panama City, etc.) and has participated in analytical reports of national and international artworks requested from institutions such as the Andalusian Institute of Historical Heritage or the Pablo de Olavide University. Finally, his research activity has been recognized with different awards at national and international level.



**Pilar Ortiz**

[mportcal@upo.es](mailto:mportcal@upo.es)

Department Physical, Chemical and Natural Systems, University Pablo de Olavide, Seville, Spain

The research and teaching experience developed has been focused on the diagnosis, preservation and conservation of cultural heritage. For this task, she has collaborated with museums and cultural institutions, such as the IVCR+i, IAPH, Cádiz Museum, Écija Museum, etc. Additionally, I have developed works related to cultural heritage issues in several countries, i.e., the United Kingdom, Belgium, Italy, Romania, Cuba, Peru, Colombia, Panama, etc. Her scientific production can be summarized in 38 publications on indexed journals; 50 books and book chapters, more than 25 attendances to international congresses, chairman and member of scientific committee in several international congresses, etc. She has worked at the University of Amberes (Belgium) as assistant lecturer, invited professor at the University of Oxford (UK), and invited researcher at ENEA (Italy). She has participated in 24 national and international projects, contracts and agreements and has the head researcher in 16 of those projects, highlighting a Project of Excellence of the Junta de Andalucía, a RETOS project of the Government of Spain, an International Cooperation project of the Junta de Andalucía and International Erasmus+. She has opened and leadership important research lines as the application of Lasers techniques for in situ diagnosis in cultural heritage materials, the development of non-destructive techniques for diagnosis of cultural heritage, or the application of risk maps, vulnerability index and artificial intelligence to the preventive conservation of cultural heritage. Dr. Ortiz is member of the International Excellency Campus of the University of Jaén in cultural and natural heritage, of the "Cambio" work group in the International Excellency Campus of the Pablo de Olavide University (UPO), of the Andalusian Council of Cultural Heritage and Dean of the faculty of Experimental Sciences of the UPO.



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.759>

# Técnicas analíticas para la caracterización de documentos: una revisión bibliográfica

Gemma M<sup>a</sup> Contreras, Javier Becerra

**Resumen:** El interés por la conservación de manuscritos ha crecido en las últimas décadas, bien por su valor artístico o por la información única que custodian. Para ello, es preciso conocer tanto los materiales empleados, como las alteraciones presentes, a fin de discernir el mejor tratamiento de restauración según sus características.

La implementación de técnicas analíticas aplicadas a este campo de estudio ha permitido mejorar el conocimiento sobre el patrimonio documental y bibliográfico. De este modo, se pueden emplear técnicas elementales (energías dispersivas de rayos X, fluorescencia de rayos X, etc.) o moleculares (espectroscopía infrarroja, espectroscopía Raman, etc.) para analizar los materiales inorgánicos u orgánicos. Si bien muchos de estos estudios han estado encaminados a estudiar manuscritos iluminados, es importante prestar especial atención a los estudios publicados sobre la caracterización de tintas metalográficas, las cuales se relacionan con la preservación de la información y con la degradación del soporte. El empleo de técnicas de imagen (microscopía óptica, fotografía infrarroja, microscopía electrónica, etc.) permite complementar los estudios de diagnóstico e identificación de materiales. Sin embargo, un conocimiento pormenorizado del manuscrito estudiado requiere del diseño de un protocolo de estudio en el que se complemente la información obtenida mediante la selección de las técnicas más adecuadas en función de las características del manuscrito y la disponibilidad de estas.

El objetivo principal de este artículo es simplificar la toma de decisiones en torno a la selección de técnicas analíticas y no solo dar una revisión bibliográfica de los principales estudios sobre el análisis de soportes y materiales respaldados. Además, se ha diseñado un protocolo que facilita al restaurador la selección de técnicas analíticas en función del material a caracterizar y los recursos disponibles

**Palabras clave:** Técnicas analíticas, manuscritos, caracterización, diagnóstico

## Analytical techniques for the characterization of documents: a bibliographic review

**Abstract:** The interest in the conservation of manuscripts has grown in recent decades, either for their artistic value or for the unique information they hold. For this, it is necessary to know both the materials used and their alterations, in order to discern the best restoration treatment according to their characteristics.

The implementation of analytical techniques applied to this field of study has allowed us to improve knowledge about documentary and bibliographic heritage. Thus, elementary techniques (X-ray dispersive energies, X-ray fluorescence, etc.) or molecular techniques (infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, etc.) can be used to analyze inorganic or organic materials. Although many of these studies have been aimed at studying illuminated manuscripts, it is important to take into consideration the published studies on the characterization of metallographic inks, which are related to the preservation of information and to the degradation of the support. The use of imaging techniques (optical microscopy, infrared photography, electron microscopy, etc.) makes it possible to complement diagnostic and material identification studies. However, a detailed knowledge of the studied manuscript requires the design of a protocol that complements the information obtained by selecting the most appropriate techniques based on the characteristics of the manuscript and the availability of them.

The main objective of this paper is simplified the maker decision around the selection of analytical techniques and not only giving a bibliographical review of the main studies about the analysis of supports and supported materials, Additionally, a protocol have been designed to make easier to the restorer the choose of analytical techniques according to the materials to characterized and the available sources.

**Keywords:** Analytical techniques, manuscripts, characterization, diagnosis

## Introducción

El patrimonio documental y bibliográfico abarca un conjunto de bienes de creciente interés tanto por la información custodiada como por su valor histórico-artístico. Desde hace décadas, se han incrementado los estudios tendentes a identificar y conocer tanto los materiales estructurales y sustentados, así como los productos de alteración, con el objetivo de mejorar los métodos para su conservación y restauración. Estos estudios son difundidos por diversas fuentes, destacando las bases de datos bibliográficas como Scopus o Dialnet, editoriales como Elsevier o Taylor & Francis, o las publicaciones realizadas bajo el amparo de instituciones de reconocida trayectoria profesional, tales como el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE), el Instituto Valenciano de Conservación, Restauración e Investigación (IVC+i) o el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (IAPH).

El conjunto de técnicas analíticas que pueden emplearse para estudiar manuscritos es muy amplio, abarcando desde complejas técnicas para obtener la composición de los materiales empleados, como las espectroscopías infrarroja o Raman, la fluorescencia de rayos X o las técnicas cromatográficas (Zappalà *et al.* 1996; Derbyshire & Wheeler 2002; Stuart 2007; Manso & Carvalho 2009), a ensayos más rudimentarios que pueden ser aplicados en el propio taller de restauración, por ejemplo, el test de batofenantrolina, de Molish o de Lugol (Matteini & Moles 2001; Stuart 2007; Neevel 2009). En este sentido, el conservador-restaurador debe tener una visión general de las técnicas analíticas más importantes empleadas en el estudio de documentos y material de archivo, de tal forma que se posean los conocimientos oportunos para discernir la técnica más adecuada en función de las necesidades del bien y los recursos disponibles en cada momento.

Un aspecto relevante a la hora de seleccionar una técnica analítica es la posibilidad de tomar muestras para realizar el análisis (Larsen 2002), así como la necesidad de operar *in situ*. Parece obvio que un método en el que no sea necesario la toma de muestras, y posibilite operar en el mismo archivo o biblioteca, es un sistema ideal. Sin embargo, según Clarke (2002), la técnica escogida debe ser capaz de identificar completamente un material desconocido, sensible a muestras muy pequeñas, capaz de diferenciar entre materiales, inmune a posibles interferencias, rápido y capaz de identificar componentes de mezclas de manera individualizada, entre otros.

Con este artículo se pretende, no sólo ofrecer una visión detallada de las investigaciones realizadas sobre análisis de soportes y elementos sustentados, sino simplificar la labor de futuros estudios en los que se deba seleccionar un método analítico. Los sistemas de análisis han sido clasificados en técnicas de imagen y

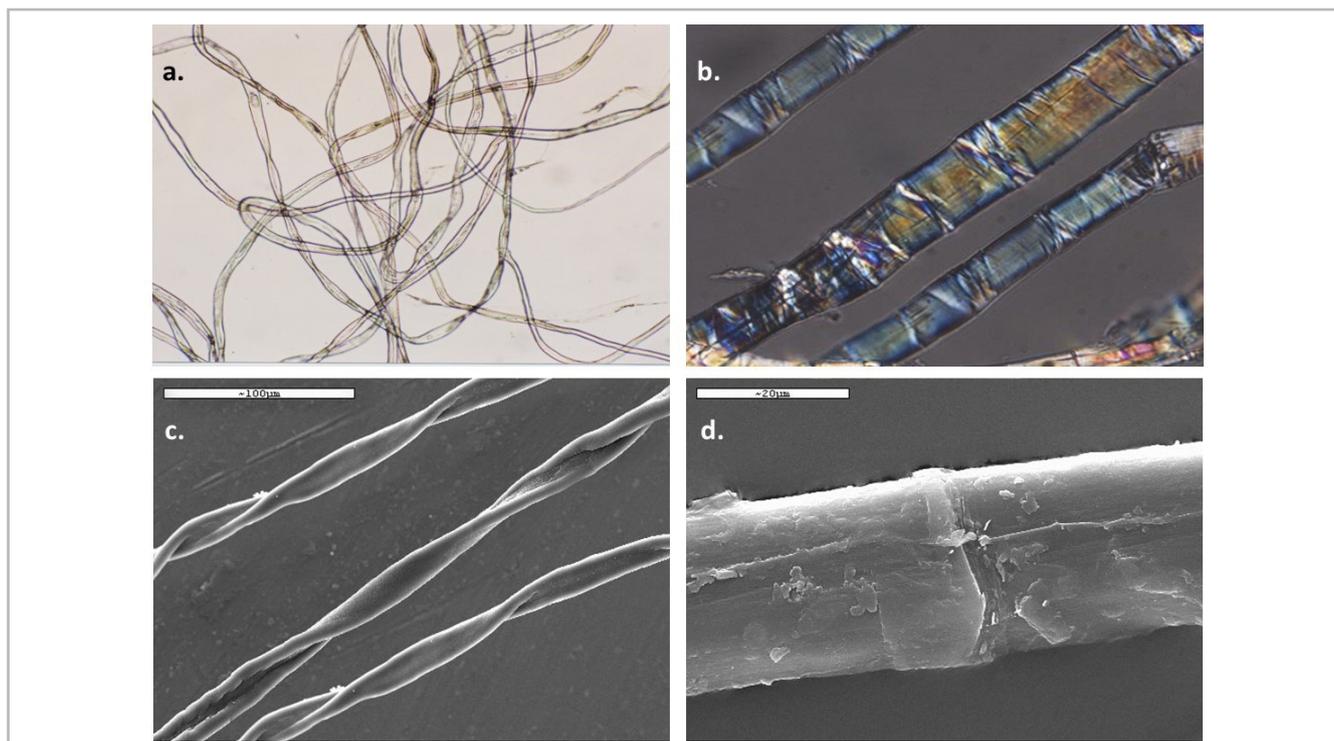
técnicas analíticas de identificación, así como un último grupo de pruebas que, al no requerir de complejos equipamientos, pueden ser aplicadas al papel en el taller de restauración. Sin embargo, una caracterización completa de este tipo de bienes culturales requiere del empleo de diferentes métodos analíticos debido a la amplia variedad de materiales que los componen, tanto orgánicos como inorgánicos. Para finalizar esta revisión bibliográfica, se han recogido diferentes estudios en los que es posible observar cómo estas técnicas analíticas se complementan unas con otras, a fin de establecer un protocolo básico de actuación teniendo en cuenta los recursos disponibles en cada momento.

## Técnicas de imagen

El empleo de técnicas de imagen en el estudio de documentos manuscritos permite obtener información morfológica de los materiales constitutivos, así como evaluar el estado de deterioro de estos (James 2010).

Mediante microscopía óptica (MO) es posible obtener imágenes amplificadas de hasta 500 aumentos [figura 1.a y b], lo que permite analizar tanto las fibras del papel (Stuart 2007) como la presencia de biodeterioro (Pinzari, Pasquariello & De Mico 2006). Además, el desarrollo de microscopios portátiles que llegan a alcanzar los 900 aumentos facilita su empleo *in situ*, sin la necesidad de toma de muestras. Para obtener imágenes de mayor magnificación es necesario recurrir a la microscopía electrónica de barrido (SEM). Esta técnica utiliza un haz de electrones para formar una imagen acromática de hasta 300.000 aumentos [figura 1.c y d]. El haz de electrones es generado por el calentamiento de un filamento de tungsteno, volframio o hexaboruro de lantano, e irradiado sobre la muestra que se sitúa en una cámara al vacío (Matteini & Moles 2001), en la que también se sitúan los diversos detectores que generan la imagen utilizando las interacciones electrón-muestra (Goodhew, Humphreys & Beanland 2014; Moropoulou *et al.* 2019). Esta técnica requiere de toma de muestras y ha sido empleada, por ejemplo, para el estudio de la morfología de la superficie del papel (Goltz *et al.* 2010) o la presencia de biodeterioro (Pinzari, Pasquariello & De Mico 2006). En efecto, la comparativa entre imágenes MO y SEM, permite apreciar como el aumento de la magnificación de estas últimas facilita la labor de identificación, por ejemplo, al apreciarse de manera nítida la torsión del hilo de algodón [figura 1.c] o las dislocaciones de la fibra de cáñamo [figura 1.d].

En el caso de que se fuese necesario realizar un rastreo topográfico de la superficie puede recurrirse al empleo de la microscopía de fuerza atómica (AFM), tal y como realizan Piantanida, Bicchieri & Coluzza (2005) para estudiar las reacciones químicas en superficie y la degradación de la celulosa por envejecimiento y ataque biológico.



**Figura 1.-** Fibra de algodón (a) y cáñamo (b) observadas mediante microscopía óptica. Fibra de algodón (c) y cáñamo (d) observadas mediante microscopía electrónica de barrido. Fuente: IVCR+i.

El empleo de la fotografía a diferentes longitudes de onda mediante filtros de paso permite evaluar la degradación de manuscritos. En este sentido, mediante fotografía infrarroja es posible distinguir tintas sepia y metalogálica de las de bistre o carbón (Colbourne 2001) o los dibujos subyacentes de las miniaturas [figura 2], mientras que con fotografía ultravioleta, la fluorescencia de los materiales es empleada para leer manuscritos con la tinta muy desvaída o estudiar su oxidación y degradación (Mairinger 2000; Knox & Easton 2003; Stuart 2007; Easton, Christens-Barry & Knox 2011; Montani *et al.* 2012).

La fotografía infrarroja de falso color ha sido empleada por varios autores (Clarke 2001; Colbourne 2001) para distinguir pigmentos inorgánicos con similar espectro. Sin embargo, en la actualidad, son las técnicas basadas en imágenes espectrales las que están tomando un mayor auge. Es el caso de la imagen multispectral, cuyos equipos permiten capturar información sobre diferentes bandas del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano, por cada píxel de la imagen. Por tanto, las imágenes multispectrales están compuestas por diferentes bandas, generalmente de 3 a 20, que no han de ser contiguas. Con el empleo de esta técnica se han identificado tintas, su distribución y su corrosión (Havermans, Aziz & Scholten 2003; Scholten *et al.* 2005), así como dibujos subyacentes de ilustraciones (McGillivray & Duffy 2017). A diferencia de la imagen multispectral, las imágenes hiperespectrales están formadas por un mayor número de bandas contiguas, lo que permite obtener el espectro de cada píxel. Se han realizado diferentes aproximaciones al empleo de esta técnica en el estudio de manuscritos, especialmente para evaluar cambios



**Figura 2.-** Fotografía a color (a) y fotografía infrarroja (b) sobre una miniatura procedente de un cantoral del Colegio del Corpus Christi. Fuente: IVCR+i.

ópticos en los documentos, durabilidad de la tinta y del papel o procesos de restauración, así como estudiar tintas o la degradación de pergaminos (Scholten *et al.* 2005; Aalderink *et al.* 2008; Goltz *et al.* 2009; Giacometti *et al.* 2012; Mindermann 2018).

### Técnicas analíticas de identificación

Las técnicas analíticas de identificación permiten estudiar la composición química de los diferentes materiales empleados en el patrimonio documental y bibliográfico, así como su grado de alteración o la aparición de productos de neoformación. Estos estudios se pueden llevar a cabo mediante el estudio de los elementos químicos o las moléculas presentes en los diferentes materiales.

#### —Técnicas de identificación de elementos químicos

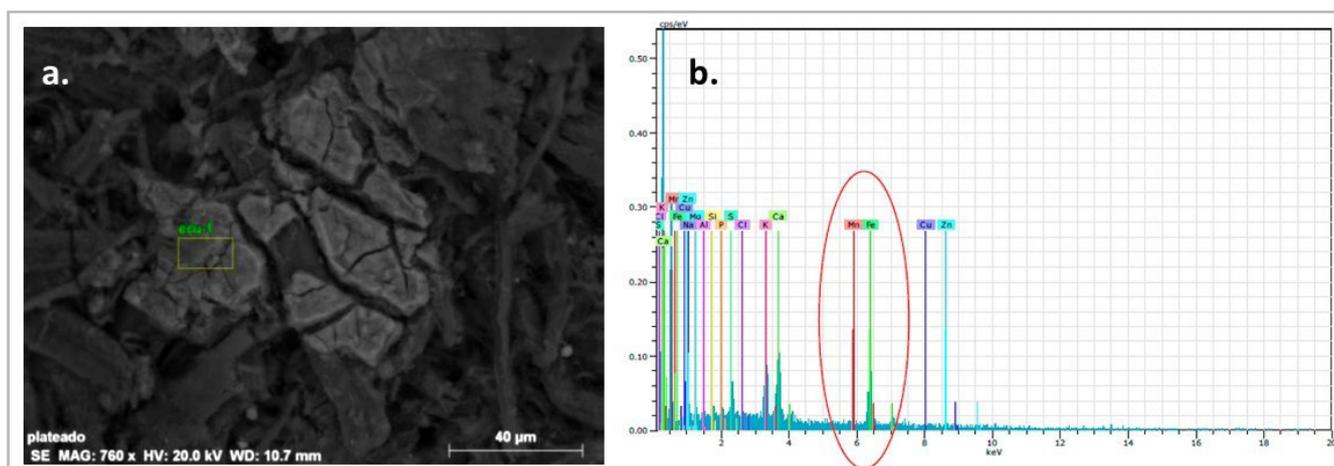
Entre las técnicas de análisis elemental caben destacar las técnicas basadas en la fluorescencia de rayos X. En ellas se emplea una fuente de excitación (electrones, protones, rayos X, fuentes radiactivas, etc.) que excita el material induciendo la emisión de fluorescencia de rayos X por parte de los átomos excitados, aportando información cuantitativa y cualitativa de los elementos que lo constituyen (análisis multielemental).

