

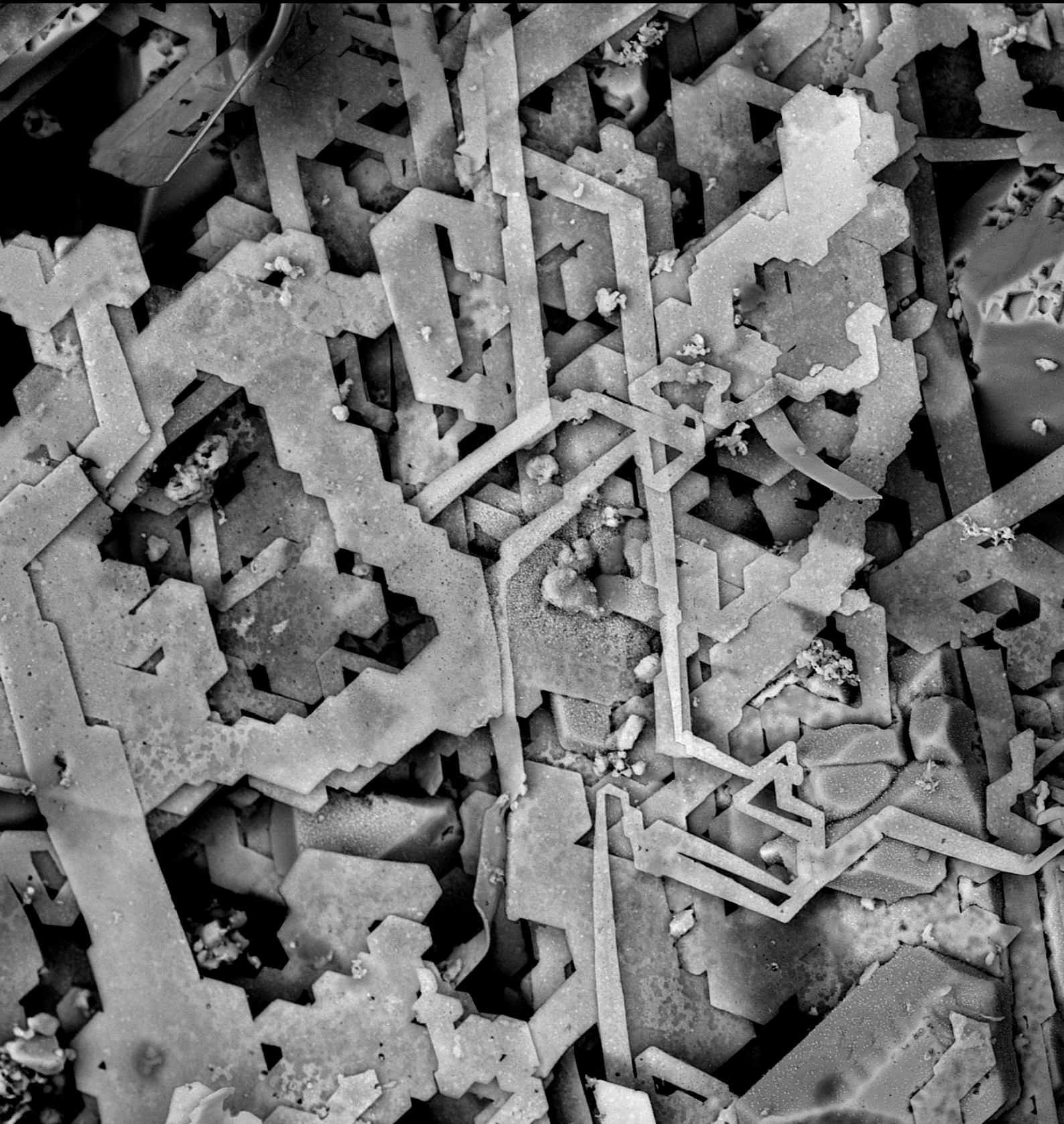
La Ciencia y el Arte VIII

Ciencias experimentales y
conservación del patrimonio

Ministerio
de Cultura
y Deporte

Science and Art VIII

Experimental Sciences and
Heritage Conservation



La Ciencia y el Arte VIII

Ciencias experimentales y
conservación del patrimonio
Madrid, 2, 3 y 4 de junio de 2021

Science and Art VIII

Experimental Sciences and
Heritage Conservation
Madrid, June 2, 3 and 4, 2021

Edición 2022



MINISTERIO DE CULTURA
Y DEPORTE

Edita:

© SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA
Subdirección General de Atención al Ciudadano,
Documentación y Publicaciones.

Fotografía de la portada CIENCIA Y ARTE VIII

© Imagen BSE de contraste composicional de cristales esqueléticos de cloruro de plata desarrollados en los productos de corrosión de una pieza de plata de ocho reales del tesoro de monedas de la fragata Nuestra Señora de las Mercedes. Fotografía: José Vicente Navarro.

© Del resto de imágenes: sus autores.

© De los textos: sus autores.

NIPO: 822-22-087-6
ISBN: 978-84-8181-812-3

ÍNDICE

	Pág.
Prólogo	7
Miriam Bueso Manzananas, María Martín Gil, M ^a José Suárez Martínez, Anna Vila Espuña	
BLOQUE 1. CONSERVACIÓN PREVENTIVA Y GESTIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL EN SITUACIONES DE CRISIS O EMERGENCIA	
El Plan de Conservación Preventiva de la colección del Museu Nacional d'Art de Catalunya. Hacia un modelo de gestión sostenible de la conservación	10
Ruth Bagan Pérez	
Gestión de riesgos y emergencias de colecciones de arte contemporáneo desde el paradigma de la complejidad	26
Pilar Montero Vilar	
El fármaco como fuente de cultura inmaterial: Santa Maria della Scala, Roma. Estudio y musealización	40
M ^a Luisa Vázquez de Ágredos Pascual, Sergio Ferrero Gil, Roberta Fantoni y Nuria Blaya Estrada	
El Museu Picasso de Barcelona: la gestión de la museografía en los edificios patrimoniales y las nuevas lecturas de la colección	56
Reyes Jiménez de Garnica	
Conservación preventiva y la identificación de riesgos en colecciones de memoria. Estrategias sostenibles y tecnología digital	71
Ana Galán Pérez, Andre Perrotta, Diogo Bernardes y Eduarda Vieira	
El cambio de paradigma de la gestión de visitantes en un sitio patrimonial tras el COVID-19. El Monasterio de Santa María la Real (Aguilar de Campoo)	85
Víctor Álvarez Gutiérrez, Jose Carlos García García y Daniel Basulto García-Risco	
Aplicación del lenguaje de programación R al análisis de datos microclimáticos para conservación preventiva	91
Irene Ureña Herradón y Héctor Bolívar Sanz	
Hábitat excavado y paisaje cultural: patrimonio histórico y cambio climático ...	104
Miguel Ángel Sorroche Cuerva y Martín Ramírez Pérez	

Actuación en bienes culturales muebles en caso de emergencia o catástrofe: protocolo de organización del triaje	119
Inmaculada Chuliá Blanco	
Análisis de la calidad del aire en la capilla de Luis de Lucena de Guadalajara. Propuesta metodológica y ejemplo de sostenibilidad	134
Alexander Gaztañaga Garabieta, Alba García Bernabé e Irene Sánchez Pascual.	
BLOQUE 2. TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN LA CONSERVACIÓN DE LOS BIENES CULTURALES. CASOS DE APLICACIÓN	
Indicadores de falsificación en los «grafitos excepcionales» del yacimiento arqueológico de Iruña-Veleia (Álava)	153
José Vicente Navarro Gascón.	
Conservación de materiales superfrágiles mediante polímeros de silicona en yacimientos arqueológicos subacuáticos	170
Luis Carlos Zambrano Valdivia.	
Aplicaciones de los Modelos Digitales de Elevación a la conservación del Patrimonio	183
José Manuel Lodeiro Pérez (<i>in memoriam</i>), María Isabel Herraiz Martín, Marta Iriondo Silván, Ioanna Ruiz de Torres Moustaka y Teresa Valle Fernández.	
Técnicas de imagen de luminiscencia fotoinducida	199
Ana Rosa García Pérez	
Macro-fotogrametría para la digitalización 3D de especímenes	217
Aleix Barberà Giné, Sergi Gago Carrión y Eulàlia Garcia Franquesa.	
Tecnología al servicio de la conservación del patrimonio cinematográfico	233
Javier Rellán Calero.	
Aplicación de SIG al estudio científico y la difusión de resultados. La Predela del Centenar de la Ploma	249
David Juanes Barber.	
Conservación de la escultura contemporánea en acero patinable en el exterior: empleo de recubrimientos protectores	265
Sara de Miguel Moreno, Blanca Ramírez Barat, Ana Crespo Ibáñez, Iván Díaz Ocaña y Emilio Cano Díaz.	

Estudio de las transformaciones de los pigmentos empleados en las pinturas murales del Parque Arqueológico de Pompeya	276
Silvia Pérez-Diez, Iker Marcaida Ormazábal, Juan Manuel Madariaga Mota y Maite Maguregui Hernando.	
Evaluación de tratamientos de limpieza para la eliminación de depósitos calcáreos en cerámicas arqueológicas	289
Águeda Sáenz-Martínez, Margarita San Andrés Moya, Mónica Álvarez de Buergo y Marta Pérez-Estébanez.	
Enfoque multidisciplinar para la intervención de conservación y restauración de la cripta rupestre de San Biagio (San Vito dei Normanni, Brindisi, Italia): un caso de estudio	299
Maria Rosaria Cipparrone, Mario Cotrino, Giovanni Leucci, Davide Melica y Gianpaolo Vacca.	
Riesgos microbiológicos tras verter geles rígidos sobre materiales pétreos	316
Alicia de Lera Santín, Véronique Vergès-Belmin y Faisl Bousta.	

Prólogo

Miriam Bueso Manzanos

Instituto del Patrimonio Cultural de España

María Martín Gil

Instituto del Patrimonio Cultural de España

M^a José Suárez Martínez

Patrimonio Nacional

Anna Vila Espuña

Fundación “La Caixa”

Cada año se conmemoran fechas importantes, aniversarios y efemérides de todo tipo y naturaleza que rescatamos para que no caigan en el olvido. Para todos nosotros, los que nos movemos entre bambalinas y estamos detrás de los hilos sobre los que se sustenta el congreso *Ciencia y Arte*, el pasado año 2021 fue, sin duda, una fecha para el recuerdo. No solo lográbamos reactivar su VIII edición —suspendida el año anterior 2020 a causa de la pandemia—, sino que el propio IPCE, que vio nacer este Congreso, festejaba su 60 aniversario (1961-2021).

Una cifra nada desdeñable en la que se encierra una larga historia en forma de trabajo y dedicación al mundo de la conservación del patrimonio, a su investigación y difusión. Pero, no nos olvidemos de que toda gran institución, como en este caso el IPCE, ha forjado su historia gracias a otros factores y, fundamentalmente, a esos grandes profesionales que han dedicado tantos años, y lo siguen haciendo, a esta entidad; y es que, los seis lustros del IPCE están tejidos sobre el buen hacer, el recuerdo y la memoria de cada uno de ellos. Sirvan estas páginas para expresarles nuestro reconocimiento, admiración y, sobre todo, darles las gracias por su incondicional apoyo a proyectos como el que ahora ocupa nuestra atención: el congreso *Ciencia y Arte*. Un congreso bienal que desde que comenzó su andadura, allá por el año 2006, hemos visto crecer, desarrollarse y convertirse en un referente dentro de su especialidad. Un posicionamiento que nos ha permitido traspasar fronteras y unirnos, en cada edición, a grandes socios: entidades como la Asociación Española de Museólogos, universidades como la Facultad de Óptica (Universidad Complutense de Madrid) y la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación (Madrid), centros de conservación como el Instituto Valenciano de Conservación y Restauración e Investigación (IVCR+i), instituciones museísticas como el Museo de Bellas Artes de Valencia, el Museo de América, el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía y el Museo Nacional del Prado o ya, para la VIII edición, Caixa Forum, en cuyo auditorio de Madrid debía realizarse este evento.

Pero, como bien sabemos, las circunstancias mandan y qué, duda cabe, que éstas fueron, y aun lo siguen siendo, muy adversas por la prolongación de este indeseado escenario marcado por la COVID 19. Evidentemente, este Congreso, como tantas y tantas actividades culturales, se vio envuelto en la incertidumbre y la balanza se inclinaba hacia su más que posible suspensión. Afortunadamente, no nos rendimos y decidimos seguir apostando por una actividad, que más allá de estar consolidada, desde hace años, pasó a ser un reto personal, cuya realización, convertimos en nuestra particular forma de resiliencia. La investigación y, en definitiva, la cultura en mayúsculas no podían echar el telón, la función debía continuar. Por fin, en el mes de octubre, se desarrolló la aplazada VIII edición, del año 2020, en modalidad de *webinar*, y he aquí el resultado: una publicación fruto de un Congreso que será para siempre un ejemplo para todos nosotros; que logró aunar voluntades,

sumar los esfuerzos de grandes investigadores —procedentes de diversos puntos de España, Europa e Iberoamérica— y, sobre todo, obtener el apoyo de ese incondicional público que, desde hace años, nos apoya y que siguió la retransmisión del Congreso en remoto, con más de 250 alumnos inscritos. A todos ellos nuestro más sincero agradecimiento, pero, muy especialmente, a Isabel Fuentes, Directora de Caixa Forum y Anna Vila, técnico de la Fundación La Caixa, por su gran empatía, comprensión y apoyo logístico.

El lector tiene ante sí, una publicación que recoge los trabajos presentados en este Congreso que, de acuerdo a nuestra política de actuación, giraron en torno a unos temas previamente fijados. En esta VIII edición, se priorizaron aquellas propuestas de investigación que tuviesen como foco de atención tanto la *Cumbre del clima* celebrada en 2019 (COP25), como la situación de la COVID 19. Los artículos recogidos en este monográfico son fruto de un arduo trabajo de investigación y reflejo de un eficiente trabajo en equipo.

Por primera vez, en la clausura, se entregó el *Diploma de Honor. Joven Investigador* a la propuesta mejor valorada por jóvenes investigadores (menores de 35 años), acerca del *Análisis de la calidad del aire en la capilla de Luis de Lucena de Guadalajara. Propuesta metodológica y ejemplo de sostenibilidad* presentada por Alexander Gaztañaga Garabieta, Alba García Bernabé e Irene Sánchez Pascual, que se incluye en la publicación.

BLOQUE 1. CONSERVACIÓN
PREVENTIVA Y GESTIÓN
DEL PATRIMONIO CULTURAL
EN SITUACIONES DE CRISIS
O EMERGENCIA.

El Plan de Conservación Preventiva del Museu Nacional d'Art de Catalunya. Hacia un modelo de gestión sostenible de la conservación

The Preventive Conservation Plan of the Museu Nacional d'Art de Catalunya. Towards a sustainable conservation management model

Ruth Bagán Pérez

Museu Nacional d'Art de Catalunya
ruth.bagan@museunacional.cat

Resumen: El Museu Nacional d'Art de Catalunya integra en su Estrategia y Plan de Acción 2019-2022/2029 la redacción de un plan de conservación preventiva para su colección. La voluntad de la institución es disponer de una herramienta de gestión de la conservación que garantice la preservación de los bienes, promueva un uso racional de los recursos y, a su vez, sea compatible con el desarrollo del resto de funciones del museo. Todo ello bajo la premisa de reforzar la aplicación de criterios medioambientales y de sostenibilidad en todos los procesos.

El elevado número de bienes que conforman la colección, la complejidad de la organización interna de la institución y la voluntad de integrar en el plan prácticas sostenibles, condicionan el enfoque de éste y exigen sentar unas bases sólidas previas para su despliegue.

En esta ocasión, se analiza el contexto en el que se desarrolla el plan y se presenta el enfoque metodológico propuesto por el Área de Restauración y Conservación Preventiva del Museo para abordarlo, con el propósito de integrar, también en el cuidado de la colección, las políticas medioambientales y de sostenibilidad de la institución.

Palabras clave: Conservación preventiva, sostenibilidad, medioambiente, museo, colección, gestión de riesgos.

Abstract: The Museu Nacional d'Art de Catalunya includes the development of a preventive conservation plan in its Strategy and Action Plan 2019-2022/2029. The institution's will is to have a conservation management tool that guarantees the preservation of the objects, promotes rational use of resources, and, in turn, is compatible with the development of the rest of the museum's functions. All this is under the premise of reinforcing the application of environmental and sustainability criteria in all processes.

A large number of objects, the complex internal organization of the institution, and the desire to integrate sustainable practices into the plan, determine the approach of the plan and demand laying a solid foundation prior to its deployment.

On this occasion, the plan development context is analyzed, and the methodological approach by the Museum's Conservation Department is presented, with the aim of incorporating the institution's environmental and sustainability policies in the care of the collection.

Keywords: Preventive conservation, sustainability, museum, collection, risk management.

El Museu Nacional d'Art de Catalunya: colección y organización

Instalado desde 1934 en el Palau Nacional en Montjuïc, edificio construido con motivo de la Exposición Internacional de Barcelona de 1929, no fue hasta 1990 cuando fue inaugurado como Museu Nacional d'Art de Catalunya, tras varios proyectos de reforma (Figura 1). En aquel momento pasó a integrar, en el mismo edificio, también la colección del Museu d'Art Modern, los fondos del Gabinet de Dibuxos i Gravats y del Gabinet Numismàtic de Catalunya, y la Biblioteca d'Història de l'Art, que hasta entonces estaban ubicados en el Parc de la Ciutadella de Barcelona.

Actualmente los fondos del Museo están formados por más de 180.000 obras, con una cronología que abarca desde el siglo XI hasta los años setenta del siglo XX, además de los 155.000 objetos del Gabinet Numismàtic de Catalunya. La colección está formada principalmente por pintura, escultura, objetos de artes decorativas, fotografía, numismática y una cantidad importante de obra sobre papel. También hay que integrar, en las tareas de conservación, los fondos de la Biblioteca, que posee más de 150.000 documentos bibliográficos, así como el Archivo, con más de 500.000 documentos.

El edificio del Palau Nacional tiene un área de 48.000 m². De éstos, 13.000m² están ocupados por la colección y 2.300 m² son espacios expositivos (Figuras 2, 3 y 4). De los fondos, solamente alrededor de 3.500 objetos están expuestos, lo que indica el peso de las reservas en la gestión de la colección.



Figura 1. Fachada principal del Museu Nacional d'Art de Catalunya. Fotografía: Museu Nacional d'Art de Catalunya, Barcelona.

El Museo cuenta con una estructura organizativa compleja, con numerosas áreas y departamentos, entre los que destacan —a efectos de gestión de la conservación—: Coordinación de Colecciones; Restauración y Conservación Preventiva; Registro y Exposiciones, Infraestructuras y Servicios Generales; Museografía y Movimiento de obra, y Seguridad.



Figura 2. Salas de la exposición permanente de Románico. Fotografía: Museu Nacional d'Art de Catalunya, Barcelona.



Figura 3. Salas de la exposición permanente de Arte Moderno. Fotografía: Museu Nacional d'Art de Catalunya, Barcelona.



Figura 4. Salas de la exposición permanente de Renacimiento y Barroco. Fotografía: Museu Nacional d'Art de Catalunya, Barcelona.

La implantación de políticas sostenibles en el Museu Nacional

El Museo inició el camino hacia la sostenibilidad en 2012, cuando se implantó un Sistema de Gestión Ambiental (SGA). En 2013 se convirtió en la primera institución cultural, pública y museo del Estado en obtener el certificado de Responsabilidad Social IQNet SR10. Con ello, la institución mostraba su compromiso con el medioambiente y la voluntad de contribuir al desarrollo sostenible del entorno. Posteriormente, en 2017, la visión estratégica de la organización integraba ya una línea de actuación con el nombre de «Gestión y organización: un museo eficiente y sostenible».

Desde que se implantó el SGA, la mayoría de acciones se han focalizado en la reducción del consumo energético, en un uso responsable del agua y en la segregación y reducción de los residuos, lo que ha facilitado la obtención de la Certificación de Calidad de Gestión Ambiental ISO 14001, además del Reglamento Europeo EMAS.

El alcance del SGA del Museo incluye todas sus actividades: planificación, coordinación y ejecución de exposiciones; conservación y restauración; ejecución de programas culturales y educativos, servicio de biblioteca; gestión de las instalaciones; alquiler de espacios; servicio de atención e información a los visitantes; gestión de la actividad del restaurante y cafetería; y servicio de tienda y librería.

Con el Plan estratégico aprobado en 2019, el Museo reforzó este compromiso, al marcar como uno de los objetivos prioritarios el incrementar la presencia transversal de las políticas medioambientales y sostenibles, es decir, aplicarlas a todas las acciones y procesos posibles dentro de la institución.

En el ámbito concreto de la conservación, destacan como proyectos estratégicos prioritarios la elaboración del Plan de conservación preventiva y la conservación sostenible de la colección, que buscan aplicar soluciones sostenibles a los problemas de preservación y uso de ésta, así como en el mantenimiento del edificio y de las instalaciones.

Sostenibilidad y museos

El concepto de desarrollo sostenible ha evolucionado mucho desde la definición recogida en el conocido *Informe Brundtland*¹ de 1987. Actualmente su alcance va más allá del entorno natural y se aplica a múltiples ámbitos, lo que lo ha hecho inevitablemente más complejo.

El compromiso de los museos con la sostenibilidad es cada vez más evidente. Esto se traduce en la implementación de medidas para lograr organizaciones más verdes y en la adopción de políticas de responsabilidad social corporativa. También destaca la toma de conciencia sobre su papel a la hora de involucrar a la sociedad en el desarrollo sostenible. Y es que, aunque inicialmente la cultura no estaba considerada como un elemento relevante en el camino hacia la sostenibilidad, cada vez hay más estudios que enfatizan su papel clave en este proceso (Luiza y Borza, 2016: 1), hasta el punto de ser considerada el «cuarto pilar» del desarrollo sostenible, junto con el medioambiente, la economía y la sociedad (British Council, 2020: 9-12).

Sin embargo, la aplicación de medidas que logren un equilibrio armonioso entre las dimensiones económica, ambiental y social no es una tarea fácil para los museos. Especialmente cuando hay una tendencia generalizada a considerar que las colecciones que preservan generan importantes costes de conservación y mantenimiento que tienen un fuerte impacto en la dimensión económica y ambiental (Luiza y Borza, 2016: 9).

Como consecuencia, en los últimos años, varias organizaciones de ámbito internacional han apostado por destacar las fuertes conexiones entre el desarrollo sostenible y los museos, e impul-

¹ Informe de la Comisión de la Asamblea de las Naciones Unidas creada en 1983 y presidida por Gro Harlem Brundtland (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987).

sar la implicación de estos últimos en el cumplimiento de los objetivos para el desarrollo sostenible (ODS)².

Por el hecho de preservar un gran patrimonio cultural en forma de colecciones, y por su capacidad de llegar a un gran público, son vistos como recursos únicos para el cumplimiento de los ODS (UNESCO, 2015: 26). Es más, los museos son presentados como ejes culturales con valiosos medios para conseguir la implicación de la sociedad en la creación de un futuro sostenible, sin olvidar la necesidad de reducir su impacto ambiental mediante la incorporación de prácticas sostenibles (ICOM, 2019: 4-7).

La función social de los museos y su papel en la aplicación de los ODS parece indiscutible hoy en día. Sin embargo, la realidad es que, actualmente, la sostenibilidad entendida en un sentido amplio todavía tiene un papel menor en este tipo de instituciones. Muchas de ellas han adoptado medidas para reducir la huella de carbono y convertirse en organizaciones más verdes, pero no han creado un marco coherente para integrar la sostenibilidad en todas sus áreas de operaciones (Garthe, 2020). Para muchas incluso, el reto principal es asegurar su propia sostenibilidad, de lo contrario no podrán contribuir al desarrollo sostenible de sus respectivas comunidades (Luiza y Borza, 2016: 5).

De los diecisiete ODS, no todos son igual de relevantes para los museos. Algunos autores han hecho propuestas de acciones para guiarles por este camino. La primera es proteger y salvaguardar el patrimonio cultural mediante el uso eficaz y sostenible de sus colecciones (McGhie, 2019: 45-46). La preservación sostenible del patrimonio cultural es el paso previo necesario para apoyar el desarrollo sostenible en la dimensión social. Los bienes culturales deben ser vistos como recursos o materias primas para cumplir con la función social del museo, puesto que permiten reflejar mejor la identidad de la comunidad y la evolución de la sociedad. En consecuencia, los gastos derivados de estas dos primeras funciones —coleccionar y conservar— son una inversión para obtener beneficios en el futuro (Luiza y Borza, 2016: 10).

Y lo más importante, el cumplimiento de estas funciones básicas debe contemplarse desde la óptica de la sostenibilidad. De manera que la sostenibilidad se convierte en un concepto transversal que impregna todas las áreas de la institución, recogidas en lo que debería ser un marco de desarrollo (Garthe, 2020). La búsqueda de la sostenibilidad en la conservación de las colecciones es pues, también, uno de los objetivos prioritarios de estas instituciones.

La sostenibilidad en el ámbito de la conservación de colecciones

La sostenibilidad en la conservación se ha vinculado tradicionalmente a las condiciones ambientales. El elevado consumo de energía resultante de mantener unos estándares de clima estrictos las convirtió en el primer blanco de las políticas de sostenibilidad ya durante la segunda mitad del siglo XX. En los años 80 y 90 se sucedieron numerosos encuentros entre profesionales para debatir la posibilidad —y la necesidad— de revisar los estándares de temperatura y humedad relativa internacionalmente aceptados. Todos ellos, junto con relevantes estudios sobre el comportamiento de los materiales, sentaron las bases para la relajación de las consignas ambientales.

En el ámbito concreto de los museos, tras la demanda del grupo Bizot³ de nuevas directrices para los préstamos en pos de la sostenibilidad, éstas se materializaron en el año 2015. Sin embargo, hoy en día, la aplicación práctica de estas directrices es discutible.

² Objetivos marcados por Naciones Unidas en la resolución adoptada por la Asamblea General del 25 de septiembre de 2015. NACIONES UNIDAS (2015): Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (A/RES/70/1).

³ El *Group of Organizers of Large-Scale Exhibitions*, conocido como «Grupo Bizot» propuso en 2009 un rango más amplio de condiciones ambientales para las obras en préstamo, basados en las pautas del NMDC (*National Museums Directors' Council*) de 2008. Con el objetivo de reducir el coste energético y la huella de carbono, plantearon un rango de temperatura de 16-25°C y 40-60% de HR para la mayoría de materiales higroscópicos y sin necesidades especiales (BIZOT GROUP, 2015)

La implantación de la sostenibilidad en la práctica de la conservación ha sido tema de debate en las últimas décadas y, más allá de los estándares de clima, se ha centrado también en un uso responsable de los materiales, así como en las posibilidades de reutilización y reciclaje de éstos. Muestra de ello es la aparición de incontables herramientas y recomendaciones de buenas prácticas puestas a disposición de los profesionales de la conservación-restauración. Algunas de ellas han sido elaboradas por asociaciones profesionales, y otras por organizaciones creadas especialmente con el fin de impulsar prácticas comprometidas con el medio ambiente en el ámbito de la preservación del patrimonio.

Sin embargo, la búsqueda de la sostenibilidad en el cumplimiento de la función de conservar va más allá de las consignas ambientales y de las buenas prácticas en los laboratorios de conservación-restauración, en el diseño de exposiciones o en la concepción de embalajes. Teniendo en cuenta que la preservación de los activos culturales para las generaciones futuras implica un horizonte temporal lejano, y que los recursos son limitados, la institución debe buscar un modelo de gestión de la conservación responsable, basado en criterios de desarrollo sostenible. El objetivo principal es garantizar la preservación y el acceso a las colecciones, pero no a cualquier precio, sino mediante un uso racional de los recursos.

En este sentido, la estrategia de la conservación preventiva se erige como la alternativa más adecuada para lograr la sostenibilidad en la preservación de las colecciones. Por su enfoque holístico, por centrar su atención en el origen del deterioro, porque busca ralentizar los procesos de degradación de los materiales y evitar costosos tratamientos de intervención, pero, sobre todo, porque aporta un sentido de proporción. Facilita la identificación de prioridades, la toma de decisiones y, en consecuencia, la optimización de los recursos (Herráez, 2012: 109).

La estrategia de gestión del riesgo sobre la que se fundamenta este enfoque proporciona una visión pragmática de la preservación de las colecciones. Desde las primeras propuestas de Waller y Michalski de los años 90 del siglo pasado (Waller, 1994; Michalski, 1990)⁴, se ha convertido en la herramienta más apropiada para garantizar una gestión eficiente de los recursos —que suelen ser limitados—, al apostar por el diseño de acciones a medida de las necesidades y prioridades de los bienes culturales.

El caso del Museu Nacional d'Art de Catalunya

Uno de los principales objetivos recogidos en el plan estratégico del Museu Nacional d'Art de Catalunya es integrar las políticas de sostenibilidad en todas las operaciones de la institución, y la conservación de la colección es una de ellas.

Algunas de las actuaciones relacionadas con la conservación que se han ido implementando durante las últimas décadas ya iban en esta dirección. Tal es el caso de la estandarización de los formatos de marcos y paspartú, lo que a su vez permite una estandarización de las cajas de almacenaje para los fondos de dibujos y grabados (Figura 5). O el privilegiar los tratamientos de desinsectación mediante anoxia en detrimento del uso de químicos, junto con la implantación de un sistema integrado de control de plagas. También el progresivo reemplazo de las fuentes de iluminación existentes por LED, la revisión de las consignas de clima bajo la premisa de ampliar el margen de fluctuación siempre que sea posible y adaptarlas a los cambios estacionales o, incluso, permitir paros del sistema de climatización en determinados espacios y momentos del día. Otras acciones son más recientes, forzadas por el contexto actual de pandemia, como el uso de correos virtuales cuando las condiciones del préstamo y las características de las obras lo permiten.

⁴ Más tarde, estas primeras propuestas desembocarían en dos de los métodos para la gestión de riesgos en patrimonio cultural más reconocidos: el método CPRAM (*Cultural Property Risk Assessment Method*) de Robert Waller y el *ABC Method* de Stefan Michalski.



Figura 5. Detalle de la reserva del gabinete de dibujos y grabados. Fotografía: Museu Nacional d'Art de Catalunya, Barcelona.



Figura 6. Reserva destinada al material inorgánico. Fotografía: Museu Nacional d'Art de Catalunya, Barcelona.

Aunque muy relevantes desde la óptica de la sostenibilidad, se trata de acciones aisladas, a las cuales deberían sumarse muchas otras, idealmente de forma coordinada y planificada. Desde el Área de Restauración y Conservación Preventiva buscamos integrar todas estas medidas en una sola herramienta de gestión, el plan de conservación preventiva.

¿Cuál es pues nuestro objetivo? Garantizar que la conservación de la colección se desarrolla de manera adecuada —preservando los objetos y su valor de riesgos potenciales—, y que se pone en práctica de manera sostenible. Es decir, que la función de conservar se cumple de manera eficaz, y a la vez eficiente.

Frente a este doble objetivo, el primer reto al que nos enfrentábamos era el de disponer de una base sólida sobre la cual trabajar. Es decir, sentar las bases para una gestión sostenible de la conservación, que se articularía alrededor del plan de conservación preventiva.

Al iniciar el plan analizamos varios modelos metodológicos para afrontarlo, todos ellos basados en la gestión del riesgo, con el objetivo de seleccionar el más acorde a las necesidades de la institución. Inicialmente se adoptó el modelo propuesto por el Instituto del Patrimonio Cultural de España, estructurado alrededor del análisis de los bienes culturales y su contexto; el análisis de los riesgos de deterioro, y el desarrollo de procedimientos de seguimiento y control de los riesgos (Herráez, Pastor y Durán, 2019).

Una vez analizado el contexto de la colección —medioambiente, uso y gestión—, el primer escollo fue el análisis de los bienes que la integran. Nos enfrentábamos a una colección cuantiosa, de modo que una aproximación individualizada no era viable (Figura 6). Priorizamos el obtener una visión global de la situación y, a partir de ahí, profundizar en aquellos aspectos que consideráramos más relevantes o prioritarios. La premisa inicial al seleccionar el método era la simplicidad de aplicación y la inmediatez en la obtención de resultados preliminares, aunque ello supusiera renunciar a un análisis pormenorizado de la colección. El modelo *Quickscan*, planteado por Brokerhof y Bülow, nos proporcionaba una instantánea de forma rápida.

El método propone un primer barrido de la colección a partir de la significancia de los bienes y de su vulnerabilidad a los principales agentes de deterioro. Esto permite identificar rápidamente las partes donde se concentra el mayor riesgo de cambio o de pérdida, que es donde coinciden

mayor valor y vulnerabilidad. A partir de ahí, podemos escoger en qué partes de la colección centrar nuestro interés en primer lugar, y proseguir con el análisis en función de posibles escenarios de riesgo (Brokerhof y Bülow, 2016: 21-22).

Cualquiera de las dos metodologías mencionada implica unos mínimos requisitos de información que, junto con el posterior análisis de riesgos, fundamentarán las propuestas. A estas necesidades de documentación hay que añadir información esencial para afrontar los objetivos marcados por la sostenibilidad.

El primer paso para identificar las necesidades de información era reflexionar sobre lo que significa ser más sostenibles en la gestión de la conservación y, partir de ahí, de forma natural podríamos establecer unos objetivos y unos posibles indicadores de seguimiento. Es decir, analizar qué tenemos, cómo lo estamos conservando y cómo podemos hacerlo mejor en las tres dimensiones de la sostenibilidad (Figura 7):

- **Desde el punto de vista ambiental**, es indiscutible, hay que buscar un ahorro de la energía destinada a la conservación de la colección, lo que tendrá, a su vez, un impacto en la dimensión económica. A priori pensamos en una nueva revisión de las consignas ambientales en busca de una mayor flexibilización de éstas allí donde sea posible, puesto que es lo que está en nuestra mano. Esto implica conocer las necesidades de conservación de los objetos, las posibilidades de las instalaciones de climatización actuales y el comportamiento de los espacios frente a las condiciones exteriores. Debido a las características del edificio, el espacio destinado a almacenaje está muy fragmentado y el Museo cuenta con veinte espacios de reserva, algunos de ellos con más estabilidad ambiental que otros.

Aun así, ampliar la horquilla de los valores de temperatura y humedad relativa permitidos no es la única vía para ser más sostenibles. Esta medida debe complementarse con un incremento de medidas de aislamiento pasivo en el edificio para lograr una mayor estabilidad, o incluso plantearse una reorganización profunda de los espacios de reserva, proyecto en el que se está trabajando actualmente. Por ejemplo, la colección de fotografía, que está cre-

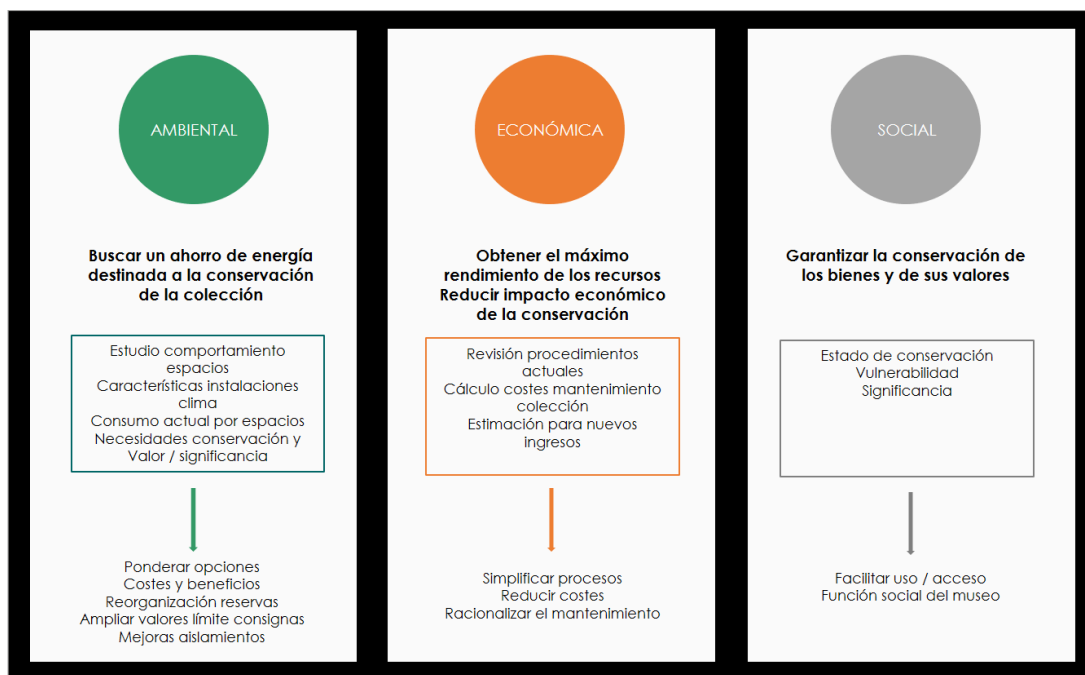


Figura 7. La conservación en el museo desde las tres dimensiones de la sostenibilidad. Fuente: Museu Nacional d'Art de Catalunya, Barcelona.

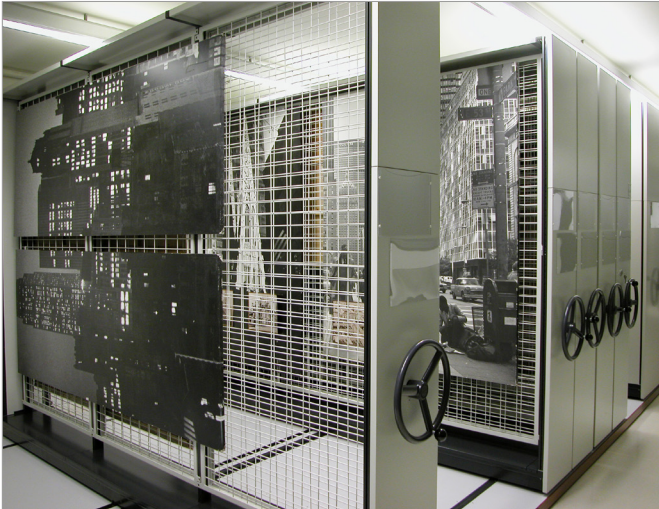


Figura 8. Detalle de la reserva de fotografía.
Fotografía: Museu Nacional d'Art de Catalunya, Barcelona.



Figura 9. Operaciones de limpieza de los ábsides románicos.
Fotografía: Paz Marqués.

ciendo de forma considerable, requiere unas condiciones de conservación estrictas (Figura 8). El espacio destinado a estos fondos está ubicado en una zona del edificio que dificulta enormemente mantener las consignas, lo que fuerza el funcionamiento de las instalaciones de climatización e incluso requiere de equipos de refuerzo en momentos críticos del año.

A este proceso de reflexión alrededor de las condiciones de conservación y de los recursos invertidos en mantenerlas, debemos incorporar también la significancia de los objetos, puesto que será uno de los factores determinantes para guiar nuestras acciones, como reflejan ya las dos metodologías citadas anteriormente para el desarrollo del plan.

- **Desde el punto de vista de la sostenibilidad económica**, debemos lograr el máximo rendimiento de nuestros recursos —escasos en relación al volumen de los fondos conservados—, y que éstos se inviertan en acciones necesarias y prioritarias. El análisis de riesgos nos permite este enfoque pragmático. Sin embargo, también buscamos racionalizar el mantenimiento de la colección sin poner en riesgo su preservación, simplificando los procesos y reduciendo los costes derivados de esta actividad.

Ante una colección de más de 300.000 objetos —sin contar con los fondos bibliográficos y de archivo—, se hace indispensable revisar los procedimientos actuales para que sean más eficientes.

De la colección expuesta, por ejemplo, una de las actuaciones que implica un coste elevado es la limpieza de las estructuras vistas de los ábsides románicos (Figura 9). Cuando se diseñó la museografía actual, se previó el acceso a las partes altas de estas estructuras para su mantenimiento, pero el coste derivado de esta operación en determinados ábsides no fue valorado desde la óptica de la sostenibilidad. En algunos casos es necesario contratar a una empresa especializada en trabajos en altura, debido a la dificultad para acceder con elevadores, lo que incrementa considerablemente el presupuesto. Con el objetivo de reducir el coste de estas operaciones, se han modificado los elementos que dificultaban el paso de los elevadores, de modo que los conservadores-restauradores del Museo puedan llevarlas a cabo. Otras propuestas en esta misma dirección, pero que comportan una mayor inversión, están en fase de estudio, como la instalación de pasarelas en algunas zonas.

Frente al incremento de nuevos ingresos, también consideramos imprescindible hacer una estimación del coste de conservación, y que este criterio se incluya en el proceso de valoración de las nuevas adquisiciones.



Figura 10. Reserva destinada a grandes formatos. Fotografía: Museu Nacional d'Art de Catalunya.

- **En cuanto a la dimensión social**, a primera vista nuestra contribución parece más difícil de encajar. Sin embargo, podemos afirmar que la adecuada conservación de los bienes y de sus valores repercute de forma positiva en la sociedad y facilita que el Museo cumpla con el resto de funciones y con su responsabilidad social. Es más, la conservación puede contribuir a un aumento de valor de los bienes culturales, lo que puede tener consecuencias directas en la sostenibilidad económica de la institución.

En resumen, los objetivos específicos que perseguimos para procurar una gestión sostenible de la conservación son los siguientes:

- Lograr unas condiciones ambientales adecuadas para la conservación de la colección con el mínimo consumo de energía necesario.
- Simplificar y hacer más eficientes los procesos relacionados con el seguimiento y la conservación de la colección.
- Optimizar el espacio destinado al almacenaje de la colección (Figura 10).
- Adecuar las prescripciones de conservación preventiva a las necesidades específicas de cada situación.

Construyendo las bases para una gestión sostenible de la conservación

Para la gestión de la conservación desde la óptica de la prevención y de la sostenibilidad, es necesario disponer de información, y ésta debe ser, preferiblemente, en forma de datos cuantitativos

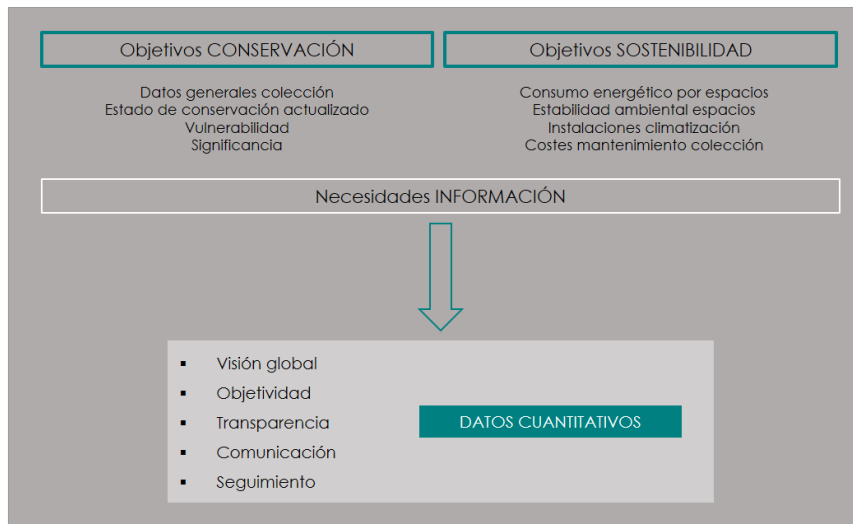


Figura 11. Objetivos y necesidades de información. Fuente: Ruth Bagán Pérez.

(Figura 11). Esto facilitará la comunicación de las necesidades a los gestores, y a su vez nos permitirá valorar, en un futuro, si las medidas adoptadas ayudan a cumplir los objetivos marcados.

La información esencial de la colección se concentra en la base de datos *MuseumPlus*, en funcionamiento en el Museo desde 2006. En ella hallamos información básica de los bienes. Sin embargo, es insuficiente para fundamentar la estrategia de conservación preventiva. Para poder obtener una visión general de la colección en poco tiempo, identificar dónde se concentra el valor, detectar la vulnerabilidad, evaluar los riesgos a los que está sometida, analizar los recursos invertidos en la conservación de los bienes y simplificar los procedimientos relacionados con su preservación, es necesario disponer de más datos. Algunos de ellos podrán ser incorporados en el sistema de gestión de colecciones actual; el resto no, debido a las limitaciones del programa.

Con la voluntad de construir una base sólida de información para desarrollar la estrategia de prevención y sostenibilidad, se ha diseñado un primer plan de actuación que consta de ocho bloques o líneas de trabajo. Cada bloque afronta un objetivo a corto plazo, y algunos de ellos se están llevando a cabo en paralelo:

1. Anatomía de la colección

El objetivo es presentar la información relativa a la colección de forma simple, mediante datos cuantitativos: número de objetos totales, por colecciones, por tipología, por ubicación, por estado de conservación, por ubicación, número de objetos pendientes de introducir en la base de datos o sin imagen identificativa, etc. A partir de ahí se agrupan los bienes en unidades de revisión o unidades de colección, para agilizar otros procesos como la evaluación de la significancia. Así como también para facilitar la asociación de riesgos con grupos específicos de objetos.

2. Evaluación de la significancia

La evaluación de la significancia nos permitirá saber dónde se concentra el valor de las colecciones, como apoyo a la evaluación de riesgos y priorización de acciones correctivas, a la optimización de los espacios de reserva, así como para el futuro plan de salvaguarda. En consecuencia, este bloque debe trabajarse en coordinación con los conservadores de colecciones.

La metodología de trabajo se ha diseñado a partir del modelo *Assessing Museum Collections. Collections valuation in six steps* (Cultural Heritage Agency, 2014). Al estar enmarcada en el desarrollo del plan de conservación preventiva, la evaluación de la significancia tiene como prioridad obtener una jerarquización, de manera que permita situar los objetos en el contexto de la colección.

3. Revisión del estado de conservación

Buscamos disponer de información sobre la integridad física de los objetos de la colección, que incluya conceptos clave como la estabilidad, la vulnerabilidad y la urgencia de intervención, para complementar la evaluación de la significancia y, a su vez, priorizar y planificar actuaciones.

Para ello se han revisado los criterios de evaluación del estado de conservación y se está llevando a cabo una evaluación individualizada de los objetos en exposición (Figura 12). Está previsto que la evaluación de los objetos en las reservas se lleve a cabo mediante una aproximación estadística.



Figura 12. Operaciones de revisión de los objetos expuestos. Fotografía: Ruth Bagán Pérez.

4. Optimización de la base de datos y creación de un histórico de incidencias

El objetivo es integrar toda la información necesaria para el desarrollo del plan de conservación preventiva posible en el sistema de gestión de colecciones *MuseumPlus*: estado de conservación, necesidad y urgencia de intervención, vulnerabilidad y significancia. Al mismo tiempo se trata de disponer de un histórico de incidencias para facilitar la evaluación de riesgos. Para ello se han reformulado algunos de los campos existentes del módulo de conservación-restauración del sistema y se ha creado un informe de incidencia que permite la introducción de incidencias para su explotación posterior (Bagan y Campuzano, 2021: 119-123).

5. Evaluación y gestión de riesgos

Tratándose de una colección cuantiosa, el método *Quickscan* nos permite obtener una primera visión general de dónde se concentra el valor y las vulnerabilidades de la colección, y conocer dónde se halla, por lo tanto, el mayor riesgo de pérdida. A partir de ahí se llevan a cabo las evaluaciones según los escenarios de riesgo (Brokerhof y Bülow, 2016: 25-26).

Una vez identificados los riesgos, en el momento de hacer las propuestas o acciones para eliminar o reducir el riesgo detectado, hay que buscar el equilibrio entre la intensidad de la amenaza y el coste de controlarla, y es en este momento también cuando entra en juego la sostenibilidad.

6. Cálculo de los costes de conservación

Traducir la conservación de las colecciones en datos cuantitativos que permitan una gestión más eficiente de los recursos, una comunicación más directa con los gestores y la puesta en marcha de acciones de sostenibilidad, especialmente para obtener una reducción del consumo energético y para lograr un ahorro en el mobiliario museográfico y de almacenaje a largo plazo. También para concienciar del coste de la conservación en el caso de nuevos ingresos.

La estimación se hace teniendo en cuenta los costes del mantenimiento periódico de los objetos, del control del clima y del control de plagas, pero también se intenta repercutir otros costes como la limpieza de los espacios, la seguridad o el mantenimiento de las instalaciones y del edificio.

Hay que incidir en la necesidad de conocer el consumo de energía por espacios. Para ello, y para el cálculo de la mayor parte de costes de mantenimiento, necesitamos la colaboración del Área de Infraestructuras y Servicios Generales. Este departamento es, por otra parte, el responsable del Sistema de Gestión Ambiental, que ya ha puesto en marcha acciones para optimizar el rendimiento de las instalaciones y reducir el consumo energético.

7. Redacción de protocolos y procedimientos

La complejidad de la estructura organizativa de la institución hace imprescindible priorizar la redacción de un conjunto de protocolos y procedimientos para todas aquellas actividades relacionadas con la colección. A su vez, disponer de estos documentos reduce los riesgos asociados a estas actividades, simplifica los procedimientos relacionados con la conservación y favorece la eficiencia.

El objetivo es estructurar y sistematizar, bajo pautas de conservación preventiva, todas aquellas acciones vinculadas de manera directa o indirecta con los bienes, acompañadas de formación. También facilitar la coordinación de las diferentes áreas organizativas del Museo en todo aquello que pueda afectar a la preservación de la colección.

Los documentos que se están redactando se organizan alrededor de la siguiente estructura:

- Seguimiento del estado de conservación.
- Incidencias.
- Tratamientos de desinsectación y desinfección.
- Exposición.
- Reservas.
- Obras en tránsito – Manipulación y movimientos.
- Cesión de espacios.
- Talleres de C-R y otros espacios del museo.
- Nuevos ingresos.
- Emergencias.

8. Identificación de indicadores

La conservación es una de las funciones principales de los museos, por lo que conceptualmente se identifican una serie de operaciones ligadas a esta función (Keene, 2002: 101-109). Desde la óptica de la prevención se pueden agrupar en las siguientes:

- Garantizar unas condiciones de exposición, almacenaje y tránsito adecuadas, reduciendo o eliminando los riesgos.
- Asegurar la preservación de los valores que se les han otorgado a los objetos.
- Facilitar el uso cultural de los bienes conservados.

El desarrollo de estas operaciones puede medirse y valorarse a partir de indicadores. Esta recogida sistemática de información puede realizarse a partir del sistema de gestión de colecciones, calculando los porcentajes sobre elementos como el número de objetos en buen estado de conservación; que pueden ser expuestos sin necesidad de intervención; introducidos en la base de datos con su imagen identificativa; objetos cuya significancia ha sido evaluada, entre otros.

También se deberán establecer indicadores para evaluar el cumplimiento de los objetivos marcados por la sostenibilidad, que tienen que ver con la reducción del consumo de energía destinada a la conservación y de los costes asociados con el mantenimiento, así como con la eficiencia de los procesos.

Conclusiones

En el contexto actual es indiscutible la necesidad de un cambio de rumbo en la gestión de las colecciones de los museos, por responsabilidad hacia la sociedad y el medioambiente. En algunas instituciones este cambio se está materializando mediante la adopción de políticas de responsabilidad social y la implementación de sistemas de gestión ambiental, como es el caso del Museu Nacional d'Art de Catalunya. Sin embargo, el verdadero reto es desarrollar todas las funciones desde la óptica de la sostenibilidad de manera eficaz.

En el ámbito concreto de la conservación de las colecciones, la estrategia de la conservación preventiva lleva implícitos elementos que favorecen este enfoque. En consecuencia, el Plan de Conservación Preventiva, por su naturaleza, es la herramienta de gestión de la conservación en la que

podemos integrar las propuestas de sostenibilidad relacionadas con esta función. De este modo, la toma de decisiones se fundamentará en un equilibrio entre las necesidades de los objetos, los riesgos a los que están sometidos, y la sostenibilidad, sin olvidar el papel fundamental de la significancia de los bienes en todo este proceso.

El plan –actualmente en desarrollo en el Museu Nacional– ha requerido la revisión de modelos metodológicos existentes basados en la gestión del riesgo, para adoptar los más adecuados para dar respuesta a las necesidades de la institución. Se ha priorizado obtener una instantánea general de la colección y de los recursos –humanos y económicos– invertidos actualmente en su conservación. Para ello, se ha trazado un primer plan de actuación, con la voluntad de configurar una base sólida para el análisis inicial y para el posterior seguimiento de las propuestas que surjan del Plan, a través de indicadores, esencialmente cuantitativos. Éstos, a su vez, facilitarán una comunicación efectiva de las propuestas a los gestores.

En una estructura organizativa compleja y con constante actividad como la del Museu Nacional, la coordinación de las acciones relacionadas con la colección mediante la redacción de protocolos y procedimientos, es imprescindible para minimizar los riesgos y para lograr la eficiencia en todos los procesos.

El éxito del Plan está condicionado a su integración en el marco de la institución y, especialmente, en el Sistema de Gestión Ambiental, para garantizar que las medidas sean realmente eficaces y no interfieran en las de otras actividades. Todo ello tiene que ir acompañado, a su vez, de un plan de comunicación dentro de la institución y de un plan de difusión para el público.

Bibliografía

- BAGAN, R. y CAMPUZANO, M. (2021): «Improving collections care documentation to support a new approach in conservation management at the Museu Nacional d'Art de Catalunya». En: *Nordiska Konservatorförbundets XXII Kongress*. Estocolmo: pp. 107-126.
- BIZOT GROUP (2015): «Bizot Green Protocol». En: *Environmental Sustainability: Reducing Museums' Carbon Footprint*. Londres: National Museum Directors' Council.
- BRITISH COUNCIL (2020): *The Missing Pillar. Culture's Contribution to the UN Sustainable Development Goals*. Londres: British Council.
- BROKERHOF, A. W. y BÜLOW, A. (2016): «The *QuiskScan*—a quick risk scan to identify value and hazards in a collection». *Journal of the Institute of Conservation*, 39 (1), pp. 18-28.
- Comisión Mundial Sobre El Medio Ambiente Y El Desarrollo (1987): *Nuestro futuro común*. Comisión de la Asamblea de las Naciones Unidas.
- GARTHE, C. (2020): «Sustainability Management in Museums: A new Approach to Implementing the Sustainable Development Goals». En: *ICOM Voices*. Disponible en: <<https://icom.museum/en/news/icom-voices-sustainability-management-museums/>> [Consulta: 28/01/2021].
- HERRÁEZ, J. A., PASTOR, M. J. y DURÁN, D. (eds.) (2019): *Guía para la elaboración e implantación de planes de conservación preventiva*. Madrid: Ministerio de Cultura y Deporte. Disponible en: <https://www.libreria.culturaydeporte.gob.es/libro/guia-para-la-elaboracion-e-implantacion-de-planes-de-conservacion-preventiva_4127/> [Consulta: 15/07/2020].
- HERRÁEZ, J. A. (2012): «La sostenibilidad en los museos». *Museos.es, Revista de la Subdirección de Museos estatales*, 7-8, pp. 106-109. Disponible en: <<https://www.culturaydeporte.gob.es/dam/jcr:18171641-8d12-4920-ba27-02a3f6fd9a44/sostenibilidad-museos.pdf>> [Consulta: 31/01/2021].
- KEENE, S. (2002): *Managing conservation in museums*, 2ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.

- LUIZA, I. y BORZA, A. (2016): «Factors Influencing Museum Sustainability and Indicators for Museum Sustainability Measurement». *Sustainability*, 8, p. 101. Disponible en: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/8/1/101>> [Consulta: 21/05/2020].
- MCGHIE, H. A. (2019): *Museums and the Sustainable Development Goals. A how-to guide for museums, galleries, the cultural sector and their partners*. Disponible en: <<https://curatingtomorrow236646048.wordpress.com/2019/08/21/how-can-museums-support-the-sustainable-development-goals/>> [Consulta: 03/02/2021].
- MICHALSKI, S. (1990): «An Overall Framework for Preventive Conservation and Remedial Conservation». En: *ICOM Committee for Conservation 9th Triennial Meeting*. Dresde: pp. 589-591.
- Ministry Of Education, Culture And Science (2014): *Assessing Museum Collections. Collection Valuation in six steps*. Amersfoort: Cultural Heritage Agency.
- Museu Nacional d'Art de Catalunya (2019): *Estratègia i Pla d'acció 2019-2022/2029*. Disponible en: <https://www.museunacional.cat/sites/default/files/pla_estrategic_2019-22_cat_b.pdf> [Consulta: 15/06/2019].
- Naciones Unidas (2015): *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015 (A/RES/70/1). Disponible en: <https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf> [Consulta: 01/02/2021].
- WALLER, R. (1994): «Conservation risk assessment: a strategy for managing resources for preventive conservation». *Studies in Conservation*, 39 (2), pp. 12-16.

Gestión de riesgos y emergencias de colecciones de arte contemporáneo desde el paradigma de la complejidad

Risk Management and Emergencies of Contemporary Art Collections from Complexity Paradigm

Pilar Montero Vilar

Universidad Complutense de Madrid
pilarmontero@ucm.es

Resumen: En este artículo se parte del entendimiento de las instituciones culturales como organismos complejos en los que podemos desarrollar sistemas adaptables que puedan dar respuesta a esta característica. Desde esta perspectiva, para la realización de un plan de protección de colecciones ante emergencias, se propone un doble acercamiento: el metodológico y el tecnológico. En relación con el primero, el paradigma de la complejidad nos permite desarrollar un planteamiento holístico e integrador al entender la organización como un organismo adaptable y cambiante, capaz de evolucionar. Estas características se relacionan directamente con el acercamiento tecnológico que se propone: la necesidad de adaptar tecnologías adecuadas, como pueden ser los sistemas de información geográfico SIG o la tecnología BIM, para dar respuesta a la complejidad de la gestión de riesgos y emergencias de colecciones.

Palabras clave: Gestión de riesgos y emergencias, instituciones culturales, complejidad, arte contemporáneo, H-BIM, SIG.

Abstract: This article is based on the understanding of cultural institutions as complex organisms in which we can develop adaptable systems that can respond to this characteristic. From this perspective, a two-fold approach is proposed for the implementation of a plan to protect collections from emergencies: the methodological and the technological. In relation to the former, the complexity paradigm allows us to develop a holistic and integrating approach by understanding the organisation as an adaptable and changing organism, capable of evolving. These characteristics are directly related to the technological approach proposed: the need to adapt appropriate technologies, such as GIS geographic information systems or BIM technology, to respond to the complexity of risk management and collection emergencies.

Keywords: Risk and emergency management, cultural institutions, complexity, contemporary art, H-BIM, GIS.

«Es cierto que con mucha frecuencia los museos o los yacimientos arqueológicos pueden ser también fuentes de extraordinarios ingresos. Pero su existencia, contrariamente a lo que algunos querrían hacernos creer, no puede subordinarse al éxito económico: la vida de un museo o una excavación arqueológica, como la de un archivo o una biblioteca, es un tesoro que la colectividad debe preservar con celo a toda costa».

Nuccio Ordine, *La utilidad de lo inútil*.

La segunda década del siglo XXI comenzó poniendo en evidencia la fragilidad del sistema en el que se desenvuelve la vida tal y como la conocemos hasta ahora. A pesar de la declaración del Director General de la OMS, el 30 de enero de 2020, sobre la emergencia de salud pública de importancia internacional (ESPII) que constituía el brote por el nuevo coronavirus (2019-nCov) y la evaluación, en ese momento, del riesgo en China como muy alto y el riesgo mundial como alto¹, pocos pudieron prever que dicho brote iba a poner en jaque los sistemas de salud y económicos de todo el mundo, provocando una crisis global. Si pensamos que el *Informe Global de Riesgo* de Davos publicado en enero de 2020 no pronosticaba entre los 10 riesgos más probables para el citado año que el mundo sufriese una pandemia, aunque eso sí, en caso de que ocurriese su impacto sería alto², entenderemos la situación de *shock* a la que nos hemos enfrentado a lo largo de estos meses y por qué el propio António Guterres, Secretario General de la ONU, calificó a la pandemia, apenas tres meses después, en abril de 2020, como «la peor crisis desde la Segunda Guerra Mundial» (Efe Redacción, 2020).

Está claro que después de lo que hemos visto estos dos últimos años con una pandemia a nuestras espaldas, episodios de iconoclasia a un lado y a otro del Atlántico³, un asalto al Capitolio, una tormenta de nieve como Filomena o la erupción del volcán de La Palma, palabras como desastre, riesgo, gestión de emergencias, pandemia, vulnerabilidad o resiliencia han pasado a formar parte de nuestro vocabulario común. Hasta el punto de que, seguramente, todos y cada uno de nosotros hemos profundizado sin quererlo en el conocimiento de los desastres y la gestión de emergencias, y todos podemos haber concluido que, si desde luego hay algo que caracteriza a las emergencias y a los desastres, que no son lo mismo, es su complejidad, fuertemente relacionada con la incertidumbre. Complejidad e incertidumbre que acompañan al calentamiento global convertido ya en emergencia climática⁴ a pesar de la persistente y generalizada denominación de cambio climático⁵.

¹ Organización Mundial de la Salud (OMS) (Última actualización 29 de enero de 2021) *Cronología de la respuesta de la OMS a la COVID-19*. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/29-06-2020-covidtimeline> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].

² El Informe de 2020 publicado en enero de ese año no contemplaba a las enfermedades infecciosas entre los 10 riesgos más probables si bien contemplaba, en caso de que ocurriese, su impacto en el décimo lugar, por detrás de los desastres naturales, las armas de destrucción masiva, la pérdida de diversidad, los fenómenos atmosféricos extremos o la interrupción de las infraestructuras de la información. En el informe de 2021, el panorama ha cambiado radicalmente y las enfermedades infecciosas ya son clasificadas como de gran probabilidad a la vez que de gran impacto. Disponible en: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf> [Consulta: 15 de diciembre de 2021]. <https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2021.pdf> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].

³ La iconoclasia no es un fenómeno ajeno a nuestra cultura, sin embargo, en los últimos años se ha visto exacerbado debido a movimientos como el *Black Lives Matter* o los movimientos descolonizadores que están realizando una nueva lectura de la Historia.

⁴ El Parlamento Europeo declaró la emergencia climática el 25 de noviembre de 2019. Resolución del Parlamento Europeo sobre la situación de emergencia climática y medioambiental B9-0209/2019 Disponible en: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/B-9-2019-0209_ES.pdf [Consulta: 15 de diciembre de 2021].

⁵ Fórmula que adquirió fortuna frente a calentamiento global gracias a la intervención de Frank Luntz, un siniestro asesor de la causa republicana en el gobierno de George W. Bush.

Pero también nos encontramos en el contexto del Acuerdo de París⁶, los Objetivos de Desarrollo Sostenible⁷ y el Marco de Sendai⁸, todos ellos firmados en 2015 y suscritos por España. Tanto el Acuerdo de París como los Objetivos de Desarrollo Sostenible, han introducido de una manera clara y meridiana el concepto de sostenibilidad. Sin embargo, también se están alzando voces discrepantes entre los científicos sobre las evidencias de la sostenibilidad que se proponen a nivel global⁹. En relación con el patrimonio cultural, el Marco de Sendai es muy relevante porque es la primera vez que se incluye el patrimonio cultural, en el Marco de Hyogo no sucedía, como uno de los elementos a proteger del riesgo de desastres y se destaca la necesidad de evaluar las pérdidas y el impacto de los desastres en el patrimonio cultural. Además, cuando se propone la inversión en la reducción de riesgo de desastres para la resiliencia, se habla específicamente de proteger y apoyar la protección de instituciones culturales y otros lugares de interés desde el punto de vista del patrimonio cultural.

Del castigo divino a los modelos complejos

Hoy en día, somos conscientes del equilibrio tan vulnerable en el que nos encontramos y en el que suceden todos los días desastres que afectan al patrimonio cultural¹⁰, de forma que está sometido a una serie de riesgos que debemos de aprender a gestionar para que, cuando ocurra un desastre, este, se vea afectado lo menos posible.

El patrimonio cultural, al igual que el natural, es no renovable y este carácter, que nos indica claramente que su pérdida es irremplazable, nos debe de señalar, de una forma inequívoca, la dirección de las acciones que debemos emprender.

Pero, ¿cuándo comenzó todo?, ¿cuándo fue la primera vez que pensamos que las catástrofes podían y tenían que ser gestionadas y por lo tanto podíamos pensar en disminuir los riesgos al trabajar sobre los peligros o las vulnerabilidades?

Tendríamos que retrotraernos más de doscientos años atrás, concretamente a las 9:30 del 1 de noviembre de 1755, a una gran catástrofe conocida como el Terremoto de Lisboa, para sumergirnos en una de esos momentos, podríamos decir casi instantes, que marcaron un hito en la Historia de Europa y desde luego en la historia de las catástrofes. De hecho, el Terremoto de Lisboa, con una Mw estimada entre 8,5 y 9,5 y con un número de víctimas, también estimado, por encima de las 60.000, supuso un momento trascendental, un cambio de paradigma en la percepción de las catástrofes. Hasta la fecha, los terremotos, erupciones volcánicas, maremotos y otras catástrofes eran vistos como designios del Dios creador. Pero en 1755 estábamos ya inmersos en el Siglo de las Luces. Cuatro años antes, en 1751, había empezado a publicarse la *Enciclopedia* francesa, texto en el que se pretendía reunir los saberes de la época a la luz de la razón y que contó con notables colaboradores, entre ellos, Diderot, d'Alembert, Rousseau y Voltaire.

⁶ Naciones Unidas (2015): *Acuerdo de París*. Disponible en: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].

⁷ Naciones Unidas (2015): *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].

⁸ Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) (2015): *Marco de Sendai*. Disponible en: https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf [Consulta: 15 de diciembre de 2021].

⁹ De hecho, empieza a ser cuestionado el malabarismo socioeconómico para conciliar desarrollo y sostenibilidad y se piensa en la asociación de estas ideas como en la cuadratura del círculo. Reducir las emisiones de CO2 supone aceptar el decrecimiento y programar una desescalada económica difícil de aceptar por nuestro pánico, ancestral y justificado a las recesiones económicas. Si bien esta es una asociación desafortunada porque, como Jason Hickel nos demuestra, decrecimiento y recesión no son lo mismo (Hickel, 2021).

¹⁰ Véase la base de datos DALIH *Damage and Loss Inventory for Heritage*. Disponible en: <https://www.dalih.org/app/#/> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].

Para que entendamos el impacto que tuvo la destrucción de una de las ciudades más prósperas de la Europa del XVIII y con uno de los puertos más activos por el que entraba en el viejo continente la mercancía procedente de las colonias, basta con tener en cuenta la aparición, pocos meses después, en 1756, de un texto con el título *Poema sobre el desastre de Lisboa*, y cuyo autor, M. de V***, enmascara al influyente filósofo ilustrado Voltaire. Voltaire se hace eco en su poema de las teorías que intentan explicar desde un punto de vista racional y científico fenómenos naturales como los terremotos y, como consecuencia, desvincularlos de la actuación de un Dios justo (Peña, 2009). Tres años después de la catástrofe, en 1758, publica su *Cándido o el optimismo* en el que cuestiona de una manera directa a los portavoces del «todo está bien» y de aquellos que como Leibniz preconizaban un «optimismo filosófico» que postulaba que nos encontrábamos en el mejor de los mundos posibles. Mientras el estamento religioso interpretó el terremoto de Lisboa como un castigo divino, cuya representación fue comparada con el Juicio Final, el pensamiento ilustrado de Voltaire, caracterizado por la búsqueda de explicaciones racionales a los fenómenos naturales y sociales, expone, frente a los defensores de la teoría del todo está bien, los azares a los que se encuentra sujeta la vida humana, la presencia del mal en la tierra y la crueldad de la naturaleza.

Tenemos pues el primer momento de cambio de mentalidad en el que se empieza a cuestionar la hipótesis que relaciona las catástrofes con los castigos divinos y a establecer relaciones de causa-efecto entre el territorio, los fenómenos generadores de riesgo y las catástrofes acaecidas.

Pero, ¿cómo estos episodios desastrosos acabaron convirtiéndose en emergencias en patrimonio cultural?

La historia de las emergencias en patrimonio cultural es una historia construida paralelamente a dos conceptos, por un lado la valoración del patrimonio por parte de la sociedad (González Varas, 2018: 25-31) y, a su vez, por su antítesis: la capacidad destructiva del hombre. De hecho, a pesar de que incipientes medidas protectoras ya se habían desarrollado, la idea de la protección del patrimonio va creciendo según el poder devastador del hombre se amplía desmesuradamente. Las guerras de finales del s. XIX y las del XX provocaron, paralelamente a su poder destructor, el desarrollo de un ordenamiento jurídico en relación con la protección de bienes culturales en tiempo de guerra (San Martín, 2014).

Actualmente, la gestión de emergencias en patrimonio cultural no es un terreno estanco y, afortunadamente, es capaz de acoger muchos de los saberes procedentes de otras disciplinas¹¹. Hoy en día, por ejemplo, en las instituciones culturales de tamaño medio-grande se produce una cantidad enorme de interacciones e interferencias entre un número muy elevado de unidades, departamentos y equipos y esta característica hace que podamos entender estas instituciones desde la perspectiva de la complejidad.

La gestión de riesgos en patrimonio cultural desde la perspectiva de la complejidad

La teoría de la complejidad parte, entre otras, de la teoría de sistemas que ha tenido entre sus virtudes haber concebido a los sistemas, aquellas unidades complejas a nivel transdisciplinario, como ecosistemas abiertos que, paradójicamente, están en permanente cambio para mantenerse dentro de una estructura estable. Pensemos en nuestro cuerpo: a pesar de que nuestras células están cambiando constantemente, nosotros siempre somos los mismos.

Una institución cultural, con la diversidad de profesionales y departamentos implicados en la gestión de sus espacios y colecciones, así como en las distintas responsabilidades de cada uno de

¹¹ De hecho, la forma en la que tradicionalmente ha estado dividido el conocimiento, supone muchas veces un problema a la hora de enfrentarse a la gestión del riesgo, al ser los desastres unas situaciones extremadamente complejas en las que convergen múltiples circunstancias.

ellos, se configura como un sistema en el que se produce una cantidad inmensa de relaciones multidimensionales. Si entendemos una institución cultural como un sistema en el que los cambios y la relación de cada una de las partes con el todo son incuestionables, estamos planteando este sistema desde el paradigma de la complejidad¹².

Al enfrentarnos a la gestión de riesgos y emergencias en patrimonio cultural, desde esta perspectiva, tenemos dos elementos ineludibles con los que debemos de contar a la hora de plantear la creación de un modelo de gestión que nos sirva para aplicar en un centro con una colección de tamaño medio-grande y que suponen un claro cambio de paradigma en la gestión de riesgos: la multiplicidad de interacciones y la incertidumbre.

De hecho, el paradigma de la complejidad implica que uno de los primeros desafíos que debemos aceptar es el presupuesto de que en los desastres se producen incertidumbres, indeterminaciones, fenómenos aleatorios, relacionados con el azar, de hecho la incertidumbre y el azar son dos características que definen un sistema complejo.

Como plantea Edgar Morin «la complejidad no se reduce a la incertidumbre, es la incertidumbre en el seno de los sistemas ricamente organizados» (Morin, 1998: 60) y, precisamente por ello, no la debemos de confundir con la completitud ya que a la vez no elimina la simplicidad sino que integra lo más posible los modos simplificadores de pensar (Morin, 1998: 22).

Pero, ¿cómo integrar la incertidumbre y lo impredecible en la gestión para construir instituciones culturales más resilientes?, ¿cómo trabajar para que el impacto, cuando ocurra, sea el menor posible y la gestión de la catástrofe sea la más diligente?

Jorge Wagensberg en su libro *Ideas sobre la complejidad del mundo* (Wagensberg, 2014: 68) planteaba que «la ignorancia de un sistema con respecto a su entorno es un reto para el sistema, de modo que este se ve obligado a aumentar su complejidad para hacer frente a tal ignorancia». La complejidad del sistema va a venir dada por la complejidad de la realidad, cuanto más compleja es una institución, mayor va a ser el grado de complejidad que tendrá que desplegar en su plan para poder soportar un mayor grado de incertidumbre en la gestión del riesgo debido a la multiplicación de elementos que pueden concurrir en un mismo escenario, así como el crecimiento exponencial de escenarios y del impacto de los riesgos que pueden darse.

Establecer el contexto

La gestión de riesgos es un estándar internacional (AENOR: 2010) procedente en su origen del ámbito financiero que, desde el mundo de la gestión del patrimonio, debemos de incorporar a nuestra propia idiosincrasia. La deontología de las profesiones relacionadas con la conservación y gestión del patrimonio tiene desarrollados unos modos de hacer con unos estándares de actuación muy elevados en los que las obras patrimonializadas, los objetos culturales, suponen el centro de toda la actuación, no perdiendo de vista que realmente, aunque el centro de nuestras actuaciones sea el objeto, en realidad, como bien ha señalado Muñoz Viñas, se conserva para las personas¹³.

Un sistema de gestión del riesgo se sitúa en un contexto concreto que debe ser entendido de una forma holística, global, tanto material, física y legalmente, como en términos más abstractos, como puede ser la cultura tomada en el sentido de la «cultura de una comunidad». Hoy en día se está estudiando cómo la respuesta de muchas comunidades a las emergencias tiene que ver con

¹² «Es complejo aquello que no puede resumirse en una palabra maestra, aquello que no puede retrotraerse a una ley, aquello que no puede reducirse a una idea simple» (Morin, 1998: 21).

¹³ Muñoz Viñas, S. (2003: 39) recoge el pensamiento de Giorgio Bonsati.

cómo es percibido el riesgo por una comunidad concreta (Casajús *et al.*, 2021). El contexto, además, debe recoger toda la complejidad de la institución y el conocimiento de toda la comunidad. De hecho, la permanencia del patrimonio cultural se vería comprometida si este no está fuertemente unido a la misma¹⁴.