La fluorescencia de rayos X (EDXRF) es una técnica no destructiva, rápida, precisa y fiable, y cuyo espectro puede ser simple o de varios elementos. En el caso de material documental y bibliográfico, ha sido utilizada para estudiar tintas metalogólicas y su degradación, identificar la aparición de foxing o analizar halos y filigranas (Ferrero *et al.* n.d.; Zappalà *et al.* 1996; Kanngießer *et al.* 2004; Rožič, Mačefat & Oreščanin 2005; Stuart 2007; Van Der Snickt *et al.* 2008; Čechák *et al.* 2010; Chaplin *et al.* 2010; Deneckere *et al.* 2011; Dietz *et al.* 2012; Pessanha *et al.* 2012; Alcántara García, Ruvalcaba Sil & Vander Meeren 2014; Manso *et*

*al.* 2014). Una variación de esta técnica es la radiación sincrotrón de fluorescencia de rayos X (XSRXRF) y que ha sido utilizada para caracterizar materiales de dibujo, tintas impresas, pigmentos, etc. (Kolar & Strlič 2006; Bataglia *et al.* 2011). Sin embargo, para obtener una mayor sensibilidad en la detección de elementos químicos, es recomendable recurrir a la fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF), por la cual el objeto es excitado por rayos X primarios que inciden de manera oblicua sobre la muestra. Su ventaja frente al XRF es que tiene una mayor sensibilidad de medición elemental. Klockenkämper, Von Bohlen, and Moens (2000) y Pessanha, Manso, and Carvalho (2012) la han empleado para la caracterización de tintas, pigmentos inorgánicos e impurezas en manuscritos.

Otra técnica muy utilizada en la caracterización de manuscritos es la espectroscopia dispersiva de rayos X (EDX), la cual aparece acoplada a un microscopio electrónico. Permite realizar el análisis químico elemental semicuantitativo [figura 3], por lo que es adecuada para analizar elementos inorgánicos, tintas manuscritas e impresas, la degradación de pergaminos y pigmentos o la oxidación de tintas (Matteini & Moles 2001; Kolar *et al.* 2006; Goltz *et al.* 2010; Espejo Arias *et al.* 2011; Pessanha *et al.* 2012).

La técnica de emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE) permite reconocer elementos de bajo número atómico, generalmente a partir del sodio (Plossi, Zappalà & Zappalà 2007). Su funcionamiento se basa en detectar los rayos X procedentes de la desexcitación de los átomos tras ser ionizados con un haz de protones. A pesar de que se puede aplicar sin dañar prácticamente los documentos, su uso presenta algunas limitaciones como la profundidad del perfil de la tinta depositada en el papel frente al alcance de los protones, el peso de las concentraciones de los elementos en el papel, la no homogeneidad en la distribución, la rugosidad de la superficie del papel, y el hecho de que la decisión dependa del elemento químico analizado con errores entre el 5 y el 20% (Budnar *et al.* 2006). A pesar de



**Figura 3.**—Muestra de tinta de un manuscrito procedente del Archivo Nacional de Ecuador estudiada por SEM (a) y EDX (b). En este caso se puede determinar que se trata de una tinta ferrogólica con trazas de calcio y potasio. Fuente: Gemma M<sup>a</sup> Contreras.

esto, se trata de una técnica ampliamente utilizada para el estudio de tintas impresas y manuscritas (distribución de metales, migración proporción de elementos, deterioro), pigmentos inorgánicos o el deterioro de papel, papiros, pergaminos y vitelas (Del Carmine *et al.* 1996; Lucarelli & Mandò 1996; Budnar *et al.* 2001; Budnar *et al.* 2004; Wagner *et al.* 2001; Budnar *et al.* 2006; Olsson *et al.* 2001; Kolar *et al.* 2006; Plossi & Zappalà 2007; Stuart 2007; Manso & Carvalho 2009; Kakuee *et al.* 2012; Pessanha *et al.* 2012).

El empleo de equipos láser en patrimonio documental y bibliográfico es muy común tanto en procesos de limpieza como en la caracterización de los materiales constituyentes (Clarke 2001; Kaminska *et al.* 2007; Nevin, Spoto & Anglos 2012). En el caso de la caracterización de este tipo de bienes culturales destaca el uso de la espectrometría de emisión atómica con inducción de plasma (IPC-AES), que ha sido utilizada para estudiar la influencia del hierro y el cobre en la degradación del papel (Kolar & Strlič 2006), y la espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (IPC-MS), la cual ha sido empleada para determinar elementos traza de los papeles y las tintas (Wagner *et al.* 1999; Stuart 2007). La espectroscopia de ablación inducida por láser (LIBS) permite hacer análisis cualitativo y cuantitativo de los elementos químicos presentes en una muestra (Mateo *et al.* 2019) al analizar el plasma producido por un pulso láser en la superficie del material a estudiar. Se trata, por tanto, de una técnica microdestruktiva, aunque con una alta sensibilidad, que permite determinar pigmentos, tintas manuscritas e impresas, papel y pergamino (Häkkinen *et al.* 2001; Melessanaki *et al.* 2001; Ochocińska *et al.* 2003; Oujja *et al.* 2005; Dolgin *et al.* 2006; Dolgin *et al.* 2008; Bicchieri *et al.* 2011; Pessanha *et al.* 2012; Król, Kowalska & Kościelniak 2018).

De este modo, y en base a las técnicas de caracterización elemental, se puede concluir que el empleo de SEM-EDX aporta la ventaja de unificar dos tipos de ensayos sobre una misma muestra, al obtenerse una imagen de alta magnificación, así como el análisis elemental de la muestra. Además, esta unificación de técnicas permite realizar un mapeado composicional y, por tanto, analizar la distribución de los diferentes elementos. Sin embargo, se trata de una técnica que requiere la toma de muestras y cuya sensibilidad a la hora de identificar elementos es de 1000 ppm, frente a otras técnicas como FRX (100 ppm) y LIBS (10-50 ppm) (Kearon & Mattley 2008). De este modo, para la identificación de elementos trazas sería recomendable el empleo de FRX, de la cual existen modelos que permiten el análisis *in situ* y sin toma de muestras, o LIBS, la cual es una técnica mínimamente invasiva. Finalmente, en el caso de ser necesaria la identificación de elementos de bajo peso molecular que no puedan ser identificados con las técnicas anteriores, se podría recomendar el empleo de PIXE.

#### —Técnicas de identificación a nivel molecular

Dentro de las técnicas de identificación a nivel molecular aplicadas al estudio del patrimonio documental y

bibliográfico destacan la espectroscopia infrarroja y la espectroscopia Raman.

Las espectroscopías infrarrojas son una serie de técnicas con numerosas aplicaciones en el patrimonio cultural (Derrick 2000), que analizan las vibraciones de los enlaces moleculares producidas por fotones de radiaciones infrarrojas, y cuyas longitudes de onda de excitación son características en función del tipo de molécula. En el caso de la espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR), la distribución de la radiación infrarroja es alterada por un espejo y pasada por un interferómetro donde es grabada la señal, es decir, se graba la cantidad de radiación infrarroja detectada. Mediante la transformada de Fourier, técnica de procesamiento de estos datos, los datos son transformados en un espectro. Esta técnica ha sido utilizada para identificar cargas (carbonatos y sulfatos), tintas metalogálicas (carbonatos, sulfatos, taninos, presencia de goma arábiga) e impresas, papeles (fibras, cargas, adhesivos, impurezas ácidas...) y pergaminos, colonias de microorganismos, oxidación por tintas metaloácidas y tratamientos de restauración (Colbourne 2000; Calvini, Gorassini & Chiggiato 2006; Trafela *et al.* 2007; Ferrer & Sistach 2007; Plossi & Zappalà 2007; Sivakoval, Beganskienė & Kareiva 2008; Zotti, Ferroni & Calvini 2008, 2011; Gonzalez & Wess 2008; Ursescu, Malutan & Ciovea 2009; Manso & Carvalho 2009; Bicchieri *et al.* 2011; Da Costa *et al.* 2013; Doherty *et al.* 2013; Vetter, Pöllnitz & Schreiner 2014; Doncea & Iona 2014; Nodari & Ricciardi 2019). A pesar de las ventajas que presenta esta técnica, autores como da Costa *et al.* (2013) y Remaizelles, Quillet & Bernard (2000) han detectado ciertas limitaciones a la hora de caracterizar pigmentos orgánicos, tintes y tintas. En el caso de las tintas metalogálicas, sólo es posible detectar el espectro de los taninos, no así de los complejos completos de las tintas.

En cuanto a la espectrometría Raman, se trata de un método analítico que se basa en la dispersión inelástica o Raman, y aporta información sobre los modos vibracionales de las moléculas. Su aplicación en el estudio de manuscritos está relacionada con la identificación de pigmentos orgánicos e inorgánicos, tintas y tintes, degradación y oxidación de las fibras, cargas de la celulosa, preparación original de pergaminos (Clark 1995; Burgio, Ciomartan & Clark 1997; Burgio, Clark & Hark 2010; Clarke 1999, 2001; Wehling *et al.* 1999; Mannucci *et al.* 2000; Bicchieri, Nardone & Sodo 2000; Bicchieri *et al.* 2006; Bicchieri *et al.* 2008; Bicchieri *et al.* 2011; Magistro *et al.* 2001; Bruni *et al.* 2001; Bruni *et al.* 2008; Derbyshire & Wheeler 2002; Chaplin *et al.* 2005; Chaplin *et al.* 2006; Aceto *et al.* 2006; Baraldi *et al.* 2009; Trentelman & Turner 2009; Bioletti *et al.* 2009; Guedes & Prieto 2012; Nastova *et al.* 2012; Marucci *et al.* 2018). Una de las principales limitaciones de esta técnica viene causada por el problema de la fluorescencia, fenómeno que aumenta en tintas históricas (Lee, Mahon & Creagh 2006), en tintes y papel (Stuart 2007), y en pergamino (Bersani *et al.* 2006). El empleo de la espectroscopia Raman activada por superficie aumentada (SERS) permite aumentar la

intensidad de las bandas Raman y reducir el efecto de la fluorescencia del material debido a la interacción del analito con la superficie rugosa de los metales nobles. De este modo, autores como El Bakkali *et al.* (2013), Castro *et al.* (2014) o Roldán, Centeno & Rizzo (2014) han podido mejorar la identificación de pigmentos, lacas o tintas.

Mediante espectrometría UV-Vis es posible identificar los grupos funcionales presentes en una molécula al excitar los electrones del enlace con radiación ultravioleta-visible. La variante de esta técnica más utilizada es la espectrometría de reflexión de fibra óptica (FORS), en la que se observa la reflectancia generada por el material en función de la longitud de onda del haz incidente, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano. En el caso de los pigmentos, cada uno tiene su propia curva de reflectancia espectral, por lo que es posible identificarlos (Clarke 2001; Matteini & Moles 2001; Aceto *et al.* 2012). Las limitaciones de este sistema aparecen cuando los pigmentos son mezclas y no puros (Aceto *et al.* 2012).

La espectrometría de resonancia magnética nuclear (NMR) permite estudiar las estructuras moleculares. Suele emplearse para evaluar el estado de conservación de materiales celulósicos, los deterioros ocasionados por las tintas metaloácidas o la efectividad de tratamientos de restauración (Blümich *et al.* 2003; Casieri *et al.* 2004; Castro *et al.* 2008)

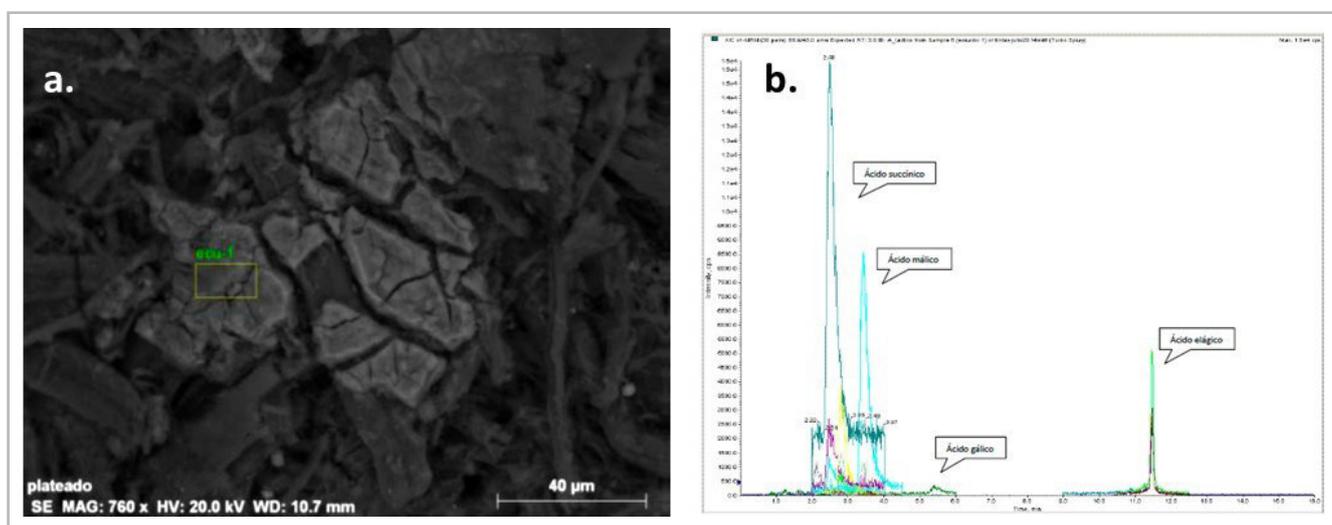
En el caso de técnicas moleculares, por tanto, destaca su empleo para la identificación de pigmentos, cargas, tratamientos de restauración, tipos de papel, etc. Algunos pigmentos y cargas pueden ser identificados con técnicas elementales, siendo recomendable el uso de estas técnicas moleculares cuando no es posible realizar una identificación correcta con las primeras, como es el caso de los pigmentos orgánicos. Lejos de establecer una prelación entre las técnicas espectroscópicas, cabe destacar que estas son complementarias en multitud de

casos, ya que, si bien el análisis por infrarrojo suele ser más sencillo, los espectros Raman permiten una mejor identificación de algunos componentes orgánicos. Sólo en el caso de pigmentos orgánicos que se encuentren en un estado más o menos puro, especialmente lacas y tintes, sería recomendable el empleo de FORS para confirmar su correcta identificación.

### Otras técnicas analíticas de identificación

Los sistemas de cromatografía permiten separar componentes estrechamente relacionados en mezclas complejas [figura 4]. Existen diferentes técnicas cromatográficas siendo las más utilizadas en los estudios sobre patrimonio documental la cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC) y la cromatografía de gases/espectrometría de masas (GS-MS). La primera técnica es un método muy rápido, eficaz y preciso que se aplica principalmente al estudio de muestras orgánicas como el material proteico, aglutinantes, aprestos, etc. (Striegel & Hill 1996; Matteini & Moles 2001; Romera *et al.* 2013; Kurouski *et al.* 2014). En la GS-MS, la muestra es volatilizada para hacerla recorrer la columna cromatográfica. Es capaz de separar mezclas orgánicas complejas y complejos organometálicos, así como determinar cualitativa y cuantitativamente sus componentes (Matteini & Moles 2001; Stuart 2007). Además, el espectrómetro de masas identifica las moléculas, las cuales son previamente ionizadas con un haz de electrones (Clarke 2001). Estas técnicas también son utilizadas para evaluar el envejecimiento de tintas (EL-Sabbah *et al.* 2019)

Mediante difracción de rayos X (XRD) es posible identificar minerales gracias a su estructura cristalina ya que los rayos X irradiados a la muestra son difractados por los electrones cuando su longitud de onda es del mismo orden que el radio atómico. De este modo, se obtiene información sobre la posición y tipo de átomos, ya que



**Figura 4.**-Imagen SEM (a) de una muestra de tinta procedente de un manuscrito de Archivo Nacional de Ecuador y cromatograma (b) en el que se observan los diferentes ácidos presentes en la tinta. Fuente: Gemma M<sup>a</sup> Contreras.

las estructuras cristalinas dispersan elásticamente los haces de electrones y los amplifica por interferencia constructiva. Se trata de una técnica que permite caracterizar pigmentos inorgánicos y tintas, así como evaluar su alteración (Matteini & Moles 2001; Wess et al. 2001; Stuart 2007; Duran et al. 2009; Cucos et al. 2011; Rueangyodjantana & Buntem 2017).

Finalmente, cabe destacar el empleo de los procesos de extracción de ADN para la determinación del origen animal de los pergaminos empleados como soporte documental. Este tipo de análisis requiere de la toma de micromuestras, las cuales son tratadas para la extracción del gen empleado para la identificación de la especie mediante el uso de primers. Tras la obtención de la secuencia genómica, se procede a su comparación con bases de datos para así determinar la especie (Bower et al. 2010). Sin embargo, el empleo de esta técnica para identificar la especie en pergaminos históricos posee la desventaja de que el ADN se encuentra degradado, para lo cual se recomienda el uso de la secuencia nucleotídica del gen del citocromo b (Espejo, Alvarez-Cubero & Saiz 2011).

### Empleo de las técnicas analíticas en el patrimonio documental

La especificidad de cada técnica analítica [tabla I] hace que la mayoría de los investigadores opten por la suma de las ventajas de varias técnicas, bien para estudiar elementos diferentes, como pigmentos orgánicos o inorgánicos, o bien para ratificar el resultado de unas técnicas con otras. Este es el caso de la espectroscopía Raman, una de las técnicas más empleadas para el estudio de los componentes de los manuscritos iluminados. Por ejemplo, Plossi & Zappala (2007) la utiliza en combinación con EDXRF, al igual que Aceto et al. (2008) en la caracterización de tintas metalogánicas, en las que la presencia de un alto contenido en cobre puede corresponder a una preparación conjunta de sulfato de

hierro y sulfato de cobre. Esta combinación de técnicas se ha empleado ampliamente para el estudio códices medievales (Vandenabeele et al. 2002; Burgio et al. 2010), libros renacentistas italianos (Burgio, Clark & Hark 2010) o manuscritos islámicos (Burgio et al. 2008). Además, estos estudios pueden llevarse a cabo mediante equipos portátiles, lo que facilita su empleo in situ (Wehling et al. 1999; Duran et al. 2011; Hamdan, Alawadhi & Jisrawi 2012).

Estas técnicas, a su vez, pueden verse complementadas por otras, por ejemplo, el uso de FORS para identificar pigmentos como el azul ultramar o el cinabrio (Aceto et al. 2012), SEM-EDS para determinar la presencia de cobre y sales de cobre en tintas manuscritas o estudiar manuscritos iluminados (Aceto et al. 2006; Chaplin et al. 2010) o FTIR para estudiar tintas metalogánicas (Bicchieri et al. 2008) y las sales e impurezas que contienen (Piantanida et al. 2013). De hecho, este tipo de combinaciones, no sólo son utilizadas para la caracterización de materiales constitutivos, sino también para la evaluación de la reversibilidad de tratamientos de restauración (Bicchieri et al. 2012). Para la identificación de pigmentos, Andalò et al. (2001) proponen el empleo de microespectroscopía Raman y PIXE, aunque sólo obtuvieron la identificación de pigmentos inorgánicos.

Tras la espectroscopía Raman, es muy común encontrar estudios en los que se emplea la combinación de EDXRF y FTIR para estudiar la composición química del papel (Doncea et al. 2010) o para el estudio del cobre como agente acelerador del deterioro tanto de tintas como de pigmentos (Faubel et al. 2007). El uso de EDXRF y FORS ha permitido a Aceto et al. (2012) y a Picollo et al. (2011) realizar estudios in situ y sin toma de muestras de tintas sobre pergamino o pigmentos.

Gambaro et al. (2009) utilizan FTIR para identificar tintas, SEM/EDX para obtener la morfología y composición de las tintas y GC/MS para identificar los componentes metalogánicas, de tal manera que se pueda trazar la continuidad en el uso de tintas metalogánicas en el siglo

**Tabla I.-** Principales técnicas analíticas y su empleo para la caracterización de los materiales constitutivos del patrimonio documental.

	MO	SEM	EDXRF	EDX	PIXE	LIBS	FTIR	Raman	FORS	HPLC	GS-MS	XRD
<b>Inorgánicos</b>												
<b>Orgánicos</b>												
<b>Morfología</b>												
<b>Biodeterioro</b>												
<b>Pergamino</b>												
<b>Pigmentos</b>												
<b>Tintas</b>												
<b>Oxidación</b>												
<b>Cargas</b>												
<b>Adhesivos</b>												

XIX. Estos mismos autores introducen el empleo de la cromatografía para el estudio de los extractos orgánicos del papel y la determinación de la presencia de ácido vanílico y de lignina (Ganzerla et al. 2009). En otros casos, junto a FTIR y SEM/EDX, se emplea la XRD para determinar la antigüedad de papeles (Rueangyodjantana & Buntem 2017).

Finalmente, la combinación de LIBS con imagen multiespectral ha resultado eficaz en el estudio no invasivo de pigmentos en manuscritos iluminados (Melessanaki et al. 2001); mientras que junto con espectrometría atómica (AAS) ha permitido identificar la presencia de hierro y cobre en tintas (Wagner et al. 1999).

### Test químicos para la aproximación a la composición de materiales constitutivos

En ocasiones, el empleo de técnicas analíticas es difícil de asumir por el conservador-restaurador. Para ello, se puede recurrir al empleo de test químicos, los cuales darán una aproximación a los compuestos presentes en una obra. Estas pruebas son de carácter cualitativo, por lo que sólo indicarán la presencia o ausencia de un material, aunque no su cuantificación en la muestra analizada. Estas pruebas requerirán de la aplicación de una gota del reactivo, por lo que se han de realizar en zonas poco vivible del documento y de manera controlada. Entre los test más utilizados para la identificación de los soportes cabe destacar:

**Test de Molish:** Determina la presencia de celulosa y sus derivados. Para ello, se disuelve una pequeña muestra del soporte en acetona y se le agregan varias gotas de 2 wt-% 1-naftol en etanol. Se depositan dos gotas de ácido sulfúrico concentrado cerca de la muestra, de tal forma que su vapor reaccione con la muestra. Si tras 10-15 minutos aparece un color rojo-marrón significa que la muestra posee celulosa. La tinción hacia un tono verdoso indica la presencia de nitrato de celulosa, mientras que entre marrón y negro puede ser debida a la presencia de lignina u otros azúcares (Odegaard, Carroll & Zimmit 2005; Stuart 2007).

**Test para determinar la presencia de celulosa:** En un tubo de ensayo, se añade a la muestra una gota de concentrado de ácido fosfórico, se tapa con filtro de papel y se añade una gota de acetato de anilina (se añaden a la anilina 1:1 ácido acético glacial y agua destilada). El tubo se calienta y, en presencia de celulosa, se aprecia un color rosa (Odegaard Carroll & Zimmit 2005; Stuart 2007).

**Test para determinar la presencia de lignina:** Se deposita sobre la muestra una gota de una solución de fluroglucinol en metanol (4 g. de fluroclucinol en 50 ml de metanol) y, a continuación, una gota de una solución de ácido clorhídrico en metanol al 50% en volumen. La presencia de lignina teñirá la muestra de un color rojo-violeta (Vergara Peris 2002; Stuart 2007).

**Test de Buiet:** Para identificar la presencia de proteínas. Se añade una gota de 2 wt-% de sulfato de cobre a una pequeña cantidad de muestra. Al cabo de unos minutos, la muestra se vuelve ligeramente azul, mientras que en presencia de proteínas, virará hacia un tono púrpura (Stuart 2007).

**Test de Lugol:** Permite determinar la presencia de almidón al adquirir la muestra una tonalidad azul tras depositar sobre esta una gota de lugol (0.13 g. de yodo y 2,6 g. de yoduro de potasio en 5 ml de agua destilada) (Matteini & Moles 2001; Stuart 2007). Una variable de este test se encuentra en Vergara Peris (2002), quien aplica una gota de solución de yodo/yoduro al 50%.

**Test para determinar la presencia de alumbre:** Se deposita una gota de una solución de aluminón (0,1 g. de aluminón en 100 ml de agua destilada) en la superficie de la muestra y se deja secar. La tinción hacia un tono rojo-rosado indica la presencia de iones de aluminio en el papel (Odegaard, Carroll & Zimmit 2005; Stuart 2007).

La identificación de tintas mediante el uso de test químicos suele ser una tarea más complicada, ya que se podrá determinar la presencia de determinados compuestos e intuir su naturaleza a grandes rasgos. Debe tenerse en cuenta que existe una gran cantidad de recetas de tintas, en la que la presencia de determinados compuestos ha favorecido a su mayor o menor grado de deterioro (Contreras 2015). En este sentido, es posible detectar la presencia de tintas ferrogálicas mediante la identificación de la presencia de hierro, o hierro y cobre.

**Test de batofenantrolina:** Permite identificar la presencia de hierro (II) al poner en contacto unas tiras empapadas en batofenantrolina con la muestra. No es un sistema apto para otros metales (Neevel 2009; Belhadj et al. 2014).

**Test para determinar la presencia de tintas ferrogálicas:** Consiste en aplicar sobre la tinta una microgota de  $\alpha, \alpha'$ -dipiridilo al 2 wt-% en ácido tioglicólico. Si aparece un color rosa o rojo significa que hay presencia de hierro, ya que este reactivo reduce  $Fe^{3+}$  en  $Fe^{2+}$  (Stuart 2007).

**Test para determinar la presencia de iones de cobre:** Se aplica en unas tiras de papel con una solución de 5N- $\alpha$ -PAN en 1,4 dioxano (Kolar & Strlič 2006).

### Protocolo de actuación para la identificación de materiales presentes en documentos

A la hora de abordar la caracterización de documentos es importante tener en cuenta una serie de premisas que condicionarán la selección de las técnicas a emplear. Entre estos condicionantes cabe destacar la necesidad de identificar los diversos materiales presentes en el documento debido a su valor histórico-cultural, su estado de conservación o la selección del tratamiento



**Figura 5.**-Protocolo de actuación en función de los medios disponibles y el tipo de material a caracterizar

de restauración; los medios y recursos disponibles o la posibilidad de toma de muestras.

La figura 5 muestra, a modo de esquema, un protocolo de actuación general que facilita la labor de selección de técnicas y estudios a la hora de abordar la caracterización de un documento bibliográfico. En el eje superior, se establece una prelación de técnicas en función de los recursos y medios disponibles, desde las técnicas más básicas, hasta la caracterización mediante técnicas más complejas pero que aportan un mayor de precisión a la hora de proceder a la determinación de los materiales y los productos de alteración. El eje vertical, determina el empleo de técnicas en función del tipo de material a analizar, distinguiendo especialmente entre soportes y materiales sustentados.

La aplicación de este protocolo de actuación permite al conservador-restaurador realizar una aproximación a los materiales presentes en el documento de manera autónoma, así como seleccionar la técnica que mejor se ajuste a su necesidad de identificar determinados materiales. El grado de precisión requerido, generalmente aparece asociado a la importancia y valor del documento, así como la disponibilidad material y económica para llevar un mayor número de estudios.

### Conclusiones

Los bienes culturales que constituyen el patrimonio documental están conformados por materiales de diversa composición química y propiedades. Es por ello que, para garantizar su preservación es necesaria su correcta identificación. El desarrollo de las técnicas analíticas de identificación, así como su puesta a punto para el análisis de documentos, garantiza un amplio espectro de posibilidades a la hora de abordar este tipo de estudios. De este modo, la elección de la técnica dependerá de diversos factores entre los que destacan el objetivo del estudio o material a caracterizar, la posibilidad o no de toma de muestra, los recursos y medios disponibles, etc.

Es importante tomar en consideración que el empleo de una única técnica analítica difícilmente podría servir para la realización de una caracterización general de los materiales que conforman un documento. De este modo, es necesario conocer el tipo de información que facilita cada técnica analítica, así como las técnicas que servirían para confirmar el resultado o para complementarlo. En este sentido, se ha establecido un protocolo de actuación que facilita la labor del restaurador a la hora de llevar a cabo la elección de técnicas en función del material a caracterizar. Debido a la dificultad

que entraña para muchos conservadores-restauradores el acceder a este tipo de técnicas analíticas, se ha dotado al protocolo de una primera aproximación mediante pruebas químicas que pueden ser desarrolladas en el propio taller.

Finalmente, es importante resaltar que la correcta caracterización de los materiales presentes en un documento no sólo aporta datos histórico-artísticos o de diagnóstico de la obra, sino que facilita la selección de los tratamientos de restauración y la implementación de los estándares de la conservación preventiva en función de las características del bien estudiado.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado gracias a la colaboración de los doctores David Juanes y Livio Ferrazza. Los autores también están agradecidos al Institut Valencià de Conservació, Restauració i Investigació (IVCR+i).

### Referencias

- AALDERINK, B.J., KLEIN, M.E., PADOAN, R., DE BRUNI, G., STEEMES, T. (2008). "Quantitative Hyperspectral Imaging Technique for Condition Assessment and Monitoring of Historical Documents". In *9th International Conference on NDT of Art*. Jerusalem, Israel.
- ACETO, M., AGOSTINO, A., BOCCALERI, E., CRIVELLO, F., GARLANDA, A.C. (2006). "Evidence for the degradation of an alloy pigment on an ancient Italian manuscript". In *Journal of Raman Spectroscopy*. V. 37: 1160–1170. <https://doi.org/10.1002/jrs.1604>
- ACETO, M., AGOSTINO, A., BOCCALERI, E., GARLANDA, A.C. (2008). "The Vercelli gospels laid open: An investigation into the inks used to write the oldest Gospels in Latin". *X-Ray Spectrometry*. 37(4):286–292. <https://doi.org/10.1002/xrs.1047>
- ACETO, M., AGOSTINO, A., FENOGLIO, G., GULMINI, M., BIANCO, V., PELLIZZI, E. (2012). "Non invasive analysis of miniature paintings: Proposal for an analytical protocol". *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 91:352–359. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.02.021>
- ALCÁNTARA GARCÍA, J., RUVALCABA SIL, J.L., VANDER MEEREN, M. (2014). "XRF study of Mexican iron gall inks: Historical and geographical overview of their chemistry". In *Materials Research Society Symposium Proceedings*. V. 1618. *Materials Research Society*: 31–41. <https://doi.org/10.1557/opl.2014.453>
- ANDALÒ, C., BICCHIERI, M., BOCCHINI, P., CASU, G., GALLETI, G.C., MANDÒ, P.A., NARDONE, M., SODO, A., PLOSSI ZAPPLÀ, M. (2001). "The beautiful "Trionfo d'Amore" attributed to Botticelli: A chemical characterisation by proton-induced X-ray emission and micro-Raman spectroscopy". *Analytica Chimica Acta*. 429(2):279–286. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)01292-7](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)01292-7)
- EL BAKKALI, A., LAMHASNI, T., HADDAD, M., AIT LYAZIDI, S., SANCHEZ-CORTES, S., DEL PUERTO NEVADO, E. (2013). "Non-invasive micro Raman, SERS and visible reflectance analyses of coloring materials in ancient Moroccan Islamic manuscripts". *Journal of Raman Spectroscopy*. 44(1):114–120. <https://doi.org/10.1002/jrs.4154>
- BARALDI, P., MOSCARDI, G., BENSI, P., ACETO, M., TASSI, L. (2009). "An investigation of the palette and techniques of some High Medieval codices by Raman microscopy". *e-Preservation science*. 6:163–168.
- BATAGLIA, M., ALIDORI BATAGLIA, M., CELESTRE, R., DENES, P., DOERNING, D., KIM, T.S., ZALUSLY, S. (2011). "The application of SR-XRF to the analysis of manuscript illumination. A case of study". *Revista de História da Arte. Medieval Colours between beauty and meaning*. 1:245–252.
- BELHADJ, O., PHAN TAN LUU, C., JACOBI, E., MESLET-STRUYVE, S., VEZ, S., REISSLAND, B., ROUCHON, V. (2014). "The Dutch Fe-Migration Mending Test". *Journal of Paper Conservation*. 15(1):9–15.
- BERSANI, D., LOTTICI, P.P., VIGNALI, F. & ZANICHELLI, G. (2006). "A study of medieval illuminated manuscripts by means of portable Raman equipments". In *Journal of Raman Spectroscopy*. V. 37: 1012–1018. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/jrs.1593>
- BICCHIERI, M., NARDONE, M., SODO, A. (2000). "Application of micro-Raman spectroscopy to the study of an illuminated medieval manuscript". *Journal of Cultural Heritage*. 1(2):S277–S279. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(00\)00175-8](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(00)00175-8)
- BICCHIERI, M., SODO, A., PIANTANIDA, G., COLUZZA, C. (2006). "Analysis of degraded papers by non-destructive spectroscopic techniques". In *Journal of Raman Spectroscopy*. V. 37:1186–1192. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/jrs.1603>
- BICCHIERI, M., MONTI, M., PIANTANIDA, G., SODO, A. (2008). "All that is iron-ink is not always iron-gall!" In *Journal of Raman Spectroscopy*. V. 39:1074–1078. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/jrs.1995>
- BICCHIERI, M., MONTI, M., PIANTANIDA, G., PINZARI, F. & SODO, A. (2011). "Non-destructive spectroscopic characterization of parchment documents". *Vibrational Spectroscopy*. 55(2):267–272. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2010.12.006>
- BICCHIERI, M., MONTI, M., PIANTANIDA, G., PINZARI, F., IANNUCELLI, S., SOTGIU, S., TIRENI, L. (2012). "The Indian drawings of the poet Cesare Pascarella: Non-destructive analyses and conservation treatments". *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 402(4):1517–1528. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-5229-3>
- BIOLETTI, S., LEAHY, R., FIELDS, J., MEEHAN, B. & BLAU, W. (2009). "The examination of the Book of Kells using micro-Raman spectroscopy". *Journal of Raman Spectroscopy*. 40(8):1043–1049. <https://doi.org/10.1002/jrs.2231>
- BLÜMICH, B., ANFEROVA, S., SHARMA, S., SEGRE, A.L., FEDERICI, C. (2003). "Degradation of historical paper: Nondestructive analysis by the NMR-MOUSE". *Journal of Magnetic Resonance*. 161(2):204–209. [https://doi.org/10.1016/S1090-7807\(03\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S1090-7807(03)00034-X)

- BOWER, MA., CAMPANA, MG., CHECKLEY-SCOTT, C., KNIGHT, B., HOWE, CJ. (2010). "The potential for extraction and exploitation of DNA from parchment: a review of the opportunities and hurdles". *Journal of the Institute of Conservation*. 33(1):1–11. <https://doi.org/10.1080/19455220903509937>
- BRUNI, S., CARIATI, F., CASADIO, F., GUGLIELMI, V. (2001). "Micro-Raman identification of the palette of a precious XVI century illuminated Persian codex". *Journal of Cultural Heritage*. 2(4):291–296. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(01\)01131-1](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(01)01131-1)
- BRUNI, S., CAGLIO, S., GUGLIELMI, V., POLDI, G. (2008). "The joined use of n.i. spectroscopic analyses - FTIR, Raman, visible reflectance spectrometry and EDXRF - To study drawings and illuminated manuscripts". *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 92(1):103–108.
- BUDNAR, M., VODOPIVEC, J., MANDÒ, PA, CASU, FLG & SIGNORINI, O. 2001. Distribution of chemical elements of iron-gall ink writing studied by the PIXE method. *Restaurator*. 22(4):228–241. <https://doi.org/10.1515/REST.2001.228>
- BUDNAR, M., SIMČIČ, J., RUPNIK, Z., URŠIČ, M., PELICON, P., KOLAR, J., STRLIČ, M. (2004). "In-air PIXE set-up for automatic analysis of historical document inks". In *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. V. 219–220. North-Holland. 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.025>
- BUDNAR, M., URŠIČ, M., SIMČIČ, J., PELICON, P., KOLAR, J., ŠELIH, VS., STRLIČ, M. (2006). "Analysis of iron gall inks by PIXE. Nuclear Instruments and Methods". In *Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 243(2):407–416. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.10.013>
- BURGIO, L., CIOMARTAN, DA., CLARK, RJH. (1997). "Pigment identification on medieval manuscripts, paintings and other artefacts by Raman microscopy: Applications to the study of three German manuscripts". *Journal of Molecular Structure*. 405(1):1–11. [https://doi.org/10.1016/S0022-2860\(96\)09422-7](https://doi.org/10.1016/S0022-2860(96)09422-7)
- BURGIO, L., CLARK, RJH., MURALHA, VSF., STANLEY, T. (2008). "Pigment analysis by Raman microscopy of the non-figurative illumination in 16th- to 18th-century Islamic manuscripts". *Journal of Raman Spectroscopy*. 39(10):1482–1493. <https://doi.org/10.1002/jrs.2027>
- BURGIO, L., CLARK, RJH., HARK, RR. (2010). "Raman microscopy and x-ray fluorescence analysis of pigments on medieval and Renaissance Italian manuscript cuttings". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 107(13):5726–5731. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914797107>
- CALVINI, P., GORASSINI, A., CHIGGIATO, R. (2006). "Fourier transform infrared analysis of some Japanese papers." *Restaurator*. 27(2):81–89. <https://doi.org/10.1515/REST.2006.81>
- DEL CARMINE, P., GIUNTINI, L., HOOPER, W., LUCARELLI, F., MANDÒ, PA. (1996). "Further results from PIXE analysis of inks in Galileo's notes on motion". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 113(1–4):354–358. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)01335-0](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)01335-0)
- CASIERI, C., BUBICI, S., VIOLA, I., DE LUCA, F. (2004). "A low-resolution non-invasive NMR characterization of ancient paper". *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*. 26(2):65–73. <https://doi.org/10.1016/j.ssnmr.2004.02.001>
- CASTRO, K., PROIETTI, N., PRINCI, E., PESSANHA, S., CARVALHO, ML., VICINI, S., CAPITANI, D., MADARIAGA, JM. (2008). "Analysis of a coloured Dutch map from the eighteenth century: The need for a multi-analytical spectroscopic approach using portable instrumentation". *Analytica Chimica Acta*. 623(2):187–194. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.06.019>
- CASTRO, R., POZZI, F., LEONA, M., MELO, MJ. (2014). "Combining SERS and microspectrofluorimetry with historically accurate reconstructions for the characterization of lac dye paints in medieval manuscript illuminations". *Journal of Raman Spectroscopy*. 45(11–12):1172–1179. <https://doi.org/10.1002/jrs.4608>
- ČECHÁK, T., TROJEK, T., MUSÍLEK, L., PAULUSOVÁ, H. (2010). "Application of X-ray fluorescence in investigations of Bohemian historical manuscripts". *Applied Radiation and Isotopes*. 68(4–5):875–878. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.10.039>
- CHAPLIN, TD., CLARK, RJH., JACOBS, D., JENSEN, K., SMITH, GD. (2005). "The Gutenberg Bibles: Analysis of the illuminations and inks using Raman spectroscopy". *Analytical Chemistry*. 77(11):3611–3622. <https://doi.org/10.1021/ac050346y>
- CHAPLIN, TD., CLARK, RJH., MCKAY, A., PUGH, S. (2006). "Raman spectroscopic analysis of selected astronomical and cartographic folios from the early 13th century Islamic «Book of Curiosities of the Sciences and Marvels for the Eyes»". *Journal of Raman Spectroscopy*. 37(8):865–877. <https://doi.org/10.1002/jrs.1536>
- CHAPLIN, TD., CLARK, RJH., MARTINÓN-TORRES, M. (2010). "A combined Raman microscopy, XRF and SEM-EDX study of three valuable objects - A large painted leather screen and two illuminated title pages in 17th century books of ordinances of the Worshipful Company of Barbers, London". *Journal of Molecular Structure*. 976(1–3):350–359. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.03.042>
- CLARK, RJH. (1995). "Raman microscopy: Application to the identification of pigments on medieval manuscripts". *Chemical Society Reviews*. 24(3):187–196. <https://doi.org/10.1039/CS9952400187>
- CLARKE, M. (1999). "A new technique for the non-destructive identification of organic pigments, dyes and inks in-situ on early mediaeval manuscripts, using 3-D fluorescence reflectance spectroscopy". *International conference on non-destructive testing and microanalysis for the diagnostics and conservation of the cultural and environmental heritage*. 2:1421–1436.
- CLARKE, M. (2001). "The analysis of medieval European manuscripts". *Reviews in Conservation*. 2:3–17. <https://doi.org/10.1179/sic.2001.46.Supplement-1.3>