La gestión de riesgos, aunque no necesariamente catastróficos, está íntimamente ligada a la labor diaria de cualquier institución que custodie patrimonio cultural y debería de ocupar un espacio conceptual que acogiese a toda la organización. Es necesario incluir los planes de mantenimiento del edificio y de la conservación preventiva, así como la prevención de riesgos laborales, para asimilar los planteamientos de la gestión de riesgo y los planes de continuidad en el negocio que no son exclusivos del campo patrimonial. De hecho en una situación ideal, el sistema de gestión del riesgo, con un planteamiento holístico debería comenzarse desde la propia génesis del edificio¹⁵ (Figura 1).

Si nos situamos en España, estamos vinculados por los acuerdos internacionales ya citados, directivas europeas, normas y cartas. Además, tenemos normativas procedentes de los tres niveles de la administración: ámbito estatal como la Constitución, el Código Penal, la Ley de Patrimonio Histórico Español (1985), la Ley de Protección Civil (2015) y sus distintos planes ante diferentes riesgos, la Norma Básica de Autoprotección Real Decreto 393/2007 o el Plan Estatal General de Emergencias, aprobado en diciembre de 2020, y que incluye entre las medidas de protección un punto específico para la protección de los bienes de interés cultural, histórico y artístico, especialmente a los BIC. Si hablamos del ámbito autonómico, tenemos que tener en cuenta las distintas leyes de patrimonio histórico y leyes de protección civil de cada comunidad y sus planes territoriales. Por último hay que tener en cuenta en cada ayuntamiento la normativa de ámbito local. Por consiguiente, la normativa abarca los tres niveles de la administración y es necesario cumplir todas las regulaciones y, sobre todo, ser conscientes del impacto que puede causar la pérdida de alguno de estos bienes. Este entramado normativo nos puede dar ya una idea de la complejidad a la que nos enfrentamos.



Figura 1. Visión holística de la gestión de riesgos en instituciones culturales. Fuente: Pilar Montero Vilar.

Las fases de la gestión de riesgos: metodología

Desde el punto de vista metodológico, para dar respuesta a este planteamiento holístico de la gestión de riesgos y emergencias en patrimonio cultural se propone un sistema de gestión integral, dinámico, complejo y abierto que integra no solo el modelo de gestión de riesgos orientado a la

¹⁴ *Supra* nota 3.

¹⁵ Entre los ejemplos de instituciones culturales que han gestionado el riesgo desde la propia génesis y construcción de sus edificios de nueva planta, podemos citar el Getty Center (Los Ángeles) y el Pérez Art Museum (Miami).

gestión de emergencias, aceptado internacionalmente con sus cuatro fases de análisis, preparación, respuesta y recuperación sino que, además, a este modelo se le superpone el ciclo de mejora continua del sistema de gestión de calidad (Montero Vilar *et al.*, 2019) propuesto desde la norma 9001 (AENOR: 2015). De hecho, la versión de 2015 de la norma de Sistemas de Gestión de Calidad incorpora, frente a la versión de 2009, una orientación a riesgos que toda organización debe de contemplar. Las características básicas de este modelo de mejora continua son Planificar, Hacer, Verificar y Actuar (Figura 2).

Ahora mismo, existen voces críticas a este modelo cíclico de gestión de riesgos porque vuelve de nuevo al punto de partida, la propuesta que aquí se realiza al superponer el modelo de mejora continua propio de los sistemas de gestión de calidad, rompe totalmente con la idea de volver al mismo lugar de partida, porque de hecho es un sistema que tiene como horizonte incorporar las mejoras y buenas prácticas en cada una de las fases que lo conforman. Tenemos, por tanto, que la gestión de riesgos implicaría el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y la gestión del desastre.

Es importante subrayar que, desde la perspectiva sistémica, es necesario entender el proceso en toda su extensión, de hecho, internacionalmente, se entiende cada vez más el concepto de riesgo como prevención y mitigación, es decir, como posibilidad, ya que esta conceptualización es mucho más conveniente para el objetivo de la reducción del riesgo (Cardona, 2019: 134).

Este planteamiento para la gestión de emergencias en patrimonio cultural supone todo un reto, sobre todo en instituciones como los museos de arte contemporáneo en nuestro entorno, en los que sabemos la baja probabilidad de que suceda una catástrofe, pero el altísimo impacto que esta tendría.

Cada vez que visitamos una institución que custodia arte contemporáneo apreciamos la variabilidad de la propia experiencia estética, debida no solo a las diferentes obras en exposición sino también a la creación y a la renovación de los diferentes espacios. Esta característica es consecuen-



Figura 2. Ciclo Gestión Riesgos + Ciclo de Mejora Continua.
Fuente: Pilar Montero Vilar.

cia del dinamismo intrínseco al sistema y la gestión de riesgos debe contemplarla para adaptarse a un entorno siempre cambiante, en definitiva a un sistema dinámico, complejo y abierto que casi podríamos calificar de «viviente», como si se tratase de un organismo vivo capaz de evolucionar. Morin, precisamente, plantea dos consecuencias importantísimas de los sistemas abiertos, una de ellas es que no son sistemas de equilibrio sino de desequilibrio o, mejor dicho, de «dinamismo estabilizado», como él precisa. La segunda es que el sistema no puede ser inteligible sino en su relación con el ambiente, y esta característica es crucial desde el punto de vista epistemológico, metodológico, teórico y empírico (Morin, 1998: 45).

Para ello es necesario no perder de vista otro de los conceptos claves: la vulnerabilidad, es decir, en nuestro caso, la fragilidad o debilidad de la institución para enfrentarse a la amenaza y su capacidad para reconstruirse en caso de que se produzca el evento catastrófico, es decir, su resiliencia.

Como todos conocemos, un museo de arte contemporáneo de ámbito nacional y de alcance internacional se caracteriza por la diversidad de profesionales y departamentos implicados en la protección y gestión de las colecciones, así como la confluencia de distintas responsabilidades en el espacio del museo. Esto nos puede dar una idea de la complejidad de la gestión de riesgos y emergencias en este tipo de instituciones. La experiencia de cualquier profesional que haya desarrollado su labor en una institución cultural de tamaño medio-grande se verá reflejada en la aspiración a un saber no parcelado, a la vez que inevitablemente deberá reconocer lo inacabado e incompleto de todo conocimiento (Morin, 1998: 23). La gestión del riesgo en las colecciones de un museo de arte contemporáneo es, por consiguiente, un sistema altamente dinámico, variable, abierto, interactivo y sujeto a múltiples parámetros y cambios en el que se plantea una relación característica de los sistemas complejos, «una relación indisoluble entre el mantenimiento de la estructura del sistema y el cambio de sus constituyentes» (Morin, 1998: 44).

La primera cuestión a que se enfrenta cualquier institución es establecer las tareas que deben de realizarse, pero seguramente el desafío mayor consiste en el cómo: cómo realizar esas tareas de una manera razonable, sostenible, adaptada y adecuada para la institución. Por tanto ante una situación de estas características tendremos que desplegar una estructura metodológica acorde a esta complejidad y que esté apoyada por una infraestructura tecnológica coherente también con el desafío al que se pretende dar respuesta.

Nos situamos, por tanto, ante un doble acercamiento, el metodológico y el tecnológico.

En relación con el primero de ellos, la evaluación y el análisis de riesgos de las colecciones de los museos exige una metodología muy precisa y rigurosa acorde con los bienes que se custodian, teniendo en cuenta que nos referimos a bienes cuya significancia, no solo desde la propia colección sino desde un contexto mayor, puede ser muy valiosa y, por consiguiente, las pérdidas pueden ser irreparables e irremplazables.

En un museo de alcance internacional con una colección relevante de arte contemporáneo como es la del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, en la que la probabilidad de que ocurra una emergencia es baja pero en cambio su impacto sería altísimo, se desarrolló una fórmula de apreciación del riesgo con un grado de acercamiento muy preciso y teniendo en cuenta las características propias de la colección y el contexto (Montero Vilar *et al.*, 2017).

Una vez que, desde la propia institución, se adquiere el conocimiento del riesgo, la siguiente fase se centraría en reducirlo, tarea fundamental, en la medida en que trabajar en la gestión del riesgo supone trabajar en su minimización que a su vez significa trabajar sobre la reducción de las amenazas o de las vulnerabilidades, por lo tanto reducir las amenazas o las vulnerabilidades signi-

fica reducir el riesgo y por lo tanto la posibilidad de futuros desastres. Al ser el riesgo un fenómeno compuesto podemos actuar desde diferentes planteamientos: sobre las amenazas (con medidas de prevención), sobre la mitigación de los impactos, o sobre la reducción de las vulnerabilidades del patrimonio cultural. No podemos olvidar que las tres posibilidades pueden darse a la vez porque son compatibles entre sí.

Herramientas tecnológicas para la gestión de riesgos de colecciones: SIG y BIM

La creación de esta metodología de análisis del riesgo que entiende la institución como un sistema abierto, dinámico y complejo en el que el nivel de interacciones es muy elevado, necesita indistintamente llevar aparejada una tecnología que sea capaz de responder a este desafío.

El empleo de recursos tecnológicos susceptibles de ser aplicados a la protección de colecciones en caso de emergencia, como los SIG o la tecnología BIM, debe considerarse fundamental para la gestión de esta complejidad, de este «dinamismo estabilizado».

Estos sistemas de información geográfica, SIG, y de modelado de información de construcción, BIM (*Building Information Modeling*), son sistemas dinámicos capaces de almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, analizar, mostrar y transferir datos espaciales y de componentes de los edificios, así como la caracterización de las colecciones. Se emplearán con el fin de prevenir y mitigar el alcance de las vulnerabilidades y obtener la máxima protección, además de facilitar la gestión de todo el proceso operativo en caso de que una emergencia ocurra y haya que desplegar el plan de contingencia según distintos escenarios.

Es importante señalar la conveniencia de partir siempre de la propia experiencia de la institución cultural, del conocimiento válido de la comunidad de partida, del estudio integral de sus procesos cotidianos, para adaptar la tecnología a los modos de hacer de la institución. De esta manera, el sistema de gestión de los riesgos y emergencias de colecciones podrá constituirse como un instrumento flexible y adaptable a los requerimientos y necesidades de la institución, con potencialidad para evolucionar con las nuevas demandas de la misma (Figura 3).

Un SIG es un instrumento de referencia para la gestión digital del espacio que empleamos para tener una caracterización exhaustiva y actualizada de todos los espacios con sus atributos y que nos permite obtener una información muy precisa de todos los elementos que componen la información espacial de nuestro sistema de gestión de protección de colecciones de forma actualizada. En el ejemplo del SIG desarrollado para el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, las diferentes capas nos informan de la caracterización espacial y arquitectónica, los diferentes usos de los espacios, la geolocalización de los diferentes medios de vigilancia y protección (cámaras, detectores de humos, extintores, pulsadores de alarma), la sectorización de incendios, las instalaciones (puntos de agua, lumina-

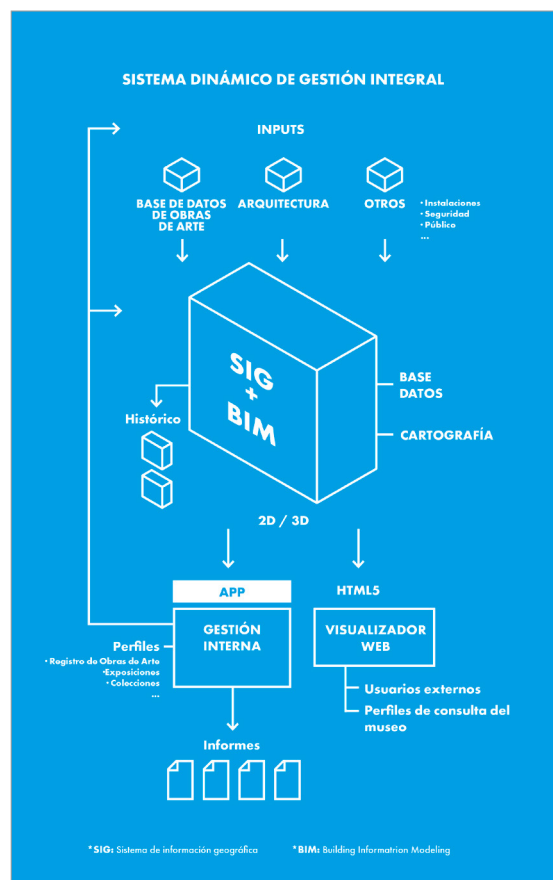


Figura 3. Sistema de gestión integral de riesgos y emergencias de colecciones de arte contemporáneo y su implementación tecnológica. Fuente: Pilar Montero Vilar.

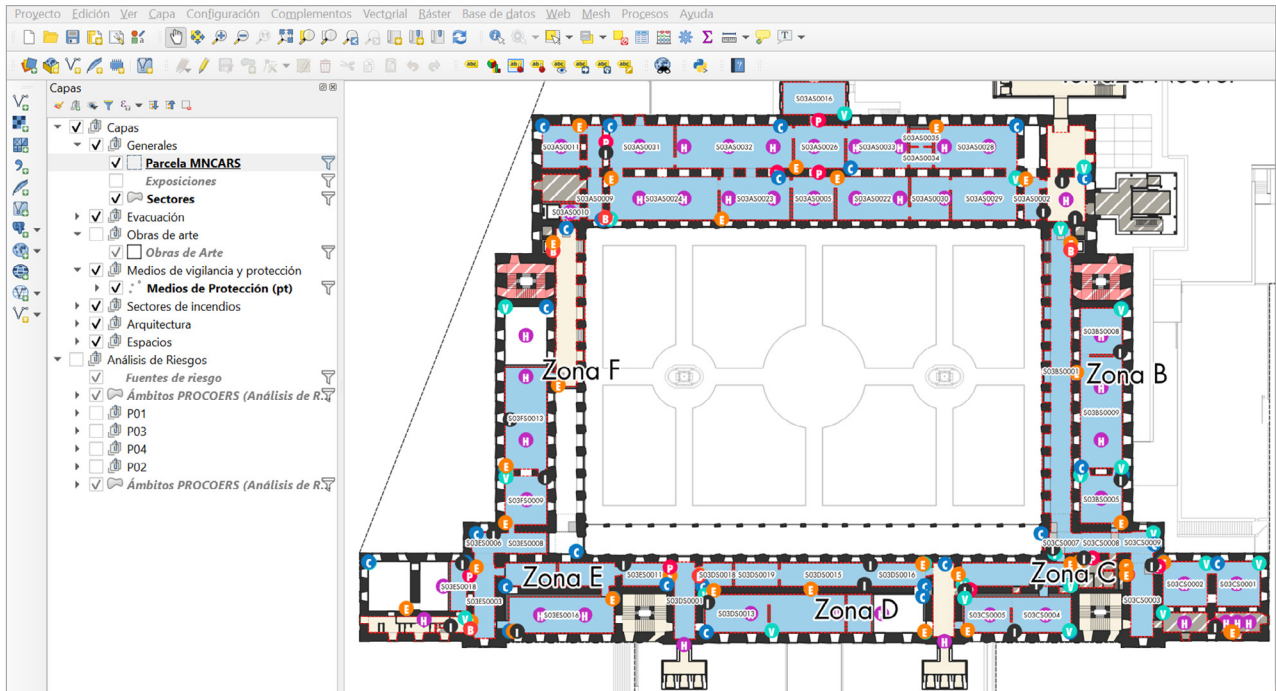


Figura 4. Sistema de información geográfico del Plan PROCOERS. Fuente: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía.

rias, cuadros eléctricos...) o la visualización del cálculo de riesgos cuyo origen está en el edificio. Además, puede, entre otras cosas, calcular rutas de evacuación dependiendo de diferentes escenarios. Es muy relevante señalar que este sistema permite no solo la geolocalización de los registros actuales sino también su consulta histórica, característica muy interesante de cara a la profundización en el conocimiento de los riesgos y las vulnerabilidades de la institución (Figura 4).

Este sistema versátil posibilita la emisión de diferentes documentos como el Informe de Planificación ante Emergencias (IPAE), documento que a modo de *facility report* orientado a emergencias puede servir de modelo para otras instituciones que deban presentar estudios de planificación de riesgos de colecciones (Montero Vilar *et al.*, 2018). En cada IPAE se incluye un estudio pormenorizado de diferentes parámetros que pueden ser críticos en la gestión de una emergencia y que pueden obtenerse del SIG, que debe estar en constante actualización como sistema dinámico y abierto que es (Figura 5).

Por su parte, BIM (*Building Information Modelling*) es la tecnología de referencia en la gestión digital de edificios. El BIM fue proyectado, en un principio, para el diseño y modelado de edificios de nueva construcción. Hoy en día estamos viendo además el empleo en muchos proyectos de protección, conservación, restauración y diseminación del patrimonio cultural construido de la metodología BIM, hasta el punto de que ha sido acuñado el concepto de H-BIM (*Heritage BIM*) (Murphy, McGovern y Pavia, 2009) para referirse al modelado en 3D de edificios patrimoniales ya construidos, atendiendo a sus tipologías constructivas, artísticas e históricas. Estas tecnologías se encuentran en plena expansión y se consideran especialmente aptas para diseñar, preservar y gestionar el patrimonio cultural dentro de lo que es conocido como *smart heritage*, y nos ofrecen múltiples posibilidades para la documentación, estudio y reconstrucción virtual del patrimonio construido¹⁶.

¹⁶ En Italia, por ejemplo, el empleo de modelos BIM en los contratos con el sector público está siendo introducido paulatinamente, comenzando en 2019 para las obras superiores a 100 millones de euros hasta enero de 2025 en que será obligatorio en todos los contratos, independientemente del presupuesto de la obra. <https://www.mit.gov.it/normativa/decreto-ministeriale-nu-mero-560-del-01122017>

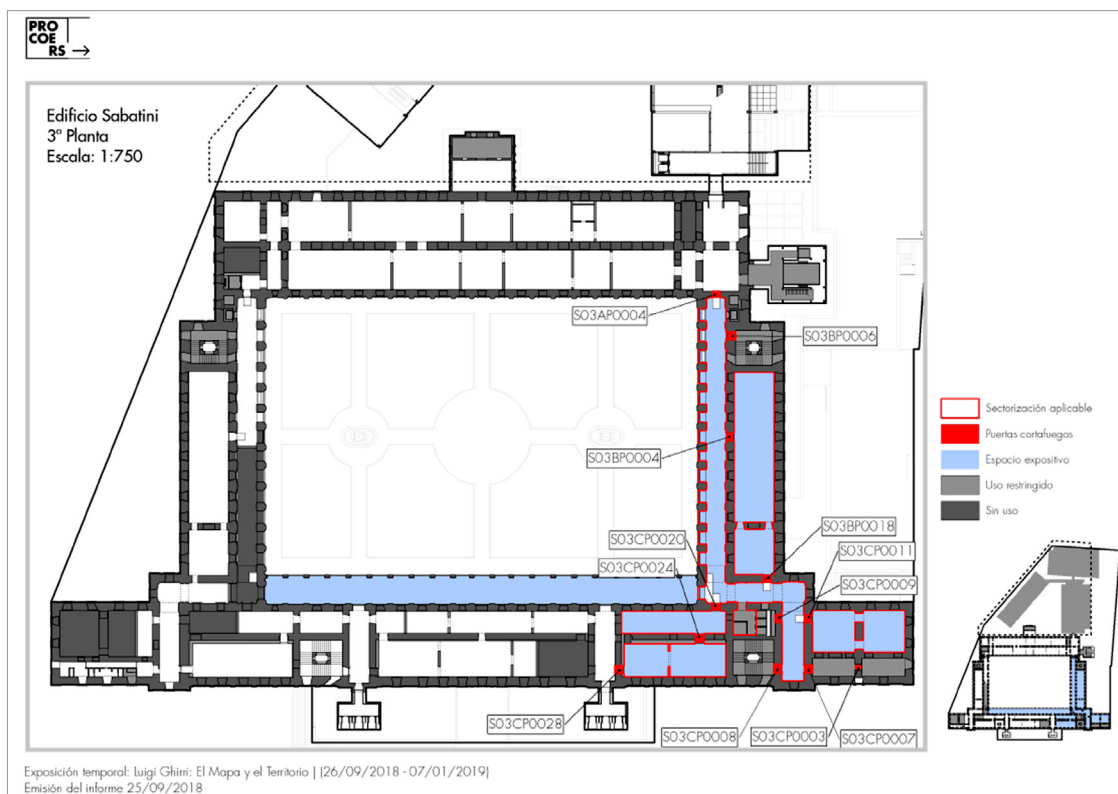


Figura 5. Plano de sectorización de incendios elaborado el 25 de septiembre de 2018 a partir del sistema de información geográfico del Plan PROCOERS. Fuente: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía.

Hoy en día el uso de los SIG y BIM está generalizado¹⁷, aunque el planteamiento novedoso que se quiere desplegar en un futuro próximo consiste en el desarrollo de sus potencialidades conjuntas para su aplicación en la gestión de riesgos y emergencias de colecciones.

La integración de la metodología BIM, el modelado de un gemelo digital del sistema, concebido como suma del elemento inmueble y de las piezas (patrimonio mueble + inmueble) como sistema único con el software GIS, permite ya a día de hoy la interoperabilidad de acceso, comunicación y cooperación entre los diferentes actores y niveles de usuario, y supone una solución para gestionar y modelar datos gráficos del edificio y las obras en él contenidas y datos semánticos referidos a la información histórico-constructiva, así como la información de las colecciones.

Esta transformación digital favorece la integración de la gestión y el intercambio de información, simplifica la interacción y obtención de la información, la realización de consultas, informes, modificaciones, y asegura la actualización multidisciplinar del conjunto. Estos modelos y resultados pueden ser accesibles, observables y utilizables desde múltiples puntos de vista y niveles de aproximación y pueden implementar técnicas de simulación que permitan el acceso a visores simplificados adaptados a la complejidad del sistema y al nivel técnico y capacidad de gestión del usuario, así como la posibilidad de acceso, comunicación y cooperación con terceras partes en diversos estados de emergencia: anticipación de puntos críticos, visualización en tiempo real del estado de la realidad monitorizada, etc... De hecho, la integración del SIG con el H-BIM nos permitirá tener

¹⁷ El empleo de BIM no es obligatorio, en general, en España en los contratos con el sector público a excepción de Cataluña y de algunos organismos públicos como el Ministerio de Fomento. Sin embargo, cada vez son más los organismos públicos de cualquier ámbito (nacional, autonómico o local) que han decidido requerir el uso de BIM en sus proyectos y obras, ya sea, como exigencia o como elemento valorable en la oferta y la Ley de Contratos del Sector Público 9/2017 que contempla, aunque no obliga, a los organismos públicos a requerir el uso de la metodología BIM en licitaciones públicas.

un conocimiento exhaustivo de la institución para poder responder a los diferentes escenarios de las emergencias que puedan surgir, aunque, como sabemos por nuestro planteamiento de partida, podemos/debemos trabajar con un cierto margen de incertidumbre, porque el azar y la incertidumbre se encuentran en la propia naturaleza de los sistemas complejos.

Conclusiones

Para concluir podemos afirmar que la gestión de riesgos y emergencias de una institución cultural debe plantearse como un sistema de gestión integral y ser acorde, proporcional y adaptada a la institución y su entorno. Es fundamental trabajar desde el contexto particular y tener en cuenta el conocimiento de la institución. El paradigma de la complejidad nos faculta para entender las instituciones como organismos de gestión evolutivos en los que podemos, a partir de la creación de herramientas digitales, obtener datos desde múltiples servicios así como generar diferentes resultados, siempre necesariamente temporales y circunscritos a la evolución del sistema. Así es posible anticipar una taxonomía de problemas o escenarios contingentes, con sus niveles de probabilidad e incertidumbre, cuyas consecuencias sobre el sistema puedan alcanzar niveles diversos, incluso críticos.

Sin embargo, las soluciones tecnológicas por sí solas no garantizan el éxito de la gestión de riesgos. El éxito de la gestión va a venir dado en gran medida por un conocimiento del riesgo muy exhaustivo de la institución y sus bienes con todo lo que ello implica (recursos humanos, materiales y espacio físico...), pero un conocimiento construido colectivamente y de forma participativa en donde los gestores con todo el conocimiento que poseen, y con el proporcionado además por los instrumentos tecnológicos adaptados a la institución, sean capaces de responder en su gestión al azar y a la incertidumbre que se da en toda situación de emergencia. Este planteamiento, que debe estar asociado al contexto y a planes de desarrollo y ser, por lo tanto, sostenible, necesita de procesos de reflexión y decisión flexibles que tengan en cuenta el nivel de incertidumbre asociado a las predicciones para crear sistemas cada vez más resilientes.

En definitiva, debemos pensar en la creación y diseño de modelos de gestión integral adaptables, que estén preparados para el cambio, y que puedan evolucionar, porque el verdadero riesgo es crear un modelo de gestión de riesgos inmutable, que no sea capaz de asimilar la incertidumbre y el azar que se da en toda situación de emergencia.

Agradecimientos

La autora quiere agradecer el trabajo realizado por todas las personas que están implicadas en el *Plan de Colecciones ante Emergencias del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía* (Plan PROCOERS).

Bibliografía

- Agencia Española De Normalización (AENOR) (2010): *UNE-ISO 31000 Gestión del Riesgo. Principios y directrices*. Madrid: AENOR.
- (2015): *UNE-EN ISO 9001 Sistemas de Gestión de la Calidad. Requisitos*. Madrid: AENOR.
- CARDONA, O. D. (2019): «Gestión del riesgo y adaptación en Manizales: Una estrategia de desarrollo para lograr que una ciudad en transición sea resiliente, sostenible, y competitiva». *Medio ambiente y urbanización*, 90-91, pp. 127-168.
- CASAJÚS VALLES, A., Marin Ferrer, M., Poljansek, K. y Clark, I. (eds.) (2021): *Science for Disaster Risk Management* EUR 30183 EN. Luxemburgo: Publications Office of the European Union.

- Damage And Loss Inventory For Heritage (s.f.): DALIH. Disponible en: <https://www.dalih.org> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- Decreto Ministerial numero 560 del 01/12/2017. Disponible en: <https://www.mit.gov.it/normativa/decreto-ministeriale-numero-560-del-01122017>
- Efe Redacción (2020): «La ONU ante el coronavirus: El mundo se enfrenta a las peor crisis desde la Segunda Guerra Mundial». *La Vanguardia*, 1 de abril. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/economia/20200401/48254415839/onu-coronavirus-peor-crisis-segunda-guerra-mundial-pib-antonio-guterres-secretario-general.html> [Consulta: 24 de noviembre de 2021].
- GONZÁLEZ-VARAS IBAÑEZ, I. (2018): *Conservación del patrimonio cultural. Teoría, historia, principios y normas*. 2ª ed. Madrid: Cátedra.
- HICKEL, J. (2021): «What does degrowth mean? A few points of clarification». *Globalizations*, 18 (7), pp. 1105-1111.
- LÓPEZ, F., LERONES, P., LLAMAS, J. *et al.* (2018): «A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)». *Multimodal Technologies and Interact*, Vol. 2 (2) (21). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/mti2020021>. [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- MONTERO VILAR, P., GARCÍA GÓMEZ-TEJEDOR, J., BARRIOS RINCÓN, L. *et al.* (2017): «Plan de Protección de Colecciones ante Emergencias del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía (Plan PROCOERS)». En: *Conservación de Arte Contemporáneo 18ª Jornada*. Madrid: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, pp. 139-146.
- MONTERO VILAR, P., GARCÍA GÓMEZ-TEJEDOR, J., PINTO SANZ, J. *et al.* (2018) «Implementación del Plan PROCOERS: el Informe de Planificación ante Emergencias». En: *Conservación de Arte Contemporáneo 19ª Jornada*. Madrid: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, pp.241-248.
- MONTERO VILAR, P., GARCÍA, J., GARCÍA GÓMEZ-TEJEDOR, J. *et al.* (2019): «El Sistema de Gestión Integral del Plan de Protección de Colecciones ante Emergencias del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía (Plan PROCOERS)». En: *Congreso Internacional "Patrimonio cultural y catástrofes: Lorca como referencia"*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 359-364.
- MORIN, E. (1998): *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona: Gedisa.
- MUÑOZ VIÑAS, S. (2003): *Teoría Contemporánea de la Restauración*. Madrid: Síntesis.
- MURPHY, M., MCGOVERN, E. y PAVIA, S. (2009): «Historic building information modelling (HBIM)». *Structural Survey*, vol. 27 (4), pp.311-327. Disponible en: <https://doi.org/10.1108/02630800910985108>
- Naciones Unidas (2015): *Acuerdo de París*. Disponible en: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- (2015): *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Disponible en: <https://www.un.org/sustainable-development/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- Oficina De Naciones Unidas Para La Reducción Del Riesgo De Desastres (UNDRR) (2015): *Marco de Sendai*. Disponible en: https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- Organización Mundial De La Salud (OMS) (Última actualización 29 de enero de 2021): *Cronología de la respuesta de la OMS a la COVID-19*. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/29-06-2020-covidtimeline> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- Parlamento Europeo: *Resolución del Parlamento Europeo sobre la situación de emergencia climática y medioambiental B9-0209/2019* Disponible en: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/B-9-2019-0209_ES.pdf [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- PEÑA CATALÁN, R. (2009): «Voltaire: una reflexión filosófico-literaria sobre el terremoto de Lisboa». *Revista de Filología Románica*, 26, pp. 187-204.

- SAN MARTÍN CALVO, M. (2014): *Bienes Culturales y Conflictos Armados: Nuevas Perspectivas de Derecho Internacional*. Navarra: Thomson Reuters Aranzadi.
- VACCA, G., QUAQUERO, E., PILI, D. *et al.* (2018): «GIS-HBIM integration for the management of historical buildings». *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII (2), pp. 1129-1135.
- WAGENSBERG, J. (2014): *Ideas sobre la complejidad del mundo*. 5ª ed. Barcelona: Tusquets.
- World Economic Forum (2020): *The Global Risks Report 2020 15th Edition*. Ginebra. Disponible en: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- (2021): *The Global Risks Report 2021 16th Edition*. Ginebra. Disponible en: https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2021.pdf [Consulta: 15 de diciembre de 2021].

El fármaco como fuente de cultura inmaterial: Santa Maria della Scala, Roma. Estudio y musealización

The drug as a source of immaterial culture: Santa Maria della Scala, Rome. Study and musealization

M^a Luisa Vázquez de Ágredos Pascual*

Universitat de València.
m.luisa.vazquez@uv.es

Sergio Ferrero Gil

Escola d'Art i Superior de Disseny de València.
sferrero@easvalencia.com

Roberta Fantoni

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile FSN-TECFIS, Italia.
roberta.fantoni@enea.it

Nuria Blaya Estrada

Florida Universitaria, Valencia.
nblaya@florida-uni.es

Resumen: En 2016 la Universitat de València inició un primer proyecto de investigación en la *spezieria* de Santa Maria della Scala, Roma. El objetivo inicial del proyecto fue realizar el análisis fisicoquímico de los fármacos más antiguos conservados en la botica de esta farmacia histórica y conventual (Orden de los Carmelitas Descalzos), abierta a finales del siglo XVII en el interior del convento que lleva su mismo nombre. La interpretación de los resultados científicos obtenidos y su estudio histórico-cultural han convertido a esta *spezieria* en un tesoro patrimonial único en el corazón del Trastevere romano; un mosaico de saberes medicinales procedentes de distintas épocas y culturas, muchos de ellos de origen ancestral. Estos resultados hoy nos están permitiendo diseñar una nueva museografía en la *spezieria* de Santa Maria della Scala, *in situ* y virtual, que convertirán a este museo de la ciencia y la medicina, único y excepcional en su naturaleza, en una referencia internacional y en el punto de partida de un nuevo itinerario cultural: «Il percorso dello speciale in Roma: farmaci e aromi nel tempo».

Palabras clave: Santa Maria della Scala de Roma, farmacias históricas, patrimonio cultural, cultura inmaterial, musealización.

Abstract: In 2016 the University of Valencia began a first research project in the Santa Maria della Scala *spezieria*, Rome. The initial objective of the project was to carry out the physicochemical

analysis of the oldest drugs preserved in the sales room of this historical and conventual pharmacy (Order of the Discalced Carmelites), opened at the end of the 17th century inside the convent that has its own name. The interpretation of the scientific results obtained and its historical-cultural study have turned this *spezieria* into a unique heritage treasure in the heart of Roman Trastevere; a mosaic of medicinal knowledge from different times and cultures, many of them of ancestral origin. Currently, these results are allowing us to design a new museography in the Santa Maria della Scala *spezieria*, in situ and virtual, which will make this museum of science and medicine, unique and exceptional in its nature, an international reference and the starting point of a new cultural itinerary: «Il percorso dello speziale in Roma: farmaci e aromi nel tempo».

Keywords: Santa Maria della Scala in Rome, historic pharmacies, cultural heritage, intangible culture, musealization.

La *spezieria* de Santa Maria della Scala, Roma

Existe un lugar en Roma que ha estado allí desde finales del siglo XVII y que, habiendo sido conocido y frecuentado por todas las clases sociales en tiempos de la Edad Moderna, hoy, en medio de una ciudad que atesora más Patrimonio Cultural que el que puede gestionar de manera sostenible, ha sido (y todavía lo es) más invisible que visible, y no solo para los millones de turistas que aterrizan en Roma para descubrirla (o redescubrirla una vez más), sino también para la propia población local. Ese espacio patrimonial, único en su naturaleza, es una *spezieria* conventual que inicialmente solo abasteció a la comunidad de frailes de la Orden de los Carmelitas Descalzos que allí vivía, y que fue la responsable de erigir este Convento de Santa Maria della Scala en su emplazamiento actual: la plaza que lleva su mismo nombre y que se localiza en el corazón del Trastevere romano. Estos orígenes se remontan a finales del siglo XVII, y muy poco tiempo después la *Spezieria dei PP. Carmelitani Scalzi della Scala*, tal y como se la conoció, abrió al público (Figura 1). Esto aconteció en un primer cuarto del siglo XVIII en el que muchas de las *spezierias* conventuales que había en Roma tuvieron que cerrar



Figura 1. Entrada a la *spezieria* de Santa Maria della Scala de Roma. © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.

o restringir su función a la venta de muy pocos remedios curativos por orden de decretos que dictaron los poderes laicos y religiosos de la ciudad, en consonancia con lo que también estaba ocurriendo en otros lugares de Europa (Vázquez de Ágredos *et al.*, 2021). Así lo demuestra para el caso de Roma, por ejemplo, el decreto de 1722 del Papa Inocencio XIII (1721-1724), por el cual se prohibía a las órdenes religiosas de Roma vender todos los medicamentos que preparaban con la excepción de la triaca y del bálsamo apoplético, ambas panaceas de origen muy antiguo, en especial la primera de ellas. En ese mismo decreto, sin embargo, el sumo pontífice declaró que esta prohibición no afectaba a la farmacia de los *Fatebenefratelli di Roma* (situada a la altura de la isla Tiberina, donde fue bombardeada en tiempos de la I Guerra Mundial) ni tampoco a las que funcionaban en beneficio de los hospitales de la ciudad (Pedrazzini, 1934: 261), lo que fue validado algún tiempo después por el Papa Clemente XII (1730-1740) y más tarde por el Papa Benedicto XIV (1740-1758).

La *spezieria* de *Santa Maria della Scala* fue una de las que sobrevivió en medio de esta desfavorable coyuntura en buena parte provocada por los propietarios de las farmacias laicas, pues las grandes pérdidas económicas que sufrían se debían a que la población optaba por adquirir los tratamientos medicinales en las *spezierias* conventuales o monásticas, donde los encontraban gratuitamente o a muy bajo coste, algo que los frailes podían permitirse porque estaban exentos de tener que pagar los impuestos que, sin embargo, sí se exigían a los establecimientos seculares (Colapinto, 2007:23). No obstante, la principal razón para que la *Spezieria dei PP. Carmelitani Scalzi della Scala* continuara abierta durante los siglos XVIII y XIX, permaneciendo activa durante toda la primera mitad del siglo XX, fue que muy pronto se convirtió en la Farmacia de los Papas, pues fue allí donde se prepararon y dispensaron todos los fármacos que requirieron los sumos pontífices y la corte papal. De hecho, la actividad de esta *spezieria* romana se mantuvo hasta la década de los 50 del siglo XX, cuando cerró definitivamente.

En memoria de esa *spezieria* histórica, ahora existe una farmacia contemporánea que lleva su mismo nombre y que está situada en la planta baja del edificio que alberga la antigua botica en su lugar original: el primer piso del convento carmelita. Si alguien quiere conocerla tendrá que llamar al convento y reservar su visita, que no siempre será posible, ya que depende de los frailes y una agenda que se debe a otras muchas actividades. Fue así como accedimos por vez primera hace muchos años al interior de Santa Maria della Scala, en cuya percepción integral tuvieron que aliarse tres sentidos: el olfato, la vista y el tacto (en ese orden), ya que su interior brinda al visitante un crisol de Patrimonio Histórico que destila milenios de cultura inmaterial, únicamente percibida en un primer momento a través de los intensos y confusos aromas que proceden de los centenares de recipientes que todavía conservan en su interior sustancias y formulaciones cuyo conocimiento remite al saber y la práctica medicinal de distintas épocas culturales (Figura 2).