- CLARKE, M. (2002). "The analysis of manuscript pigments". Why, what and how?". *Gazette du livre médiéval*. 40(1):36–44. <https://doi.org/10.3406/galim.2002.1555>
- COLBOURNE, J. (2001). "A survey of methods used in the technical examination and analysis of brown inks". In *The iron gall ink meeting, Newcastle upon Tyne, 4th & 5th September*. University of Northumbria. 37–45.
- CONTRERAS, G. (2015). *La tinta de escritura en los manuscritos de archivo valencianos, 1250-1600. Análisis, identificación de componentes y valoración de su estado de conservación*. Universidad de Valencia.
- DA COSTA, ACA., DA FONSECA, NF., DE CARVALHO, SS., DOS SANTOS, FCSC., BARKI, L., DE FREITAS, DS., HERBST, MH., LUTTERBACH, MTS. (2013). "Archaeometric investigations on naturally and thermally-aged iron-gall inks using different tannin sources". *Central European Journal of Chemistry*. 11(11):1729–1739. <https://doi.org/10.2478/s11532-013-0303-7>
- CUCOS, A., BUDRUGEAC, P., MIU, L., MITREA, S., SBARCEA, G. (2011). "Dynamic mechanical analysis (DMA) of new and historical parchments and leathers: Correlations with DSC and XRD". *Thermochimica Acta*. 516(1–2):19–28. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.01.006>
- DENECKER, A., DE REU, M., MARTENS, MPJ., DE COENE, K., VEKEMANS, B., VINCZE, L., DE MAEYER, P., VANDENABEELE, P., MOENS, L. (2011). "The use of a multi-method approach to identify the pigments in the 12th century manuscript Liber Floridus". In *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. V. 80. Elsevier. 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.03.005>
- DERBYSHIRE, A., WHEELER, M. (2002). "Further applications of Raman microscopy in paper conservation". *Conservation Journal*. Spring(40).
- DIETZ, G, KETELSEN, T, HOSS, M, SIMON, O, WINTERMANN, C, WOLFF, T, RABIN, I & HAHN, O. (2012). "The Egmont Master phenomenon: X-ray fluorescence spectrometric and paper studies for art history research". *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 402(4):1505–1515. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-5309-4>
- DOHERTY, B., DAVERI, A., CLEMENTI, C., ROMANI, A., BIOLETTI, S., BRUNETTI, B., SGAMELLOTTI, A., MILIANI, C. (2013). "The Book of Kells: A non-invasive MOLAB investigation by complementary spectroscopic techniques". *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 115:330–336. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.06.020>
- DOLGIN, B., CHEN, Y., BULATOV, V., SCHECHTER, I. (2006). "Use of LIBS for rapid characterization of parchment". *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 386(5):1535–1541. <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0676-y>
- DOLGIN, B., BULATOV, V., CHEN, Y., SCHECHTER, I. (2008). "Characterization of historical parchment using laser-induced breakdown spectroscopy". *American laboratory*. 40(6):24–27.
- DONCEA, SM., IONA., RM. (2014). "FTIR (DRIFT) analysis of some printing inks from the 19th and 20th centuries". *Revue Roumaine de Chimie*. 59(3–4):173–183.
- DONCEA, SM., ION, RM., FIERASCUI, RC., BACALUM, E., BUNACIU, AA., ABOUL-ENEIN, HY. (2010). "Spectral methods for historical paper analysis: Composition and age approximation". *Instrumentation Science and Technology*. 38(1):96–106. <https://doi.org/10.1080/10739140903430271>
- DURAN, A., PEREZ-RODRIGUEZ, JL., ESPEJO, T. FRANQUELO, ML., CASTAING, J., WALTER, P. (2009). "Characterization of illuminated manuscripts by laboratory-made portable XRD and micro-XRD systems". In *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. V. 395. 1997–2004. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2992-5>
- DURAN, A., FRANQUELO, ML., CENTENO, MA., ESPEJO, T., PEREZ-RODRIGUEZ, JL. (2011). "Forgery detection on an Arabic illuminated manuscript by micro-Raman and X-ray fluorescence spectroscopy". *Journal of Raman Spectroscopy*. 42(1):48–55. <https://doi.org/10.1002/jrs.2644>
- EASTON, R.L. CHRISTENS-BARRY, W.A., KNOX, K.T. (2011). "Spectral image processing and analysis of the Archimedes Palimpsest". In *European Signal Processing Conference*. Barcelona. 1440–1444. <https://doi.org/10.5281/zenodo.42360>
- EL-SABBAH, M.M.B., GOMAA, A.Z., EL-HEFNY, D.E., AL-HAWARY, A.S. (2019). "Dating the ballpoint pen inks using gas chromatography-mass spectrometry technique". *Egyptian Journal of Chemistry*. 62(3):385–400. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2018.4812.1427>
- ESPEJO, T., ALVAREZ-CUBERO, M.J., SAIZ, M. (2011). "Determinación del origen animal de pergaminos históricos a través de análisis de ADN". In *XVIII Congreso Internacional Conservación y Restauración de Bienes Culturales*. Granada: Universidad de Granada. 10–13.
- ESPEJO ARIAS, T., LAZAROVA STOYTICHEVA, I., CAMPILLO GARCÍA, D., DURÁN BENITO, A., JIMÉNEZ DE HARO, MC. (2011). "Caracterización material y proceso de conservación de la colección de documentos árabes manuscritos del archivo histórico provincial de granada". *Al-Qantara*. 32(2):519–532.
- FAUBEL, W., STAUB, S., SIMON, R., HEISSLER, S., PATAKI, A., BANIK, G. (2007). "Non-destructive analysis for the investigation of decomposition phenomena of historical manuscripts and prints". *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*. 62(6–7 SPEC. ISS.):669–676. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.03.029>
- FERRER, N., SISTACH, MC. (2007). "FTIR Technique Used to Study Acidic Paper Manuscripts Dating from the Thirteenth to the Sixteenth Century from the Archive of the Crown of Aragón". *The Book and Paper Group Annual*. 26:21–25.
- FERRERO, J.L., ROLDAN, C., JUANES, D., LLUCH, J.L., ARDID, M. *Evolucion de la instrumentacion de fluorescencia de rayos-X en la unidad de arqueometria del ICMUV*. GEIIC.
- GAMBARO, A., GANZERLA, R., FANTIN, M., CAPPELLETTO, E., PIAZZA, R., CAIRNS, WRL. (2009). "Study of 19th century inks from archives in the Palazzo Ducale (Venice, Italy) using various analytical techniques". *Microchemical Journal*. 91(2):202–208. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2008.11.002>

- GANZERLA, R., GAMBARO, A., CAPPELLETTI, E., FANTIN, M., MONTALBANI, S., ORLANDI, M. (2009). "Characterization of selected paper documents from the archives of Palazzo Ducale (Venice), Italy using various analytical techniques". *Microchemical Journal*. 91(1):70–77. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2008.08.003>
- GIACOMETTI, A., CAMPAGNOLO, A., MACDONALD, L., MAHONY, S., TERRAS, M., ROBSON, S., WEYRICH, T., GIBSON, A. (2012). "Cultural Heritage Destruction: Documenting Parchment Degradation via Multispectral Imaging". *Proc. of Electronic Visualisation and the Arts (EVA 2012)*. BCS Learning & Development. <https://doi.org/10.14236/ewic/EVA2012.52>
- GOLTZ, D., ATTAS, M., CLOUTIS, E., YOUNG, G & BEGIN, P. (2009). "Visible (420–720 nm) Hyperspectral imaging techniques to assess inks in historical documents". *Restaurator*. 30:199–221. <https://doi.org/10.1515/rest.013>
- GOLTZ, D., CHIN, J., HIEBERT, R., ABSALAN, G. (2010). Micro-extraction and determination of transition metals in historical ink. *Microchimica Acta*. 170(1):127–133. <https://doi.org/10.1007/s00604-010-0375-4>
- GONZALEZ, L., WESS, T. (2008). "Use of attenuated total reflection-fourier transform infrared spectroscopy to measure collagen degradation in historical parchments". *Applied Spectroscopy*. 62(10):1108–1114. <https://doi.org/10.1366/000370208786049196>
- GOODHEW, P.J., HUMPHREYS, J., BEANLAND, R. (2014). *Electron Microscopy and Analysis*, Third Edition. CRC Press.
- GUEDES, A., PRIETO, AC. (2012). "Raman Spectroscopy for the Characterisation of Inks on Written Documents". *Infrared and Raman Spectroscopy in Forensic Science*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. 137–151.
- HÄKKÄNEN, H., HOUNI, J., KASKI, S., KORPPI-TOMMOLA, JEI. (2001). "Analysis of paper by laser-induced plasma spectroscopy". *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*. 56(6):737–742. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00210-5](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00210-5)
- HAMDAN, NM., ALAWADHI, H., JISRAWI, N. (2012). "Integration of  $\mu$ -XRF, and u-Raman techniques to study ancient Islamic manuscripts". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. V. 37. IOP Publishing. 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/37/1/012006>
- HAVERMANS, J., AZIZ, HA., SCHOLTEN, H. (2003). "Non Destructive Detection of Iron-Gall Inks by Means of Multispectral Imaging - Part 2: Application on Original Objects Affected with Iron-Gall-Ink Corrosion". *Restaurator*. 24(2):88–94. <https://doi.org/10.1515/REST.2003.88>
- JAMES, C. (2010). *Visual identification and analysis of old master drawing techniques*. Olschki.
- KAKJEE, O., FATHOLLAHI, V., OLIAIY, P., LAMEHI-RACHTI, M., TAHERI, R., JAFARIAN, HA. (2012). External PIXE analysis of an Iranian 15th-century poetry book. In *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. V. 273:178–181. North-Holland. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.07.069>
- KAMINSKA, A., SAWCZAK, M., KOMAR, K., ŚLIWIŃSKI, G. (2007). "Application of the laser ablation for conservation of historical paper documents". *Applied Surface Science*. 253(19):7860–7864. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.02.094>
- KANNGIEßER, B., HAHN, O., WILKE, M., NEKAT, B., MALZER, W., ERKO, A. (2004). "Investigation of oxidation and migration processes of inorganic compounds in ink-corroded manuscripts". *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*. V. 59. Elsevier. 1511–1516. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2004.07.013>
- KEARTON, B. MATTLEY, Y. (2008). "Laser-induced breakdown spectroscopy: Sparking new applications". *Nature Photonics*. 2(9):537–540. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.173>
- KLOCKENKÄMPER, R., VON BOHLEN, A., MOENS, L. (2000). "Analysis of Pigments and Inks on Oil Paintings and Historical Manuscripts Using Total Reflection X-ray Fluorescence Spectrometry". *X-Ray Spectrometry*. 29(1):119–129. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4539\(200001/02\)29:1<119::AID-XRS400>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4539(200001/02)29:1<119::AID-XRS400>3.0.CO;2-W)
- KNOX, KT., EASTON, RL. (2003). Recovery of Lost Writings on Historical Manuscripts with Ultraviolet Illumination. In *The Fifth International Symposium on Multispectral Color Science* (Part of PICS 2003 Conference). 301–306. <http://www.imaging.org/IST/store/epub.cfm?abstrid=8535> (Accessed 14 February 2020).
- KOLAR, J., STRLIČ, M. (2006). *Iron gall inks: on manufacture characterisation, degradation and stabilisation*. Ljubljana: National and University Library.
- KOLAR, J., ŠTOLFA, A., STRLIČ, M., POMPE, M., PIHLAR, B., BUDNAR, M., SIMČIČ, J., REISSLAND, B. (2006). Historical iron gall ink containing documents - Properties affecting their condition. *Analytica Chimica Acta*. 555(1):167–174. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.08.073>
- KRÓL, M., KOWALSKA, D., KOŚCIELNIAK, P. (2018). "Examination of Polish Identity Documents by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy". *Analytical Letters*. 51(10):1592–1604. <https://doi.org/10.1080/00032719.2017.1384833>
- KUROUSKI, D., ZALESKI, S., CASADIO, F., VAN DUYN, RP, SHAH, NC. (2014). "Tip-enhanced raman spectroscopy (TERS) for in situ identification of indigo and iron gall ink on paper". *Journal of the American Chemical Society*. 136(24):8677–8684. <https://doi.org/10.1021/ja5027612>
- LARSEN, R. (2002). *Microanalysis of parchment*. Archetype.
- LEE, AS., MAHON, PJ., CREGH, DC. (2006). "Raman analysis of iron gall inks on parchment". *Vibrational Spectroscopy*. 41(2):170–175. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2005.11.006>
- LUCARELLI, F., MANDÒ, PA. (1996). "Recent applications to the study of ancient inks with the Florence external-PIXE facility". *Nuclear*

- Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 109–110:644–652. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)00985-X](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)00985-X)
- MAGISTRO, F., MAJOLINO, D., MIGLIARDO, P., PONTERIO, R., RODRIQUEZ, MT. (2001). "Confocal Raman spectroscopic study of painted medieval manuscripts". *Journal of Cultural Heritage*. 2(3):191–198. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(01\)01121-9](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(01)01121-9)
- MAIRINGER, F. (2000). "The ultraviolet and fluorescence study of paintings and manuscripts". *Radiation in Art and Archeometry*. Elsevier. 56–75. <https://doi.org/10.1016/B978-044450487-6/50050-X>
- MANNUCCI, E., PASTORELLI, R., ZERBI, G., BOTTANI, CE., FACCHINI, A. (2000). "Recovery of ancient parchment: Characterization by vibrational spectroscopy". *Journal of Raman Spectroscopy*. 31(12):1089–1097. [https://doi.org/10.1002/1097-4555\(200012\)31:12<1089::AID-JRS649>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1097-4555(200012)31:12<1089::AID-JRS649>3.0.CO;2-C)
- MANSO, M., CARVALHO, ML. (2009). "Application of spectroscopic techniques for the study of paper documents: A survey". *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*. 64(6):482–490. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2009.01.009>
- MANSO, M., CARDEIRA, AM., SILVA, M., LE GAC, A., PESSANHA, S., GUERRA, M., CALDEIRA, AT., CANDEIAS, A., CARVALHO, ml. (2014). "The mysterious halos in iron gall ink manuscripts: an analytical explanation". *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 118(3):1107–1111. <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8924-z>
- MARUCCI, G., BEEBY, A., PARKER, AW., NICHOLSON, CE. (2018). Raman spectroscopic library of medieval pigments collected with five different wavelengths for investigation of illuminated manuscripts. *Analytical Methods*. 10(10):1219–1236. <https://doi.org/10.1039/C8AY00016F>
- MATEO, M., BECERRA, J., ZADERENKO, AP, ORTIZ, P., NICOLÁS, G. (2019). "Laser-induced breakdown spectroscopy applied to the evaluation of penetration depth of bactericidal treatments based on silver nanoparticles in limestones". *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 152:44–51. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.11.010>
- MATTEINI, M., MOLES, A. (2001). *Ciencia y restauración: método de investigación*. Hondarribia (Guipuzcoa): Nerea.
- MCGILLIVRAY, M., DUFFY, C. (2017). "New light on the Sir Gawain and the green knight manuscript: Multispectral imaging and the Cotton Nero A.x. Illustrations". *Speculum*. 92(October):S110–S144.
- MELESSANAKI, K., PAPANAKIS, V., BALAS, C., ANGLOS, D. (2001). "Laser induced breakdown spectroscopy and hyper-spectral imaging analysis of pigments on an illuminated manuscript". *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*. 56(12):2337–2346. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00302-0](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00302-0)
- MINDERMANN, S. (2018). *Hyperspectral Imaging for Readability Enhancement of Historic Manuscripts*. Munich.
- MONTANI, I., SAPIN, E., PAHUD, A., MARGOT, P. (2012). Enhancement of writings on a damaged medieval manuscript using ultraviolet imaging. *Journal of Cultural Heritage*. 13(2):226–228. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.09.002>
- MOROPOULOU, A., ZENDRI, E., ORTIZ, P., DELEGOU, ET., NTOUTSI, I., BALLIANA, E., BECERRA, J., ORTIZ, R. (2019). "Scanning Microscopy Techniques as an Assessment Tool of Materials and Interventions for the Protection of Built Cultural Heritage". *Scanning*. 2019:1–20. <https://doi.org/10.1155/2019/5376214>
- NASTOVA, I., GRUPČE, O., MINČEVA-ŠUKAROVA, B, TURAN, S., YAYGINGOL, M., OZCATAL, M., MARTINOVSKA, V., JAKOVLEVSKA-SPIROVSKA, Z. (2012). "Micro-Raman spectroscopic analysis of inks and pigments in illuminated medieval old-Slavonic manuscripts". *Journal of Raman Spectroscopy*. V. 43. John Wiley & Sons, Ltd. 1729–1736. <https://doi.org/10.1002/jrs.4084>
- NEEVEL, JG. (2009). "Application issues of the bathophenanthroline test for iron(II) ions". *Restaurator*. 30(1–2):3–15. <https://doi.org/10.1515/rest.002>
- NEVIN, A., SPOTO, G., ANGLOS, D. (2012). "Laser spectroscopies for elemental and molecular analysis in art and archaeology". *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 106(2):339–361. <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6699-z>
- NODARI, L., RICCIARDI, P. (2019). "Non-invasive identification of paint binders in illuminated manuscripts by ER-FTIR spectroscopy: a systematic study of the influence of different pigments on the binders' characteristic spectral features". *Heritage Science*. 7(1):7. <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0249-y>
- OCHOCIŃSKA, K., SAWCZAK, M., MARTIN, M., BREDAL-JORGENSEN, J., KAMIŃSKA, A., ŚLIWIŃSKI, G. (2003). "LIPS spectroscopy for the contamination analysis and laser cleaning diagnostics of historical paper documents". *Radiation Physics and Chemistry*. V. 68. Elsevier Ltd. 227–232. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(03\)00289-5](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(03)00289-5)
- ODEGAARD, N., CARROLL, S., ZIMMT, WS. (2005). *Material Characterization Tests for Objects of Art and Archaeology*. London: Archetype Publications. <http://books.google.com/books?id=BaZ1QgAACAAJ&pgis=1> (Accessed 07 April 2020).
- OLSSON, AM., CALLIGARO, T., COLINART, S., DRAN, JC., LÖVESTAM, NEG, MOIGNARD, B., SALOMON, J. (2001). "Micro-PIXE analysis of an ancient Egyptian papyrus: Identification of pigments used for the "Book of the Dead". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 181(1–4):707–714. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)00545-6](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00545-6)
- OUIJA, M., VILA, A., REBOLLAR, E., GARCÍA, JF, CASTILLEJO, M. (2005). "Identification of inks and structural characterization of contemporary artistic prints by laser-induced breakdown spectroscopy". *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*. V. 60. Elsevier. 1140–1148. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.05.021>
- PESSANHA, S., MANSO, M., CARVALHO, ML. (2012). "Application of spectroscopic techniques to the study of illuminated manuscripts:

- A survey". *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*. V. 71–72. Elsevier. 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.05.014>
- PIANTANIDA, G., BICCHIERI, M., COLUZZA, C. (2005). "Atomic force microscopy characterization of the ageing of pure cellulose paper". *Polymer*. 46(26):12313–12321. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.10.015>
- PIANTANIDA, G., MENART, E., BICCHIERI, M., STRLIČ, M. (2013). Classification of iron-based inks by means of micro-Raman spectroscopy and multivariate data analysis. *Journal of Raman Spectroscopy*. 44(9):1299–1305. <https://doi.org/10.1002/jrs.4351>
- PICOLLO, M., ALDROVANDI, A., MIGLIORI, A., GIACOMELLI, S., SCUDIERI, M. (2011). "Non invasive XRF and UV-Vis-Nir reflectance spectroscopy Analysis of materials used by Beato Angelico in the manuscript graduale N.558". *Revista de História da Arte*. 219–227.
- PINZARI, F., PASQUARIELLO, G., DE MICO, A. (2006). "Biodeterioration of paper: A SEM study of fungal spoilage reproduced under controlled conditions". *Macromolecular Symposia*. V. 238. John Wiley & Sons, Ltd. 57–66. <https://doi.org/10.1002/masy.200650609>
- POSSI, M., ZAPPALÀ, A., ZAPPALÀ, A. (2007). *Libri e documenti: le scienze per la conservazione e il restauro*. V. 13, StudiGo. Biblioteca statale Isontina.
- REMAIZELLES, C., QUILLET, V., BERNARD, J. (2000). "FTIR techniques applied to iron gall inked damaged paper". *15th World Conference on NDT*. Roma.
- ROLDÁN, ML., CENTENO, SA., RIZZO, A. (2014). "An improved methodology for the characterization and identification of sepia in works of art by normal Raman and SERS, complemented by FTIR, Py-GC/MS, and XRF". *Journal of Raman Spectroscopy*. 45(11–12):1160–1171. <https://doi.org/10.1002/jrs.4620>
- ROMERA, D., SANCENÓN, J., GAMON, M., CONTRERAS, G., JUANES BARBER, D., FERNÁNDEZ, G. (2013). "La espectrometría de masas en tándem. Aplicación a la caracterización de las tintas en manuscritos del siglo XV al siglo XIX". *La ciencia y el arte IV: ciencias experimentales y conservación del patrimonio*, 2013, págs. 70–92.
- ROŽIĆ, M., MAČEFAT, MR., OREŠČANIN, V. (2005). Elemental analysis of ashes of office papers by EDXRF spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 229(1):117–122. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.11.011>
- RUEANGYODJANTANA, J., BUNTEM, R. (2017). "Studies on the deterioration of ancient Thai manuscripts". *Key Engineering Materials*. 757 KEM:19–23. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.757.19>
- SCHOLTEN, JH., KLEIN, ME., STEEMERS, TAG., DE BRUIN, G. (2005). Hyperspectral imaging-A Novel non-destructive analytical tool in paper and writing durability research. In *Proceedings of Art'05 – 8th International Conference on Non Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage*. C. Parisi, G. Buzzanca, & A. Paradisi, Eds. Lecce, Italy.
- SIVAKOVAI, B., BEGANSKIENÉ, A., KAREIVA, A. (2008). "Investigation of damaged paper by Ink Corrosion". *Materials Science (Medziagotyra)*. 14:51–54.
- VAN DER SNICKT, G., DE NOLF, W., VEKEMANS, B., JANSSENS, K. (2008). "μ-XRF/μ-RS vs. SR μ-XRD for pigment identification in illuminated manuscripts". *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 92(1):59–68. <https://doi.org/10.1007/s00339-008-4447-9>
- STRIEGEL, MF., HILL, J. (1996). *Thin-layer chromatography for binding media analysis*. Los Angeles: Getty Conservation Institute.
- STUART, BH. (2007). *Analytical Techniques in Materials Conservation*. J.& S. Wiley, Ed.
- TRAFELA, T., STRLIČ, M., KOLAR, J., LICHTBLAU, DA., ANDERS, M., MENCIGAR, DP., PIHLAR, B. (2007). "Nondestructive analysis and dating of historical paper based on IR spectroscopy and chemometric data evaluation". *Analytical Chemistry*. 79(16):6319–6323. <https://doi.org/10.1021/ac070392t>
- TRENTELMAN, K., TURNER, N. (2009). "Investigation of the painting materials and techniques of the late-15th century manuscript illuminator Jean Bourdichon". *Journal of Raman Spectroscopy*. 40(5):577–584. <http://doi.wiley.com/10.1002/jrs.2186>
- URSESCU, M., MALUTAN, T., CIOVICA, S. (2009). "Iron gall inks influence on papers' thermal degradation". *FTIR spectroscop applications. European Journal of Science and Theology*. 5(3):71–84.
- VANDENABEELE, P., WEHLING, B., MOENS, L., DE REU, M., VAN HOOYDONK, G., VON BOHLEN, A., KLOCKENKÄMPER, R. (2002). *Characterization of pigments in Mercatellis manuscripts by total-reflection X-ray fluorescence and Raman-microscopy*. In *Archaeometry '98: proceedings of the 31st international symposium on archaeometry*, Budapest, 26 April-3 May 1998. p.825-827
- VERGARA PERIS, J. (2002). *Conservación y restauración de material cultural en archivos y bibliotecas*. Valencia: Biblioteca Valenciana.
- VETTER, W., PÖLLNITZ, G., SCHEREINER, M. (2014). "Examination of historic parchment manuscripts by non-invasive Reflection-FTIR. Possibilities and limitations". *3TH International Congress Chemistry for Cultural Heritage*. Viena.
- WAGNER, B., GARBOŚ, S., BULSKA, E., HULANICKI, A. (1999). "Determination of iron and copper in old manuscripts by slurry sampling graphite furnace atomic absorption spectrometry and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry". *Spectrochimica acta, Part B: Atomic spectroscopy*. 54(5):797–804. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(99\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(99)00025-7)
- WAGNER, B., BULSKA, E., HULANICKI, A., HECK, M., ORTNER, HM. (2001). "Topochemical investigation of ancient manuscripts". *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*. V. 369. Springer-Verlag. 674–679. <https://doi.org/10.1007/s002160100750>

WEHLING, B., VANDENABEELE, P., MOENS, L., KLOCKENKÄMPER, R., VON BOHLEN, A., VAN HOOYDONK, G., DE REU, M. (1999). "Investigation of pigments in medieval manuscripts by micro Raman spectroscopy and total reflection X-Ray fluorescence spectrometry". *Mikrochimica Acta*. 130(4):253–260. <https://doi.org/10.1007/BF01242913>

WESS, T., DRAKOPOULOS, M., SNIGIREV, A., WOUTERS, J., PARIS, O., FRATZL, P., COLLINS, M., HILLIER, J., NIELSEN, K. (2001). The Use of Small-Angle X-Ray Diffraction Studies for the Analysis of Structural Features in Archaeological Samples. *Archaeometry*. 43:117–129. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00007>

ZAPPALÀ, A., BAJT, S., GIGANTE, G., HANSON, A. L. (1996). "Applications of EDXRF in the conservation of acid papers using a synchrotron light microbeam". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 117(1–2):145–150. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(96\)00221-2](https://doi.org/10.1016/0168-583X(96)00221-2)

ZOTTI, M., FERRONI, A., CALVINI, P. (2008). Microfungal biodeterioration of historic paper: Preliminary FTIR and microbiological analyses. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 62(2):186–194.

ZOTTI, M., FERRONI, A. & CALVINI, P. 2011. Mycological and FTIR analysis of biotic foxing on paper substrates. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 65(4):569–578.

## Autor/es



**Gemma María Contreras**

[contreras\\_gem@gva.es](mailto:contreras_gem@gva.es)

Subdirecció General del Institut Valencià de Conservació, Restauració i Investigació (IVCR+i) Generalitat Valenciana.

Gemma M<sup>a</sup> Contreras Zamorano has a degree in Geography and History, specialized in Art, by the University of Valencia, where she obtained the DEA and the PhD degree with a research about inks of Valencian manuscripts between 1250 and 1600. In addition, she has a degree in Fine Arts, specialized in conservation and restoration of cultural heritage, by the Polytechnic University of Valencia. She is currently a professor in the master of Diagnosis of the State of Preservation of the Historical Heritage at the Pablo de Olavide University (Seville), which she previously studied. Since 1999, she has worked for the Generalitat Valenciana as a restorer of graphic works and archival material. In 2008, she got the position of section head of this department at the Valencià Institute of Conservation and Restoration. Since November 2015, she is director of this institution. She has two books about cultural heritage and conservation, and 50 articles about paper restoration and research on materials and application techniques. She has conducted several courses about conservation and restoration of graphic artworks and archival materials at Spanish and international universities (Basque Country, Seville, Managua-Nicaragua, Quito-Ecuador), as well as other public institutions such as the Alhambra in Granada, Arxiu de la Seu d'Urgell, Suleymaniye Library (Istanbul), CIRMA (Guatemala), INHCA (Nicaragua).



**Javier Becerra**

[jbeclun@upo.es](mailto:jbeclun@upo.es)

Department Physical, Chemical and Natural Systems, University Pablo de Olavide, Seville, Spain

PhD in History and Humanities: Europe, America, Arts and Language, degree in Conservation and Restoration and MSc Diagnosis of the State of Preservation of the Historical Heritage. Now, Javier is researcher at the Pablo de Olavide University in Seville, Spain. His research activity has focused on a) studies of new conservation-restoration treatments, especially based on nanomaterials b) vulnerability and risk studies in cultural heritage and c) diagnosis, analytical techniques and interventions in cultural heritage. This scientific production has resulted in a patent, 15 journal publications (10 in high impact indexed journals) and 12 book chapters. The results of the investigations carried out have been presented at 10 international conferences with a total of 18 communications. He has collaborated in the diagnosis of samples from national and international monuments (Villa Adriana in Rome, Medina Azahara, archaeological museum of Écija, churches in Seville, contemporary buildings in La Havana, historical buildings in Oxford and Panama City, etc.) and has participated in analytical reports of national and international artworks requested from institutions such as the Andalusian Institute of Historical Heritage or the Pablo de Olavide University. Finally, his research activity has been recognized with different awards at national and international level.



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.760>

# La incidencia de la opinión social en el grado de vulnerabilidad de los edificios patrimoniales. El caso del centro histórico de Popayán (Colombia)

M<sup>a</sup> Isabel Turbay Varona, Rocío Ortiz, María Arana, Pilar Ortiz

**Resumen:** El patrimonio urbano y arquitectónico de muchas ciudades en Hispanoamérica es vulnerable frente a amenazas de diversa índole; la exposición a fenómenos naturales y antrópicos son muchas veces las causas de su destrucción, sin embargo, uno de los factores más importantes que sin duda tiende a debilitarlo, es su relación directa e indirecta con las sociedades comprometidas y por tanto, el valor que ellas han de asignarle; por este motivo, la opinión de los ciudadanos se convierte en un elemento constituyente de la preservación o destrucción del patrimonio histórico. Este trabajo se centra en analizar la opinión social de los habitantes de Popayán, Colombia, sobre el patrimonio arquitectónico de su centro histórico. El instrumento Las encuestas fueron diseñadas por un equipo interdisciplinario de arquitectos, ambientalistas, químicos, historiadores, matemáticos, ingenieros, ... que trabajan en Inteligencia Artificial aplicada a la conservación preventiva de edificios patrimoniales, y fueron revisadas por un sociólogo. Los resultados se analizaron como parte del insumo para la construcción de herramientas para determinar los factores involucrados en el grado de debilidad que sufren los edificios históricos y estimar la vulnerabilidad y peligrosidad, ante distintas amenazas.

**Palabras clave:** Conservación, grado de vulnerabilidad, opinión social, valor del patrimonio

## The incidence of social opinion on the degree of vulnerability of heritage buildings. The case of the historic center of Popayán (Colombia)

**Abstract:** The urban and architectural heritage of many cities in Latin America is vulnerable to threats of various kinds; exposure to natural and anthropic phenomena are many times the causes of its destruction, however, one of the most important factors that undoubtedly tends to weaken it, is its direct and indirect relationship to committed societies and, therefore, the value that they assign it, because of that, the citizen opinion becomes a constituent element of cultural heritage preservation or destruction. This work focuses on analyzing the social opinion of the inhabitants of Popayan (Colombia), about the architectural heritage of the historical center. The surveys were designed by an interdisciplinary team of architects, environmentalists, chemists, historians, mathematicians, engineering, ... that work on Artificial Intelligence applied to the preventive conservation of heritage buildings, and were revised by a sociologist. The results were analyzed as a tool to determine the factors involved in the degree of weakness that historical buildings suffer and estimate the vulnerability and hazards, facing different threats.

**Keywords:** Conservation, grade of vulnerability, social opinion, heritage value

### Introducción

Para precisar el valor patrimonial de un bien es importante entender, el concepto de significación cultural, desde las recomendaciones de las cartas internacionales, como la carta de Burra (ICOMOS 1999), donde se especifica que los conjuntos de valores asignados a los monumentos, incluyen el valor estético, histórico, científico, social o espiritual que toman su forma en los lugares, en su materialidad, en el entorno, en el uso, en asociaciones, significados, registros, sitios relacionados y objetos relacionados. Por tanto la percepción acerca de estos

valores, implica el reconocimiento y representatividad de las características y cualidades de los objetos, por parte de determinados grupos o individuos, que a su vez, establecen conexiones direccionadas a fortalecer, o no, la identidad comunitaria de los pueblos y que pueden emplearse también, como una función social en la cual una población, las toma, no solo como referente identitario, sino también como fuente potencial de desarrollo y relacionamiento social cotidiano (Llull Peñalba 2005).

Es necesario abordar también la relación entre el valor patrimonial y la conservación, lo cual se interpreta como

un campo complejo (Manzini 2011), en el que puede ser determinante la evaluación de la opinión social. Explica Caraballo (Caraballo Perichi 2008) que alrededor de la significación acumulativa y en concordancia con la permanencia y evolución de los monumentos, se integra el contexto físico y temporal; mientras Garré (Garré 2001) establece que, el atributo (objeto) que representa ese valor, pudo en otro momento haber representado otros, incluso contradictorios, al que en el presente se le asigna; este proceso de re-significación resulta a partir de la evolución cultural de las comunidades que intervienen en este proceso y de su percepción acerca del patrimonio. Por tanto, el concepto de valor cultural tiene que ver directamente con el de la conservación del patrimonio, como describe García Canclini (García Canclini 1999). Es evidente que la interpretación social de los edificios y lugares puede tener diferentes matices en un rango de valor, según los grupos o individuos, y donde se involucran los intereses propios, cuestionados en diferentes entornos y estados, ocasionando la falta de comprensión del significado del patrimonio, asociada a la obsolescencia, abandono o pérdida de los monumentos (Manzini 2011) o por el contrario puede servir como instrumento de salvaguarda al patrimonio mismo y de reafirmación de la identidad en un conjunto social.

Las investigaciones dirigidas a identificar y medir los riesgos del patrimonio histórico son imprescindibles en la generación de insumos para la gestión de los entornos y los edificios históricos. En los avances en este campo, son la clave para garantizar la conservación, las propuestas de metodologías que identifiquen las debilidades del patrimonio, con el uso de herramientas que permitan la toma de decisiones.

La inclusión del valor social asociado a la vulnerabilidad no puede evaluarse solo en función de un listado de valores culturales implícitos a la normativa de los sitios. En la actualidad, las normativas de muchos países implican la catalogación de los monumentos, estos inventarios de valores intrínsecos reconocidos y protegidos, deben considerarse incompletos para la conservación del patrimonio; como se aborda en el estudio sobre la vulnerabilidad sísmica en Chile (Díaz Fuentes 2017), y es por tanto necesario involucrar la opinión de la sociedad, para otorgar mayor legitimidad hacia el valor que representa el patrimonio; de lo contrario, es más probable que aunque un bien esté reconocido desde el ámbito formal no cuente con la apropiación social suficiente y por tanto no se pueda garantizar su preservación en el futuro.

En los manuales de riesgo, la vulnerabilidad suele recogerse como la susceptibilidad de los bienes culturales ante una perturbación, es decir la debilidad inherente del patrimonio (UNESCO 1977) por tanto, la opinión de la sociedad no puede ser subvalorada ante la fragilidad de los monumentos, ya que puede ser reflejo de vitalidad o quebranto ante las diferentes amenazas. La importancia

de este valor social del patrimonio se ha podido observar a nivel internacional tras el incendio de la Catedral de Notre Dame de París en 2019.

Este estudio complementa las metodologías propuestas por diversos autores (Ortiz y Ortiz 2016; Prieto *et al.* 2020; Turbay, Ortiz y Ortiz 2019) que tienen como objetivo calcular las vulnerabilidad en edificios históricos para minimizar los riesgos y la pérdida de elementos patrimoniales. Este tipo de investigaciones de evaluación de riesgos y estimación de la vulnerabilidad, incluyen estudios sistemáticos en los que se verifican las amenazas de tipo natural y antrópico, valorando el grado de afección mediante matrices de vulnerabilidad o inferencias calculadas por medio de inteligencia artificial; en los que se analizan un conjunto de variables. La opinión social del patrimonio histórico es una variable hasta ahora no incluida, que puede ser relevante como factor en la aproximación de escenarios de riesgo.