Figura 2. Detalle de los recipientes de fármacos datados entre finales del siglo XVII y principios del siglo XVIII. © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.

Caracterizar, estudiar y conservar la colección de fármacos de Santa Maria della Scala de Roma (2015-2022): un proyecto de investigación enfocado a la conservación del patrimonio inmaterial y su transmisión científica

Los resultados que hemos obtenido en los distintos proyectos de investigación que el Departamento de Historia del Arte de la Universitat de València ha liderado e implementado en este lugar desde hace siete años confirman que la *spezieria* romana de Santa Maria della Scala es el crisol milenario e histórico-cultural de conocimiento y práctica farmacéutica al que hemos hecho referencia en el apartado anterior. Se trata de resultados que han sido posibles gracias al apoyo de distintas fuentes de financiación nacionales e internacionales, y a la colaboración científica de universidades, centros de investigación y laboratorios de España, Italia, Francia, Portugal y Suiza, que de forma coordinada han dado respuesta a los objetivos que se trazaron en una primera fase del proyecto (2016-2019), los cuales fueron: (1) abordar la caracterización fisicoquímica de los centenares de fármacos que estaban contenidos en los recipientes más antiguos de Santa Maria della Scala, datados a finales del siglo XVII y principios del siglo XVIII; (2) realizar el estudio histórico y cultural de las sustancias y recetas identificadas; (3) estudiar la procedencia geográfica y temporal de esos tratamientos medicinales caracterizados, así como su transmisión y evolución a través del tiempo; (4) completar el inventario y la catalogación de los bienes muebles de esta *spezieria* romana (Figura 3). Mientras que los tres primeros objetivos se enfocaban al conocimiento y la conservación del patrimonio inmaterial atesorado en el interior de este espacio, el último de ellos ponía el foco en la conservación preventiva de su rico y diverso patrimonio material, en la actualidad en riesgo por distintos factores de degradación.



Figura 3. Interior de la botica de Santa Maria della Scala. Solo en esta imagen se percibe el crisol de bienes culturales que la *spezieria* atesora en su interior. Al fondo puede verse la vitrina que conserva los recipientes de fármacos más antiguos, fechados entre finales del siglo XVII y principios del siglo XVIII. © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.

El abordaje de estos objetivos supuso combinar una metodología interdisciplinar, y en concreto alianzas metodológicas entre la química, la física, la geología, la botánica, la ciencia farmacéutica, la historia de la ciencia y la medicina, y la historia del arte, entre otras disciplinas, que en todos los casos han contado con la participación de investigadores especializados en cada una de ellas. La optimización de un protocolo fisicoquímico que hiciera posible la caracterización de los antiguos fármacos (objetivo 1), en los que, posiblemente y *a priori* de cualquier análisis, sería más frecuente identificar marcadores de degradación de los compuestos (en vez de los propios compuestos), exigió alianzas entre las unidades de investigación y equipamientos del Parque Científico, Departamento de Química Analítica, y Laboratorio de Análisis y Diagnóstico de obra de arte de la Universitat de València, y de estos con otros cuatro centros de investigación e innovación científica localizados en universidades y empresas de reconocido prestigio internacional: el Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale, CNRS-Sorbonne Université, París-Francia; el Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica de la Università Ca' Foscari di Venezia, Italia; la Phytochemistry Research Area de Aboca Spa Società Agricola, Sansepolcro, Italia; y el Institute for Materials and Constructions-University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland.

Para la caracterización fisicoquímica de las sustancias y remedios curativos contenidos en los recipientes más antiguos de Santa Maria della Scala (cerca de 300) se consideraron los resultados que habían reunido otros proyectos de investigación al estudiar compuestos similares y la combinación de técnicas que fueron utilizadas para ello (Guasch-Jane *et al.*, 2004; Edwards *et al.*, 2004; Cotte *et al.*, 2005; Colombini *et al.*, 2005; Mondello *et al.*, Wen *et al.*, 2005; Mizzoni *et al.*, 2007; Gamberini *et al.*, 2008; Ribechini *et al.*, 2009; Pérez Arantegui *et al.*, 2009; Tapsoba *et al.*, 2010; Beaten *et al.*, 2010; Saliu *et al.*, 2011; entre otros). En todos los casos analizados, la aplicación de instrumentación microscópica (en especial microscopía electrónica de barrido-microanálisis de rayos X/SEM-EDX, y microscopía de transmisión electrónica/TEM), así como también la difracción de rayos X/XRD, debía combinarse con otras técnicas de análisis enfocadas a la identificación de compuestos de naturaleza orgánica (espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier/FT-IR, espectroscopía raman, espectroscopía de resonancia magnética nuclear/RMN, cromatografía de gases-espectrometría de masas/GC-MS, que puede incorporar Pirólisis —Pyr-GC-MS—, cromatografía de líquidos de alta resolución/HPLC, acelerador de partículas sincrotrón, y voltamperometría de micropartículas), por ser los más frecuentes en el análisis de formulaciones complejas de naturaleza farmacéutica desde la Antigüedad a la época contemporánea (medicinas, perfumes y cosméticos), y desde luego una constante en el botamen conservado en la *spezieria* romana objeto de nuestro proyecto de investigación, a tenor de la mixtura de olores que embriagan su interior. Finalmente, tras esta revisión bibliográfica exhaustiva y un año de trabajo en los distintos laboratorios europeos mencionados, con resultados más o menos favorables que fueron definiendo la combinación de técnicas más apropiada para la caracterización del citado botamen de los siglos XVII y XVIII, el protocolo analítico a utilizar en la colección consistió en combinar técnicas microscópicas (LM, SEM-EDX), de difracción (XRD), espectroscópicas (FT-IR, RAMAN, RMN), y cromatográficas, aisladas o en tándem (GC-MS, Pyr-GC-MS, HPLC). Por último, y siempre con la intención de mejorar los resultados obtenidos en la detección de compuestos orgánicos (Lodi *et al.* 2020; Izzo *et al.* 2021), se trabajó con reflectancia difusa y micro-extracción magnética en línea en fase sólida en tubo (Magnetic-IT-SPME) combinada con cromatografía líquida capilar-detección de matriz de diodos (CapLC-DAD).

Siete años después de los primeros resultados obtenidos con este protocolo analítico, y gracias a su interpretación y estudio cultural a la luz de las fuentes históricas y la bibliografía especializada (objetivos 2 y 3), hoy sabemos que esta *spezieria* del barroco romano reúne tratamientos medicinales que pueden clasificarse en siete grupos (Vázquez de Ágredos *et al.*, 2018): (1) formulaciones complejas, (2) compuestos mercuriales, (3) compuestos antimoniales, (4) compuestos férricos, (5) compuestos orgánicos, (6) sales y (7) piedras preciosas. Con la excepción del último de los grupos, representado por diversas gemas a las que se les atribuyeron propiedades



Figura 4. Detalle al microscopio óptico (LM) de la *pedra preciosa*. Imagen adquirida con tecnología Leica. Laboratorio de Análisis y Diagnóstico de obra de arte, Universitat de València.

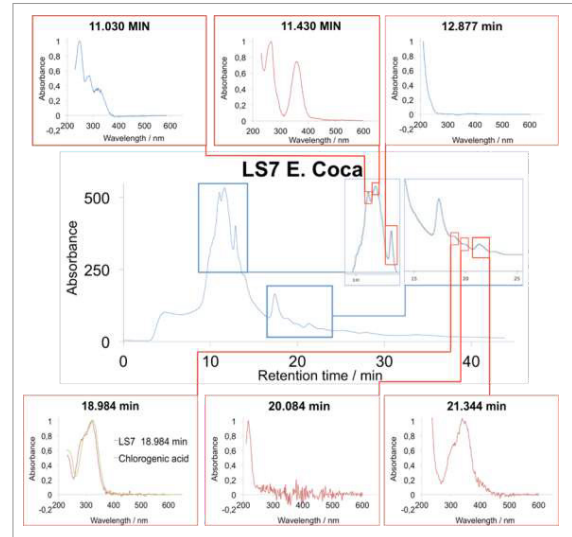


Figura 5. IT-SPME-CapLC-DAD de la *coca*, sustancia que llegó desde el Nuevo Mundo a partir del siglo XVI. Resultados obtenidos en el Departamento de Química Analítica de la Universitat de València.

curativas desde tiempos muy antiguos, como los granates, la esmeralda o el lapislázuli, entre otras (Figura 4), en el resto de las categorías el común denominador es la presencia de compuestos orgánicos, en proporción dominante o no (Figura 5). Así ocurre, por ejemplo, en el caso de las sales, cuyo protagonismo en Santa Maria della Scala es más que notable, pues están presentes en casi un 40% de los remedios pertenecientes a la época más antigua de la colección (siglos XVII y XVIII, como señalábamos anteriormente). Sin embargo, el nombre diferente al que responden cada uno de ellos (sal. Vener; sal. Guajac; sal. Corall, etc...) no se debe a su composición salina, pues siempre se utilizó el sulfato de potasio conocido como arcanita (K_2SO_4) (Figura 6), sino al compuesto aromático y volátil que va ligado a cada una de esas sales, como por ejemplo la vainilla, entre otros (Cavallo y Vázquez de Ágredos, 2021).

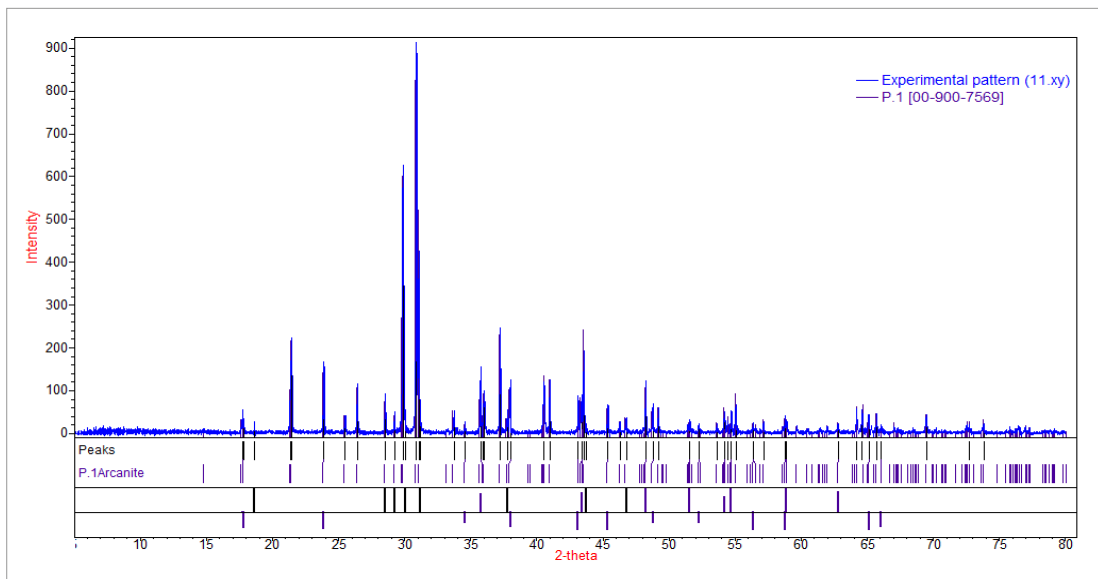


Figura 6. XRPD de la *arcanita* (K_2SO_4), principal componente de las sales medicinales de Santa Maria della Scala, Roma. Resultados obtenidos en el Servicio Central de Soporte a la Investigación Experimental (SCSIE), Universitat de València.



Figura 7. Detalle de la pintura mural que decora la cubierta de la botica de Santa Maria della Scala. Las flores que aparecen representadas aparecen en los herbarios conservados en esta *spezieria*, y son ricas en principios activos de naturaleza medicinal. Fotografía: © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.

También lo orgánico está presente en los grupos en los que es un componente mineral el que determina el tratamiento y su uso (1, 2, 3, 4), lo que obliga a concluir que la preparación y dispensa de medicamentos en Santa Maria della Scala estuvo dominada entre los siglos XVII y XVIII por el fármaco vegetal y su riqueza de aplicaciones históricas, algo que también está patente en los motivos iconográficos que decoran el interior de la botica (Figura 7) y la rebotica (Figura 8), así como en los distintos herbarios y fuentes históricas que se conservan en su interior (Figura 9).

El testimonio del uso de plantas medicinales y remedios naturales se remonta a la antigüedad, lugar al que Santa Maria della Scala de Roma nos traslada a través de su antiguo botamen,



Figura 9. Uno de los libros conservados en Santa Maria della Scala, actualmente en proceso de estudio. © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.

Figura 8. Detalle de la rebotica que permite apreciar los motivos vegetales que decoran las contraventanas. © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.

convirtiéndolo en punto de partida de los innovadores discursos museográficos que estamos diseñando en su interior, los cuales estarán activos a finales de 2024. En este sentido, la mayoría de las poblaciones antiguas estaban en estrecho contacto con el medio que les rodeaba y del cual tomaban los ingredientes para producir medicinas, perfumes y cosméticos (Jamshidi-Kia *et al.*, 2018). El ejemplo más antiguo que se conoce del uso de las plantas con este fin procede de un contexto fechado entre 13.700 y 11.700 años, localizado en la cueva de Raqefet en el Monte Carmelo, antiguo Israel. Las tumbas de los individuos que fueron enterrados en esta cueva se cubrieron con plantas aromáticas, y en concreto con variedades locales de salvia (*Salvia judaica*), menta (*Lamiaceae*), y flores de intensa fragancia de la familia *Scrophulariaceae* (Nadel *et al.*, 2014: 11776), entre otras de propiedades similares que también están presentes en la *spezieria* de Santa Maria della Scala (Martínez y Vázquez de Ágredos, 2021). Los hombres y mujeres que participaban en los rituales funerarios en esta cueva debieron intuir los efectos que el aroma de estas especies ejercía sobre su comportamiento (Heaviland-Jones *et al.*, 2005: 104-132), como ocurre con la *Salvia judaica*, cuyas especies contienen sustancias como la salvinorina A, que provoca notables efectos psicodélicos cuando se aplica en pequeñas dosis (Schultes y Hofmann, 2000: 165). Mucho tiempo después y en un contexto completamente distinto, se produjo el primer escrito conocido sobre el uso de plantas para la preparación de remedios medicinales. Nos referimos a la receta que fue descrita en una tablilla de arcilla sumeria de Nagpur, cuya datación se remonta a unos 5000 años. Por su parte, las tablillas de Nippur, fechadas en el III milenio a. C. reúnen la colección de medicamentos y recetas más antigua que se conoce, seguida de cerca por varios textos del antiguo Egipto que incluyen numerosas referencias a la terapia mineral y vegetal, como el *Papiro de Ebers*, datado alrededor de 1500 a.C., el cual es contemporáneo a numerosos tratados de Extremo Oriente que por esas mismas fechas ya registraban decenas de compuestos medicinales de origen orgánico, en especial procedentes de plantas.

Con el paso del tiempo, todos estos conocimientos ancestrales, con orígenes muy diversos en culturas de Oriente y Occidente, desembocaron en la Grecia clásica, donde se produjo un enriquecimiento en torno al fármaco vegetal a raíz de los estudios y descubrimientos de Hipócrates, que dejó descritos en su tratado *Sobre el aire, el agua y los lugares*, considerado el primer libro de la historia sobre geomedicina y medioambiente. Sus trabajos fueron seguidos en el mundo grecorromano por Teófilo de Éfeso (siglos IV-III a. C.), Dioscórides (siglo I d. C.), Plinio el Viejo (siglo I d. C.), Galeno (siglo IV d. C.) y Oribasio de Pérgamo (siglos IV y V d. C.), entre otros autores, cuyo legado todavía puede rastrearse en la *spezieria* de Santa Maria della Scala, de acuerdo con los resultados fisicoquímicos obtenidos y su estudio histórico-cultural.

Después de la caída del Imperio Romano de Occidente (476 d. C.) y el comienzo de la Edad Media, las sustancias y formulaciones a base de plantas continuaron teniendo una gran importancia en Europa occidental y oriental (Bizancio), y tanto en el mundo cristiano como islámico, como lo demuestran los tratados de Mesue El Joven (1013), Avicena (978-1036), Juan Serapion (1070) o Bartholomeus Anglicus (1220), entre otros a los que también rinden homenaje los remedios medicinales conservados en Santa Maria della Scala. Esto también se proyectó en la Edad Moderna, y entre los siglos XV y XVIII convivieron la medicina natural de origen vegetal y animal con la mineral. A este respecto, no fue hasta principios del Renacimiento (siglo XV) que la filosofía hermética y la alquimia buscaron dar una explicación más racional a las propiedades curativas de las plantas, siendo el médico y alquimista Paracelso (c. 1496) uno de los mayores exponentes en este campo. En estas fechas, y a la luz de esta nueva filosofía, las mezclas de varias especies vegetales, o su combinación con minerales y sales (constante en el botamen de Santa Maria della Scala de Roma), se convirtió en una constante.

A la luz de este contexto, los frailes-boticarios de Santa Maria della Scala prepararon los remedios curativos de los siglos XVII y XVIII, que hemos analizado e identificado a nivel fisicoquímico y estudiado desde el punto de vista histórico y cultural, lo que hoy está permitiendo diseñar nuevos discursos museográficos en el interior de esta *spezieria* del barroco romano y desde aquí hacia la



Figura 10. El armario contenedor de los venenos que está presente en la botica de Santa Maria della Scala. Sus recipientes están fechados entre la segunda mitad del siglo XIX y las primeras décadas del siglo XX. © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.

ciudad de Roma, en un nuevo itinerario cultural urbano que se conocerá como «Il percorso dello speciale in Roma: farmaci e aromi nel tempo», y que ha sido inaugurado en abril 2022 con apoyo de la Soprintendenza Speciale Archeologia Belle Arti e Paesaggio di Roma (Ministerio de Cultura italiano) y la Real Academia de España en Roma (Ministerio de Asuntos Exteriores de España). En concreto, esos discursos museográficos de interior abordarán los siguientes contenidos: (a) de las antiguas culturas mediterráneas a la Edad Moderna; (b) astrología y curación; (c) medicina judía; (d) medicina islámica; (e) sustancia y remedios curativos procedentes de las Indias orientales y occidentales; (f) Paracelso y la nueva química moderna. A su vez, estos itinerarios interiores en Santa Maria della Scala se están ampliando en estos momentos con el estudio de los fármacos conservados en las vitrinas de los siglos XIX y XX (Figura 10), que incluyen tratamientos muy interesantes y de amplio uso en un mundo en el que estuvieron en alza enfermedades venéreas (por ejemplo, la sífilis), para las que se impusieron los tratamientos mercuriales, y también las enfermedades mentales (por ejemplo, la depresión crónica o la esquizofrenia) para las que se generalizaron tratamientos como la digitalina (*Digitalis purpurea*). El protocolo analítico anteriormente descrito (LM, SEM-EDX, XRD, FT-IR, RAMAN, GC-MS, Pyr-GC-MS, HPLC, IT-SPME-CapLC-DAD) está siendo aplicado desde el año 2020 en la caracterización y estudio histórico-cultural de estos nuevos fármacos de cronología más contemporánea. En este trabajo, en el que colaboran el Parque Científico y el Laboratorio de análisis y diagnóstico de obra de arte de la Universitat de València con el Laboratorio Hércules de la Universidad de Évora (Portugal), también se ha implementado análisis de toxicología y ADN en los tratamientos históricos conservados, lo que nos está permitiendo profundizar y ampliar el conocimiento que teníamos de estos tratamientos, sus propiedades y usos en la Europa finisecular.

Esto se está produciendo en una nueva fase del proyecto (2020-2022), en la que también estamos abordando la conservación preventiva y musealización accesible de este lugar y su rico patrimonio cultural de naturaleza material e inmaterial, para lo cual se han establecido nuevas alianzas metodológicas.

Inteligencia artificial y nuevas tecnologías 3D para estudiar, conservar y difundir el legado patrimonial de Santa Maria della Scala de Roma (2019-2023)

Desde finales del 2019 el proyecto de investigación en Santa Maria della Scala amplió sus objetivos. Además de continuar con la caracterización fisicoquímica y el estudio histórico-cultural de los medicamentos de periodos históricos más recientes, pertenecientes a los siglos XIX y la primera mitad del siglo XX, consideramos pertinente (1) desarrollar un *Thesaurus* Internacional y Web Semántica que reuniera ese compendio de cultura inmaterial en torno al fármaco presente en esta *spezieria* histórica, y que facilitara su conservación, conocimiento y accesibilidad a través de búsquedas inteligentes en las que el usuario podría encontrar cada compuesto y/o formulación compleja en su nomenclatura originaria, esto es: griego, latín, hebreo o árabe, y tal y como está registrada en inglés, italiano y español; (2) iniciar la musealización virtual del espacio y sus bienes culturales, de forma que su patrimonio cultural tangible quedase conservado en soporte digital, y que su visita fuese accesible para todos aquellos colectivos que no pueden llegar hasta el lugar, como ocurre, por ejemplo, con los que presentan movilidad reducida, pues la *spezieria* está situada en la primera planta del convento carmelita que la alberga, tal y como se expresó al inicio de este texto; (3) trabajar en un modelo de *software* inteligente para la predicción de riesgos en museos de historia de la ciencia y la medicina, caracterizados por custodiar colecciones patrimoniales muy híbridas (recipientes cerámicos, contenedores de vidrio, instrumental científico en metal, herbarios y otras fuentes escritas, lienzos, pinturas murales, mobiliario histórico, etc...) en las que los factores de degradación actúan de manera distinta sobre cada soporte-obra de arte, y que se pondría en práctica como experiencia piloto en la *spezieria* de Santa Maria della Scala, con posibilidad de réplica y valoración en otras colecciones idénticas o similares.

Para dar cobertura al primero y al último de estos nuevos objetivos se está trabajando con inteligencia artificial. En el último de los casos, el *software* inteligente que se está diseñando parte de un prototipo previo que fue creado por la Universidad Pablo Olvide de Sevilla y la Universidad de Sevilla para la predicción y prevención de riesgos en edificios históricos: *ART RISK 3.0*. Su perfil innovador y la importante aportación que representa en el ámbito de la conservación del patrimonio histórico, con resultados tanto en América como en Europa, explica que el proyecto que lo desarrolló, *Artificial intelligence applied to preventive conservation of heritage buildings* (Ministerio de Economía y Competitividad-FEDER), recibiera en 2021 el premio EUROPA NOSTRA de Patrimonio Cultural. En el proyecto de investigación de Santa Maria della Scala se trabaja con la Universidad Pablo Olvide de Sevilla para lograr el *software* inteligente *ART RISK 4.0*, cuyo diseño y programación permitirá esa predicción y prevención de riesgos en colecciones de historia de la ciencia y la medicina, lo que contribuirá a su conservación preventiva. Es importante señalar que este objetivo en el proyecto de Santa Maria della Scala responde a una urgente necesidad, detectada, manifestada y compartida por los conservadores de colecciones de la misma naturaleza en distintos países europeos, como demuestra, por ejemplo, la estrecha colaboración científica que en este punto se ha establecido en fechas recientes con otros proyectos y equipos de investigación que trabajan en contextos similares de Italia (por ejemplo, el Museo Farmacia di Roccavaldina, Messina, Sicilia), Portugal (es el caso del Museu da Farmacia, Lisboa, Portugal), Rumanía (Muzeul de Istorie a Farmaciei, Sibiu, Transilvania, entre otros), España (Museo de la Farmacia Hispana, Madrid; Farmacia Esteve de Llívia, Puigcerdà), y otros países de América Latina, de los que resaltamos Cuba, cuyo acervo de farmacias históricas en la Habana Vieja y otras localidades como Matanzas permitió que entráramos en contacto desde 2020, con idea de poder colaborar a nivel científico en un futuro próximo.

En la nueva era de las Humanidades Digitales es de vital importancia que la aplicación de la inteligencia artificial y las nuevas tecnologías 3D al servicio de la conservación, el conocimiento, y la musealización del Patrimonio Cultural no solo se vuelque en las grandes pinacotecas y galerías, por ejemplo, sino también en otros muchos rincones y escenarios patrimoniales cuyo estudio y puesta en valor favorece la transmisión de un legado cultural que es fuente de identidad, fortalecimiento comunitario y desarrollo local. Son aspectos considerados de manera directa en el Objetivo de Desarrollo Sos-

tenible 11 de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas: «ciudades y comunidades sostenibles», en el que también se apela a la implementación de nuevos modelos de turismo cultural sostenible en clave de inmersión experiencial y accesibilidad, y todo ello bajo el marco que se impone en las nuevas propuestas de habitabilidad y convivencia urbana, garantes de derechos, interculturalidad y sostenibilidad; son las llamadas *smart cities* (ciudades inteligentes) y su diseño e implementación como parte de la Agenda Internacional focalizada en el Patrimonio Cultural y su disfrute también ha llegado para quedarse.



Figura 11. Captura de pantalla del modelo en color 3D de alta resolución de la botica obtenida por el sistema RGB-ITR (octubre de 2021). © ENEA, Italia.

nomico sostenibile (ENEA, Italia) trabaja junto con l'Escola d'Art i Superior de Disseny de València (EASD-València) en la musealización del conjunto patrimonial de esta *spezieria* y sus bienes culturales. La primera de las entidades lo hace a través de la tecnología RGB-ITR (*Red Green Blue Imaging Topological Radar*). Se trata de un prototipo creado en el laboratorio ENEA FSN-TECFIS-DIM en Frascati (Roma), perteneciente a la clase de instrumentos no invasivos, remotos, y de amplitud, conocidos como escáneres láser en color 3D modulados (AM), basados en una técnica activa de radar láser de búsqueda de rango. Esta clase de escáneres, y en concreto el RGB-ITR, ha encontrado diversas aplicaciones en el campo del patrimonio cultural como herramienta de fruición, catalogación, valorización, almacenamiento digital, seguimiento, diagnóstico y apoyo a la restauración de obras de arte tanto en el interior de edificios monumentales como en áreas arqueológicas (Guarneri *et al.*, 2014: 46; Caneve *et al.*, 2021: 10, Fantoni *et al.*, 2021: 153). Estas posibilidades son las que han permitido trabajar con él para iniciar la musealización virtual del espacio arquitectónico de Santa Maria della Scala de Roma, la cual ha empezado con su botica (Figura 11) y continuará en un futuro próximo con sus otros espacios: entrada, rebotica, laboratorio galénico, corredor de acceso a la sala de destilaciones, la propia sala de destilaciones (allí llamada *liquorificio*), y una antigua escalera de caracol en piedra que desciende hasta el claustro del convento.

Para esta nueva fase la Universitat de València se ha aliado con una nueva institución, la Universitat Politècnica de València, en el marco del proyecto *Digital Alliances in the Era of Smart Cul-*

A la luz de este marco internacional, adquieren todavía más sentido y relevancia los objetivos 1 y 2 de esta nueva fase de investigación en Santa Maria della Scala. En el primero de ellos, el Departamento de Historia del Arte de la Universitat de València y el Departamento de Computo Artificial de la misma institución trabajan para la creación de un *thesauro* y web semántica que garantizará la conservación y la accesibilidad del patrimonio inmaterial presente y en riesgo (degradación de los compuestos almacenados; invisibilidad de la colección, efecto dominó de los riesgos que corre el patrimonio cultural tangible que alberga el inmaterial, etc...) en esta *spezieria* histórica. Esta amplia biblioteca digital introducirá progresivamente lo conservado y estudiado en materia de fármacos y saberes medicinales a través del tiempo en otras *spezierias*, boticas, farmacias y apotecarias históricas, lo que la convertirá en una base de datos de referencia internacional desde la que conservar y difundir el citado legado de conocimiento y cultura inmaterial. Sin embargo, su creación obedece a otra razón de ser: alimentar la musealización virtual de Santa Maria della Scala. En este sentido, desde 2020 la Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo eco-

tural Tourism: Safeguarding and Immersive Multisensorial Storytelling in the (In)tangible Heritage of Hygeia-Roma Hispana (Ministerio de Ciencia e Innovación, 2022-2023), que ofrecerá como producto final el Museo Virtual de Santa Maria della Scala, desde el que se podrá acceder al citado Thesaurus Internacional y Web Semántica.

De manera paralela, la EASD-València ha utilizado el escáner de mano Shining EinScan Pro 2X Plus con módulo de textura y tecnología de luz volumétrica (*software* (EXScan Pro 3.4.0.5) para iniciar el escaneo tridimensional de los bienes culturales conservados en la *spezieria*, lo que en esta primera fase ha incluido las cajas de madera que conservaban las sustancias medicinales en el armario de la rebotica (Figura 12) y los recipientes de fármacos y formulaciones complejas más antiguos (vitrina de los siglos XVII y XVIII de la botica de la *spezieria*) (Figura 13). A ello, el equipo EASD-València, en colaboración con la empresa valenciana *run & run creative design studio*, ha



Figura 12. Sal de Saturno. Escaneo tridimensional mediante técnica fotogramétrica de la caja contenedora de esta sal, almacenada en el armario de la rebotica. Software utilizado: Autodesk ReCap Photo 201. © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.

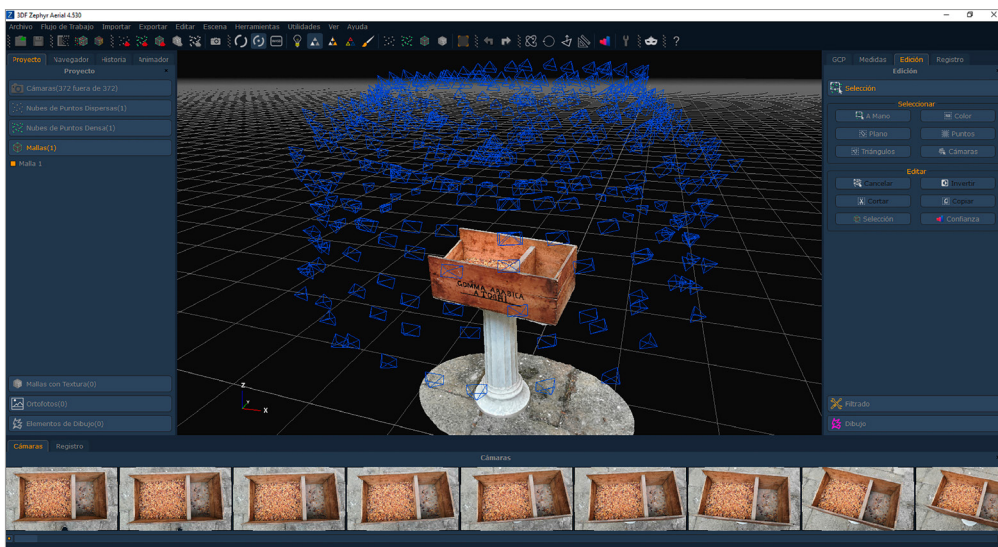


Figura 13. Goma arábica. Escaneo tridimensional mediante técnica fotogramétrica de la caja contenedora de esta sustancia de amplio uso en el ámbito de la medicina y el arte. La caja forma parte de las conservadas en una de las salas del *liquorificio*. Software utilizado: Autodesk ReCap Photo 201. © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.



Figura 14. Panorámica equirectangular del laboratorio galénico. © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.



Figura 15. Panorámica equirectangular de la sala de destilaciones (*liquorificio*). © Proyecto Roma Hispana: la *spezieria* de Santa Maria della Scala.

sumado el desarrollo de panorámicas de los distintos espacios de interior descritos, utilizando para ello la técnica más tradicional desde los orígenes de la fotografía: el «cosido» de varias instantáneas tomadas desde un mismo punto para cubrir todo el espacio que nos rodea. Para que las imágenes obtenidas fuesen de la mayor calidad posible se ha empleado la técnica HDR (*High Dynamic Range*), que permite un mayor rango dinámico de luminancia entre las zonas más claras y oscuras de una imagen, mezclando varias fotografías a diferentes exposiciones. En concreto, en Santa Maria della Scala se realizaron tres fotografías por cada posición de cámara, una con exposición correcta, una sobreexpuesta a +2EV y otra subexpuesta a -2E. El cosido de estas imágenes se ha hecho con el mejor *software* disponible actualmente para este proceso, PTGui Pro. El resultado de todo este trabajo ofrece imágenes en un formato de proyección conocido como equirectangular, que reúnen información de todo el espacio interior (Figuras 14 y 15) Son imágenes en las que el usuario se puede desplazar, como ocurre también en los modelos 3D obtenidos con la tecnología RGB-ITR descrita anteriormente.

El objetivo final de todo ello, en el que seguimos trabajando, es presentar en 2023 el Museo Virtual de la *spezieria* de Santa Maria della Scala de Roma, como modelo piloto para otros museos de historia de la ciencia y la medicina. Lo estamos concibiendo como un museo en el que el usuario podrá desplazarse virtualmente por los espacios de interior, acercarse al armario de la rebotica o a cualquiera de las vitrinas que contienen los recipientes de fármacos conservados, abrirlas y señalar alguno de estos frascos, provocando así la apertura de una ventana con la información farmacéutica, histórica y cultural de ese tratamiento, la cual estará recogida previamente en el *Thesaurus* Internacional y Web Semántica. Será una experiencia única en museos de esta categoría que busca convertirse en una referencia nacional e internacional en proyectos y colecciones idénticas o similares, cuyo patrimonio material e inmaterial se presenta como un gran legado de identidad cultural y memoria histórica.

Conclusiones

El proyecto de Santa Maria della Scala, Roma, hoy es una referencia como iniciativa científica internacional (trabajan en él cinco países europeos) e interdisciplinar (integra más de 10 disciplinas pertenecientes a alguna de las cinco áreas de conocimiento reconocidas en nuestro sistema nacional de investigación y transferencia: (a) arte y humanidades, (b) ciencias, (c) ciencias de la salud, (d) ciencias sociales y jurídicas, (e) ingeniería y arquitectura). Ello nos está permitiendo recomponer la historia de esta *spezieria* histórica y el conjunto de saberes y tradiciones medicinales que reúne en su interior. Esta información está sirviendo para trazar nuevos discursos museográficos e itinerarios en su interior, que podrán ser visitados *in situ* y en modo virtual, teniendo como horizonte la accesibilidad del espacio, su colección y el conocimiento que alberga para todas aquellas personas y colectivos que por distintas razones no puedan llegar a él. Sin duda, las redes europeas que el proyecto ha abierto y está consolidando desde hace dos años, y que están poniendo en relación y bajo un único itinerario cultural europeo a las *spezierias*, farmacias históricas y apotecarias de distintos países de Europa es el mejor resultado al que podíamos aspirar, pues conduce a la visibilización de una historia común sobre el fármaco, el tratamiento de la enfermedad y sus acepciones culturales desde la que se busca contribuir a la Historia de la Ciencia y la Medicina; un riquísimo acervo de patrimonio material e inmaterial en el que la Historia de la Cultura también encuentra resortes con los que entender mejor un presente que nunca antes vivió tan de cerca el impacto que la salud puede tener en el ámbito de la cultura y la esfera social.

Finalmente, y también como importante resultado, el trabajo realizado en los últimos años en Santa Maria della Scala ha impulsado a la Soprintendenza Speciale Archeologia Belle Arti e Paesaggio di Roma a comprometerse con su próxima restauración (inmueble). No hay mejor ejemplo de cómo la investigación de excelencia en el ámbito del Patrimonio Cultural puede conducir a alianzas con la administración pública a favor de la conservación y restauración del Patrimonio Histórico, algo que les debemos a las futuras generaciones, pues entre sus muros, imágenes, colores, lienzos, tablas, aromas, etc... está la herencia cultural que les hará entender los orígenes de lo que hoy somos; las luces y las sombras de una historia que no podemos cambiar, pero que nos permite aprender para tratar de construir un mundo más sostenible y garante de derechos humanos. Uno de esos derechos es el acceso y el disfrute al patrimonio y la cultura, fuente de identidad, bienestar y salud, y debe ser nuestro compromiso trabajar conjuntamente en las vías que pueden hacerlo posible, sentando las bases de iniciativas que inspiren a las generaciones futuras. Nosotros ya no lo veremos; pero será el legado que dejemos.

Bibliografía

BAETEN, J. *et al.* (2010): «Application of a multi-analytical toolset to a 16th century ointment: Identification as lead plaster mixed with beeswax». *Microchemical Journal*, 95, pp. 227–234.