El modelo de evaluación de la opinión social que se aplicó en Popayán, tuvo como objetivo identificar la opinión de los ciudadanos como un factor que incide en la vulnerabilidad, y estimarlo como una nueva variable directamente proporcional a la debilidad o fortaleza del patrimonio ante las amenazas naturales o antrópicas. Este nuevo factor podría, a su vez, agregarse a las metodologías propuestas por varios autores (Ortiz y Ortiz 2016; Prieto *et al.* 2020; Turbay, *et al.* 2019) para la estimación de la vulnerabilidad de edificios históricos.

## Metodología

La opinión social se ha evaluado mediante una encuesta de carácter anónimo, llevada a cabo en el casco histórico de la ciudad, específicamente en algunos puntos estratégicos del centro como son el Parque Caldas, uno de los lugares de mayor concurrencia, y en tres plazoletas de iglesias donde también se evidencia alto flujo peatonal diario (Alcaldía de Popayán 2015).

Las encuestas estuvieron dirigidas a ciudadanos colombianos o extranjeros, mayores de 18 años residentes en la ciudad, esto abarca a la población que ha establecido su domicilio de manera permanente en esa área y no incluye a la población que ejerce movilidad temporal o no definitiva, a través de movimientos diarios por distintas razones (trabajo, estudio, recreo, comercio, ...), y que puede implicar el traspaso de fronteras municipales como es el caso de Popayán, ya que es el principal centro urbano del departamento (Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial 2004).

Para evaluar la muestra necesaria para que los resultados fuesen representativos, se tuvo en cuenta la población total estimada para Popayán (Colombia) en 2018, cercana a las 277.270 personas en la zona urbana, según los resultados del censo nacional de población y vivienda

(DANE 2019); la muestra se segmentó por medio de las variables de sexo y edad de acuerdo a los datos de la pirámide poblacional. El total de encuestas fue de 384, para obtener un 5% de error muestral y un 95% de confianza, de estas, 201 dirigidas a mujeres y 183 a hombres, de las cuales a su vez estuvieron distribuidos en 8 rangos de edad acorde con la densidad poblacional de cada grupo para la representatividad de la muestra.

Las encuestas en las que se basa este modelo han sido aplicadas en otras ciudades como Sevilla, Osuna y Marchena en España (Benítez *et al.* 2020). El proceso de entrevistas se realizó entre noviembre y diciembre de 2018, de forma aleatoria entre los ciudadanos.

La primera parte de la encuesta reúne una caracterización social de los encuestados, que permitió conocer aspectos claves de los ciudadanos como la edad, el género, el lugar de origen, ocupación, tiempo de residencia en la ciudad y el nivel de estudios alcanzados, que posteriormente fueron relacionados con los resultados de las preguntas, que contenían las variables sobre la opinión social. La segunda parte de la encuesta [tabla I] permitió al ciudadano evaluar los ítems o afirmaciones para dar cuenta de su opinión sobre aspectos referentes a las problemáticas que sufren los monumentos, como el nivel de conservación, la participación ciudadana e institucional, así como la apropiación y conocimiento sobre el patrimonio edificado de Popayán. En todas las preguntas se puede valorar entre 1 a 5, siendo 1 muy poco importante para el entrevistado, y el valor 5, implica que el concepto es considerado como muy importante por el entrevistado.

Los resultados de aplicación de las encuestas se ponderan mediante la opinión de los encuestados, para evidenciar el valor que representa el patrimonio, traducido en la preocupación de los ciudadanos hacia su conservación y su afectación en la vulnerabilidad del patrimonio de la ciudad.

El porcentaje de respuestas de cada valor (PRv), fue calculado con base al número total de respuestas obtenidas por cada uno de los valores (TRv) y dividida entre el sumatorio total de respuestas obtenidas por el valor correspondiente ( $\Sigma TRv$ ) [Tabla II].

$$PRv(i) = \frac{TRv(i)}{\Sigma TRv} * 100$$

El promedio ponderado del grado de vulnerabilidad se obtiene, mediante el sumatorio de la multiplicación de cada porcentaje de respuestas de cada valor (PRv) por su Valor de la opinión social (V):

$$\text{Grado de vulnerabilidad} = \Sigma [PRv(i) * V(i)]$$

Esta valoración se encuentra en la escala entre 1 y 5, siendo 1 en los casos donde la preocupación social por el patrimonio implicaría un patrimonio menos vulnerable, y 5, en las ciudades en las que no hay preocupación social por el patrimonio, y esto hace que los monumentos sean más vulnerables.

**Tabla I.-** Resumen de la encuesta

Preguntas	Muy poco importante/ Muy bajo	Poco importante/ Bajo	Algo importante/ Medio	Importante/ Alto	Muy importante/ Muy alto
A. ¿Es importante conservar y mantener los monumentos de mi ciudad?	1	2	3	4	5
B. ¿Considero que los monumentos de mi ciudad son bien conocidos por sus habitantes?	1	2	3	4	5
C. ¿Creo que los políticos de mi ciudad se preocupan por los monumentos?	1	2	3	4	5
D. ¿Realizo visitas frecuentes a museos, monumentos, etc?	1	2	3	4	5
E. ¿Los monumentos tienen un papel importante a la hora de planificar mis viajes?	1	2	3	4	5

**Tabla II.-** Método para el cálculo de opiniones por escala de valor

Escala de valor de cada pregunta	Valor muy bajo	Valor bajo	Valor medio	Valor alto	Valor muy alto	
Valor de la opinión social (V)	1	2	3	4	5	
Total respuestas de cada valor (TRv)	(TRv)1	(TRv)2	(TRv)3	(TRv)4	(TRv)5	Sumatorio total respuestas ( $\Sigma TRv$ )

## Resultados y discusión

### —Contexto social de la ciudad de Popayán

Popayán está ubicada geográficamente en el Valle de Pubenza, entre la cordillera occidental y central al suroeste de Colombia, en el departamento del Cauca [figura 1], zona con alto riesgo sísmico. La vocación del departamento es rural, y esto se ve reflejado en las dinámicas y actividades de la población de composición cultural diversa, convirtiéndose la ciudad, en un centro de comercio donde interactúan los municipios cercanos. Popayán ha sido en las últimas décadas epicentro de migraciones del campo a la ciudad por desplazamientos forzados a causa del conflicto armado en Colombia. El turismo es uno de los motores económicos de la ciudad, que se activa especialmente en el mes de marzo y abril, cuando se celebra la Semana Santa, declarada Patrimonio Cultural inmaterial de la Humanidad.

La estructura productiva de la ciudad no está muy diversificada, y en el contexto social, funciona como un núcleo que acoge a un gran número de estudiantes foráneos al ser una atractiva opción para la realización de estudios superiores en diferentes universidades, por lo que su economía se apoya en actividades relacionadas. No obstante, hay una alta tasa de desempleo respecto a otras ciudades del país, así como los trabajos informales que no están amparados bajo las garantías legales para los trabajadores. El centro histórico de la ciudad actúa como centro político-administrativo, donde funcionan las instituciones gubernamentales, bancarias y sitios de uso comercial. Se trata del centro histórico más grande de Colombia, y pese a los grandes avatares sufridos por los sismos, mantiene su imagen de ciudad colonial, considerado Bien de Interés Cultural de ámbito nacional, por el valor histórico artístico de sus edificaciones [figura 2].

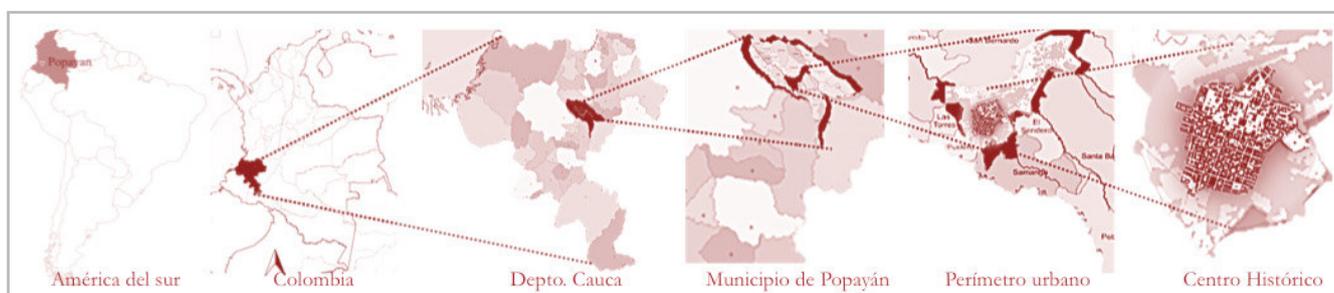


Figura 1.- Ubicación del Centro Histórico de Popayán.



Figura 2.- Vista general de la Parque Caldas en el Sector histórico de la ciudad de Popayán.

Desde el último terremoto de 1983, se han observado en el centro histórico, cambios en el uso de los materiales durante las restauraciones, rehabilitaciones o reparaciones de los monumentos, no siempre compatibles con los mismos, igualmente se ha observado un incremento del uso de los espacios públicos y privados y cambios en los usos del suelo que no son favorables para la conservación o que afectan de manera considerable el paisaje urbano [figura 3] y/o la materialidad de los edificios [figura 4].

#### —Caracterización de la población encuestada

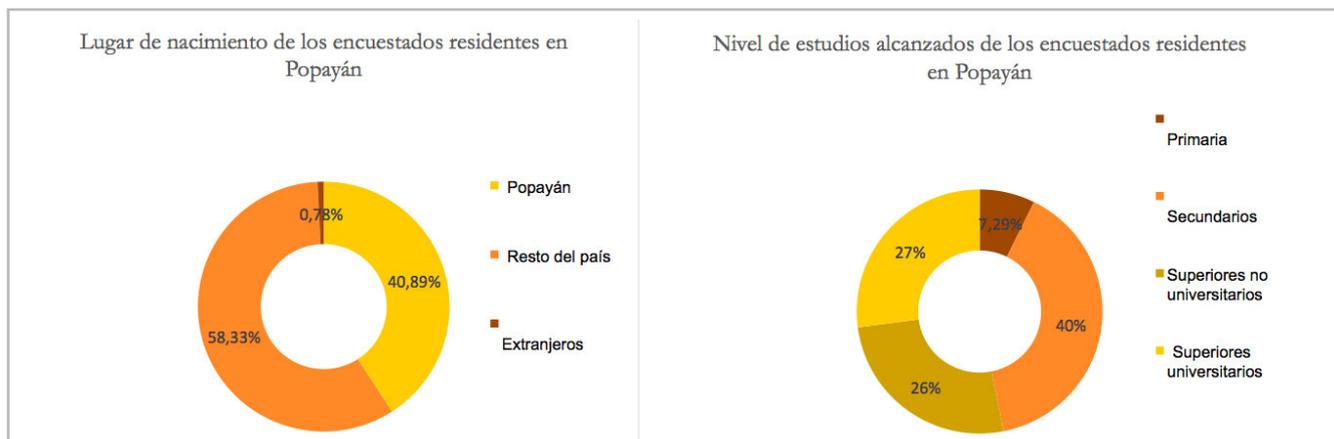
Las 384 encuestas realizadas a residentes permanentes de Popayán fue acorde a la distribución socio-demográfica de la ciudadanía, donde el 58,3% de los encuestados son provenientes del resto del país, un 0,8% son extranjeros, y finalmente un 40,9% corresponde a población nativa. Un 39,6% de los encuestados respondió que su nivel educativo eran estudios secundarios, siendo este el porcentaje más alto,



**Figura 3.-** Alteración del paisaje urbano en el centro histórico A) Ocupación del espacio público, por uso comercial informal, frente a la iglesia de La Encarnación B) Antigua casa convertida en parqueadero sobre la calle 4 frente a la iglesia de San Francisco C) Alteración del perfil urbano por construcción de nuevas edificaciones, edificio sobre la carrera novena, con calle 4.



**Figura 4.-** Ejemplo de la morfología de la manzana contigua a la iglesia de San José en Popayán. Se pueden identificar, en esta vista superior de las cubiertas, cambios en los materiales y técnicas constructivas de las cubiertas de tejas de cerámica.



**Figura 5.-** Caracterización general de la población encuestada

lo que indica que gran parte de la población no ha accedido a la educación superior, universitaria y no universitaria. Para estos casos el 26% dijo tener estudios superiores no universitarios y un 27,1% estudios superiores universitarios. Un 7,3% dijo haber alcanzado sólo estudios de primaria [figura 5].

#### —Caracterización de la opinión social

A continuación, se recogen los resultados de las encuestas a partir de cinco aspectos: a) la importancia de la conservación del patrimonio en la ciudad, b) nivel de conocimiento de los monumentos, c) preocupación de los entes gubernamentales por los monumentos de la ciudad, d) visita a los monumentos de la ciudad y e) importancia de los monumentos para la planificación viajes. Estos resultados se analizan desde los rangos de edad, el nivel de estudios y el sitio de origen de los ciudadanos.

a) Opinión de los habitantes de Popayán sobre la importancia de la conservación del patrimonio de su ciudad.

El 79,2% de los ciudadanos encuestados calificaron en una escala del 1 al 5, que es muy importante la conservación (5); una significativa proporción respecto a las otras opciones, sólo el 0,8% valoró con uno (1), considerando que es muy poco o nada importante la conservación del patrimonio en la ciudad. Estas respuestas en su mayoría positivas aportan en la generalidad la importancia del patrimonio para los habitantes de Popayán, solo existe un porcentaje bajo de ciudadanos, 2,4% entre los niveles bajo (2) y muy bajo (1), que manifiestan que no les interesa, o les interesa muy poco, que sea preservado el patrimonio de la ciudad.

Esta opinión varía considerablemente entre los grupos de edad. El rango de edad que calificó con valores más bajos, corresponde a los jóvenes y adultos de temprana edad (18 a 29 años); los grupos de mayor edad fueron más propensos a calificar con valores más altos este apartado. Lo anterior se puede interpretar a partir de una posición de arraigo, apropiación y sentido de comunidad de las personas mayores, que desde su cotidianidad y a través del tiempo

han compartido imaginarios y desarrollado conexiones hacia los valores del patrimonio. Por el contrario, los jóvenes probablemente no se involucran de forma directa por lo que no le dan la misma importancia; además, Popayán concentra a una alta población foránea de estudiantes, que permanece en la ciudad, sin necesariamente establecer vínculos o reconocer los valores de su patrimonio. Este valor hace pensar en la necesidad de mejorar la visión de los más jóvenes del patrimonio histórico, independientemente de su origen, especialmente en países no envejecidos, como es el caso de Latinoamérica.

Según el nivel de estudios de los encuestados se observa que el 98,1% que tienen estudios superiores universitarios le otorgaron una valoración entre 4 y 5, por el contrario, el 17,9% de las personas con un nivel de educación primaria fueron los que otorgaron la valoración más baja (1, 2 y 3). Este resultado revela que el nivel de escolaridad y por tanto, el nivel de conocimiento adquirido indica una preocupación y conciencia mayor por el valor del patrimonio y podría ser la clave para fortalecerlo ante las distintas amenazas. Así mismo, nos lleva a pensar sobre la importancia de incluir el concepto de “conservación del patrimonio histórico” en las escuelas primarias como un aspecto curricular.

Según el lugar de origen, el 84,1% de la población local le otorgó la mayor valoración asignada, al igual que el 75,8% de la población originaria del resto del país. Esto señala que tanto nativos como allegados dan una gran importancia a los monumentos de la ciudad. Este resultado puede evidenciar la apropiación e identificación a causa de los valores sociales que el patrimonio aporta al imaginario colectivo en el transcurso del tiempo; el fenómeno que crea con las personas no locales que residen en la ciudad puede verse influenciado por la participación y el interés por parte de la población nativa.

b) Opinión de los habitantes de Popayán sobre su nivel de conocimiento de los monumentos de la Ciudad:

El 43% de los encuestados contestó que el nivel de conocimiento era regular en una escala del 1 al 5. Sólo

un 3,4% consideró que su nivel de conocimiento de los monumentos de la ciudad era muy alto, y en el otro extremo, un 6,8% opinó que era muy bajo. A través de estas respuestas, los ciudadanos expresan que el nivel de conocimiento sobre nuestro patrimonio, no es suficiente, lo que apoya la propuesta sobre la necesidad de incluir el estudio de estos aspectos desde la primaria. Algunos de los entrevistados, no tenían una opinión clara al respecto, favorable o desfavorable, y esto hace mucho más difícil la tarea de conectar de alguna forma los bienes patrimoniales con la sociedad, y mucho más esperar un papel activo de la ciudadanía en cuanto al tema.

En función de los grupos de edad, el que le asignó una mayor calificación (5) a esta pregunta tiene entre 18 y 29 años, y el grupo que dio la valoración más baja (1) tiene más de 60 años. En general las respuestas estuvieron inclinadas a calificarlo como regular (3), siendo los ciudadanos entre los 45 y 59 años los que más insistieron en esta respuesta. Esto indica que el simple hecho de convivir con el patrimonio no es un determinante para conocer el trasfondo detrás de este, y aunque los jóvenes fueron los que expresaron que conocían más el patrimonio, esto no se traduce en que desarrollen un interés particular hacia él, ni un alto grado de apropiación social, lo que se refleja en que no consideran importante su conservación según los resultados recogidos en el apartado anterior.

Según nivel de estudios, todos los grupos educativos concentraron su calificación como regular (3). El grupo con estudios de primaria es el que mejor valoró (5) su nivel de conocimiento, con un 10,7%, tan sólo el 1% de la población con estudios superiores universitarios piensan que su nivel de conocimiento es muy bueno (5). Las respuestas en esta categoría tuvieron una alta variación, pero se puede señalar que para la ciudadanía no es un punto fuerte el conocer su patrimonio a pesar de tenerlo próximo.

Según el lugar de origen de los ciudadanos, las respuestas en esta categoría varían respecto a la calificación asignada. La población proveniente del resto del país es la que le otorga una mayor valoración (5) con un 4%, respecto al 2,5% representado por la población local. Esto podría implicar que los foráneos tienden a percibir que el nivel de conocimiento sobre los monumentos en la ciudad es más alto que lo que consideran los locales. Si bien las diferencias son pequeñas y habría que profundizar en este aspecto.

c) Opinión de los habitantes de Popayán sobre la preocupación de los entes gubernamentales por los monumentos de la ciudad.

El 27,9% de los encuestados consideran que la preocupación de las organizaciones gubernamentales es muy baja (1), el 33,9% lo considera bajo (2) y el 29,7% como regular (3). En contraste, sólo el 0,5% de los encuestados contestó que el nivel de preocupación es muy alto (5). Esto tiene relación directa con el papel de las instituciones gubernamentales en lo concerniente a la gestión del patrimonio en la ciudad,

no sólo en términos de conservación, sino en la activación del sector económico y cultural y en la difusión que se hace del trabajo realizado.

Según los grupos de edad, los ciudadanos entre los 45 y 59 años (con un 41,3%) opinan que la preocupación de los entes gubernamentales es regular (3). En el caso de la valoración baja (2), es el rango entre los 30 y 44 quien representa un mayor peso porcentual, con un 38%. En el caso de muy baja preocupación (1), son los ciudadanos de más de 60 años (36,9%) los que consideran el papel de los políticos y gestores como deficiente.

Según el nivel de estudios, el grupo con estudios superiores universitarios considera mayoritariamente (47,1%) como baja la preocupación de los entes gubernamentales por los monumentos. El grupo con estudios de primaria son quienes en mayor proporción calificarían como muy baja (1) la acción de los gestores, seguida de la población estudios superiores no universitarios con un 35,7% y 33,0% respectivamente. Tan solo un 1,7% de los encuestados valora muy positivamente (5) la gestión.

Se evidencia que la opinión generalizada es que existe una deficiente gestión del sector público, tanto de las personas con mayor nivel educativo como de menor nivel educativo, sin embargo, son estas últimas las que peor lo califican, lo que podríamos traducir como una percepción de mayor distanciamiento y exclusión hacia esta población, a la cual probablemente no han llegado las acciones gubernamentales suficientes para involucrarla activamente. Por el contrario, hay que indicar que el centro histórico de Popayán es el más grande conservado en Colombia, su Semana Santa es Patrimonio Inmaterial de la Humanidad y cuenta con un Plan Especial de Manejo y Protección (PEMP) desde el año 2010, por lo que se evidencia la necesidad de medidas de comunicación sociales más efectivas con los diferentes grupos de interés para su participación en los modelos de conservación de la ciudad.

d) Opinión de los habitantes de Popayán sobre visitar los monumentos de su ciudad.

Los encuestados reconocieron en general no visitar los monumentos de la ciudad. El 25,8 % de los encuestados respondieron con un valor 2, lo que indica que el nivel de visitas es bajo; seguido del 24,2% con una valoración regular (3) y un 21,9% con una valoración muy baja (1). Se evidencia que sólo el 9,4% de los ciudadanos encuestados realiza visitas muy frecuentes, esto tiene implicaciones en la conservación del patrimonio, ya que un bien abandonado progresivamente por la sociedad civil, es más propenso a que desde las instituciones no se garanticen los mecanismos necesarios para mantenerlo en uso y en óptimo estado. Las causas son difíciles de analizar, pero podrían estar en el poco interés o tiempo en el esparcimiento cultural, y las pocas o nulas iniciativas desde los gobiernos nacionales y locales para proporcionar y mantener un rol activo del ciudadano hacia su entorno próximo.

Según grupos de edad, el grupo de mayores de 60 años y el de 18 a 29 años manifestaron visitar los monumentos de Popayán con mayor frecuencia (5) con porcentajes del 13,8% y 13,2% respectivamente. Los ciudadanos entre los 45 y 59 años son los que menos visitas realizan, ya que el 27,2% contestó que no realizaba visitas a monumentos y el 31,5% que casi nunca las realizaba.

Según nivel de estudios, los resultados obtenidos muestran que la población con estudios universitarios son los que con mayor frecuencia visitan los monumentos de la ciudad, con un 30,8% y un 13,5% para los valores de 4 y 5 respectivamente. Los ciudadanos que menos concurren a los monumentos pertenecen al nivel de estudios de primaria, representando un 42,9% y 21,4% con respuestas 1 y 2 respectivamente.

Según el lugar de origen, los resultados reflejan que los ciudadanos que nacieron en Popayán son los que manifestaron visitar de forma más regular los monumentos con las valoraciones 3, 4 y 5, con una importante diferencia porcentual respecto a la población foránea. Un 17,2% de los ciudadanos nacidos en Popayán dijeron que la frecuencia de visitas que hacía a los bienes patrimoniales era muy poco frecuente (1), no obstante, la población no local supera esta cifra con 7,9 puntos porcentuales.

e) Opinión de los habitantes de Popayán sobre la importancia de los monumentos para la planificación de sus viajes.

Los ciudadanos en general no consideraron fundamental este aspecto para desarrollar sus actividades de turismo y ocio. Tan solo un 25,5% de los encuestados lo valoró como

importante (4) y un 19,3% dijo que era muy importante (5), mientras un 23,7% lo considera con importancia media (3) y un 14,6% manifestó que no era nada importante (1).

Según grupos de edad, los mayores de 60 años y los jóvenes y adultos entre 18 y 29 años son los que manifestaron tener más en cuenta los monumentos para la planificación de sus viajes, con resultados totales de 58,4% y 57,6% respectivamente para valores de 5 y 4. Los ciudadanos entre los 45 a 59 años son los que menos tienen en cuenta este aspecto para planificar sus viajes, representando un 45,7% en total para las valoraciones de 1 y 2.

Con respecto al nivel de estudios, el grupo de ciudadanos con estudios universitarios es el que más tiene en cuenta este aspecto, un 26,0% da la valoración más alta (5) mientras un 33,7% da la valoración (4), lo que significaría que siempre o casi siempre tienen en cuenta los monumentos a la hora de planificar sus actividades de ocio y turismo. Por otro lado, la población que referenció tener solo estudios de primaria, es la que menor valoración le asigna a esta consideración (1 y 2), representando un 42,8% del total, le siguen las personas con estudios secundarios, entre las que un 16,4% da la valoración (1), y con porcentajes similares las personas con estudios superiores no universitarios que calificaron también en un 16% que no es importante (1).

—Evaluación de la opinión social

La figura 6 recoge un resumen comparativo de los cinco aspectos evaluados mediante las opiniones de los ciudadanos encuestados en Popayán.

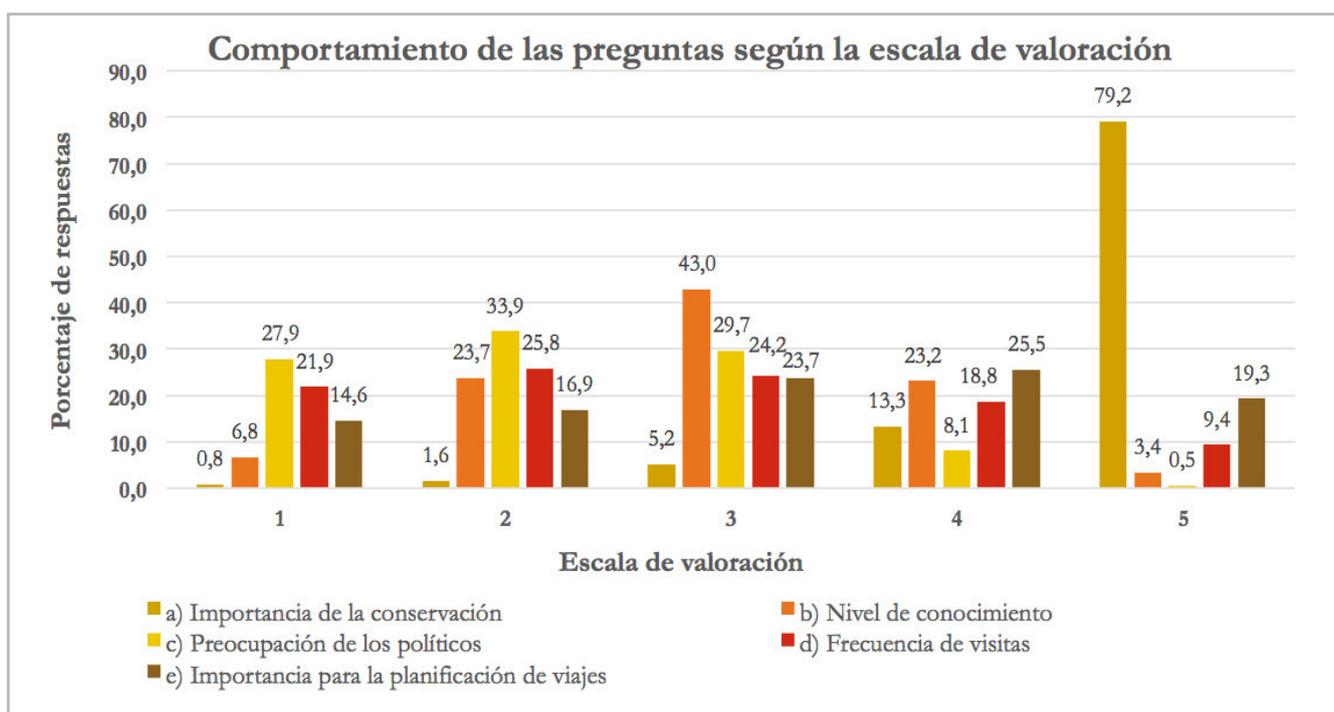


Figura 6.- Opinión social general de los ciudadanos de Popayán (Colombia) recogida en la encuesta sobre el patrimonio

El resultado del cuestionamiento sorprende por la elevada preocupación que expresan los ciudadanos sobre la importancia de la conservación del patrimonio, el 79,2% de los encuestados responde con el valor más alto (5), esto independiente del nivel educativo, edad o lugar de origen de los encuestados.

Este dato parece estar en contradicción con las respuestas a las demás preguntas, ya que, aunque existe un alto nivel de preocupación por la conservación del patrimonio histórico en Popayán, sus ciudadanos opinan que su nivel de conocimiento del patrimonio es regular, la preocupación de sus políticos por el patrimonio es muy baja, y gran parte de la población no visita frecuentemente los monumentos ni tiene en cuenta los bienes patrimoniales de forma significativa a la hora de planear sus viajes de turismo y ocio. Esto se podría explicar a partir del concepto de capital social (The Getty Conservation Institute 2013), que tiene que ver con la asociación identitaria, espiritual, ideológica y hasta de tipo histórico y estética que se puede desarrollar. Podría afirmarse que la importancia evidenciada por la ciudadanía puede ser un factor a favor de la conservación del patrimonio, pero dado el comportamiento de las otras variables no ha sido desarrollado en el territorio.

En cuanto al nivel de conocimiento de los bienes patrimoniales, el panorama no es muy positivo, tan solo el 3,4% lo calificó como muy alto, las respuestas se centraron entre medio y bajo. Esta variable es muy representativa, ya que darle una significación al patrimonio implica conocerlo. La difusión de este tipo de conocimiento no llega a la población en general, entre las posibles causas, encontramos el limitado acceso que tienen al patrimonio, que no motiva a los diferentes grupos de la sociedad, falta de campañas y políticas motivadoras, o la falta de interés de los individuos. Dada la amplia afluencia de personas foráneas en Popayán, es destacable que la población local insista en que el grado de conocimiento no es alto. Es ahí, donde es importante la implementación de estrategias educativas para promover el conocimiento hacia el patrimonio, su uso, su apropiación e incluso su relación como motor del desarrollo social y económico, o de los desarrollos comunitarios. Este estudio deja patente la necesidad de transmitir una visión del patrimonio edificado que vaya más allá de la importancia histórica (García Canclini 1999). Para lograrlo, es imperativo la accesibilidad a los conocimientos, ya que es una condición necesaria para la toma de decisiones, y contribuye a una conservación integrada del patrimonio (Icomos 2015).

En general, la percepción sobre la preocupación de los entes gubernamentales para preservar los monumentos es bastante

desalentadora, sólo el 0,5% de los ciudadanos encuestados la calificarían como muy alta; es decir, en opinión de la población, hay una ausencia de interés o voluntad política para llevar a cabo la labor de protección. Lo cierto es que los ciudadanos no perciben los esfuerzos de los gobiernos y líderes políticos, lo cual ofrece una pista acerca del rol histórico y actual de las instituciones frente al patrimonio; que sean las personas de mayor edad las que consideren que estos actores no tienen como una de sus prioridades el cuidado del patrimonio, demuestra una baja confianza en las instituciones, como gestores del mismo, y por tanto una larga tradición de invisibilidad a la sociedad durante generaciones (Garavito González 2006; Caraballo Perichi 2008)

El que los ciudadanos en su mayoría no frecuenten los monumentos de la ciudad es un indicador de la baja interacción que tienen con estos, sólo un 9,4% respondió que los visitaba de manera habitual; esto indica que, a pesar de convivir desde la cotidianidad, no se establece un vínculo ni reconocimiento con el entorno patrimonial. Una de las posibles causas son las limitadas iniciativas y actividades, que permitan el disfrute, igualmente la apatía o falta de interés hacia el ámbito cultural. Las visitas y la interacción adecuada con el patrimonio promueven un sentido de apropiación y una preocupación por la salvaguarda. Estas medidas pueden prevenir que se caiga en desuso o uso impropio, condiciones que se pueden dar si los espacios no son reconocidos por los ciudadanos para su aprovechamiento.

Por último, es importante anotar que apenas se tienen en cuenta el patrimonio para planificar viajes, tan sólo un 19,3% aseguró que era muy importante, seguido de un 25,5% que respondió que era altamente importante. No obstante, para la mayoría no representa un factor determinante o imperativo para escoger el destino de su tiempo de ocio y viajes; esto es coherente con las repuestas asignadas a otros aspectos, como el poco conocimiento sobre el patrimonio y la baja frecuencia de visitas. Esto evidencia aún más el desconocimiento de los ciudadanos acerca de los entornos patrimoniales y a su vez denota poco interés y capacidad de divertirse en buena medida por la ausencia de diversificación y difusión del patrimonio.

—La opinión social como factor agregado en el grado de vulnerabilidad

El porcentaje de respuestas de cada valor (PRv), calculado con base al número total de respuestas obtenidas para cada uno de los valores (TRv) para la escala de 1 al 5, se representa en la tabla III.

**Tabla II.**- Método para el cálculo de opiniones por escala de valor

Escala de valor de cada pregunta	Valor muy bajo	Valor bajo	Valor medio	Valor alto	Valor muy alto
Valor de la opinión social (V)	1	2	3	4	5
Total respuestas de cada valor (TRv)	276	391	483	341	429
Porcentaje de respuestas de cada valor (PRv)	14.40%	20.40%	25.20%	17.80%	22.30%

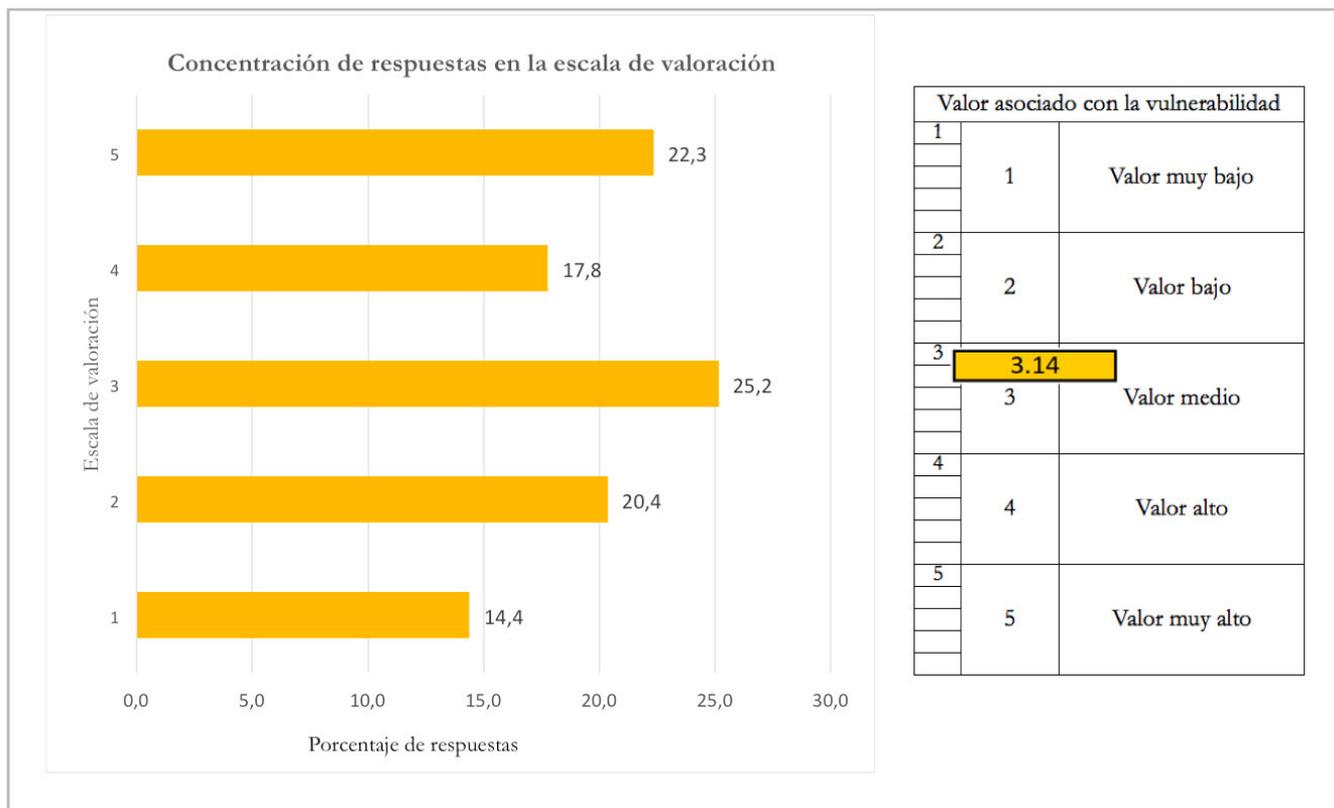


Figura 7.- Grado de vulnerabilidad del patrimonio de Popayán según la opinión social de sus habitantes

A partir de estos datos se ha calculado el grado de vulnerabilidad en función de las opiniones sociales, aplicando la ecuación recogida en la metodología. El grado de vulnerabilidad del patrimonio de Popayán asociada a la opinión de los encuestados, se puede estimar como medio, correspondiente a un valor de 3.14, en una escala de medida de 1 a 5, siendo (1), muy vulnerable y (5) muy poco vulnerable. [figura 7]

En Popayán, como en la mayoría de ciudades hispanoamericanas, están latentes las dinámicas de orden global, que pueden afectar a la opinión de la sociedad frente al patrimonio, como el crecimiento demográfico y aumento de la pobreza, el consumismo, entendido como la visión a corto plazo, la moda global promocionada por los medios de comunicación, la cultura global que discrimina las diversidades culturales, la falta de recursos profesionales para atender técnicamente el patrimonio y la ausencia de conocimiento esencial sobre los monumentos, entre las principales causas enumeradas en el informe de ICOMOS (ICOMOS 2000) sobre monumentos y sitios en peligro. A estas causas, se suman otras de orden nacional o regional que están relacionadas con los problemas de índole colectivo como la fragmentación social, la diversidad en la composición cultural de la población actual, producto de las migraciones y el desplazamiento forzado del campo a las ciudades; además, la falta de alternativas de inversión pública, para suplir la necesidades básicas como la vivienda y

la educación, ocasionando cambios socioeconómicos y llevando progresivamente a la pérdida de la identidad cultural.