- CANEVE, L. *et al.* (2021): «Non-invasive diagnostic investigation at the Bishop's Palace of Frascati: an integrated approach». *ACTA IMEKO*, 10 (1), pp. 180-186.
- CAVALLO, G. y VÁZQUEZ DE ÁGREDOS PASCUAL, M.L. (2018): «X-ray Powder Diffraction of Mineral Pigments and Medicines from the 17th Century Pharmacy (Spezieria) of Santa Maria della Scala in Rome, Italy». *Powder Diffraction*, 33 (4), pp. 270-278.
- COLAPINTO, L. (2007), AETEN, J. *et al.* (2010): «Lectura Simplicium dalla botánica antigua alla farmacopee del XVII e XVIII secolo a Roma». En: Breccia, M y S. Buttò (Eds.): *Erbe e Speziali. I laboratori della salute*. Sansepolcro: Aboca Edizioni, pp. 17-29.
- COLOMBINI, M. P. *et al.* (2005): «Characterisation of organic residues in pottery vessels of the Roman age from Antinoe (Egypt)». *Microchemical Journal*, 79, pp. 83– 90.
- COTTE, M. *et al.* (2005): «New insight on ancient cosmetic preparation by synchrotron-based infrared microscopy». *Analytica Chimica Acta*, 553, pp. 105–110.
- EDWARDS, H. G. M. *et al.* (2004): «Raman spectroscopy of archaeological samples from the Barber-Surgeon's medicine chest on the Mary Rose». *Journal of Raman Spectroscopy*, 35, pp. 746–753.
- FANTONI, R. *et al.* (2021): «Digital Imaging and Related Remote Diagnostics: New Tools to Support, Safeguard and Address the Conservation of Cultural Heritage». En: Romiti, B. y Folliero, A. (Eds.): *The Safety and Security of Cultural Heritage in Zones of War or Instability. NATO Science for Peace and Security Series*. Amsterdam: IOS Press, pp. 80-93.
- GAMBERINI, M. C. *et al.* (2008): «MicroRaman and infrared spectroscopic characterization of ancient cosmetics». *Vibrational Spectroscopy*, 47, pp. 82–90.
- GUARNERI, M. *et al.* (2014): «3D remote colorimetry and watershed segmentation techniques for fresco and artwork decay monitoring and preservation». *Journal of Archaeological Science*, 46 (1), pp. 182-190.
- GUASCH-JANE, M. R. *et al.* (2004): «Liquid Chromatography with Mass Spectrometry in Tandem Mode Applied for the Identification of Wine Markers in Residues from Ancient Egyptian Vessels». *Analytical Chemistry*, 76, pp. 1672-1677.
- IZZO, F. C. *et al.* (2018): «New Insights into the composition of historical remedies and pharmaceutical formulations: the identification of natural resins and balsams by gas-chromatographic-mass spectrometric». *Archaeological and Anthropological Sciences*, 13 (2).
- HEAVILAND-JONES, R. *et al.* (2005): «An Environmental Approach to Positive Emotion: Flowers». *Evolutionary Psychology*, 3, pp. 104-132.
- JAMSHIDI-KIA, F. *et al.* (2018): «Medicinal plants: Past history and future perspective». *Journal of Herbal Pharmacology*, 7, pp. 1–7.
- LODI, G. C. *et al.* (2020): «Disclosing the composition of unknown historical drug formulations: an emblematic case from the *Spezieria* of St. Maria della Scala in Rome». *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 412 (27), pp. 7581-7593.
- MARTÍNEZ GARCÍA, M. J. y VÁZQUEZ DE ÁGREDOS PASCUAL, M. L. (2021): «Ancient dyes with medical and pharmacological properties». En Kirby, J. (Ed.): *Dyes in History and Archaeology*, 35-36. Londres: Archetype Publications, pp. 89-107.
- MIZZONI, F. *et al.* (2007): «Study of the organic residue from a 2600-year old Etruscan plumpekanne». *Spectrochimica Acta Part A*, 68, pp. 377–381.
- MONDELLO, L. *et al.* (2005): «Comprehensive two-dimensional gas chromatography in combination with rapid scanning quadrupole mass spectrometry in perfume analysis». *Journal of Chromatography A*, 10672, pp. 35–243.

- NADEL, D. *et al.* (2014): «Earliest floral grave lining from 13,700–11,700-y-old Natufian burials at Raqefet Cave, Mt. Carmel, Israel». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110 (29), pp. 11774-11778.
- PEDRAZZINI, C. (1934): *La farmacia storica ed artistica italiana*. Milano: Edizioni Vittoria.
- PÉREZ-ARANTEGI, J. *et al.* (2009): «Colorants and oils in Roman make-ups—an eye witness account». *Trends in Analytical Chemistry*, 28 (8).
- RIBECHINI, E. *et al.* (2009): «Py-GC/MS, GC/MS and FTIR investigations on late Roman-Egyptian adhesives from opus sectile: New insights into ancient recipes and technologies». *Analytica Chimica Acta*, 638, pp. 79–87.
- SALIU, F. *et al.* (2011): «HPLC–APCI-MS analysis of triacylglycerols (TAGs) in historical pharmaceutical ointments from the eighteenth century». *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 401, pp. 1785–1800.
- SCHULTES, R. E. y HOFMANN A. (2000): *Plantas de los Dioses*. México: Fondo de Cultura Económica.
- TAPSOBA, I. *et al.* (2010): «Finding Out Egyptian Gods' Secret Using Analytical Chemistry: Biomedical Properties of Egyptian Black Makeup Revealed by Amperometry at Single Cells». *Analytical Chemistry*, 82, pp. 457–460.
- VÁZQUEZ DE ÁGREDOS PASCUAL, M. L. *et al.* (2018): «Tradition and Renovation in the Ancient Drugs of the *Spezieria di Santa Maria della Scala (Rome)*. Between Scientific Knowledge and Magical Thought». *European Journal of Science and Theology*, 14 (2), pp. 3-12.
- VÁZQUEZ DE ÁGREDOS PASCUAL, M. L., CAVALLO G. y PAGIOTTI R. (eds.) (2021): *Drugs, colors & aromatics. Tradition & innovation in the materia medica of Italian Baroque: studies from the spezieria of Santa Maria della Scala*. Roma, Sansepolcro: Aboca Edizione.
- WEN, I. *et al.* (2005): «A Universal HPLC Method for the Determination of Phenolic Acids in Compound Herbal Medicines». *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 53, pp. 6624-6629.

El Museu Picasso de Barcelona: la gestión de la museografía en los edificios patrimoniales y las nuevas lecturas de la colección

Museu Picasso Barcelona: museography management in heritage buildings and new readings of the collection

Reyes Jiménez de Garnica

Museu Picasso, Barcelona

rjimenezga@bcn.cat

Resumen: Este estudio hace una reflexión sobre la génesis del Museo Picasso de Barcelona en 1963 y las sucesivas remodelaciones de los edificios. A través de un recorrido por los diferentes planteamientos museográficos, analizamos el desarrollo de nuevos planes de conservación preventiva en paralelo al progresivo incremento de visitantes y a la demanda de conservación en las exposiciones temporales. Por último, la voluntad de mantener la integridad de los materiales originales y de conocer los procesos de trabajo del artista, determinan el nuevo paradigma a través de los estudios técnicos de las colecciones.

Palabras clave: Conservación preventiva, museografía, patrimonio arquitectónico, Picasso, trazabilidad de las colecciones, estudios técnicos.

Abstract: This study reflects on the genesis of the Picasso Museum in Barcelona in 1963 and the successive remodeling of the buildings. Taking a tour of the different museographic approaches, we analyze the development of new preventive conservation plans in parallel to the progressive increase in visitors and the demand for conservation in temporary exhibitions. Finally, the will to maintain the integrity of the original materials and to know the artist's work processes determine the new paradigm through the technical studies of the collections.

Keywords: Preventive conservation, museography, architectural heritage, Picasso, traceability of collections, technical studies.

Introducción

El Museu Picasso de Barcelona es el signo más evidente del vínculo del artista con la ciudad. Creado por deseo y con la aportación de las colecciones personales del propio Picasso, fue fruto de la convergencia de las voluntades de todo un colectivo. No hay que olvidar tampoco, la oportuna estrategia del Ayuntamiento de Barcelona, que en un momento político poco favorable, pudo hacer realidad un museo monográfico¹ en la ciudad que tanto representó para el artista.

No fue casualidad que para su emplazamiento, el consistorio eligiera la calle Montcada. Vestigio de la Barcelona señorial de otros tiempos, la calle se localiza en el barrio de La Ribera, donde el pintor tuvo sus primeros talleres, cerca de la Escuela de Bellas Artes de la Llotja y de la emblemática taberna *Quatre Gats*. Todos fueron escenarios esenciales de su desarrollo vital y artístico.

La calle constituye el núcleo de arquitectura civil medieval más importante de la ciudad y en 1947 había sido declarada Conjunto Monumental. De esta manera, la apertura del museo en una de sus «casas grandes», venía a sumarse a los esfuerzos de la municipalidad que trabajaba para frenar el proceso de degradación del que había sido uno de los núcleos más ricos de la ciudad. La elección del palacio Berenguer de Aguilar², para instalar el futuro Museu Picasso contribuyó a iniciar la recuperación y dotar de vida cultural al barrio.

Rehabilitación de los edificios y sus conjuntos patrimoniales

Los trabajos de rehabilitación se iniciaron en 1960 y fueron supervisados desde Francia por el propio artista. Durante los tres años que duraron las obras, Picasso fue recibiendo fotografías e incluso, una maqueta desmontable, que le permitieron hacer el seguimiento de los espacios medievales a *musealizar*.

El museo se inauguró oficialmente el 9 de marzo de 1963³. Desde entonces su fisonomía se ha transformado de manera radical, pasando de ocupar una sola finca a extenderse a través de cinco edificios o casas burguesas. El recinto hoy lo conforman un extraordinario conjunto de edificios patrimoniales construidos entre los siglos XIII-XIV⁴. Cada una de las construcciones es bastante similar⁵, edificios de planta y dos o tres alturas, con un patio central por el que se accede a la planta principal a través de una escalinata exterior⁶.

Del antiguo esplendor de estas casas aún se conservan en su interior algunos elementos originales que han quedado integrados al recorrido expositivo. Los más destacables son los artesonados del edificio Aguilar, el conjunto del salón neoclásico de Barón de Castellet (s. XVIII) y un singular artesonado decorado con papel pintado (impreso por xilografía e iluminado a mano) cuya manufactura data de finales del siglo XVI (Jiménez, 2011).

Otro de los conjuntos decorativos originales, son las pinturas murales de *La Conquista de Mallorca* (1285-1290), que ocupaba el muro principal de la galería porticada del edificio Aguilar.

¹ Fue el primer museo monográfico. En 1966 se inauguró el *Musée Picasso*, Antibes (Francia).

² Construcción del s. XIII, remodelada entre los s. XV y XVIII.

³ La inauguración del museo tuvo su polémica y por expreso deseo del artista no se invitó a ningún representante oficial ni autoridad oficial.

⁴ Algunos remodelados en el s. XVIII.

⁵ Como material constructivo combina el tapial y la sillería de piedra arenisca procedente de las canteras de Montjuïc. En el s. XV se introduce el ladrillo y el mortero de cal.

⁶ La planta baja se dedicaba a almacenes, cocheras y caballerizas. El término *palacio* se comienza a usar en la década de los años 40, hasta entonces se denominaban «casas grandes» formadas por la suma de «casas menores».

Siguiendo los criterios de la época, fueron transferidos a las colecciones del MNAC en 1961, al inicio de la campaña de rehabilitación. La alta calidad de estas pinturas, integradas hoy en su recorrido museístico, indica el nivel socioeconómico del propietario y cuál habría sido la decoración interior de las estancias.

Despliegue del proyecto museológico

El museo ha pasado por diversas fases desde su inauguración y ha ido incrementando la superficie con las progresivas anexiones de los edificios adyacentes. Como consecuencia de ello, el itinerario museístico pasó de ocupar un solo edificio en 1963, con un recorrido expositivo que incluía la planta baja, a vertebrar un nuevo trazado en 2003 articulado por un amplio corredor transversal, que discurre a los cinco edificios. Al mismo tiempo que los espacios se renovaban y adaptaban a los requisitos de conservación de las colecciones, también la museografía se acondicionó en concurrencia a cada nueva etapa. Hoy la planta baja se destina principalmente a zona de circulación y servicios, mientras que la colección permanente se presenta en la primera.

Por lo que respecta a las colecciones, los fondos se han ido configurando a través de los años gracias, especialmente, a la generosidad sin precedentes de Picasso. No podemos olvidar tampoco a Jaume Sabartés⁷, figura fundamental en el proyecto así como las aportaciones privadas⁸ y de los herederos del artista, además de las del Ayuntamiento de Barcelona.

El acto de generosidad del artista ha tenido dos momentos claves, que impulsaron el despliegue definitivo del museo⁹. El primero en 1968 cuando Picasso aumentó el núcleo original de las colecciones del museo¹⁰, haciendo donación de la serie de *Las Meninas*¹¹. El siguiente y definitivo, el 8 de Mayo de 1970 al firmar la donación de una importante colección personal, cediendo a la ciudad de Barcelona, 236 pinturas, 1.149 dibujos, 17 cuadernos, 4 libros de texto¹², dos grabados, 40 obras de otros artistas, un fondo que su familia había custodiado en Barcelona durante tres generaciones¹³.

Raimon Noguera, promotor y asesor jurídico de la constitución del Museo Picasso de Barcelona, lo recuerda así:

«Durante muchas horas inolvidables Picasso las compulsó una por una con emoción apenas contenida, y con una memoria prodigiosa identificó lugares y personas, recordó anécdotas e ilustró los dibujos con comentarios precisos y agudos, en gran parte anotados, que hicieron más viva y humana la evocación de Barcelona» (<http://museupicassobcn.org/origens/part-4?lang=es>).

⁷ Jaume Sabartés (1881-1968). Propagandista entusiasta de la obra de Picasso, en 1935, se instala en París y se convierte en su secretario particular. Publica la biografía del artista y otros escritos sobre su vida y su obra.

⁸ En 1963 Salvador Dalí hace donación del libro ilustrado de *Les Metamorphoses d'Ovide* con 30 aguafuertes de Picasso de 1931.

⁹ Disponer en Barcelona, en 1963 de un museo dedicado a Pablo Picasso representó un hecho de enorme relevancia. Hay que pensar que en París no se inauguró el *Musée Picasso* hasta el 1985, y el *Guernica* llegó al Museo Reina Sofía en 1981.

¹⁰ 1919 Primera donación de Picasso a Barcelona y en 1932 adquisición por parte del Ayuntamiento de Barcelona y la Generalitat de Catalunya, de la colección Plandiura, en la que había 22 obras de Picasso.

¹¹ Compuesta por 58 lienzos realizados en Cannes en 1957. El de Barcelona es el único museo que conserva una serie completa con todo el interés técnico y documental que eso conlleva.

¹² Los libros de texto están repletos de anotaciones personales y dibujos de infancia cuyo estudio grafológico está aportando nuevas claves para conocer su entorno vital del momento.

¹³ Su propia madre, su hermana Lola y sus sobrinos Vilató-Ruiz.

Fue en concreto este último legado, lo que propició la progresiva ampliación de la superficie expositiva, al tiempo que descubrió periodos cruciales en la formación del artista, como las obras de su estancia en A Coruña y que hasta aquel momento eran desconocidos incluso para personajes tan cercanos y eruditos de su obra como el prestigioso marchante Daniel-Henry Kahnweiler (1974: 7) cuyo comentario no deja lugar a dudas:

«Me he dado cuenta de esto hace poco, cuando visitaba el Museo Picasso de Barcelona, que ha abierto de nuevo sus puertas tras haber aumentado el número de obras expuestas. A la vista de cientos de dibujos de su primera juventud-de los que yo solo conocía una mínima parte-me sorprendió, sobre todo, la profunda unidad de su obra, pese a su asombrosa diversidad».

Expansión del museo

Como consecuencia de estas fases de crecimiento de las colecciones, la configuración actual del museo es el resultado de un proceso dinámico por el que, a medida que aumentaban los fondos, se fueron anexionando los edificios adyacentes (Tabla 1) y adecuándolos cada vez mejor a los requisitos de conservación.

Posteriormente, en 1999 se inauguró una nueva ampliación con la anexión de la casa Mauri y el Palacio Finestres como espacio para exposiciones temporales. El museo se sumaba al nuevo fenómeno social, que desde la década de los 70 se venía desarrollando en algunos países de Europa con las denominadas *Blockbusters* y que atraía multitudes obligando a acondicionar espacios específicos para este tipo de eventos.

Para completar la expansión, a los cinco edificios patrimoniales que configuran el actual *Museu Picasso* de Barcelona, se sumó en 2011 una moderna construcción de nueva planta destinada a albergar la biblioteca, los servicios educativos y el centro de documentación.

Tras estas fases de transformación del museo, la superficie actual es de 12.000 m², con 22 salas de exposición permanente de dimensiones y características muy heterogéneas (algunas heredadas de la distribución medieval) que contrastan con los renovados espacios de las salas temporales que disponen de interiores diáfanos, versátiles y amplios.

Implementación y desarrollo del proyecto museográfico

Para entender el desarrollo de este sistema dinámico que dio lugar al actual museo, es imprescindible recordar los periodos más significativos que ha vivido la institución desde su inauguración y

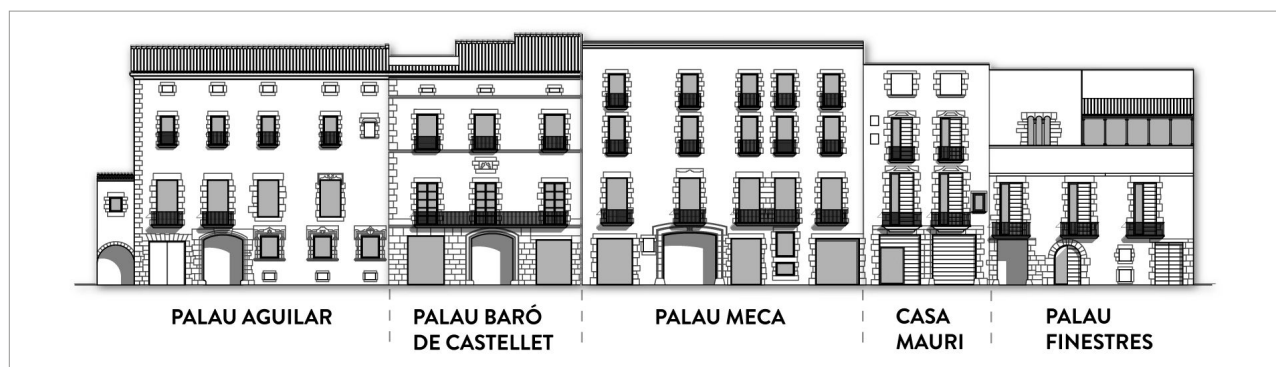


Tabla 1. Alzado de las fachadas de los cinco edificios de arquitectura civil gótica de la calle Montcada que ocupa el Museu. Barcelona, 2013. Fuente: Museu Picasso, Barcelona.

revisar la interrelación entre la evolución de los espacios, los equipamientos museográficos y la conservación de las obras.

Con este objetivo, se analizaron cuáles fueron los principales retos de adaptar este conjunto patrimonial de esta envergadura, para presentar una colección tan singular. No es únicamente una colección monográfica, es el legado que sintetiza algunos de los periodos vitales del artista, máxime de la época de formación.

Las colecciones

Si cuantificamos la colección en base a sus materiales constitutivos (Tabla 2), la obra sobre papel (dibujo, grabado y material fotográfico y documental) supera con creces los fondos de pintura. Mientras que la presencia de materiales inorgánicos, menos sensibles a las condiciones ambientales, como el metal o la cerámica, es menor.



Tabla 2. Tipología de materiales de la colección. Fuente: Reyes Jiménez de Garnica.

Se trata por tanto de una colección con alto porcentaje de elementos de naturaleza orgánica y de material que precisa de un control riguroso y una gestión eficaz de la conservación preventiva.

La transformación del museo a lo largo de las últimas seis décadas, refleja también el proceso de profesionalización de sus gestores y por extensión, evidencia la gestión patrimonial de la segunda mitad del siglo XX. Una trayectoria que, en materia de conservación preventiva, ha tenido que sortear muchas dificultades (agravadas por la propia estructura del edificio), para garantizar su adecuado desarrollo. Con el curso de los años, se han hecho mejoras considerables en los equipamientos museográficos, principalmente en los procedimientos de iluminación, de control del clima y el mobiliario expositivo.

Un recorrido por los sucesivos reportajes fotográficos realizados a lo largo de la historia del museo, nos ha permitido interpretar tanto las características de los primeros equipamientos como también valorar las principales alteraciones en las obras.

Influencia de los agentes de deterioro sobre la colección

A través de las imágenes del archivo fotográfico, se han analizado las principales fases de ampliación del espacio arquitectónico y la evolución de las condiciones del circuito expositivo. Centrándonos en la evaluación de los tres agentes de deterioro principales: iluminación, clima y sistemas de presentación de las obras.

Sistemas de iluminación: su evolución

Parece que desde 1963 y toda la década de los 70 las colecciones se iluminaban con proyectores de incandescencia y tubos fluorescentes. Habrá que esperar a la década de los 90 para ver un cambio significativo, porque si bien es cierto que se mantuvo la fluorescencia indirecta, también se fueron incorporando focos halógenos *dimmerizados*. Esto representó una mejora en el control y regulación de la intensidad.

Desconocemos cuáles fueron los protocolos de iluminación aplicados, pero la mirada histórica del archivo fotográfico y la documentación escrita, una vez más, aporta evidencias documentales que delatan la considerable incidencia que durante años tuvo la luz sobre las colecciones. Algunos informes de la década de los 70 (conservados en los archivos del museo), ya muestran la preocupación por el impacto de la luz en las obras:

«Colocar postigos o cortinas en las ventanas de la sala 10 (1º piso), sala 21 (2º piso) para poder controlar la luz solar y así evitar que las obras pierdan su colorido inicial».

Hubo asimismo una total indiscriminación por técnicas y procedimientos pictóricos; las obras más fotosensibles, como los pasteles o las acuarelas, se presentaban junto a técnicas más sólidas y resistentes como los óleos sobre tela (Figura 1).



Figura 1. Vista de una sala donde se exponía con la misma intensidad lumínica dibujos sobre papel y pinturas sobre tela. Barcelona, 1968. Fotografía: Mas. Museu Picasso, Barcelona.



Figura 2. Sistemas de climatización e iluminación de las salas. Barcelona, mayo de 1971. Fotografía: Ramon Calvet. Museu Picasso, Barcelona.

Podemos concluir que los criterios de iluminación, han pasado por diferentes fases. Si en un principio se vincularon a las remodelaciones arquitectónicas, en la última década las actuaciones ya han sido autónomas y exclusivamente asociadas a la conservación de la colección.

Hoy la experiencia de la visita es muy diferente; se ha reducido el impacto de la luz exterior, todos los focos están filtrados y progresivamente se está incorporando la tecnología LED introduciendo así el concepto de sostenibilidad en el museo.

Condiciones ambientales

Por lo que respecta al control de los parámetros climáticos, y según testimonio oral de Rosa María Subirana, directora entre 1966-1983, el Museu Picasso fue el primer museo climatizado de Barcelona. Si en los primeros tiempos la climatización de salas se lograba con dispositivos individuales o *fancoils* (Figura 2), desde la década de los 80 el clima ya se controlaba y modificaba de forma centralizada. Sin duda esto significó un gran avance, pero no podemos subestimar la servidumbre que conllevan este tipo de instalaciones en un edificio patrimonial: sobrepeso y ocupación del espacio (principalmente en las azoteas), contaminación visual y acústica en un barrio con alta densidad de población, elevado coste energético...¹⁴ sin olvidar que la configuración interior de los edificios, dificultó la distribución de los conductos en aquellas salas con elementos patrimoniales.

Museografía

En cuanto al espacio museográfico, al mobiliario expositivo y a los sistemas de presentación de las colecciones, una vez más, las características del edificio-contenedor fueron un condicionante para la exhibición de las obras; recorridos laberínticos, salas de dimensiones irregulares, etc.

¹⁴ Aproximadamente el 70% del consumo de la institución.



Figura 3. Museografía en las salas de la planta baja. Barcelona, c. 1970. Fotografía: Museu Picasso, Barcelona.

En los primeros años, los elementos museográficos (luz, vitrinas y paramentos) tuvieron que adaptarse a la arquitectura y a través de soluciones ingeniosas, se instalaron espacios de exposición en zonas que hoy no consideraríamos aptas, como la planta baja (Figura 3).

Allí se habilitaron salas cubriendo las paredes con paneles de madera que ocultaban las conducciones eléctricas al tiempo que permitían aislar las obras del contacto con los fríos muros de piedra. Las vitrinas (construidas de hierro y cristal) tenían las dimensiones del fuste o cuerpo básico de la columna que soporta la estructura de la estancia. Al tratarse de espacios en planta baja donde apenas llegaba luz natural, se resolvió la iluminación por medio de tubos de fluorescencia instalados en el interior de las vitrinas. Desconocemos si se realizaba un control de seguimiento de exposición horas/lux, pero analizando el estado de conservación de algunas obras, que sabemos por las imágenes que fueron exhibidas en esas condiciones, es seguro que la radiación de fluorescencia en combinación con la humedad ambiental tuvo una incidencia significativa sobre ellas.

Los archivos fotográficos recogen con precisión las diversas presentaciones que se hicieron de la colección, así como los emplazamientos específicos que tuvieron algunas obras emblemáticas. Hemos visto ya que en la primera presentación de 1963, se habilitaron los espacios de la planta baja. Aunque fueron convenientemente compartimentados, sospechamos que la incidencia de la humedad tuvo que ser determinante para la conservación de las colecciones expuestas. Si contemplamos las posibles vías de entrada de humedad en un edificio próximo a la costa y con las salas de exposición a nivel de la calle, las alteraciones provocadas por el impacto de la capilaridad y la



Figura 4. Presentación de las obras en planta baja, donde se aprecia la deformación de los soportes. Barcelona, mayo de 1971. Fotografía: Ramon Calvet. Museu Picasso, Barcelona.

condensación era inevitable. Pensamos, sin embargo, que la temperatura no debía ser un factor muy determinante dadas las características del edificio y su inercia térmica (Figura 4).

El archivo fotográfico como fuente de información para evaluar las colecciones

De nuevo recurrimos a las fuentes documentales, para tener una idea bastante aproximada de cuál ha sido la evolución de la colección y, en particular, de algunas piezas significativas. Fue el propio Picasso quien encargó inventariar la colección depositada en la casa familiar, antes de proceder a cumplimentar su donación al museo. En 1959, un año después de la muerte de su hermana Lola¹⁵, el artista pidió fotografiar todas las obras que se conservaban en el domicilio de Barcelona. Se realizaron 994 fotografías¹⁶ en blanco y negro que reproducían pinturas y dibujos y fueron enviadas al artista para su dictamen. Una vez realizado, Picasso donó a la ciudad de Barcelona las obras de juventud que él mismo iría seleccionando a partir de las imágenes¹⁷.

Los archivos del museo conservan estos valiosos documentos fotográficos que fueron la base de primer trabajo de registro y catalogación de la colección y sirvieron para ilustrar el catálogo-inventario de la colección de pintura y dibujo. A través de las imágenes, se analizó la evolución de algunas obras, concluyendo que si bien en 1959 se conservaban, en apariencia, en el mismo estado en que Picasso las dejó al marchar a París en 1904, en 2022 su aspecto es diferente en un gran número de casos.

¹⁵ Málaga 1884-Barcelona 1968.

¹⁶ Fotógrafo: Francisco Melich.

¹⁷ Con esta documentación el notario Noguera se desplazó al sur de Francia para que el propio Picasso certificara la autenticidad de las obras.

Evolución de los criterios de presentación y enmarcado

Los sistemas de enmarcado han sido uno de los temas prioritarios en el que los museos han trabajado en los últimos años. Los criterios de conservación y presentación de las obras han evolucionado de forma significativa y el marco ha pasado de cumplir una función estética a ocupar preferentemente una función protectora. En el caso del Museu Picasso estas mejoras han venido condicionadas además, por factores periféricos como el incremento de visitantes y el fenómeno de las exposiciones temporales, con el consiguiente movimiento de obras y la necesidad de reforzar su protección.

Enmarcados sin protección de reverso, cristales demasiado próximos a las obras y el contacto con materiales inadecuados (Figura 5) como el DM o las chapas de madera, eran la práctica habitual en los antiguos enmarcados. A pesar de haberse sustituido por material de conservación, las consecuencias en las obras en algunos casos son persistentes e incluso irreversibles. En este sentido, se ha hecho un esfuerzo considerable para renovar los procedimientos de enmarcado de la colección, dotarlos de vidrios y láminas acrílicas de conservación así como dedicar un espacio prioritario a la protección a los reversos.

Para las telas de gran formato seguimos una política de conservación preventiva instalando entelados flotantes que eviten las vibraciones indeseadas, en particular durante los transportes de obras (Figuras 6 y 7).



Figura 5. Foto de la protección del reverso perteneciente a la enmarcación de un dibujo de 1900. Barcelona, 2021. Fotografía: Museu Picasso, Barcelona.



Figura 6. Detalle del proceso de instalación de un entelado flotante en una pintura de gran formato. Barcelona, 2018. Fotografía: Museu Picasso, Barcelona.



Figura 7. Vista general del proceso finalizado. Barcelona, 2018. Fotografía: Museu Picasso, Barcelona.

Y para una mayor seguridad, los marcos climáticos son un medio de protección para algunas obras, tanto durante su presentación en la colección permanente, como en situaciones de mayor vulnerabilidad como son las exposiciones temporales.

El del transporte y embalaje es otro ámbito prioritario del museo de Barcelona. El interés mundial por el artista y el aumento exponencial de las muestras internacionales representan un reto para los conservadores-restauradores, por ello trabajamos con las empresas especializadas para diseñar cajas y procedimientos de transporte específicos.

En el más de medio siglo de existencia, el museo ha recopilado documentación con la que trazar y comparar la mejora en este ámbito. Podemos hacer el seguimiento de los procedimientos empleados en algunas de las piezas más emblemáticas y en consecuencia más solicitadas en préstamo, desde que ingresaron en las colecciones, pasando por su participación en las primeras exposiciones internacionales en los años 80.

Un conjunto paradigmático es la serie de *Las Meninas* que llegaron al museo en 1968, en cajas de madera compartidas (Figura 8). En el espacio de diez años volvieron a viajar al MOMA de Nueva York para participar en la antológica de Picasso pero ya entonces, los restauradores pusieron especial cuidado desarrollando un sistema para estabilizar la humedad relativa durante el trayecto. Hoy diseñamos cajas a medida de cada obra y desarrollamos diseños específicos para aquellas que precisan de requerimientos especiales como mayor amortiguación, modificación de la posición de viaje o control de parámetros ambientales.



Figura 8. Llegada de la serie *Las Meninas* al Museu Picasso, donación de Pablo Picasso. Barcelona, 9 de mayo de 1968. Fotografía: Pérez de Rozas. Museu Picasso, Barcelona.

Trazabilidad de las colecciones

Para determinar la relación causa-efecto y diagnosticar las secuelas en las obras, se han analizado las posibles causas de degradación rastreando la evolución de algunas piezas específicas. Por consiguiente, hemos reconstruido el transcurso de la conservación de las colecciones a lo largo de los años y de esta manera evaluado las consecuencias visibles de más de medio siglo de museografía.

Al abordar este trabajo, nos preguntamos si hoy percibimos las obras como las pintó Picasso, tal como las dejó en 1904 (cuando marchó a París) o al menos, tal como el artista las entregó ante notario en 1970. En los tres casos la respuesta es concluyente y negativa.

Para valorar las posibles causas y cuantificar el proceso de degradación sufrido, partimos de una primera valoración global del estado de las colecciones de pintura, dibujo y grabado, para proseguir haciendo estudios pormenorizados de algunas de las obras emblemáticas.

En el caso de la obra sobre papel, la primera conclusión fueron las evidencias de los efectos dañinos de la acción fotoquímica, combinada con otros factores ambientales; la respuesta de los materiales al impacto lumínico presumiblemente combinado con los elevados niveles de humedad. En el caso de los dibujos y grabados exhibidos durante los primeros años en vitrinas, la exposición reiterada a radiaciones de longitud de onda corta agravada por la temperatura emitida por las luces interiores, conllevó a la alteración cromática y debilitamiento de los materiales estructurales.

A las consecuencias de los años de exhibición, habría que añadir un último vector; las intervenciones realizadas en algunas obras, sobre todo en los dibujos. En particular, las consecuencias de los tratamientos de consolidación y limpieza y el uso de productos blanqueadores como la *Cloramina T* que ha sido recientemente estudiado en un trabajo de final de grado (Vélez, 2020). En el caso de la colección de pintura, la situación no es muy diferente: tras el acta de donación y antes de instalar las obras en el museo, se llevó a cabo una intensa campaña de restauración en la que fueron intervenidas, en mayor o menor grado, la práctica totalidad de las obras donadas. En 2011, un exhaustivo estudio (Berrocal, 2011), puso en evidencia que la mayoría de las pinturas sobre tela, habían sido sometidas a modificaciones de soporte radicales (enteladas o adheridas a un soporte rígido) y solo se excluyeron del proceso de entelado, aquellas que aún conservaban sus bastidores originales en el momento de la donación o aquellas pintadas por ambas caras.

Este esfuerzo por contextualizar las obras y comprender cuáles fueron sus condiciones de presentación y su relación directa con el estado de conservación actual, ha dado frutos muy reveladores. En 2014 se presentó una visión histórica de la institución en el marco de un simposio internacional. El estudio recorría los primeros 50 años de museología del museo para concluir con una valoración de los métodos de restauración y su impacto en las colecciones (Jiménez, 2017).

Sin duda el tiempo transcurrido entre el acta de donación de las obras y la inauguración del museo fue muy corto y en consecuencia, insuficiente para realizar una reflexión pausada del estado global de la colección y la correspondiente propuesta de intervención. Destacamos la escasez de sugerencias sobre la necesidad de estrategias conservativas y un claro predominio de las expositivas.

No es menos elocuente «el deterioro silencioso de los materiales». Hay que recordar que Picasso es un artista formado en el siglo XIX que comienza a experimentar con procedimientos no tradicionales en los primeros años del s. XX. Recientes estudios han puesto en evidencia la utilización de materiales susceptibles de decolorarse como determinadas lacas de uso industrial, aceites *estandardizados*, o simplemente pigmentos con componentes reactivos como los de plomo, o quebradizos como los de zinc. Tampoco hay que olvidar la tendencia del artista a «revisitar» sus propias obras con la consecuente acumulación sobre la tela de sucesivas capas de color.

Esta peculiaridad de su proceso de trabajo produce películas pictóricas en ocasiones muy densas y tan estratificadas, que hoy se las denomina como *pintura multicapa*. Por ello a menudo sus pinturas presentan fallos mecánicos, pérdida de estabilidad, fisuras de secado, etc.

Asimismo la categoría, casi de palimpsesto, que han adquirido algunas obras como consecuencia de este procedimiento de trabajo secuencial, ha configurado unas pinturas extremadamente ricas en sus capas subyacentes (y por tanto no visibles) que nos ofrecen un campo de investigación excepcional.

El futuro del museo/analizando a Picasso

El conjunto de edificios que conforman el Museu Picasso están en permanente custodia. Se protegen y mantienen de acuerdo con su condición de recintos patrimoniales y en estos momentos se está llevando a cabo un ambicioso plan de rehabilitación de patios y fachadas.

Si el siglo XX fue el siglo de la génesis y vertebración del Museu Picasso de Barcelona, a través de la donación de Picasso y de la ordenación de los espacios arquitectónicos, en el siglo XXI nos corresponde centrarnos en el artista, en el proceso creativo y en las estrategias de conservación de su obra. Tal como afirmó Joan Ainaud de Lasarte,

«podemos decir en síntesis que las colecciones las habrá donado Picasso y que el museo lo han hecho él y Barcelona» (<http://museupicassobcn.org/origens/part-4?lang=es>)

Sin embargo, aquella acertada afirmación hecha en la década de los 70, necesita hoy ser reformulada para adecuarla al nuevo paradigma de museo. Como conservadores de esta colección singular, coordinamos acciones para visibilizar el conocimiento global de la producción picassiana, por medio de la adquisición de datos y combinando diferentes técnicas de diagnóstico, de preferencia no invasivas. Para profundizar en los materiales y en las técnicas utilizadas por el artista, es necesario utilizar instrumentación analítica que aporten respuestas objetivas, precisas y cuantificables. Analizar las obras, determinar sus materiales y difundir los resultados, son intervenciones obligadas que llevamos a cabo a través de un plan ambicioso de proyectos de conservación y estudio científico-técnico. Como museo monográfico, la colección es nuestra columna vertebral y el estudio técnico del artista es el eje de conocimiento. Promovemos estudios técnicos no necesariamente ligados a los preparativos de una campaña de restauración. Para ello, constituimos equipos interdisciplinares, impulsamos el estudio de los materiales y los procesos empleados por Picasso, además de potenciar líneas de trabajo que ayudan a contextualizar al artista con otros creadores coetáneos (Jiménez *et al*, 2020:25-34).

El análisis científico-técnico está siendo fundamental para profundizar en la colección; porque además de determinar los elementos materiales, aportamos los instrumentos para hacerla más accesible al visitante estableciendo nuevos relatos.

Todos los proyectos de investigación son trabajos corales. A través de ellos y con datos contrastables, además de implementar las estrategias de conservación, podemos explorar nuevas vías de conocimiento desde la materialidad de las obras, contribuyendo a establecer dataciones más precisas, relaciones desconocidas entre las obras y en definitiva narrativas nuevas.