Las implicaciones sobre los bienes patrimoniales ya se perciben en el centro histórico de Popayán, y pueden estar asociadas a esta baja-media valoración social del patrimonio. Entre esas implicaciones hay actuaciones de la población, que sobrepasan la existencia de la normativa, como son los usos impropios del suelo, la ocupación informal del espacio público con fines lucrativos, o la construcción de edificaciones ilegales afectando el paisaje urbano y la contaminación visual. Estas amenazas al patrimonio histórico pueden tender a incrementarse en el futuro de forma progresiva, en especial por combinación con otros factores, como la presión urbanística, bajo políticas de gestores poco sensibilizados o preocupados por la conservación del Patrimonio. Por otro lado, la falta de conocimiento sobre el valor del patrimonio, puede afectar a proliferación de intervenciones u obras de mantenimiento inadecuadas, que sumada a la carencia de conocimientos técnicos o falta de documentación, puede llevar a actuaciones que desfiguren la materialidad del patrimonio. Además, la ausencia de reconocimiento de los valores tangibles e intangibles del patrimonio puede favorecer el robo, el vandalismo, el abandono o los usos no compatibles; que a la larga ocasionan el debilitamiento físico del monumento, su pérdida de significación cultural, la ruina o incluso su desaparición [figura 8].



**Figura 8.**- Ejemplos de alteración en la conservación del patrimonio de Popayán. A) Construcción de edificio modificando los perfiles urbanos ubicado en la Carrera 10 con calle 4 en el sector histórico. B) Grafitis como muestra de actos vandálicos afectando el paisaje urbano en la iglesia de El Carmen. C) Contaminación visual y vandalismo por grafiti en la Iglesia de santo Domingo.

## Conclusión

La metodología desarrollada en este trabajo puede contribuir a valorar la vulnerabilidad del patrimonio, desde la óptica de las comunidades allegadas. Los resultados ponen de manifiesto la importancia de evaluar el comportamiento social que puede afectar de manera directa al patrimonio, como es el caso de los actos vandálicos o la presión urbanística, o de manera indirecta por las corrientes de orden global y/o conflictos de intereses. En este sentido, estimar la conciencia y principales preocupaciones de los ciudadanos ante la preservación del patrimonio podría medir el nivel de sensibilidad social acerca de la importancia que tiene su conservación, e identificar las necesidades actuales de la población y las medidas para fortalecer la conservación como factor de identidad y desarrollo sostenible.

Los resultados obtenidos en esta investigación son útiles para el planteamiento de estrategias basadas en la colaboración y participación activa de los ciudadanos, donde tengan la posibilidad de comprender, valorar y proteger el patrimonio. El análisis realizado se basa en un componente subjetivo y cualitativo, relacionado con la percepción de los habitantes de Popayán, del patrimonio de su ciudad, y por tanto hay una incertidumbre asociada a la medición y evaluación, que debe ser analizada en futuros estudios. En este sentido, la relación del ciudadano con su patrimonio implica múltiples escalas de percepción basadas en sus necesidades a nivel individual y comunitario, sin embargo, pueden identificarse patrones de valoración discernibles y cuantificables vinculados a causas frecuentes de deterioro o de conservación del patrimonio edificado, por lo que la metodología planteada se puede usar para campañas que impliquen formas de actualización del patrimonio que tengan como fin su conservación.

Este estudio pone de manifiesto la necesidad de la coparticipación de distintos actores gubernamentales y no gubernamentales, que puedan involucrarse en la gestión de los bienes de interés cultural, la estimación e implementación de políticas de actualización del valor del patrimonio para elevar el grado de significación de

las comunidades más próximas al él, y a su vez la creación de todo un escenario donde se promuevan los recursos patrimoniales.

## Agradecimientos

Esta investigación se basa en la Metodología desarrollada por dos Proyectos: ART-RISK, un proyecto RETOS del Ministerio de Economía y Competitividad y Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), (código: BIA2015-64878-R (MINECO / FEDER, UE)) y el proyecto UPO-03 de la consejería de Fomento, Infraestructura y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía (España). Pilar Ortiz agradece la beca Salvador Madariaga del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España (PRX16/00226) para la realización de una estancia en la Universidad de Oxford (UK), durante la cual se trabajó en el diseño de las encuestas utilizadas en esta investigación. Rocío Ortiz agradece su estancia en la Universidad de Lisboa (Portugal), durante la cual se trabajó en el diseño de las encuestas utilizadas en esta investigación.

## Referencias

- ALCALDÍA DE POPAYÁN. (2015). *Plan de Movilidad para el municipio de Popayán*. Informe 3: diagnóstico parte, 1ªed., Popayán: Movilidad Futura.
- BENÍTEZ, J., TIRADO-HERNÁNDEZ, A., ORTIZ, R., MORENO, M., ORTIZ, P., TURBAY, I., GARRIDO-VIZUETE, MA. (2020). "Social opinion of monuments vulnerability in historical cities". *Science and Digital Technology for Cultural Heritage*, Ortiz, P (coord.) Sevilla: Taylor & Francis Group, 221-224. <https://doi.org/10.1201/9780429345470-41>
- CARABALLO PERICHI, C. (2008). "El patrimonio cultural y los nuevos criterios de intervención. La participación de los actores sociales" *Palapa. Revista de Investigación Científica en Arquitectura/ Journal of Scientific Research in Architecture*, 3:41-49.
- DANE (2019). *Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda*

2018, 1ª ed., Bogotá: DANE

DIÁZ FUENTES, D. A. (2017). "Un método simplificado para evaluar el riesgo sísmico y priorizar la atención de los bienes culturales inmuebles: el caso de Chile", *Intervención*, 8:46-62. <https://doi.org/10.30763/Intervencion.2017.15.173>

GARAVITO GONZÁLES, L. (2006). "El origen del patrimonio como política pública en Colombia, y su relevancia para la interpretación de los vínculos entre cultura y naturaleza". *Opera*, 6:169-187.

GARCÍA CANCLINI, N. (1999). "Los usos sociales del patrimonio cultural", *Patrimonio Etnológico. Nuevas perspectivas de estudio*, 1: 16-33.

GARRÉ, F. (2001). "Patrimonio arquitectónico urbano, preservación y rescate: bases conceptuales e instrumentos de salvaguarda", *Conserva*. 5:5-21.

ICOMOS. (2015). *Documentos de icomos*, 1ª ed., Santiago de Chile: J. de N. Concha, Ed.

ICOMOS. (1999). *Carta de Burra*, 1ª ed., Sidney: ICOMOS Australia.

ICOMOS. "Tendencias, Amenazas Y Riesgos" en Informe Mundial 2000 de ICOMOS sobre monumentos y sitios en peligro. [https://www.icomos.org/risk/world\\_report/2000/trends\\_spa.htm?fbclid=IwAR2waaCDSNTXRJD1STcIZjRml\\_b6c1xmhU\\_mT6ygSi42cMUPmZ1m197dLDY](https://www.icomos.org/risk/world_report/2000/trends_spa.htm?fbclid=IwAR2waaCDSNTXRJD1STcIZjRml_b6c1xmhU_mT6ygSi42cMUPmZ1m197dLDY). [consulta: 3/2/2020].

LLULL PEÑALBA, J. (2005). "Evolución del concepto y de la significación social del patrimonio cultural", *Arte, Individuo y Sociedad*, 17:175-204. <https://dx.doi.org/10.5209/ARIS>

MANZINI, L. (2011). "El significado cultural del patrimonio", *Estudios del Patrimonio Cultural*, 6:27-42.

MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2006). *Serie Población, Ordenamiento y Desarrollo. Guía metodológica 1: Elementos Poblacionales Básicos para la Planeación*, 1ª ed., Bogotá: Dirección de desarrollo territorial.

ORTIZ, R., ORTIZ, P. (2016). "Vulnerability Index: A New Approach for Preventive Conservation of Monuments", *International Journal of Architectural Heritage*, 10:1078-1100. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1186758>

PRIETO, A.J., TURBAY, I., ORTIZ, R., CHÁVEZ, M.J., MACÍAS-BERNAL, J.M., ORTIZ, P. (2020). "A Fuzzy Logic Approach to Preventive Conservation of Cultural Heritage Churches in Popayán, Colombia". *International Journal of Architectural Heritage*, 0:1-20. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1737892>

THE GETTY CONSERVATION INSTITUTE. (2013). *Assesing the*

*values of cultural heritage*, 1ª ed., Los Angeles: De la Torre, M

TURBAY I., ORTIZ P., ORTIZ, R. (2019). "Assessment of Vulnerability Index Applied to Churches of 18th Century in the Historic Center of Popayan (Colombia)". En *Resilience and sustainability of cities in hazardous environments*, Dobran, F. (coord.) New York, 26-30.

UNESCO. "Tesoro de la UNESCO" en UNESCO. <http://vocabularies.unesco.org/browser/thesaurus/en/>. [4/1/2020].

## Autor/es



**María Isabel Turbay Varona**

[isaturbay@hotmail.com](mailto:isaturbay@hotmail.com)

Facultad de Arquitectura, Fundación Universitaria de Popayán, Popayán, Colombia

Arquitecta, Master en Diagnóstico del estado de conservación del Patrimonio Histórico, Candidata a Doctora en Historia y estudios Humanísticos, Europa, América, arte y lenguas, en la línea de Tutela, Protección, Gestión y Puesta en Valor del Patrimonio Histórico, de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla. Profesora en la Facultad de Arquitectura de la Fundación Universitaria de Popayán, (Colombia), donde actualmente es Codirectora del grupo de investigación, GREP, Grupo de Estudios del Paisaje. Su experiencia radica en investigación de la vulnerabilidad y riesgos en el Patrimonio arquitectónico, Valoración social del patrimonio y arqueología de la arquitectura. Ha sido docente en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, en la Facultad de Arte y Diseño del Colegio Mayor del Cauca y en la Facultad de Artes de la Universidad Antonio Nariño, (Colombia). Ha realizado estancias de investigación en instituciones como el Centro de Investigaciones regionales de Mesoamérica CIRMA en La Antigua (Guatemala), en el laboratorio Sanit-ARTE de la Facultad de Ciencias Experimentales de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla y en el Museo Histórico Municipal de Écija (España) y participó en la III Campaña de Excavación Arqueológica en el Palacio de Villa Adriana, Roma (Italia).



**Rocío Ortiz**

[rortcal@upo.es](mailto:rortcal@upo.es)

Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España

Licenciada en Arquitectura en 2001, Máster en Protección del Patrimonio Histórico con un Proyecto enfocado en el estudio de Marchena en 2012. En 2014 Obtuvo el título de Doctora con mención europea en Universidad Pablo de Olavide (Sevilla). Actualmente es profesora en la UPO, donde desarrolla su actividad investigadora en torno a la Conservación Preventiva y el estudio de riesgos y vulnerabilidad del Patrimonio Histórico.

La Dra. Ortiz es directora del Máster de Diagnóstico del Estado de Conservación del Patrimonio Histórico y es responsable del Área de Cristalografía y Mineralogía de la misma universidad. La Dr. Ortiz es experta en el diagnóstico del Patrimonio Histórico, administración, e-learning, y sus investigaciones científicas aparecen publicadas en 30 libros, actas de congresos, y revistas especializadas. Sus proyectos de investigación han sido financiados por la Unión Europea, gobiernos nacional y autonómico, y organizaciones privadas. Los intereses de la Dr. Ortiz se centran en los estudios de riesgo y vulnerabilidad del Patrimonio Cultural, el empleo de información georreferenciada para el estudio del Patrimonio Cultural, materiales de construcción, planes de ordenación urbana y peligros e innovación en las enseñanzas de ciencias con especial énfasis en el diagnóstico del Patrimonio Histórico.

de Excelencia de la Junta de Andalucía, un proyecto RETOS del Gobierno de España, un Proyecto de Cooperación Internacional de la Junta de Andalucía y un Proyecto Internacional Erasmus+. Ha iniciado y liderado importantes líneas de investigación como la aplicación de técnicas láser para el diagnóstico in situ de Bienes Culturales, el desarrollo de técnicas no destructivas para el estudio del Patrimonio Histórico, o la aplicación de mapas de riesgos, índices de vulnerabilidad e inteligencia artificial para la preservación del Patrimonio Cultural. La Dra. Ortiz es miembro del Campus de Excelencia Internacional de la Universidad de Jaén en Patrimonio Cultural y Natural, del grupo de trabajo "Cambio" en el Campus Internacional de Excelencia de la universidad Pablo de Olavide (UPO), del Consejo Andaluz de Patrimonio Histórico y decana de la Facultad de Ciencias Experimentales de la UPO.



**María Arana**

[mariamonica@unicauca.edu.co](mailto:mariamonica@unicauca.edu.co)

Facultad de Derecho, Ciencias Políticas y Sociales, Universidad del Cauca, Popayán

Estudiante de Ciencia Política de la Universidad del Cauca. Se desempeña como coordinadora general del semillero de investigación Ciudad, Universidad y Juventud, en el cual desarrolla investigaciones en las líneas de comunicación política y ciudad, con particular interés en la cohesión de las instituciones públicas y la sociedad civil en la gestión de las ciudades. Ha publicado textos en la revista universitaria Comarca de la Universidad del Cauca. Realizó un voluntariado en Houston, Texas.



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.777>



**Pilar Ortiz**

[mportcal@upo.es](mailto:mportcal@upo.es)

Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España

La experiencia investigadora y docente de la Dra. Ortiz se ha enfocado en el diagnóstico, preservación y conservación del Patrimonio Cultural. Para su desarrollo ha colaborado con museos y otras instituciones culturales como el IVCR+i, IAPH, Museo de Cádiz, Museo de Écija, etc. Además, ha desarrollado de actividad en diferentes países: Reino Unido, Bélgica, Italia, Rumanía, Cuba, Colombia, Panamá, etc. Su producción científica puede ser resumida en 38 publicaciones en revistas indexadas; 50 libros y capítulos de libros, participación en más de 25 congresos internacionales, chairman y miembro de comités científicos en numerosos congresos, etc. Ha trabajado como profesora asociada en la Universidad de Amberes (Bélgica), como profesora invitada en la Universidad de Oxford (Reino Unido) y como investigadora invitada en ENEA (Italia). La Dra. Ortiz ha participado en 24 proyectos nacionales e internacionales, contratos y convenios y ha sido la investigadora principal de más de 16 de estos proyectos, destacando un Proyecto

## *Reseñas*

---



***Made in Malines. Les Statuettes Malinoises Ou Poupées de Malines de 1500-1540 : Etude Materielle Et Typologique***

Fanny Cayron, Delphine Steyaert

Institut royal du Patrimoine artistique. Bruxelles 2019

ISBN 978-2-930054-37-7

Dimensiones: 29,30 x 22 cm

Páginas: 231

Idioma: Francés

El número 16 de 'Sciencia Artis', del Instituto Real del Patrimonio Artístico (IRPA), titulado "*Made in Malines. Les statuettes malinoises ou poupées de Malines de 1500 - 1540: Étude matérielle et typologique*", refleja la investigación sobre las pequeñas esculturas de Malinas realizadas durante el siglo XVI. Este trabajo fue promovido por Myriam Serck-Dewaide, entonces directora general de esta institución, con el fin de revisar y catalogar el amplio corpus elaborado por Willy Godenne y publicado en la segunda mitad del siglo XX. Dicha investigación ha sido subvencionada por la Oficina Federal de Política Científica de Bélgica (Belspo). Forma parte de los programas de estudio y difusión de datos científicos sobre los materiales y las técnicas empleados en el arte belga. El estudio se basa en la experiencia del taller de conservación especializado en la escultura de madera policromada del IRPA, como indica su actual responsable Emmanuelle Mercier.

El libro se estructura en cinco capítulos, que abordan sucesivamente el contexto de producción de estas esculturas manufacturadas en los talleres de Malinas, su comercialización y uso devocional. Se inicia con los datos extraídos de la historiografía, para luego entrar en el análisis sistemático de la escultura, la policromía y las marcas. Estas populares esculturitas, conocidas como muñecas de Malinas o malinenses por su tamaño, aire infantil y caras redondeadas, su sonrisa y la coquetería de su hechura, estaban destinadas a la devoción privada. Representan un fenómeno esencial del arte medieval asentado en la repetición de modelos establecidos, sin buscar privilegiar el carácter original de la obra única. Entre sus características principales destacan su reducido tamaño, generalmente entre 26 y 38 cm, y que representan

figuras de santos, el niño Jesús o la Virgen con el Niño como las más extendidas.

Sobre la base del Corpus estudiado de estas pequeñas esculturas, con más de 600 entradas, las autoras amplían la división de las dos fases de producción identificadas hasta ahora: las policromadas en Bruselas y, más tarde, la mayoría talladas y policromadas en Malinas. Como consecuencia del sistemático análisis formal y técnico de la talla, la policromía y las marcas de control características de los centros de producción de esta época en las Países Bajos del sur, se propone la subdivisión de la segunda fase en tres periodos de acuerdo a la evolución estilística observada.

En la primera etapa, *periodo Malinas-Bruselas*, entre 1500 y 1510, están las obras de colaboración entre escultores de Malinas y policromadores de Bruselas, con clara influencia de la escultura bruselense y en especial de la saga de los Borman, y una policromía a base de dorados, plateados y la utilización casi sistemática del brocado aplicado.

Continúa un *periodo de transición* de mayor variedad de estilo y calidad, en el que si bien se mantienen rasgos de la escultura bruselense las piezas serán enteramente realizadas en Malinas, como revelan las marcas de garantía, conviviendo en su policromía brocados aplicados, estofados, esgrafiados y labores de punzonado.

La tercera fase, denominada *periodo de intensificación*, presenta un considerable incremento en la producción, fijará las fórmulas con un tratamiento más sofisticado en las formas, con predominio del estofado pintado y fondos punzonados en su policromía.

El *final de la producción* de estas esculturitas de estilo gótico tardío supuso una menor calidad de las piezas por repetición de las fórmulas, si bien los estofados a punta de pincel con fondos punzonados siguen siendo de buena calidad.

El capítulo cuatro describe y analiza en profundidad las marcas de control del gremio y las utilizadas por escultores y policromadores, tan habituales en los centros brabanzones de la época. Sin duda, un elemento que en buena medida contribuye a identificar la procedencia y aproximar la datación de las piezas.

En el quinto capítulo se exponen una serie de aspectos que invitan a reflexionar sobre las posibilidades de colaboración y datación en torno a la producción de éstas y otras esculturas en madera policromada realizadas en los Países Bajos, y las ordenanzas de los gremios que controlaban la calidad de su manufactura. El libro finaliza con unas conclusiones claras y bien estructuradas, en las que se condensan los aspectos mencionados anteriormente.

Este volumen va destinado a conservadores-restauradores, historiadores y científicos especializados en el estudio de la escultura policromada, que trabajan en instituciones culturales, y a otros profesionales interesados en esta materia.

Cabe resaltar así mismo el valor de la documentación gráfica que incluye la publicación, con numerosos detalles de las esculturas, de la minuciosa policromía y de las marcas, como otra de las aportaciones sustantivas de este tipo de trabajos interdisciplinarios que ahondan en la materialidad de los objetos estudiados.

**Ana Carrassón y Marisa Gómez**

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)



<https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.778>

[www.revista@ge-iic.com](mailto:www.revista@ge-iic.com)

Edición digital del GEIIC