Estas son algunas de las obras estudiadas cuyos estudios técnicos han proporcionado datos destacables en la articulación de exposiciones temporales y presentadas en publicaciones científicas:

Obra/ núm. registro	Instituciones	Objetivo	Procedimiento experimental	Difusión en exposiciones temporales
Ciencia y Caridad Óleo sobre tela (Barcelona,1896) MPB 110.046	UB Proyecto europeo UPV ProMeSa	Determinar materiales Clasificación obras relacionadas valoración de materiales Reconstrucción secuencia proceso creativo.	OM SEM-EDS RX IR FORS Imagen digital (HRSP)	<i>Ciencia y caridad al descubierto</i> Museu Picasso Barcelona (2010), <i>Picasso.Chefs d'œuvres</i> Musée Picasso Paris (2018)
Azoteas de Barcelona Óleo sobre tela (Barcelona,1903) MPB 112.943	UB MOLAB PATRIMONI UB	Relacionar la capa subyacente con la pintura fundacional del periodo azul, <i>La Vida</i> (Barcelona, 1903), The Cleveland Museum of Art	OM SEM-EDS RX IR Imagen digital	<i>Viaje a través del azul: La Vida</i> Museu Picasso Barcelona (2013) <i>Picasso. Proyecto azul</i> (2022) Museu Picasso Barcelona
Proyecto 1917 Diversas pinturas sobre tela de 1914	UB UPV ProMeSa	Determinar la causa de la reactividad de los soportes y su afectación en la capa pictórica.	OM SEM-EDS RX IR FORS Imagen digital (HRSP)	<i>1917 Picasso en Barcelona</i> , Museu Picasso Barcelona (2017)
Naturaleza muerta Óleo sobre tela Paris, 1901 MPB 4.273	UB National Gallery Washington	Analizar capa subyacente Establecer conexiones entre obras y precisar datación.	OM SEM-EDS RX IR XRF Imagen digital (HRSP)	<i>Picasso. Proyecto azul</i> (2022) Museu Picasso Barcelona
Jaume Sabartés con quevedos Óleo sobre tela Paris, 1901 MPB 70.941	Pola Museum of Art National Gallery of Art de Washington.	Analizar capa subyacente Establecer conexiones entre obras y precisar datación.	OM SEM-EDS RX IR Imagen digital (HRSP)	<i>Picasso. Proyecto azul</i> (2022) Museu Picasso Barcelona
La Copa azul Óleo sobre tela Barcelona, 1902-03 MPB 110.009	IFAC.CNL UPV ProMeSa	Analizar capa subyacente Establecer conexiones entre obras y precisar datación.	OM SEM-EDS RX IR Imagen digital (HRSP)	<i>Picasso. Proyecto azul</i> (2022) Museu Picasso Barcelona

Bibliografía

- BERROCAL, S. (2011): *Museu Picasso de Barcelona: La donació de 1970. Intervencions de conservació-restauració realitzades per a l'exposició de la col·lecció*. TFM. Facultat de Belles Arts de Barcelona.
- JIMENEZ, R., RAMELLS, C., ORIOLS, N. *et al.* (2020): «Análisis de la técnica pictórica en dibujos de Picasso y Nonell en torno a 1900». En: *21ª Jornada de Conservación de Arte Contemporáneo*. Febrero 2020. Madrid: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, pp. 25-34.

- JIMÉNEZ, R. (2011): «La découverte et la restauration d'un ensemble décoratif de papier imprimé polychrome datant de la fin du XVII^e siècle au palais Aguilar de Barcelone, siège du Musée Picasso». En: ZAK, *Band 68. Musée Nationale Suisse. Revue Suisse d'art et archeologie*, pp. 151-160.
- JIMÉNEZ, R. (2017): «50 ans du musée Picasso de Barcelone: muséologie et méthodes de restauration et leur impact sur les collections». En: *Retours d'expérience et regards rétrospectifs. 6e Colloque international de l'ARAAFU. Paris. Cité de L'architecture et du Patrimoine*. 26, 27 y 28 novembre 2014. ARAAFU: Paris, pp. 15-20.
- KAHNWEILER, D. (1974): *Picasso 1881-1973*, Ed. Gustavo Gili.
- NOGUERA, R. (1980): *El amor a Barcelona*. Barcelona: Ed. Destino.
- VÉLEZ, A. (2020): *Estudi sobre els tractaments de restauració documentats en dibuixos de la col·lecció del Museu Picasso de Barcelona*. TFG. Escola Superior de Conservació i Restauració de Béns Culturals de Catalunya.

Conservación preventiva y la identificación de riesgos en colecciones de la memoria. Estrategias sostenibles y tecnología digital

Preventive conservation and identification of risks in memory collections. Sustainable strategies and digital technology

Ana Galán Pérez*

Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia das Artes, Porto. Universidade Católica Portuguesa
anagalan@musealia.net

Andre Perrotta

Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia das Artes, Porto. Universidade Católica Portuguesa
avperrotta@gmail.com

Eduarda Vieira

Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia das Artes, Porto. Universidade Católica Portuguesa
evieira@ucp.pt

Diogo Bernardes

Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia das Artes, Porto. Universidade Católica Portuguesa
diogofranciscobernardes@outlook.com

Resumen: El proyecto de investigación *Conservación preventiva y la identificación de riesgos en colecciones de la memoria. Estrategias sostenibles y tecnología digital* se estructura en dos ejes principales: el patrimonio sensible procedente de hechos trágicos y su conservación preventiva en una exposición temporal itinerante. Todo ello abordado desde una filosofía de sostenibilidad social, económica y medioambiental. Conocer en profundidad las colecciones de objetos sensibles, tanto por su significancia como por sus materiales constitutivos, requiere de una reflexión previa para la construcción de criterios de planificación y métodos de ejecución, acordes también con los nuevos avances en conservación preventiva y consideraciones generales del tratamiento del patrimonio cultural, como es la perspectiva holística en su relación al concepto de sostenibilidad. Este artículo tiene el objetivo de presentar el avance del trabajo de investigación, especialmente en sus últimas fases en las que está prevista la elaboración y diseño de un *software* informático para interconectar a todos los agentes involucrados en la manipulación de las colecciones de la memoria. Especialmente las comunidades y museos a las que pertenecen los objetos tendrán participación activa en este método para recoger la información y prevenir riesgos en su tránsito.

Por tanto, en primer lugar, se pretende detectar cuáles son las preguntas a responder y analizar su resultado para conseguir que en los ciclos de vida expositivos se identifiquen los factores potenciales de riesgo. En segundo lugar, y con la información anterior, se pretende utilizar las tecnologías

digitales para conseguir mejorar los procesos de comunicación, recopilar sistemáticamente y de manera normalizada la información necesaria y poder visualizar y prevenir situaciones de riesgo. Las herramientas digitales e internet nos ayudan a conectar sin limitación geográfica a todos los agentes que participan en el ciclo de una exposición temporal.

Palabras clave: Conservación preventiva, colecciones, registro, tránsito, holismo, manipulación, transporte, sostenibilidad, *software* gestión de riesgos, significancia.

Abstract: The research project «Preventive conservation and the identification of risks in memory collections. Sustainable Strategies and Digital Technology» is structured around two main axes: sensitive heritage from tragic events and its preventive conservation in a traveling temporary exhibition, and all of this approached from a philosophy of social, economic and environmental sustainability. Knowing in depth the collections of sensitive objects, both for their significance and for their constituent materials, requires prior reflection for the construction of planning criteria and execution methods, also in accordance with the new advances in preventive conservation and general treatment considerations of cultural heritage, such as the holistic perspective in its relation to the concept of sustainability. This article aims to present the progress of the research work, especially in its last phases in which the development and design of computer software is planned to interconnect all the agents involved in the manipulation of memory collections. Especially the communities and museums to which the objects belong will have an active participation in this method to collect information and prevent risks in transit.

Therefore, in the first place, it is intended to detect which are the questions to be answered and analyze their results in order to ensure that potential risk factors are identified in the exhibition life cycles. Secondly, and with the above information, it is intended to use digital technologies to improve communication processes, collect the necessary information systematically and in a standardized manner and be able to visualize and prevent risk situations. Digital tools and the internet help us to connect, without geographical limitation, all the agents that participate in the cycle of a temporary exhibition.

Keywords: Preventive conservation, collections, registration, transit, holism, handling, transport, sustainability, risk management software, significance.



Figura 1. Vagón del Museo Estatal de Auschwitz-Birkenau.
Fotografía: Ana Galán Pérez.

Introducción

La gestión de las colecciones en una exposición temporal sigue el orden de los procesos de gestión, organización y desarrollo de la misma. Sin embargo, es posible distinguir fases propias para aplicar un plan de conservación preventiva y gestión de riesgos. Si analizamos los factores que determinan cada fase, comprobaremos que las exposiciones temporales que itineran, especialmente las colecciones de la memoria, van a mostrar cambios y adaptaciones de una exposición temporal a otra, siendo necesario un análisis continuo y un planteamiento de prevención de riesgos adaptado a cada situación.

A la hora de dotarnos de herramientas, previamente hemos acudido al *Plan Nacional de Conservación Preventiva*, y el proyecto *EXPOTemp*. Asimismo, la conservación preventiva desde la gestión de riesgos la desarrollan instituciones como: CCI, ICCROM con una metodología basada en la norma internacional ISO 31000.

Ha sido preciso asimismo acudir al *Plan Nacional de Salvaguarda y Emergencias* porque engloba acciones y protocolos de causas sobrevenidas, como puede ser el caso.

Los objetivos del proyecto son identificar los factores potenciales de riesgo, predecir y prevenir la degradación, gestionar los objetos con las comunidades de origen y con la variedad de agentes.

Apoyándonos en los avances proporcionados por las fuentes descritas, el presente artículo ofrece un trabajo todavía en proceso, que consiste en trasladar una lista de verificación de indicadores de riesgo a una herramienta informática que genere un seguimiento de movimiento de las piezas de la exposición. Para ello, presentaremos en primer lugar la caracterización de las colecciones de patrimonio disonante, para continuar con las listas de verificación y la propuesta de herramienta, y finalizar con una serie de conclusiones.



Figura 2. Metodología y criterios de planificación. Fuente: Diogo Bernardes.

1. Contextualización: las colecciones de la memoria

Por sus características, la exposición *Auschwitz. Not Long Ago. Not Far Away*¹ es innovadora en contenido y planteamiento superando una serie de retos significativos. Desarrollada por el momento en dos continentes (Europa y América), con multiplicidad de agentes, colecciones y museos memoriales poco conocidos y en plena actualidad museológica sobre la necesidad de aplicar una filosofía de la sostenibilidad ecológica, social y económica, plantea los siguientes retos:

- El proyecto de la exposición: previsto en siete años de itinerancia por los cinco continentes.
- La variedad de instituciones y el punto de partida. Una cooperación de veintidós entidades público-privadas, muy diversas entre sí: museo estatal, sitio Histórico Estatal Patrimonio de la Humanidad, museos de remembranza y memorial judíos con patronato privado, archivos históricos con colección en sus fondos, fundaciones privadas, colecciones privadas de legado familiar, coleccionistas privados de Oświęcim.
- Heterogeneidad en la tipología de sus colecciones, en sus custodios y en la procedencia.



Figura 3. Pieza de tejido bicolor conservada sin utilizar, conservado y expuesto en vitrina del Pabellón de Polonia en el Museo Estatal de Auschwitz-Brikenau. Fotografía: Ana Galán Pérez.

Desde el punto de vista desde la Antropología, las colecciones de la memoria o del patrimonio disonante componen un legado cultural cuya conservación debe asegurar la defensa de los Derechos Humanos. La preservación de los testigos materiales ayuda a transmitir la memoria de las víctimas y a permitir un reconocimiento de los hechos para su compensación moral, ayudando a reforzar la sociedad actual.

¹ La Exposición *Auschwitz. No hace mucho, no muy lejos* se inauguró en Madrid, en la *Sala de Arte Canal* en Diciembre de 2017. A partir de este momento, ha viajado a Nueva York y a Kansas City, y ha sido galardonada con el premio *Europa Nostra 2020* en la categoría «Education. Training. Awareness». Su website: <https://auschwitz.net/>

Dichas colecciones, compuestas de variedad de materiales y fórmulas de elaboración, son derivadas de acontecimientos históricos que impactan de manera negativa en el rumbo de una comunidad y que anula o limita sus derechos humanos fundamentales (crimen bélico, crimen político, ataque terrorista, entre otros).

2. Fases de una exposición temporal itinerante y la identificación de riesgos

Conseguir que los procesos de prevención de riesgos tengan un carácter de sostenibilidad es alcanzar la eficiencia en términos de maximización de objetivos con el mínimo desgaste de recursos, y proteger tanto a la comunidad como al medio ambiente. Hablamos de la conservación verde o *green conservation*. Es decir, ello implica la sostenibilidad social y cultural (profesional, la comunidad local, la sociedad y los visitantes), además de la sostenibilidad económica (evitando los costes innecesarios) y finalmente la sostenibilidad medioambiental que pasa por la infraestructura, los edificios y los servicios, como puede ser el transporte y embalaje de colecciones y su exposición.

Por tanto, en primer lugar, se pretende detectar cuáles son las preguntas a responder y analizar su resultado para conseguir que en los ciclos de vida expositivos se identifiquen los factores potenciales de riesgo relacionados con los objetos en sí mismos, con las comunidades de origen, con los agentes de procedencia y de llegada, y finalmente con los procesos de manipulación de las colecciones.

Una exposición temporal itinerante es más compleja porque supone un movimiento cíclico y repetitivo de las colecciones mientras dura el proyecto. A su vez se divide en cuatro fases y siete momentos o hitos, con dos pasos que suman variables que potencialmente pueden dañar el objeto:

- Fase I. Preparación. Paso 1.
- Fase II. Operaciones. Pasos 2, 3 y 4.
- Fase III. Exposición. Paso 5.
- Fase IV. Operaciones. Pasos 6 y 7.

Y así se cierra y comienza de nuevo un nuevo ciclo en el que la responsabilidad de aplicar los estándares depende de los gestores en cada fase.

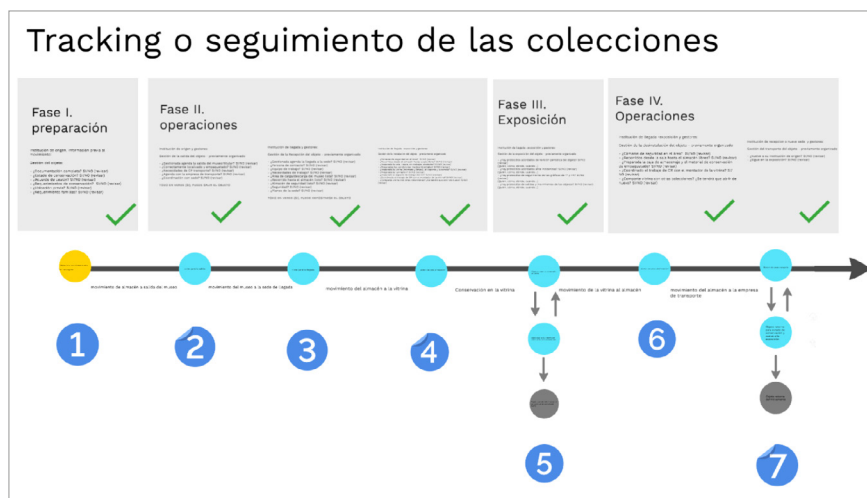


Figura 4. Tracking o seguimiento de las colecciones para la gestión de riesgos. Cuatro fases, siete hitos. Fuente: Ana Galán Pérez.

Para conocer los indicadores de riesgo de las colecciones, el proyecto se apoya en un sistema de listas de verificación de las cuatro fases del movimiento. Cada respuesta aportaría un sistema de colores que visualmente nos indicaría el estado de la situación de gestión, conservación y comunicación entre los agentes implicados.

Cuando la lista de verificación tiene todas las respuestas aparece en color verde. Cuando la lista de verificación tiene alguna necesidad que solventar aparece en color naranja. Cuando hay algún aspecto sin resolver el color es rojo e indica un posible riesgo.

Lista de verificación de la Fase I. Preparación

La fase I consiste en preparar las colecciones. Para que el objeto esté listo y pueda manipularse y moverse con todas las garantías, la institución, organismo o propietario ha recopilado la información necesaria.

Paso 1. Conocer para preparar la colección

El Paso 1. Consistiría en agrupar toda la información relevante que va a condicionar algún momento de las 4 fases o 7 pasos. Siguiendo una lista de verificación, nos preguntaríamos:

- ¿Está resuelto el acuerdo de cesión con el propietario/la institución? SÍ/NO (revisar).
- ¿Contamos con la documentación completa de las colecciones, sobre su significancia y materialidad? SÍ/NO (revisar).
- ¿Es adecuado el estado de conservación? SÍ/NO (revisar).
- ¿Hay requerimientos de conservación? SÍ/NO (revisar).
- ¿Se conoce la ubicación previa, por ejemplo, en un almacén, en una exposición, en archivo, en una caja de embalaje familiar? SÍ/NO (revisar).
- ¿Existe algún requerimiento por parte de las familias propietarias? SÍ/NO (revisar).
- ¿Cuenta con una póliza de seguro específico? ¿Se conoce el valor económico para poder emitir la póliza de seguro? SÍ/NO (revisar).
- ¿Hay requerimientos de tiempo y forma para el registro del movimiento, en caso de que sea una institución? SÍ/NO (revisar).

Lista de verificación en la Fase II. Operaciones

Comprende la fase II de operaciones todo aquello que afecta al objeto desde su lugar de origen hasta que llega a la institución de llegada y que aloja la exposición.

Paso 2. Dependiente de la institución de origen y gestores

El objetivo de este paso es asegurarnos que el objeto está listo para la salida de su institución. Por tanto, la lista de verificación tendría como objetivo chequear la gestión de la salida del objeto, previamente organizado en el paso 1.

La lista de verificación:

- ¿Está gestionada la agenda para la salida del museo/titular? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Está correctamente localizado y empaquetado? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Hay necesidades de conservación preventiva en el transporte? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Está programado el movimiento con la empresa de transporte? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Hay requerimientos específicos de la aduana correspondiente? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Se requieren permisos de exportación temporal del país de origen? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Se requiere solicitar al país de recepción el certificado de no confiscación? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Se ha programado una coordinación de la llegada con la sede receptora? SÍ/NO (revisar).
- TODO EN VERDE (SÍ), PUEDE SALIR EL OBJETO.

Paso 3. Dependiente de la institución de llegada y gestores: Asegurarnos que el objeto está listo para la llegada y su recepción

El objetivo es asegurarnos la correcta gestión de la recepción del objeto, previamente organizada en el paso 2, otorgando la importancia que tiene la movilidad de las colecciones en el interior de la institución, los recorridos establecidos y principalmente el estado del almacén y su mobiliario.

La lista de verificación:

- ¿Está programada adecuadamente la llegada a la sede? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Se ha asignado una persona de contacto? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Se ha asignado un equipo de trabajo? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Se han establecido las necesidades de trabajo? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Se ha asignado un correo de la institución? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Está el área de carga/descarga del museo lista? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Está el recorrido hasta el almacén listo? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Está el almacén de seguridad listo? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Hay seguridad? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Hay planos de la sede? SÍ/NO (revisar).
- TODO EN VERDE (SÍ), PUEDE DEPOSITARSE EL OBJETO.

En la perspectiva holística en la que los agentes implicados son múltiples, las responsabilidades son también múltiples, y por ello pueden hacerse cargo de proporcionar la información o de subirla a un posible sistema de gestión de colecciones y de riesgos, para que todos puedan compartirla y conocerla. Hablamos principalmente de las sedes de origen y llegada, los propietarios, y las empresas que de alguna manera u otra van a manipular las piezas. La gestión del sistema informático recae en la empresa que coordina y gestiona la exposición temporal itinerante, determinando cómo se comparte la información.

Paso 4. Dependiente de la institución de llegada y gestores: Asegurarnos que el objeto está listo para su instalación

La misión recae en la institución de llegada, en el montaje de la exposición y en los gestores, para llevar a cabo la instalación del objeto, previamente organizada en el paso 3. Además, hay que tener en cuenta en la programación las tareas de coordinación con el montaje de la propia museografía y el diseñador de la exposición.

La lista de verificación:

- ¿Se ha coordinado el trabajo de CR con el montador de la vitrina? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Comparte vitrina con otras colecciones? ¿Se tendrá que abrir de nuevo? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Hay cámaras de seguridad en el área? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Hay recorridos desde el almacén hasta las salas libres? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Está preparada la sala, adecuada y específica para la gestión de las colecciones? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Están preparadas las condiciones medioambientales? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Está preparada la vitrina (montada y limpia), el soporte y la cartela? SÍ/NO (revisar)
 - ¿Está preparada la iluminación? SÍ/NO (revisar).
 - ¿Está preparado el espacio de trabajo del CR? SÍ/NO (revisar).
- TODO EN VERDE (SÍ), PUEDE INSTALARSE EL OBJETO.

Lista de verificación de la Fase III. Una vez abierta la exposición

Uno de los rasgos de las colecciones de la memoria, dada su significancia, es su movilidad en la exposición. Por ello, mientras que otra tipología de exposiciones permanece estática en los meses de su exhibición, en el caso que nos ocupa implica un dinamismo por su valor social y religioso. En el paso 5 referente a la exposición, una vez instalada, las comunidades intervienen en su requerimiento y los gestores de la institución de llegada así como los gestores del proyecto, deben de haber asegurado los siguientes pasos en la lista de verificación.

- ¿Hay protocolos acordados de revisión periódica del objeto? SÍ/NO (revisar).
- ¿Hay protocolos acordados ante incidencias? SÍ/NO (revisar).
- ¿Hay protocolos de seguimiento de los gráficos de T^a y HR? SÍ/NO (revisar).
- ¿Hay protocolos de salidas y movimientos de los objetos? SÍ/NO (revisar).

De nuevo, siguiendo una perspectiva holística, cada uno de los protocolos respondería a las preguntas: quién, cómo, dónde, cuándo.

La conservación preventiva y la gestión de riesgos deben apoyarse en una serie de protocolos acordados previamente con la institución de recepción. En caso de que dicha institución

no los tenga, hay que construirlos y acordar cómo serán los procedimientos para la conservación de las colecciones una vez instaladas, puesto que las incidencias van a ocurrir y hay que saber cómo actuar.

La variable del paso 5 implica que las comunidades soliciten al museo o institución, y este a su vez al propietario, qué piezas que ya están expuestas en su vitrina, salgan para ser utilizadas en ceremonias o eventos relevantes para dicha comunidad.

Puede darse el caso de que, una vez instalada la pieza y por motivación variada, la pieza sea solicitada por su propietario, y que por tanto el paso 5 sea su retorno definitivo, finalizando el seguimiento en el ciclo de gestión de riesgos de la exposición temporal previsto.

Lista de verificación de la Fase IV. Operaciones en sentido inverso para cerrar el ciclo

Si bien supone un trabajo a la inversa, hay nuevas variables que han podido tener lugar mientras la exposición estaba en curso: nuevos requerimientos aduaneros, cambios en la distribución del edificio que complican el desmontaje, o nuevos requerimientos del propietario, entre otros.

La fase IV se programa mientras la exposición está todavía en marcha, y comprende todos los ajustes, de nuevo, de coordinación entre los propietarios, la institución de recepción y las empresas de desinstalación y transporte. Supone que dispondremos de la misma sala de almacenaje para proceder al embalaje, aunque no siempre, y que algunas colecciones requerirán la figura del correo.

Paso 6. Movimiento de la pieza de la vitrina al almacén

El paso 6 supone la gestión de la desinstalación del objeto, previamente organizado en la fase 5, e incluso devuelto a su propietario si ha sido el caso antes del cierre de la exposición.

La lista de verificación es similar a la de fase de operaciones-instalación:

- ¿Hay una instalación de cámaras de seguridad en el área? SÍ/NO (revisar).
- ¿Están los recorridos desde la sala hasta el almacén libres? SÍ/NO (revisar).
- ¿Está preparada la caja de almacenaje y el material de conservación de empaquetado? SÍ/NO (revisar).
- ¿Se ha coordinado el trabajo de CR con el montador de la vitrina? SÍ/NO (revisar).
- ¿Comparte vitrina con otras colecciones? ¿Se tendrá que abrir de nuevo? SÍ/NO (revisar).

Paso 7. Movimiento de la pieza del almacén a la empresa de transporte, y al siguiente destino

En esta fase, lo primordial supondrá conocer si la pieza continúa su recorrido con las demás colecciones en la siguiente sede, pues se trata de una exposición temporal itinerante, o si retorna y/o se sustituye por otra pieza.

Por tanto, la lista de verificación dependerá de los nuevos propietarios también y de las sedes de emisión o de recepción:

- ¿Vuelve a su institución de origen? SÍ/NO (revisar).
- ¿Sigues en la exposición? SÍ/NO (revisar).

En este caso, al comenzar de nuevo el ciclo y el rastreado, hay que conocer de dónde procede dicha pieza: de la sede anterior, producto del intercambio con otra pieza, o si se incluye como pieza nueva en la exposición.

En resumen, cuatro fases y siete pasos que nos indican: Paso 1. Pieza lista para el movimiento. Paso 2. Pieza lista para la salida-transporte. Paso 3. Pieza lista para la llegada. Paso 4. Pieza lista para la instalación. Paso 5. Pieza expuesta y conservada en vitrina. Paso 6. Pieza lista para la desinstalación. Paso 7. Pieza lista para su salida-transporte.

3. La aplicación de la tecnología: el sistema de seguimiento de colecciones

Las herramientas informáticas nos facilitan la toma de datos y su interconexión para que los diversos agentes se vean reflejados y conozcan los protocolos y los indicadores, así como los momentos en los que el riesgo es mayor.

Tanto para la gestión de colecciones como para los propietarios de las colecciones, la sede de la exposición y el equipo de la exposición, el acceso a una herramienta informática virtual puede ayudar a mejorar la toma de decisiones.

Contamos con la base del *software* realizado en 2017 y que ha sido presentado en diversos soportes científicos². Se trataría de analizar las carencias y proponer un sistema de uso a lo largo de toda la exposición para la prevención de riesgos.

El *software* para el seguimiento de colecciones y verificación de pasos

La caracterización exhaustiva de los procesos que ocurren con los préstamos y transferencia de objetos pertenecientes a colecciones de memoria es uno de los primeros pasos hacia el desarrollo de un *software* informático que permita el acceso, control y seguimiento integral de cada objeto, por parte de las instituciones intervinientes o responsables. Considerando las diferentes fases y tareas de gestión y traslado del objeto y entendiendo los potenciales factores de riesgo a lo largo del ciclo de vida de la exposición, se define la información que se debe aportar y acreditar con documentación en cada proceso.

El diseño del *software* se basa en un sistema de lenguaje de programación simple basado en JavaScript Object Notation (JSON), utilizando texto en el formato atributo-valor. En cada campo referente a los distintos pasos expuestos en el apartado 2, se le asigna información textual, y si en ciertos casos solo se debe contestar con atributos simples de «sí / no», en otros casos se requiere información documental para acreditar o explicar la respuesta «sí / no» (Figura 3).

El *software* también sirve como interfaz a una base de datos remota donde se almacenan y catalogan datos e información, permitiendo el seguimiento y control de la información de la transacción, así como la posibilidad de conectar esta información con datos de los sensores de monitoreo de aspectos físicos de las obras.

² ¿Y después? Control y mantenimiento del Patrimonio Cultural, una opción sostenible, congreso de Conservación Preventiva coordinado por el Grupo Español del GE-IIC en Vitoria, 2019.



Figura 5. Interfaz pública del software. Fuente: Diogo Bernardes.

Sensores

La gran complejidad de los procesos que involucran frecuentes transferencias de objetos, y que, además, pasan por varios intervinientes, requiere el desarrollo de un sistema que ayude a monitorear ciertos factores que pueden constituir un mayor potencial de riesgo. En este sentido, se propone el diseño de un sistema de monitoreo capaz de recolectar información, instruyéndose de manera autónoma a través de ellas; envío de alertas; y predicción de cambios y variaciones en las condiciones ambientales, basados en *machine learning*, en el aprendizaje automático y en la inteligencia artificial. La idealización del dispositivo debe centrar el rastreo en factores considerados estratégicos para asegurar la conservación de los objetos, ya que los principales agentes responsables de acelerar la degradación de los diversos materiales que constituyen los bienes culturales son relativamente conocidos.

Los sensores incluidos en primera instancia deben ser los encargados de monitorear parámetros de humedad relativa, temperatura, exposición a la luz, vibraciones y un localizador de posición (Figura 4). Para construir el sistema, se utilizan soluciones comerciales de *hardware* y *software* de código abierto con un consumo de energía reducido y un bajo coste. Así, el sistema de monitoreo y predicción se establece en la adquisición de datos por parte de los sensores, los cuales se comunican con la placa del microcontrolador y, a su vez, envían la información a la base de datos remota de la computadora, implementando el protocolo de comunicación. Esta comunicación se establece mediante un módulo de comunicación inalámbrico responsable de la transferencia de datos en tiempo real al dispositivo controlador / coordinador.

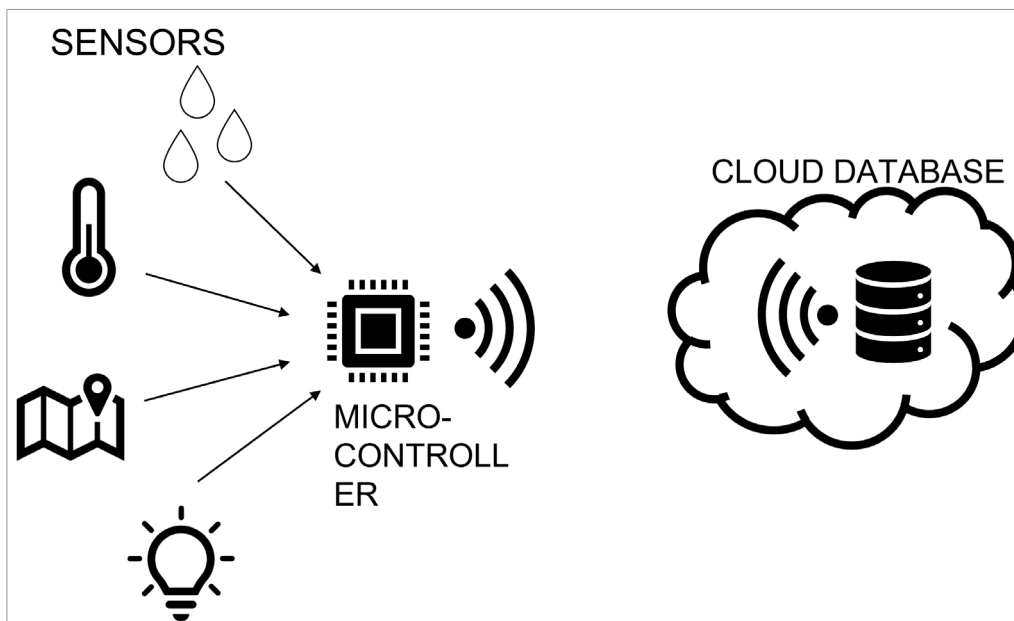


Figura 6. Funcionamiento de los sensores. Fuente: Andre Perrotta.

4. Conclusiones

Para evitar riesgos en la gestión de las colecciones se necesita implicar a todos los agentes y mejorar en la comunicación interna y externa. Se trata de un tipo de bienes culturales con un gran peso de la significancia y una gran variedad de materiales constitutivos.

Para ello, hemos querido destacar como herramienta las listas de verificación, pues se trata de una fórmula sencilla para controlar los siete pasos y cuatro fases del ciclo por parte de las instituciones implicadas y el personal responsable.

Subrayamos los códigos de colores, una manera visual que resalta la importancia de tener todas las fases en verde y prevenir posibles riesgos, o de saber si no se resuelve dónde hay un riesgo potencial.

Asimismo, la informatización de estos procesos en el *tracking* o seguimiento de los bienes culturales en el ciclo de una exposición temporal facilita el trabajo al registrador y al gestor de colecciones, de manera que la gestión de riesgos informatizada nos ayuda en todo el proyecto expositivo a mantener una dinámica sostenible: social-cultural, medioambiental y económica.

Bibliografía

- AA.VV. (2011): «Dossier Monográfico. Museos y sostenibilidad». *Museos.es*, 7-8. Disponible en: <https://www.culturaydeporte.gob.es/cultura/areas/museos/mc/mes/revista-n-7-8-2011-2012/dossiermonografico.html> [Consulta: 30 de marzo de 2021].
- BIEDERMANN, A., FERREIRO L., GALÁN, A. (2018): «Preventive conservation at the exhibition “Auschwitz. Not Long Ago. Not Far Away”. Memoria, Memory, History, Education». *Auschwitz-Birkenau State Museum Magazine*, 13.
- BIEDERMANN, A., FERREIRO L., GALÁN, A. (2019): «Auschwitz —una exposición itinerante— diseño, gestión de colecciones y de la información». En Foradada Baldellou, C. y Irala-Hortal, P. (Eds.),

Re_Visiones sobre Arte, Patrimonio y Tecnología en la Era Digital. Aragón: IAACC Pablo Serrano, Gobierno de Aragón.

- BROKERHOF, A., MEUL, V., MICHALSKI, S., PERDERSOLI, J. L. (2007): «Advancing research in risk management application to cultural property». *ICCROM Newsletter*, 33, 10-11.
- Canadian Conservation Institute (s.f.): *Basic requirements of preventive conservation*. Disponible en: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/preventive-conservation/guidelines-collections/basic-requirements-preventive-conservation.html#a2> [Consulta 30 de marzo de 2021].
- CARRASCO GARRIDO, R. (2013): «Documentar el patrimonio: cuando la información se transforma en un recurso sostenible». *Museos.es*, 120-125. Disponible en: <http://www.culturaydeporte.gob.es/dam/jcr:152134ba-0c95-4589-9ef1-00aca6c18a13/documentar-patrimonio.pdf> [Consulta: 30 de marzo de 2021].
- Council Of Europe (2018): *Strategy 21, Factsheets in Preventive Conservation*. Disponible en: <https://rm.coe.int/strategy-21-preventive-conservation-of-cultural-heritage-in-less-than-16807b-fbb9> [Consulta: 30 de marzo de 2021].
- Cultural Heritage Agency (s.f.): *Assessing Museum Collections. Collection valuation in six steps*. Disponible en: <https://cultureelerfgoed.nl/sites/default/files/publications/assessing-museum-collections.pdf> [Consulta: 30 de marzo de 2021].
- CULUBRET WORMS, B., HERNÁNDEZ AZCUTIA, M., et al. (2008): *Guía para un plan de protección de colecciones ante emergencias*. Madrid: Ministerio de Educación y Cultura. Disponible en: http://www.mcu.es/museos/docs/MC/CERES/Guia_plan_proteccion_colecciones.pdf [Consulta: 30 de marzo de 2021].
- FERNANDEZ BUEY, F. (2011): *Sostenibilidad: palabra y concepto*. Disponible en: <http://www.culturaydeporte.gob.es/dam/jcr:c0de2191-6add-40a9-84c3-85c2f63991a9/sostenibilidad-palabra-concepto.pdf> [Consulta: 30 de marzo de 2021].
- DE GUICHEN, G. (2013): «Conservación preventiva. ¿En qué punto nos encontramos en 2013?». *Patrimonio Cultural de España*, 7, pp. 15-23.
- DE TAPOL, B. (2013): «La necesaria adaptación de la conservación preventiva al concepto de sostenibilidad con especial atención a las herramientas de gestión». *Patrimonio Cultural de España*, 7, pp. 81-89.
- DE TAPOL, B. y CAMPUZANO, M. (2010): *Software para la recogida y utilización de datos en conservación preventiva: Un camino todavía por hacer*. París: ARAAFU.
- FERNÁNDEZ, Ch., ARECHAVALA, F., MUÑOZ-CAMPOS, P., TAPOL, B. (2008): *Conservación preventiva y procedimientos en Exposiciones Temporales*. Madrid: Grupo Español de IIC y Fundación Duques de Soria. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/0B6u9FpQfrTwtcFVFLTJLeDNsYUE/view> [Consulta: 30 de marzo de 2021].
- FERNÁNDEZ, C., LEVENFELD, C., MONEREO, A. (2013): «La evaluación de riesgos en el patrimonio. Del diagnóstico al pronóstico». *Patrimonio Cultural de España*, 7, pp. 57-69.
- FINKBEINER, M., SCHAU, E. M., LEHMANN, A., TRAVERSO, M. (2010): «Towards life cycle sustainability assessment». *Sustainability*, 2 (10), pp. 3309-3322. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/2/10/3309> [Consulta: 30 de marzo de 2021].
- GALÁN-PEREZ, A. (2019): «Conserving Testaments to Human Survival». En: *Auschwitz. Not long ago, Not far away*. Nueva York: Abbeville Press.
- GALÁN-PEREZ, A. (2018): «La gestión de la colección de colecciones de Auschwitz: sensibilización, código deontológico y aplicación técnica». En: *Auschwitz. Not long ago, Not far away*. Madrid: Palacios y Museos.

- GALÁN-PÉREZ, A. (2018): «Conocer, conservar y comunicar el patrimonio de hechos traumáticos». En: *VI Congreso. ¿Y después? Control y mantenimiento del patrimonio cultural, una opción sostenible*. Vitoria, 20-22 de septiembre de 2018. Ge-IIC. Disponible en: <https://www.congreso2018.ge-iic.com/es/programa-preliminar/actas/> [Consulta: 30 de marzo de 2021].
- HERRÁEZ, J. A., DURÁN, D., PASTOR, M. J. (Eds.) (2019): *Guía para la elaboración e implantación de Planes de Conservación preventiva*. Madrid: Instituto del Patrimonio Cultural de España, Ministerio de Cultura y Deporte. Disponible en: https://www.libreria.culturaydeporte.gob.es/libro/guia-para-la-elaboracion-e-implantacion-de-planos-de-conservacion-preventiva_4127/ [Consulta: 30 de marzo de 2021].
- Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) Y Museo Del Prado (2017): *EXPOTemp Herramientas para la implantación de la conservación preventiva en las exposiciones temporales*. Recurso informático disponible en: <https://www.museodelprado.es/actualidad/multimedia/conservacion-preventiva-en-exposiciones/d71272eb-c109-4b9c-960f-b4c37a8c8147> [Consulta: 25 de marzo de 2021].
- ISO (2006): ISO 14040 International Standard. En: *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. Ginebra: Switzerland International Organisation. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en> [Consulta: 25 de marzo de 2021].
- KLOEPFFER, W. (2008): «Life cycle sustainability assessment of products (with comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95)». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13 (2), pp. 89-95.
- MICHALSKI, S. (1994): «Sharing responsibility for conservation decisions». En: *Durability and change: the science, responsibility, and cost of sustaining cultural heritage. Report of the Dablem workshop*, 6-11 de diciembre de 1992.
- MICHALSKI, S. (2004): «Care and preservation of collections». En: *Running a Museum: A Practical Handbook*. Paris: P. Boylan, International Council of Museums & UNESCO.
- MICHALSKI, S. (2009): «Los niveles ABC para la evaluación de riesgos en las colecciones museísticas e información para interpretar los riesgos derivados de una incorrecta humedad relativa y temperatura». En: *II Seminario del Grupo de Conservación Preventiva*.
- NEGRI, M. (2011): «La aparición del concepto de sostenibilidad en el ámbito de los museos de Europa. Posibles directrices para la evolución de los museos como organizaciones sostenibles». *Museos.es. Revista de la Subdirección General de Museos. Museos y Sostenibilidad*, 34-43.
- Ministerio de Cultura y Deporte (2013): *Plan Nacional de Conservación preventiva*, [Vídeo online]. Disponible en: <https://www.youtube.com/user/canalmcu/search?query=Plan+nacional+conservaci%C3%B3n> [Consulta: 25 de marzo de 2021].
- VIEIRA, E. (2015): *Actas das IX Jornadas da Arte e Ciência UCP / V Jornadas da ARP – A prática da conservação preventiva. Homenagem a Luís Elias Casanovas*. Porto, Portugal: CITAR.

El cambio de paradigma de la gestión de visitantes en un sitio patrimonial tras el COVID-19: el Monasterio Santa María la Real, Aguilar de Campoo

The paradigm shift of visitor management in a heritage site after COVID19: the Santa María la Real Monastery, Aguilar de Campoo

Víctor Álvarez Gutiérrez

Fundación Santa María la Real, Madrid (Madrid)
vmalvarez@santamarialareal.org

Daniel Basulto García-Risco*

Fundación Santa María la Real, Aguilar de Campoo (Palencia)
dbasulto@santamarialareal.org

Jose Carlos García García

Fundación Santa María la Real, Valladolid (Valladolid)
jcgarcia@santamarialareal.org

Resumen: Afrontar el reto de la gestión del patrimonio cultural es complejo, hay que valorar la adecuada explotación de los recursos, preservar y mantener las piezas, equilibrar el balance económico, analizar el estado de conservación del lugar, y además, aportar una experiencia cultural al visitante. Pero en los tiempos que corren, nadie cuestiona que la necesidad imperativa de una pandemia replantea estos condicionantes, situando el foco en la seguridad de las personas. La Fundación Santa María la Real ha participado en las «Subvenciones destinadas a la modernización, innovación y digitalización en el sector del patrimonio cultural para adaptarse a la situación creada por el COVID-19» promovidas por la Consejería de cultura y turismo de la Junta de Castilla y León para afrontar este reto tecnológico.

Es por ello que el objetivo del proyecto es combinar tres factores, el aforo, la seguridad de la información y la conservación preventiva. En primer término, la gestión del control de aforos analiza la cantidad de visitantes por zonas, realizando un procesamiento autónomo de la información que generan cámaras de conteo. El segundo factor es la tecnología *blockchain*, que permite certificar en tiempo real todos los datos e indicadores que se generen, ya sean de aforos, de indicadores de riesgo o alarmas. Por último, el análisis de las variables ambientales mediante sensores que estudian la calidad de la conservación de las piezas y espacios, en este caso instalada en el bien antes de la pandemia.

Palabras clave: Turismo cultural, conservación patrimonio, gestión aforos, covid-19, *blockchain*.

Abstract: Facing the challenge of cultural heritage management is complex, it is necessary to assess the proper exploitation of resources, preserve and maintain the pieces, balance the economic balance, analyze the state of conservation of the place, and also provide a cultural experience to the visitor. But in these times, no one questions that the imperative need for a pandemic rethinks these conditions, placing the focus on the safety of people. The Santa María la Real Foundation has participated in the «Subsidies aimed at modernization, innovation and digitization in the cultural heritage sector to adapt to the situation created by COVID-19» promoted by the Ministry of Culture and Tourism of the Board of Castilla y León to meet this technological challenge.

That is why the objective of the project is to combine three factors: capacity, information security and preventive conservation. First of all, capacity control management analyzes the number of visitors by zone, carrying out autonomous processing of the information generated by counting cameras. The second factor is blockchain technology, which allows real-time certification of all the data and indicators that are generated, whether they are gauging, risk indicators or alarms. Finally, the analysis of the environmental variables through sensors that study the quality of the conservation of the pieces and spaces, in this case installed in the property before the pandemic.

Keywords: cultural tourism, heritage conservation, capacity management, covid-19, blockchain.

El turismo cultural aportó en España durante el año 2018 más de 20.000 millones de euros, y más de doce millones de visitantes extranjeros visitaron nuestro país. La Organización Mundial del Turismo (OMT) vaticinó para 2020 una caída del turismo entre el 60 y el 80 % en comparación con 2019, lo que produjo un fuerte impacto económico y a nivel de empleo en un país como España, que presenta una notable dependencia de este sector. Por otro lado, tomando como referencia la anterior crisis, la inversión pública en Patrimonio Cultural cayó un 43%, según Protecturi. En esta nueva crisis causada por la pandemia se produce una situación similar, con una derivación de los presupuestos públicos principalmente a temas de índole sanitaria y social.

En este marco global, la Fundación Santa María La Real (FSMLR) se ha visto notablemente afectada por la actual situación de crisis originada por el Covid-19 en mayor o menor medida, pero especialmente significativo está siendo el impacto en el área de Turismo y Cultura. En especial dos actividades han sufrido dichas consecuencias:

- Centro expositivo ROM - Monasterio de Santa María la Real: a partir del 12 de marzo las instalaciones donde se desarrolla la actividad se cerraron para cumplir con lo establecido en la ORDEN SAN/295/2020, de 11 de marzo de la Junta de Castilla y León, por la que se adoptan medidas preventivas y recomendaciones en relación con el COVID-19 para toda la población y el territorio de la Comunidad de Castilla y León. El centro permaneció cerrado hasta mediados del mes de julio en cumplimiento del Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo, por el que se declara el estado de alarma para la gestión de la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19, que expresamente suspendía la apertura del establecimiento en su artículo 10.3 y en el anexo al Real Decreto.
- Conservación e intervención del Patrimonio: durante el estado de alarma el cierre de monumentos, museos, archivos y bibliotecas por el artículo 10 del Real Decreto 463/2020, impidió el correcto funcionamiento de la actividad, la suspensión de obras y la conservación preventiva.

En conjunto, durante el ejercicio de 2020 se produjo una disminución de ingresos directamente imputable a la crisis del Covid-19 cercana a un 30% del presupuesto del área de Turismo y Cultura de la FSMLR para ese año.

En este contexto de crisis originada por el Covid-19, se realizó un análisis de los retos y necesidades a los que tiene que enfrentarse de manera inmediata el sector del Patrimonio Cultural, del que nosotros formamos parte. La conclusión de este análisis fue la detección de la necesidad de implementar soluciones digitales para que los bienes patrimoniales que tienen un uso turístico-cultural puedan aportar una mayor seguridad sanitaria en las visitas, y por tanto sean capaces de generar la confianza necesaria en los usuarios, de modo que pueda lograrse una recuperación de la actividad turística que pueda paliar los graves efectos socio-económicos derivados de la pandemia.

La FSMLR ha desarrollado durante años el sistema MHS (*Monitoring Heritage System*) (Chiriac, 2017), un conjunto de herramientas tecnológicas que permite gestionar de manera inteligente cualquier espacio patrimonial, partiendo del principio de conservación preventiva, e integrando, mediante sucesivos desarrollos, la capacidad de controlar y analizar en tiempo real parámetros decisivos como los relacionados con la conservación preventiva, la seguridad o la eficiencia energética en los espacios patrimoniales: monumentos, museos, yacimientos, cascos históricos, etc... Sin embargo, aún no se habían desarrollado aplicaciones tecnológicas específicas para el uso turístico del Patrimonio.

Se hacía patente, en definitiva, la necesidad de un cambio de enfoque en el que debemos entender los espacios patrimoniales también como elementos capaces de atraer al turista cultural. La importancia de considerar de modo específico al Patrimonio Cultural en las estrategias de gestión turística nos lo muestran los resultados estadísticos. El último anuario de estadísticas culturales publicado indica que el 14,5% del total de viajes recreativos realizados por los españoles fueron iniciados principalmente por motivos culturales. Del mismo modo, más de doce millones de visitantes extranjeros llegaron a España atraídos por estos motivos. Debido a ambas cuestiones, la conservación de los bienes y su adecuada gestión turística, deben ir de la mano para lograr una recuperación de los destinos turístico-culturales y de la propia economía nacional en el escenario post-covid.

El escenario a corto plazo plantea, por tanto, una cuestión fundamental y es el de la seguridad en la visita. Se trata de la capacidad de los destinos de generar confianza y esta confianza se consigue, entre otras cosas, garantizando la seguridad del destino. Creemos que una forma de conseguirlo es implementar controles y datos de aforo automatizados a los lugares patrimoniales con uso turístico, de forma que tanto sus gestores como los propios usuarios tengan la información necesaria para poder planificar su visita con seguridad, cumpliendo con los requisitos de distancia social y medidas sanitarias establecidas por los organismos competentes. Asimismo, es necesario también implementar en paralelo la aplicación de la tecnología *Blockchain* para la trazabilidad de los datos IoT de conservación y seguridad en los espacios patrimoniales que reciben visitas, de modo que los gestores de estos bienes puedan certificar ante los usuarios el cumplimiento de todas las normativas vigentes en cada momento para el control epidemiológico del Covid-19, al tiempo que también se traza el estado de conservación y mantenimiento.

Blockchain, o cadena de bloques, es un registro único, consensuado y distribuido en varios nodos de una red. *Blockchain* se puede explicar como un gigantesco libro de cuentas en el que los registros (los bloques) están enlazados y cifrados para proteger la seguridad y privacidad de las transacciones. Es, en otras palabras, una base de datos distribuida y segura (gracias al cifrado) que se puede aplicar a todo tipo de transacciones que no tienen por qué ser necesariamente económicas. En nuestro caso, hemos aplicado esta cadena de bloques para llevar a cabo una solución de trazabilidad sobre la información generada en un espacio patrimonial con uso turístico.

Ante este escenario, la FSMLR ve la oportunidad de innovar en su sistema de monitorización del patrimonio MHS, con el desarrollo de nuevos módulos para el control de aforos y flujos que

permitan la realización de visitas turísticas seguras, teniendo en cuenta también la conservación de los espacios patrimoniales.

La actual situación genera una mayor necesidad de eficiencia, seguridad e inteligencia en la gestión del turismo y el patrimonio, y es aquí donde se encuentran nuevos retos y situaciones para las que generar nuevos desarrollos y soluciones que impulsen la modernización del sector. El abordaje es, por un lado, tener como base los conocimientos y la experiencia adquiridos durante nuestros cuarenta años de experiencia y por otro la capacidad de innovación y creatividad para implementar en el sector del patrimonio aplicaciones tecnológicas novedosas, provenientes de ramas del conocimiento ajenas al patrimonio, pero que podemos adaptar a estos bienes. Ambas capacidades son determinantes para lograr el desarrollo de una solución sólida, sostenible en el tiempo y que abra paso a nuevos modelos de gestión de los destinos turístico-culturales guiados por criterios de seguridad, sostenibilidad y eficiencia.

Dentro del ámbito del turismo, es necesario aportar soluciones específicas para aquellos territorios que cuentan con un tipo de turismo eminentemente cultural, como es el caso de Castilla y León. La recuperación y mantenimiento del turismo cultural en estas regiones va a ser fundamental para poder superar la recesión vinculada al coronavirus. Y es dentro de este ámbito del turismo cultural donde cobra importancia el Patrimonio Cultural, pues este tipo de espacios, en su dimensión de recursos turísticos, se convierten en el principal elemento de atracción del turista. Por tanto, es imprescindible que se encuentren en un estado óptimo, puedan ser disfrutados en condiciones de seguridad y que su gestión sea sostenible.

Los objetivos planteados en este proyecto se vinculan a la gestión del turismo en espacios patrimoniales, concretamente los objetivos son:

- Realizar visitas seguras en bienes patrimoniales.
- Evitar aglomeraciones o situaciones de riesgo de contagio para los visitantes.
- Asegurar las medidas de distanciamiento social ante situaciones de pandemia.
- Trazar el control de aforo y flujos de un espacio patrimonial, a partir de la información que el sistema MHS recibe del *software* de análisis de imágenes en tiempo real de las cámaras de video-vigilancia.
- Asegurar que la información generada sobre aglomeraciones, cumplimiento del distanciamiento social o situaciones de riesgo de contagio para los visitantes en el destino turístico es válida y transparente.
- Proporcionar a los usuarios información veraz y transparente sobre el estado de conservación del destino turístico en tiempo real.
- Asegurar el estado de conservación de los bienes patrimoniales.
- Optimizar el uso y la gestión de los bienes patrimoniales.
- Mejorar la calidad y la experiencia de la visita.

En cuanto al alcance previsto para la consecución de los objetivos, se planifica la instalación y desarrollo de un sistema automatizado de control de aforos y aglomeraciones en tiempo real basado en algoritmos *Deep Learning* en un edificio piloto, que servirá de demostrador, además de permitir la configuración y validación del sistema desarrollado, para posteriormente poder ofrecer esta solución en el catálogo de servicios de nuestra entidad.

El edificio en cuestión es el Monasterio de Santa María la Real de Aguilar de Campoo, concretamente la zona destinada al centro expositivo ROM, establecimiento gestionado por la FSMLR que forma parte desde el año 2012, de la *Red de Museos de Castilla y León* con la categoría de colección museográfica.

Para realizar el desarrollo previsto y conseguir un sistema telemático de control de aforos y flujos que permita la gestión de las visitas de forma segura siguiendo las recomendaciones sanitarias al respecto, actuando de forma directa sobre paneles informativos o informando al personal responsable de aglomeraciones o situaciones de riesgo para los turistas, ha sido necesario implementar soluciones tecnológicas novedosas que han requerido de su adaptación concreta al ámbito del Patrimonio, para conseguir las siguientes funcionalidades:

- Medición del número de visitantes, en conjunto y por zonas o salas, de un espacio patrimonial en tiempo real.
- Control de aforo y flujos de visitantes, en conjunto y por zonas o salas, mediante paneles de información.
- Integración en plataforma digital (MHS) para gestión y visualización de eventos.
- Integración con módulo de conservación preventiva.

El sistema desarrollado para el control de aforos y flujos que permite la gestión de las visitas de forma segura siguiendo las recomendaciones sanitarias al respecto, actuando de forma directa sobre paneles informativos o informando al personal responsable de aglomeraciones o situaciones de riesgo para los turistas, se compone de los siguientes módulos:

- Captura de imágenes. La captura de imágenes se realiza mediante la instalación de una serie de videocámaras IP, colocadas estratégicamente para cubrir todo el espacio expositivo a controlar.
- Procesado de imágenes. Una vez que tenemos las imágenes, se envían a un equipo informático para que sean procesadas, y que es una tecnología no intrusiva de detección y monitorización de personas en tiempo real basada en el procesado de imágenes mediante algoritmos *Deep Learning*.
- Panel de información. Se trata de una pantalla que muestra información al público sobre el estado de ocupación de la siguiente sala o zona de la visita, con esta información se puede controlar el acceso a cada una de las zonas en función del aforo que presente o si presenta alguna aglomeración o no se estuviese respetando la distancia de seguridad entre los visitantes. El panel informativo está compuesto por un monitor y un mini-pc conectado al sistema.
- Plataforma MHS. La plataforma MHS, además de las funcionalidades propias de control y gestión de bienes patrimoniales ya desarrolladas, recopila la información generada mediante API, información referente a aforo en tiempo real, aforo por sectores, densidad de ocupación, alertas de aglomeraciones o de aforo superado, y la incorpora a su propia base de datos para ser accesible y mostrada a los usuarios del sistema.
- Panel de gestión, visor web. La plataforma MHS es accesible mediante navegador web o app móvil, posibilitando el acceso al panel de gestión y control del bien monitorizado, permitiendo el acceso al nuevo módulo de gestión de turismo, donde se muestra el aforo, la densidad de ocupación, alertas de aglomeraciones, histórico de datos, estadísticas de visitas, etc...

El desarrollo de esta solución digital apuesta por la conservación de los bienes y su adecuada gestión turística, logrando un impacto social positivo específicamente en estos ámbitos:

Beneficiamos a los gestores y/o propietarios de los recursos-bienes culturales y a la propia sociedad:

- Recuperación progresiva del número de turistas de los niveles previos a la crisis del covid-19, gestionados de una forma eficiente y sostenible.

- Incremento del desarrollo económico gracias a las aportaciones que harán esos turistas y a la generación de empleo en el sector, con una perspectiva integradora y entendiendo el patrimonio como un recurso territorial y del que los visitantes obtendrán además una experiencia vital y formativa.
- Creación de mejores sistemas de gestión e indicadores que ayuden a la toma de decisiones.
- Ahorro de costes en el mantenimiento de los bienes patrimoniales mediante la aplicación de la conservación preventiva.

También de manera directa se producen beneficios a los visitantes de estos recursos turístico-culturales:

- Generación de una mayor confianza a los usuarios de estos recursos al poder aportar una seguridad extra en las visitas.
- Disminución de las infecciones por coronavirus u otras enfermedades transmisibles.
- Asegurar la distancia social y por tanto generando un menor riesgo de contagio.
- Aumento de la satisfacción de los turistas al generar una experiencia de visita positiva.

Bibliografía

CHIRIAC, M. *et al.* (2017): «MHS, la herramienta de gestión patrimonial». En: *La Ciencia y el Arte VI. Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio*. Madrid: Ministerio de Cultura y Deporte.

Aplicación del lenguaje de programación R al análisis de datos microclimáticos para conservación preventiva

Application of the R programming language to the analysis of microclimatic data for preventive conservation

Irene Ureña Herradón¹

Héctor Bolívar Sanz^{2*}

Instituto del Patrimonio Cultural de España. Ministerio de Cultura y Deporte
hector.bolivar@cultura.gob.es

Resumen: El seguimiento y control de los parámetros ambientales es una de las estrategias de conservación preventiva más eficaces para detectar procesos de deterioro de forma precoz. El análisis microclimático de las condiciones de temperatura y humedad relativa es imprescindible en la elaboración de un Plan de Conservación Preventiva. Este análisis se suele realizar a partir de los datos recogidos por aparatos de medición continua (*data-loggers*) que generan gran cantidad de información. Sin embargo, el manejo de tal cantidad de datos puede resultar complicado y tedioso.

En este trabajo, se ha desarrollado un *script* en lenguaje R que permite realizar un análisis estadístico de esta información, facilitando el manejo de grandes volúmenes de datos y sistematizando su análisis. R es un lenguaje de programación libre, utilizado para todo tipo de análisis de datos que puede ser fácilmente adaptado al análisis de las condiciones microclimáticas. El empleo de esta herramienta permite obtener de forma rápida y sencilla un máximo rendimiento de la información recogida, facilitando la toma de decisiones y permitiendo una comparación sencilla y visual entre las condiciones microclimáticas de distintos bienes o localizaciones.

En el texto se describe el *script* creado y el documento que se genera al ejecutarlo. Este informe incluye los resultados del análisis en forma de texto, tablas y gráficos, con un formato estandarizado y fácilmente interpretable, siguiendo los criterios de análisis publicados por el Instituto del Patrimonio Cultural de España.

Palabras clave: Patrimonio cultural, automatización, *software* libre, temperatura, humedad relativa.

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-9977>.

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5898-643X>

Abstract: Monitoring and control of environmental parameters is one of the most effective preventive conservation strategies for early detection of deterioration processes. Microclimatic analysis of temperature and relative humidity conditions is essential for the elaboration of a Preventive Conservation Plan. This analysis is usually carried out using the data collected by continuous measurement devices (data-loggers) that generate a large amount of information. Nevertheless, data management can be complicated and tedious.

An R script has been developed that allows a complete statistical analysis of this information and facilitates the management of large amounts of data, systematizing their analysis. R is a free programming language, used for all types of data analyses, which can be easily adapted for the analysis of microclimatic conditions. This tool makes easy to obtain maximum performance for the information collected, supporting decision-making and allowing a simple and visual comparison between the microclimatic conditions of different cultural goods or locations.

This study describes the script created and the document generated. The report follows the criteria published by the Spanish Cultural Heritage Institute and includes text, tables and graphics in a standardized and easily interpretable structure.

Keywords: Cultural heritage, automatization, free software, temperature, relative humidity.

Introducción

Control de las condiciones ambientales en conservación preventiva

Desde hace unos años, la conservación preventiva es una herramienta de conservación muy efectiva, considerándose como la estrategia de conservación preferente del patrimonio cultural, ya que prioriza las acciones sobre el objeto o su entorno antes de que ocurran los procesos de alteración. El Plan Nacional de Conservación Preventiva la define como:

«un método de trabajo sistemático para identificar, evaluar, detectar y controlar los riesgos de deterioro de los objetos, colecciones, y por extensión cualquier bien cultural, con el fin de eliminar o minimizar dichos riesgos, actuando sobre el origen de los problemas, que generalmente se encuentra en los factores externos a los propios bienes culturales, evitando con ello su deterioro o pérdida y la necesidad de acometer drásticos y costosos tratamientos aplicados sobre los propios bienes» (IPCE, 2015).

De forma general, la conservación preventiva busca saber qué debemos evitar, cuándo debemos actuar y cómo debemos hacerlo. Su metodología se basa en el análisis, la corrección de riesgos y el control y la planificación de acciones, de tal forma que, controlando los riesgos de deterioro y actuando sobre los factores del medio y mediante programas de uso y gestión, se evite o minimice el deterioro de los bienes culturales, evitando una actuación directa sobre el propio patrimonio cultural (IPCE, 2015).

Todos los objetos, tanto los cotidianos como aquellos que consideramos patrimonio cultural, están sometidos a procesos de alteración que definimos como el conjunto de procesos de índole física, química, físico-química o biológica, frecuentemente simultáneos, que, actuando sobre el material, tienden a establecer el equilibrio entre los integrantes de éste y el medio ambiente en que se encuentran, lo que supone una pérdida de sus propiedades originales. El proceso de alteración

termina con la destrucción material del objeto y es irreversible. Estos factores pueden ser debidos a factores intrínsecos, es decir, inherentes al propio material o extrínsecos, derivados del medio o de fuentes externas. Entre los factores extrínsecos, los más importantes son las condiciones ambientales, que son aquellas condiciones presentes en el entorno del bien cultural, mueble o inmueble. Las condiciones ambientales afectan a todos los materiales, tanto a los sintéticos como a los inorgánicos, pero sobre todo a los orgánicos con alta higroscopicidad, materiales que históricamente han sido preferentes como base para la elaboración de todo tipo de objetos artísticos y culturales (Herráez *et al.*, 2014).

Se denominan factores microclimáticos al conjunto de temperatura y humedad relativa del entorno de un bien cultural. Ambas magnitudes se relacionan entre sí mediante una función inversa: al aumentar la temperatura, si el resto de condiciones se mantienen, disminuirá la humedad relativa. Ambos factores son responsables de alteraciones como deshidrataciones y cambios volumétricos, además de su capacidad de interacción con los contaminantes, aumentando la velocidad de las reacciones químicas. Poseen efectos severos sobre los bienes culturales y una gran influencia en la aparición y el control del biodeterioro (Valentín y García, 1999). Los máximos daños se producen al alcanzarse niveles extremos de temperatura o humedad relativa y por cambios bruscos u oscilaciones muy rápidas. Estos factores pueden ser fácilmente controlados mediante acciones de ventilación activa o pasiva. Los criterios de conservación más aceptados implican mantener los parámetros de HR y T en unos valores adecuados, tanto para las personas como para los objetos. En salas de exposición y almacenamiento se suelen considerar adecuados los valores de humedad relativa que se encuentren cercanos a 45-55%; no obstante también pueden ser valores adecuados aquellos entre 30% y 70%, siempre dependiendo de las condiciones ambientales locales y evitando valores por encima del 70% ya que pueden desencadenar el crecimiento de microorganismos y la aparición de biodeterioro. La temperatura se suele situar, por motivos de comodidad del público, entre los 18°C y 22°C, aunque el rango de valores aceptables se sitúa entre los 17°C y 27°C. Tanto para la temperatura como para la humedad relativa, deben evitarse las fluctuaciones diarias que sean mayores del 20% de humedad relativa o de 2-5°C de temperatura (IPCE, 2009). Siempre se ha de tener en cuenta que las condiciones microclimáticas a alcanzar se han de adecuar a la naturaleza de las colecciones, a su estado de conservación y a las condiciones habituales de los objetos (Herráez *et al.*, 2014).

Información obtenida a partir de *data-loggers*

Las herramientas de seguimiento de las condiciones ambientales son fundamentales para proporcionar datos objetivos que permitan evaluar los parámetros microclimáticos que interaccionan con el patrimonio. Este análisis es necesario en la elaboración de un plan de conservación preventiva, tanto en la fase de diagnóstico como posteriormente en el control de tales condiciones para comprobar y verificar el correcto funcionamiento del plan. Para realizar estas mediciones continuas de humedad relativa y temperatura, se suelen emplear registradores de datos automáticos, bien autónomos y programables (*data-loggers*) (Figura 1) como incorporados dentro de un sistema inalámbrico (*radio-loggers*).

El periodo de registro de datos debe ser lo suficientemente amplio para asegurar la representatividad de la información obtenida y disponer de una serie temporal que permita medir las condiciones en momentos o situacio-



Figura 1. *Data-logger* marca Testo modelo 174H con cable de conexión para la descarga de datos. Fotografía: Héctor Bolívar Sanz.

nes distintas. En las latitudes en las que se encuentra España, el periodo mínimo de medición para una sala o un inmueble debe abarcar al menos un año, ya que esto permite caracterizar los cuatro periodos estacionales. No obstante, en determinados ambientes muy estables, el periodo de medición puede ser mucho más reducido, por ejemplo en una sala climatizada o en el interior de una vitrina. La frecuencia de registro debe determinarse según las necesidades del estudio, pero suele ser muy útil tomar los datos con una frecuencia horaria, de forma que dentro de cada día se registren los valores mínimos y máximos (Herráez *et al.*, 2014).

El análisis de esta información debe describirse estadísticamente mediante el cálculo de la media, mediana, desviación estándar, máximo absoluto y mínimo absoluto y posteriormente deben realizarse análisis referentes a periodos de tiempo menores, por ejemplo según meses, semanas o periodos diarios (Herráez *et al.*, 2014). La mayoría de estos parámetros son sencillos de calcular mediante herramientas como hojas de cálculo y similares, pero al aumentar el grado de detalle temporal aumenta el número de repeticiones del análisis. Por ejemplo, para calcular la oscilación absoluta mensual de un determinado año se han de realizar doce operaciones, una por cada mes, no obstante, si se desea aumentar la precisión y calcular la oscilación absoluta diaria, se necesitarían 365 operaciones. Otros cálculos, como la oscilación horaria, requieren el manejo de los datos horarios de todo un año, lo que implica realizar 8760 operaciones por cada año. En muchos casos, el análisis estadístico de las condiciones microclimáticas en las instituciones que las monitorizan implica numerosos cálculos de muchos sensores climáticos, multiplicando la carga de trabajo de trabajadores que muchas veces no disponen del suficiente tiempo para realizar estos análisis en profundidad. Esto conlleva a que en algunas de ellas no se realice el estudio en el grado de detalle deseable o que, en otras instituciones, no se realice ningún análisis de los datos.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer una herramienta informática gratuita y libre que permite agilizar y automatizar el análisis de las condiciones microclimáticas. Para ello, se ha desarrollado un texto en lenguaje R o *script*³ que realiza al ejecutarse el análisis estadístico completo, en un solo paso, de la gran cantidad de datos recogida por los *data-loggers* y genera un informe con tablas y gráficos que recogen esta información siguiendo las recomendaciones del IPCE en su contenido (Herráez *et al.*, 2014) en un formato cuidado y fácilmente interpretable tanto para el personal responsable de su análisis como para todo el personal de la institución.

El lenguaje de programación R

R es un conjunto integrado de programas que permiten el almacenamiento y manipulación de datos, su análisis y su exportación a gráficos, junto con el lenguaje de programación propio del entorno (lenguaje R) (Ihaka y Gentleman, 1996). Como se trata de un entorno empleado para nuevos métodos de análisis de datos, R es muy dinámico y sus versiones se suceden rápidamente. Actualmente, R se encuentra actualizado y mantenido por el *R Core Team* (2020).

El entorno R es *software* libre (licencia GNU), es decir, libre en su ejecución, en su acceso al código fuente, en la capacidad de distribución (lo que se denomina gratuidad) y libertad de distribuir copias modificadas a terceros, es decir, a crear mejoras en el *software* y distribuir las. El uso del *software* libre tiene múltiples beneficios para las instituciones públicas y privadas. Al margen de no tener restricciones por licencias y de su gratuidad, se trata de un modelo que acelera el desarrollo de herramientas y aplicaciones y permite el intercambio de información entre la comunidad de usuarios, de forma que se impulsa la retroalimentación y la colaboración y, en una perspectiva temporal más amplia, la innovación.

³ Tecnicismo para definir el código o secuencia de comandos que agrupa un conjunto de mandatos u órdenes que sirven de entrada a un sistema operativo o programa informático.

Metodología

Software empleado

El *script* se ha desarrollado empleando R (*R Core Team*, 2020) y usando el *software Rstudio* versión 1.1.383 desarrollado por el *Rstudio team* (2020) como entorno de desarrollo de R. Además, se ha empleado *R Markdown* (Allaire *et al.*, 2020) que combina la sintaxis del lenguaje *Markdown* con código de R, de manera que según R va realizando cálculos, tablas y gráficos, éstos se integran en un informe final con el formato deseado. El *script* genera un informe completo con los resultados de los análisis microclimáticos en formato página web (html), que garantiza su fácil lectura y exportación entre programas y sistemas operativos.

El *script* creado usa como entrada los datos recogidos por el *data-logger* de la marca y modelo Testo 174 H (*Testo Industrial Services GmbH*, Alemania), ya que se trata de un instrumento ampliamente utilizado en diversas instituciones culturales. Estos datos se exportan con el *software Testo Comfort Software Basic 5* (*Testo Industrial Services GmbH*, Alemania), en formato tabla «xls». Como ejemplo, se ha empleado un conjunto de datos correspondiente a un caso simulado en el que se toman los valores de humedad relativa y temperatura cada hora durante un periodo aproximado de 14 meses (426 días).

Desarrollo del *script*

El informe completo generado mediante el código se compone de información sobre el sensor y los datos tomados, el análisis global de las variables estudiadas, el análisis anual de las variables, el análisis mensual de las mismas y el análisis estacional.

El código comienza con la carga de librerías que posteriormente empleará R y que permitirán hacer los cálculos estadísticos, tablas, gráficos y demás funciones necesarias, por lo que deberán estar instaladas en R previamente. La librería *readxl* (Wickham y Bryan, 2019) permite leer los archivos en formato «xls». También se cargan las librerías *stringi* (Gagolewski, 2020), *dplyr* (Wickham *et al.*, 2020), *tidyr* (Wickham, 2020), *psych* (Revelle, 2020), *knitr* (Xie, 2014, 2015, 2020), *kableExtra* (Zhu, 2020), *gridExtra* (Auguie, 2017), *ggplot2* (Wickham, 2016), *scales* (Wickham y Seidel, 2020) y *ggpubr* (Kassambara, 2020).

El *script* toma los datos de la cabecera de la tabla en formato «xls» que proviene del *data-logger* para obtener el nombre del sensor, su número de serie y el día en que se descargaron los datos. Posteriormente, a partir de esa misma tabla que se usa como entrada, se toman los datos sobre las mediciones y se genera un *data frame* (denominado «db») sobre el que se realiza una reordenación de columnas, y se formatea la columna «Fecha-Hora» para obtener un formato con el que R pueda operar.

Información sobre el sensor

Se determina el número de datos tomados que se guarda con el nombre «n_idg» y el número de datos que no se han tomado o son erróneos tanto en el sensor de humedad relativa («na_HR») como en el de temperatura («na_T»). También se determina la fecha y hora de inicio («iniciodias») y fin («findias») de la toma de datos, así como el número total de días transcurridos entre las dos fechas («diastotales»).

Análisis global de las variables

El primer bloque de análisis estadístico está constituido por el análisis global de los datos. La función *describe* se emplea para crear un *data frame* en el que se incluye: nombre de la variable, número de datos, media, desviación típica, mínimo, máximo, oscilación absoluta (rango), error

estándar y los percentiles 0,023, 0,5 (mediana) y 0,977. Los datos incluidos entre los percentiles 0,023 y 0,977 engloban más del 95% de los datos, lo que permite obtener un conjunto en el cual los valores extremos no distorsionen la visualización. La tabla resultante se nombra como «tabla_db».

También se calculan las oscilaciones diarias y horarias de humedad relativa y temperatura sobre el conjunto total de datos. Una vez calculadas, se determina la máxima oscilación diaria global, tanto para la humedad relativa como para la temperatura, y el día que presenta ese valor. Las variables «MOD_HR» y «MOD_T» muestran los valores absolutos de la oscilación diaria, mientras que el día en que ocurrió la máxima oscilación se puede consultar en las variables «MOD_HRday» y «MOD_Tday». De forma análoga, las variables «MOH_HR» y «MOH_T» informan de los valores absolutos de la oscilación horaria máxima, mientras que las variables «MOH_HRday» y «MOH_Tday» indican el día y la hora en que ocurrió dicha oscilación.

El primer gráfico que se presenta en el informe es referente a la evolución temporal de los parámetros de humedad relativa y temperatura (Figura 2). En la gráfica, se representa con un punto de color azul o rojo el valor horario de humedad relativa o temperatura respectivamente, a la vez que se superpone una curva de regresión local azul o roja para indicar el promedio de valores de humedad relativa y temperatura.

Otros gráficos, como los histogramas, se construyen a partir de las frecuencias absolutas de los datos. Bajo el nombre de «histHR» se crea el histograma de frecuencias de humedad relativa, mientras que «histT» es el histograma de frecuencias de temperatura (Figura 3).

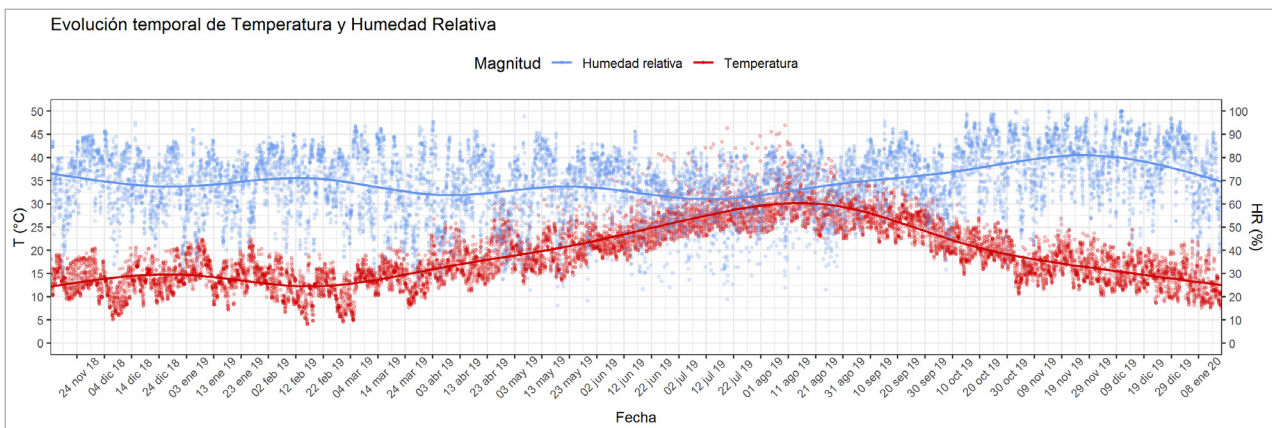


Figura 2. Gráfico de evolución temporal de los parámetros de humedad relativa y temperatura. Gráfico: Irene Ureña Herradón.

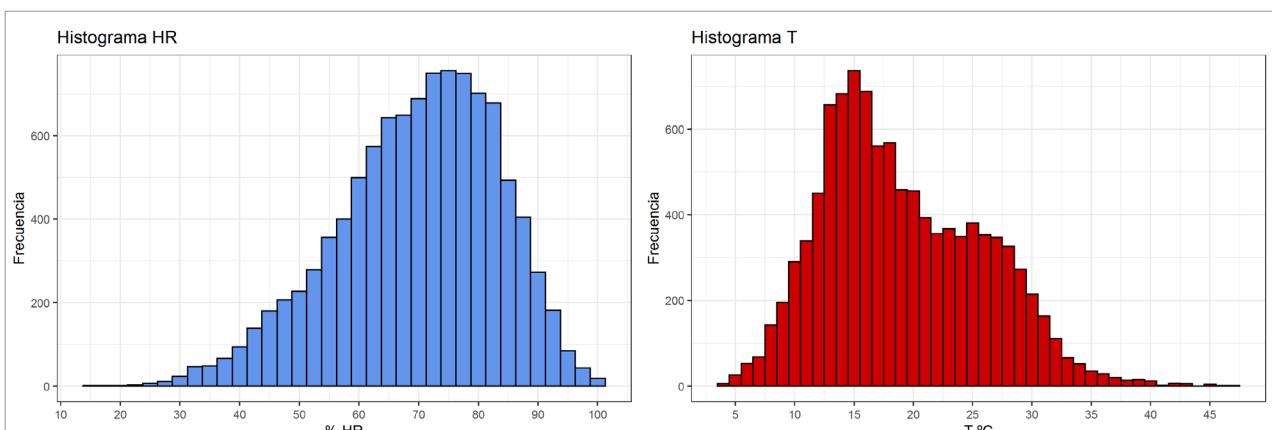


Figura 3. Ejemplo de histogramas de humedad relativa y temperatura. Gráficos: Irene Ureña Herradón.

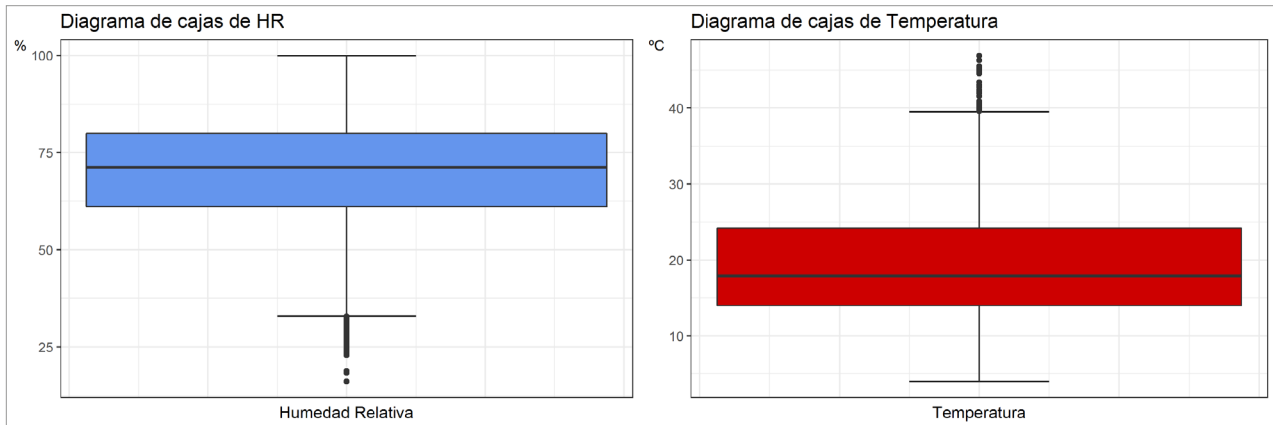


Figura 4. Ejemplo de diagramas de caja de los parámetros humedad relativa y temperatura. Gráficos: Irene Ureña Herradón.

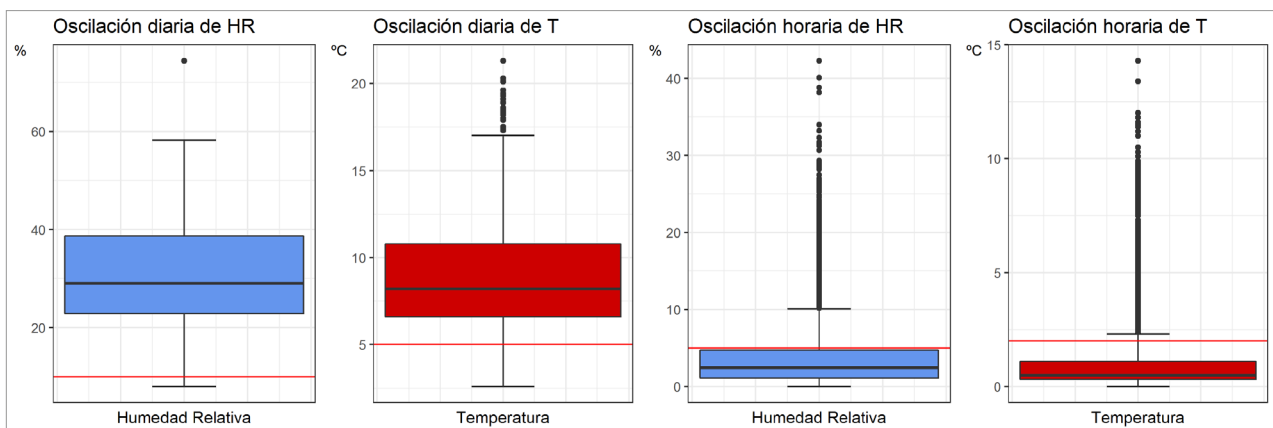


Figura 5. Ejemplo de diagramas de caja de las oscilaciones diarias y horarias de humedad relativa y temperatura. La línea roja marca el umbral de riesgo en cada uno de los diagramas. Gráficos: Irene Ureña Herradón.

Los diagramas de cajas (también llamados *box-plot*) son muy interesantes para mostrar la simetría de los datos a partir de los cuartiles y ayudan a visualizar los datos atípicos. Por tanto, el siguiente gráfico elaborado corresponde a los diagramas de cajas para los datos globales de humedad relativa y temperatura así como para los valores absolutos de las oscilaciones diarias y horarias (Figuras 4 y 5). En los diagramas de caja de las oscilaciones se ha introducido además una línea que marca los umbrales de riesgo que indican variaciones de humedad relativa o temperatura excesivas. Estos umbrales se han fijado, a modo de ejemplo, en un $\pm 10\%$ de la humedad relativa y $\pm 5^\circ\text{C}$ de temperatura en 24h y en un $\pm 5\%$ de la humedad relativa y $\pm 2^\circ\text{C}$ a la hora.

Análisis anual y mensual de las variables

En segundo y tercer lugar, se realizan los cálculos estadísticos de los datos agrupados por años y por meses. Para ello, se crean dos tablas en la que se incluye el número de días, la media, mediana, desviación típica, mínimo, máximo y oscilación absoluta anual o mensual para cada una de las variables. La tabla anual se denomina «db_a», mientras que la tabla mensual se denomina «db_m».

El cálculo de las oscilaciones diarias y horarias realizado para el conjunto total de datos se emplea en este punto para crear una tabla resumen que indica para cada mes el número de días analizados, oscilación diaria media, mediana, desviación típica, oscilación diaria máxima y fecha de la oscilación diaria máxima, tanto para los parámetros de humedad relativa como de temperatura.

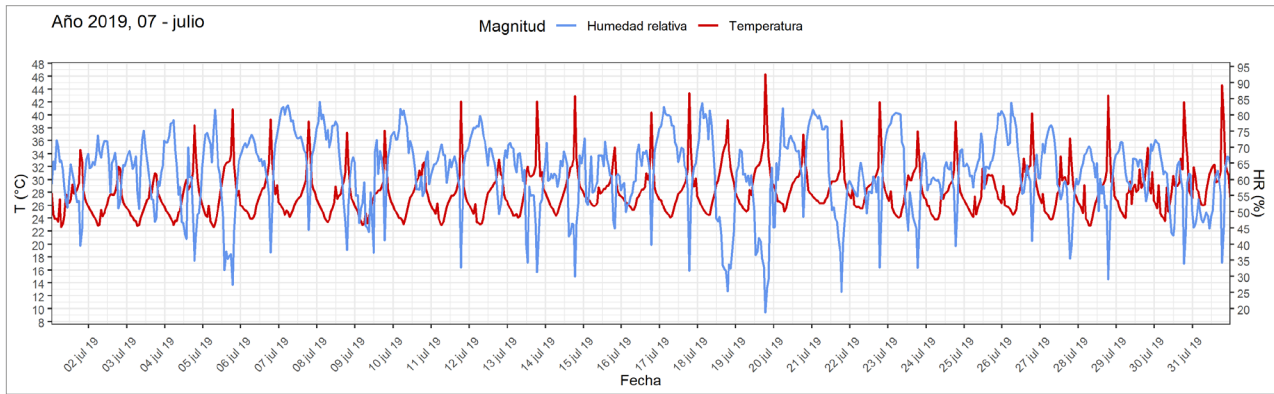


Figura 6. Ejemplo del gráfico mensual para julio que presenta la evolución temporal de los parámetros de humedad relativa y temperatura. Gráfico: Irene Ureña Herradón.

La tabla resultante se guarda bajo el nombre de «OD_m_t». De forma similar, se crea una tabla en la que se recoge la información sobre la oscilación horaria de cada mes con los campos número de días del mes, media, mediana, desviación típica, oscilación diaria máxima y fecha y hora de la oscilación diaria máxima para cada una de los dos parámetros analizados. La tabla queda guardada bajo el nombre «OH_m_t».

Las gráficas mensuales de la evolución temporal de las variables se presentan individualizadas, con un título, ejes y graduaciones de los ejes independientes. En ellas, se mantiene el color azul para la humedad relativa y rojo para la temperatura; no obstante, el tipo de gráfico pasa de una nube de puntos a una línea sólida, sin curva de regresión local, ya que los datos se visualizan mejor de este modo (Figura 6). El *script* genera una imagen independiente para cada uno de los meses naturales del periodo analizado.

Análisis estacional

Para el análisis estacional se representa la evolución temporal de los parámetros de humedad relativa y temperatura de un día típico de cada una de las cuatro estaciones. Para ello, se toman los datos correspondientes a las 24 horas de cada uno de los 30 ó 31 días de los meses de enero, abril, julio y octubre, se determina el promedio de cada hora, y se genera un gráfico que corresponde a un día de invierno, primavera, verano u otoño, respectivamente (Figura 7). En el gráfico se repre-

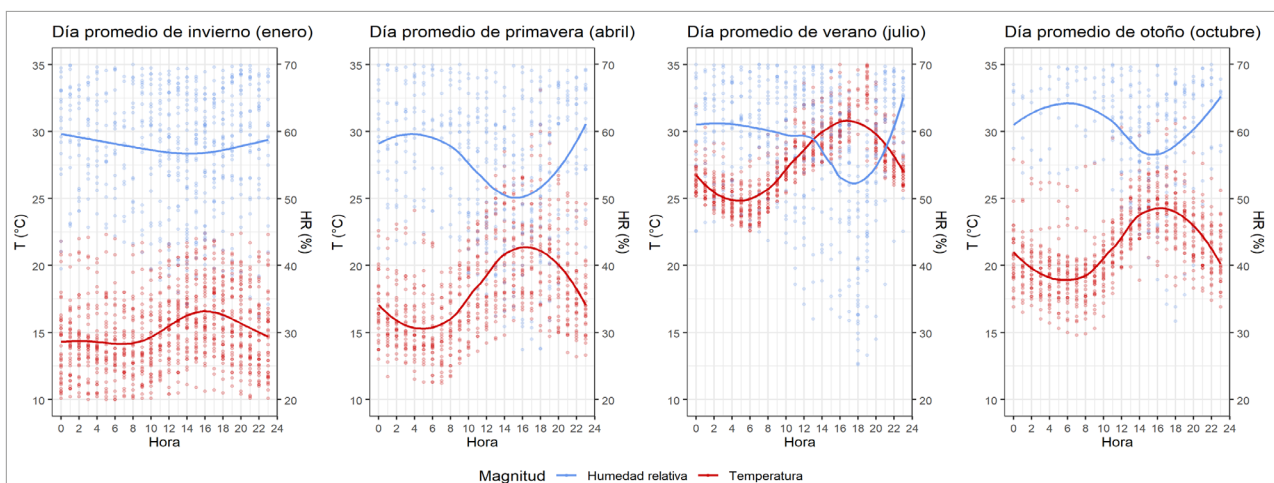


Figura 7. Ejemplo de gráficos de caracterización estacional. Gráficos: Irene Ureña Herradón.

senta una nube de puntos con los valores horarios, en azul para la humedad relativa y en rojo para la temperatura, y a su vez se incluye una recta de regresión lineal que indica el promedio de los datos y permite una interpretación rápida y visual.

Generación de un informe

Como se ha comentado anteriormente, el *script* se ha diseñado para crear automáticamente un informe con los resultados del análisis en forma de texto, tablas y gráficos. Para ello, se emplea R Markdown, que permite ejecutar el código de R junto con los elementos de texto que se deseen incluir en el mismo. El informe generado aparece en formato html, de tal forma que gráficos y texto son fácilmente exportables y reutilizables en otros documentos.

En el informe, aparecen los resultados y gráficos creados en el orden anteriormente mencionado, de manera que presenta la siguiente estructura (Figura 8):

- Cabecera: en ella aparece el título y la autoría, así como la fecha de generación del informe.
- Datos del sensor: contiene el nombre del sensor, su número de serie, la fecha y hora de inicio y fin de la toma de datos, el periodo comprendido entre ambas fechas en días completos, el número total de pares de datos tomados, el número de datos erróneos o perdidos y la fecha y la hora en la que se descargaron los datos.
- Análisis global, con los siguientes elementos:
 - Tabla resumen («tabla_db») de los parámetros medidos.
 - Gráfica de evolución temporal de los parámetros humedad relativa y temperatura.
 - Histograma de frecuencias de las variables humedad relativa y temperatura
 - Diagramas de cajas de los valores de humedad relativa y temperatura.
 - Texto referido a las oscilaciones globales, en el que se detalla la oscilación máxima diaria y horaria

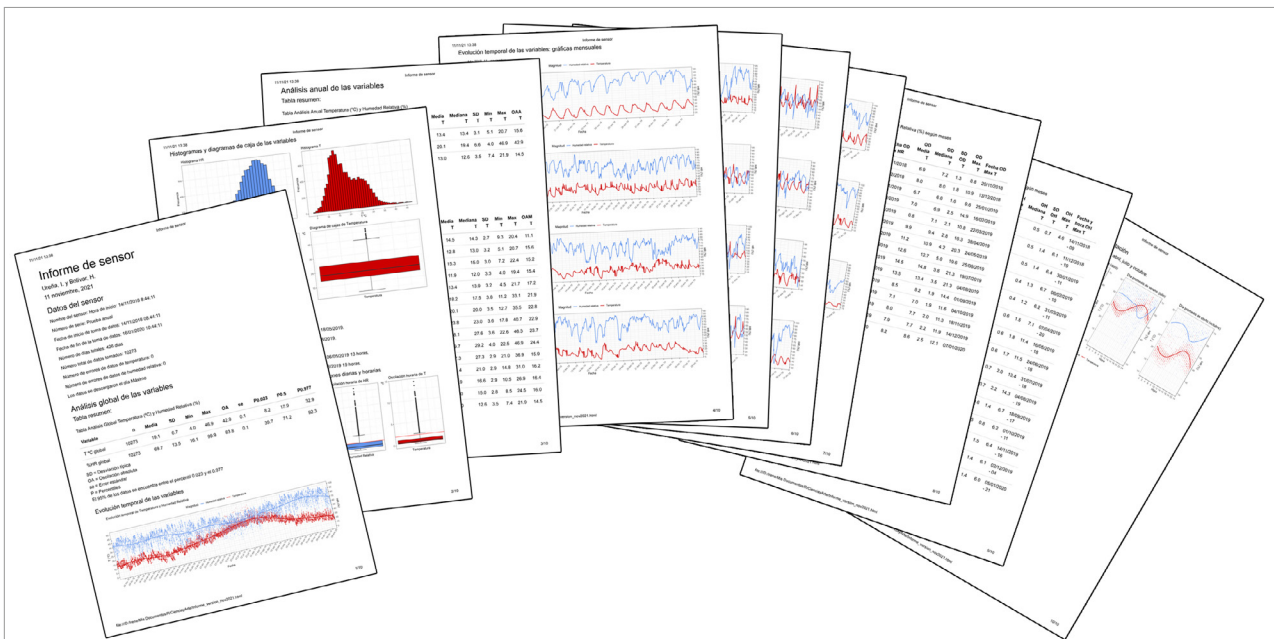


Figura 8. Ejemplo de presentación del informe. Gráfico: Irene Ureña Herradón.

- Diagramas de cajas de las oscilaciones diarias y horarias tanto para la humedad relativa como para la temperatura.
- Análisis anual de las variables, en el que se presenta en una tabla resumen.
- Análisis mensual:
 - Tabla resumen.
 - Gráficos mensuales con la evolución temporal.
 - Tabla con las oscilaciones diarias para cada mes.
 - Tabla con las oscilaciones horarias para cada mes.
- Análisis estacional, con un gráfico compuesto por cuatro columnas, correspondiéndose con las cuatro estaciones.

El informe completo generado a partir de los datos usados como ejemplo se puede visualizar en el repositorio digital GitHub⁴ en formato html y pdf.

Respecto a los gráficos generados, se exportan automáticamente al ejecutar el *script* a una carpeta denominada «análisis_microclimatico_files» que se encuentra dentro del directorio de trabajo establecido y, dentro de ella, a la subcarpeta «figure-html». El tipo de archivo de exportación por defecto es del tipo «*portable network graphics*» (png) con unas dimensiones de 3600 píxeles x 1200 píxeles. El gráfico de la serie temporal completa se ha nombrado como «Global_Graficos.png», el histograma de frecuencias del conjunto de los datos como «Global_Histograma_Box-1.png» y los diagramas de caja de los datos totales como «Global_Histograma_Box-2.png». Las series temporales de cada mes se guardan como «Mensual_Graficos-N.png» siendo «N» el número que determina el mes a partir del cual se inicia el registro. Los diagramas de cajas que indican las oscilaciones diarias, horarias y sus umbrales están agrupados en una sola imagen que se llama «Oscilaciones_Graficos-1.png». Por último, los gráficos del análisis estacional también aparecen agrupados en una sola imagen bajo el nombre de «Grafico_Estacional-1.png».

Discusión

Hoy en día, la conservación preventiva del patrimonio cultural se puede beneficiar de las posibilidades de monitorización, modelización y predicción que las nuevas tecnologías ponen a disposición de los conservadores. Cabe destacar los ejemplos de la herramienta SIG del Departamento de Conservación Preventiva del Instituto del Patrimonio Cultural de España (Herráez, Durán y García, 2019) y la herramienta Art-Risk de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla (Ortiz *et al.*, 2020), ambas herramientas disponibles on-line. No obstante, y a pesar de la rápida introducción que ha habido de las tecnologías de medición de parámetros microclimáticos en las instituciones de conservación del patrimonio, la publicación de herramientas de *software* libre que faciliten el manejo de grandes cantidades de datos microclimáticos es muy escasa, señalando como única referencia la herramienta Burrito (Fernández-Navajas *et al.*, 2013). Por el contrario, el *software* privativo que se emplea en diversos sistemas de sensores rara vez está ideado o adaptado a las necesidades de la conservación del patrimonio cultural (por no mencionar limitaciones de exportación y personalización gráficas), de tal forma que muchas veces su utilización se limita a servir de puente de datos entre los sensores y el *software* de análisis. Una vez descargados los datos, las herramientas de *software* que más suelen emplearse son las hojas de cálculo de *suites* ofimáticas, con las limitaciones al cálculo estadístico y matemático que tienen, así como la dificultad para automatizar operaciones, destacando como un importante elemento desfavorable el que los

⁴ <https://github.com/ireneuh/Microclimatic-analysis-for-cultural-heritage-preservation>

cálculos se realizan sobre los propios archivos de datos, con el riesgo de pérdida o corrupción de la información que conlleva.

En este sentido, queremos destacar las ventajas que tiene el uso de un *script* sobre el *software* R frente a otras soluciones de análisis.

En primer lugar, analizar estadísticamente con detalle la información proporcionada por los *data-loggers* conlleva un mejor aprovechamiento de los recursos materiales y equipos, siendo este un concepto fundamental en la conservación preventiva.

Por otro lado, automatizar el análisis de las condiciones microclimáticas ahorra tiempo, por lo que es posible dedicar más atención al análisis de los resultados obtenidos y no a la elaboración de tales resultados. Esto es especialmente importante en aquellos casos en los que los recursos de personal son limitados.

El empleo del *script* también permite que la información de los archivos originales de datos sea solamente leída por el *software* y se trabaje en todo momento con una copia de los datos, evitando que por accidente o negligencia ocurra una pérdida de la información original.

Cabe destacar que el empleo del *software* R optimiza el cálculo matemático y estadístico frente a las hojas de cálculo, que son programas pesados con evidentes limitaciones en equipos antiguos o con recursos limitados. R en cambio es un *software* libre, gratuito y fácilmente funciona en la mayoría de ordenadores sin necesitar grandes requerimientos de memoria.

El análisis estadístico aquí presentado, siguiendo los parámetros establecidos por el IPCE (Herráez *et al.*, 2014), y en un formato organizado permite comparar fácilmente las condiciones microclimáticas entre diferentes sensores y entre diferentes instituciones o lugares, al proporcionar unas gráficas y tablas estandarizadas.

Además, el *script* es un archivo de comandos en lenguaje de programación, por lo que es completamente adaptable a las necesidades particulares de cada contexto, pudiéndose fácilmente modificar los análisis mostrados en el ejemplo presentado así como poder incorporar más análisis que sean de interés. La adaptabilidad también se aplica al diseño y a la forma, de manera que se pueden modificar las opciones gráficas de los documentos generados. Por lo tanto, el *script* queda a la libre modificación de los usuarios, lo que favorece, en última instancia, la mejora y optimización del mismo, desarrollándose soluciones que pueden ser rápidamente adoptadas por otros usuarios y a las necesidades particulares de cada caso.

No se explora en este artículo la posibilidad de realizar análisis entre dos o más archivos de datos de sensores distintos, pero siguiendo la premisa de que el *software* no modifica los datos originales, sino que solamente los lee y los mantiene en la memoria del sistema, se podrían diseñar una gran variedad de cálculos a realizar entre dos o más sensores, como por ejemplo la diferencia absoluta de temperatura entre dos puntos o la estimación de los valores microclimáticos por interpolación de un tercer punto situado entre dos sensores dados.

Siguiendo en la línea del análisis de las condiciones ambientales, es fácil imaginarse las posibilidades de análisis que puede tener un *script* similar al presentado en el estudio de contaminantes o de las condiciones de iluminación, siempre que se disponga con los sensores adecuados y se modifique el *script* convenientemente. Otra posibilidad de gran relevancia en instituciones abiertas al público, es la posibilidad de incorporar en los análisis la información del número de visitantes en un momento dado.

Por último, cabe mencionar que el lenguaje R es compatible con la mayoría de los sistemas de información geográfica (SIG) actuales, lo que multiplica las posibilidades de análisis al incorporar a este el componente espacial.

Es importante señalar que este tipo de herramientas no deben sustituir al personal especializado en conservación ya que es este quién deberá interpretar el informe, y siempre teniendo en cuenta el contexto de los bienes culturales. Al contrario, la formación del personal de conservación preventiva en este tipo de herramientas puede ayudar a una mejor detección y valoración de los riesgos asociados a unas condiciones microclimáticas inadecuadas.

El *script* se encuentra accesible bajo una licencia *Creative Commons* 4.0 reconociendo la atribución del creador, para su uso sin fines comerciales, se ha de compartir con igual licencia y sin la posibilidad de realizar restricciones adicionales (CC BY-NC-SA 4.0)⁵. El código desarrollado se encuentra bajo la licencia mencionada en la plataforma GitHub⁶, así como los informes en formatos html y pdf generados como ejemplo.

Bibliografía

- ALLAIRE, J., MCPHERSON, J., XIE, Y. *et al.* (2020): *rmarkdown: Dynamic Documents for R. R package version 2.3*. Disponible en: <https://github.com/rstudio/rmarkdown>
- AUGUIE, B. (2017): *gridExtra: Miscellaneous Functions for "Grid" Graphics. R package version 2.3*. Disponible en: <https://cran.r-project.org/package=gridExtra>
- BELTRÁN, P., FERNÁNDEZ-NAVAJAS, Á., MERELLO, P. *et al.* (2013): «Software for Storage and Management of Microclimatic Data for Preventive Conservation of Cultural Heritage». *Sensors*, 13 (3), pp. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/s130302700>
- GAGOLEWSKI, M. (2020): *R package stringi: Character string processing facilities*. Disponible en: <https://stringi.gagolewski.com/>
- HERRÁEZ, J. A., DURÁN, D. y GARCÍA, E. (2019): «Índices de riesgo climático. Tutorial para el uso de la herramienta SIG.» Madrid: Ministerio de Cultura y Deporte.
- HERRÁEZ, J. A., ENRÍQUEZ DE SALAMANCA, G., PASTOR ARENAS, M. J. *et al.* (2014): *Manual de Seguimiento y Análisis de Condiciones Ambientales*. Madrid: Ministerio de Cultura y Deporte.
- IHAKA, R. y GENTLEMAN, R. (1996): «R: A Language for Data Analysis and Graphics». *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5 (3), pp. 299-314. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/10618600.1996.10474713>
- IPCE (2015): *Plan Nacional de Conservación Preventiva*. Madrid: Ministerio de Cultura y Deporte.
- (2009): *Normas de conservación preventiva para la implantación de sistemas de control de condiciones ambientales en museos, bibliotecas, archivos, monumentos y edificios históricos*. Madrid: Ministerio de Cultura y Deporte.
- KASSAMBARA, A. (2020): *ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots. R package version 0.4.0*. Disponible en: <https://rpkgs.datanovia.com/ggpubr/>
- ORTIZ, P., MACÍAS, J. M., ORTIZ, R. *et al.* (2020): *Manual de usuario. Software ART-RISK 3.0. Proyecto de investigación ART-RISK. Inteligencia Artificial aplicada a la Conservación Preventiva de Edificios Patrimoniales*. Sevilla: Pilar Ortiz Calderón.
- R Core Team (2020): *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

⁵ Se puede encontrar los términos de la licencia completa en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

⁶ <https://github.com/ireneuh/Microclimatic-analysis-for-cultural-heritage-preservation/>

- REVELLE, W. (2020): *psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research. R package version 2.0.8*. Evanston: Northwestern University.
- Rstudio Team (2020): *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Boston: RStudio, PBC.
- VALENTÍN, N. y GARCÍA, R. (1999): «El biodeterioro en el Museo.» *Arbor*, 164 (645), pp. 85-107.
- WICKHAM, H. (2020): *tidyr: Tidy Messy Data. R package version 1.1.2*. Disponible en: <https://tidyr.tidyverse.org/>
- (2016): *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Nueva York: Springer-Verlag.
- WICKHAM, H. y BRYAN, J. (2019): *readxl: Read Excel Files. R package version 1.3.1*. Disponible en: <https://readxl.tidyverse.org/>
- WICKHAM, H., FRANÇOIS, R., LIONEL, H. *et. al.* (2020): *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. Disponible en: <https://dplyr.tidyverse.org/>
- WICKHAM, H. y SEIDEL, D. (2020): *scales: Scale Functions for Visualization. R package version 1.1.1*. Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/scales/>
- XIE, Y. (2020): *knitr: A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R. R package version 1.29*. Disponible en: <https://rdr.io/cran/knitr/>
- (2015): *Dynamic Documents with R and knitr*. Disponible en: <https://duhi23.github.io/Análisis-de-datos/Yihue.pdf>
- (2014): «knitr: A Comprehensive Tool for Reproducible Research in R.» En: Victoria Stooden, F. *Implementing Reproducible Research*. Chapman and Hall/CRC.
- ZHU, H. (2020): *kableExtra: Construct Complex Table with 'kable' and Pipe Syntax. R package version 1.2.1*. Disponible en: <https://rdr.io/cran/kableExtra/>

Hábitat excavado y paisaje cultural: patrimonio histórico y cambio climático¹

Excavated habitat and cultural landscape: historical heritage and climate change

Miguel Ángel Sorroche Cuerva*

Universidad de Granada
masc@ugr.es

Martín Ramírez Pérez

Arquitecto
grxmartin@gmail.com

Resumen: El norte de la provincia de Granada es un territorio bien delimitado por sus características históricas y geomorfológicas. Cruce de caminos entre diversos contextos peninsulares, la presencia humana se registra desde la Prehistoria. Por su geomorfología se ha declarado Geoparque, reconociendo sus singulares características físicas. En este escenario encontramos el conjunto de arquitectura excavada más importante del sur de Europa. Perfectamente adaptadas al medio, las viviendas cuevas de la zona son la mejor respuesta que el ser humano ha dado a unas condiciones medioambientales de temperaturas extremas, falta de lluvias regulares y ausencia de una cobertura vegetal que ha permitido la proliferación de este hábitat tan característico.

La funcionalidad de la arquitectura tradicional está siendo una de las mejores respuestas al cambio climático por su eficiencia constructiva, ahorro energético o huella medioambiental entre otras circunstancias. Sin perder de vista sus valores culturales, algunas propuestas como el proyecto *Hábitat Excavado y Paisaje Cultural*, busca revalorizar su importancia.

Palabras clave: Hábitat excavado, Granada, patrimonio cultural, cambio climático.

Abstract: The north of the province of Granada is a territory well defined by its historical and geomorphological characteristics. Crossroads between certain peninsular contexts, human presence has been recorded since Prehistory. Due to its geomorphology, it has been declared a Geopark, recognizing its unique physical characteristics. It is in this setting that we find the most important excavated architectural ensemble in southern Europe. Perfectly adapted to the environment, the cave dwellings in the area the best response that humans have given to environmental conditions of extreme temperature, lack of regular rains and the absence of a vegetation cover that has allowed the proliferation of this characteristic habitat.

¹ Este trabajo forma parte del proyecto que se viene desarrollando en la zona norte de la provincia de Granada a propuesta de los agentes locales, refrendado en la firma de un convenio marco de colaboración entre la Universidad de Granada, la Diputación de Granada y las mancomunidades de Guadix, Baza, Huéscar y Marquesado del Cenete en julio de 2020.

The functionality of traditional architecture is being one of the best responses to climate change due to its constructive efficiency, energy savings or environmental footprints, among other circumstances. Without losing sight of their cultural values, some proposals, such as the Excavated Habitat and Cultural Landscape Project, seek to revalue its importance.

Keywords: Excavated Habitat, Granada, Cultural Heritage, Climate Change.

Introducción

El norte de la provincia de Granada ha sido siempre un ámbito bien definido por sus características históricas y geomorfológicas. Paso obligado entre distintos contextos peninsulares como el Levante, la meseta castellana o el valle del Guadalquivir, la presencia humana se registra desde la Prehistoria. Es no obstante su geomorfología, lo que le ha valido la declaración de Geoparque como figura que reconoce sus singulares características físicas (CONAMA, 2018)².

Es en este escenario donde se localiza el conjunto de arquitectura excavada más importante del sur de Europa, consecuencia directa de una materialidad en la que los depósitos cuaternarios de arcillas y yesos han permitido conformar un paisaje antropizado de profunda significación.



Figura 1. Desierto de Gorafe. Fotografía: Roberto Travesí Idáñez.

² Resultado del proceso de colmatación de un mar interior y la posterior elevación de ese fondo marino por la eclosión de la orogénesis que dio lugar a la aparición de la cordillera de Sierra Nevada, estas tierras arcillosas y yesosas, expuestas a un clima continental de escasas precipitaciones, han permitido su manipulación para generar uno de los hábitats excavados más extensos de Europa.

Perfectamente adaptadas al medio, las viviendas cuevas de la zona, son la mejor respuesta a unas condiciones medioambientales en las que las temperaturas extremas, la falta de lluvias regulares y la ausencia de una cobertura vegetal, ha permitido la proliferación de este hábitat tan característico y cuya continuidad al menos se data desde el siglo XI (Bertrand, 1987; 1997).

En un momento en el que las dinámicas derivadas del denominado cambio climático están buscando alternativas que permitan afrontar sus consecuencias, la tipología tradicional que conforma la vivienda excavada y sus valores patrimoniales, son un buen ejemplo para encontrar respuesta a esta situación, dadas las características intrínsecas al material con el que está realizada y las condiciones regulares de sus espacios interiores.

Justificación histórica de la propuesta. Antecedentes

Plantear un proyecto para valorar la capacidad de adaptación del ser humano a un entorno, a partir de la identificación que el peso de la experiencia ha tenido para explicar dicha aclimatación, lleva a indagar en la presencia humana en dicho contexto y cuál ha sido su dinámica de implementación con las características naturales de ese entorno, tal y como lo planteara Carlos Asenjo Sedano (1972) (Figura 1).

El extremo nororiental de la provincia de Granada, con aproximadamente unos 4000 km² de superficie, conforma un imponente escenario semiárido que llega al calificativo de desierto en puntos concretos como en las proximidades de la localidad de Gorafe. En este altiplano relativo, en el que la altitud media se aproxima a los 1000 metros, es donde encontramos algunas de las manifestaciones culturales más asombrosas como es el caso del Parque Megalítico de Gorafe, localizado en un corte de la costra calcárea que cubre el antiguo borde de la depresión marina que fue en su momento este territorio y que adquirió el valor de frontera real y simbólica de los grupos humanos que transitaban por estas tierras. Es ahí, en el desfiladero abierto por el proceso erosivo del río Gor, donde se localiza una de las mayores concentraciones de dólmenes del sur de Europa, testimonianando el culto a la muerte que ya durante la Edad del Bronce existía y la estabilidad del poblamiento para ese momento³.

Se iniciaba así la construcción de un paisaje que etapas posteriores consolidaron mediante la presencia de asentamientos estables que fueron punteando el territorio ya de una manera clara desde el período íbero (S. VII a.C.), hasta estructurarlo tal y como lo conocemos en la actualidad a lo largo de la Edad Media, momento en el que podemos situar la última etapa importante de fundación de nuevos núcleos en la zona. Ocasionalmente, con posterioridad podemos hablar de fundaciones que completaron la articulación territorial, que en muchos casos se limitaron a cortijadas que ampliaron la explotación de tierras que se cultivaban, y que en otros han llegado a más desde un punto de vista urbano, como es la localidad de El Bejarín, en la comarca de Guadix (Sorroche, 2004).

Una tipología específica: el hábitat excavado

Las especiales características de la zona que centra nuestro interés, donde a las mismas condiciones geomorfológicas se les unen las climáticas y las históricas, ha sido objeto de la atención de especialistas de distintas disciplinas que han profundizado en su estudio.

³ La zona norte de la provincia de Granada alberga uno de los contextos continentales más destacados de Europa donde el ser humano ha sabido adaptarse a las condiciones esteparias y subdesérticas de su medioambiente. Territorio ocupado desde la Edad del Bronce (2200-700 a.C.), su posición estratégica como corredor que comunicó al levante peninsular con la depresión del Guadalquivir y la costa mediterránea, ha visto pasar por sus tierras a grupos de diversa naturaleza que han ido dejando su impronta. Íberos, romanos, musulmanes, cristianos, etc., han generado un sedimento cultural que identifica a estas comarcas.

Si bien referencias documentales de las cuevas como estructura artificial las hay desde el siglo XVI en la documentación que se genera como consecuencia del proceso de repoblación que se inicia tras la llegada castellana a estas tierras a finales del siglo XV (Cara, 1986) su presencia está registrada arqueológicamente desde la Edad Media, proponiéndose el siglo XI como el momento en el que comenzaron a generalizarse (Bertrand, 1987; 1997).

Algunos autores, como Carlos Asenjo Sedano (1972), enfatizan el paso del siglo XVI al XVII como el momento de la eclosión en la aparición de las cuevas, coincidiendo con las dinámicas de expulsión de los moriscos y su reubicación en los extrarradios de las poblaciones, donde se daban las condiciones para la aparición y expansión de la cueva como vivienda (Figura 2).

Las representaciones que en el siglo XVIII se hacen en el Catastro del Marqués de la Ensenada, nos las muestran ya de una forma visual, conformando núcleos duales en los que la arquitectura exenta y la excavada, darán un perfil característico a muchas de estas poblaciones (Gallego, 1987; Gámez, 1991). El Diccionario de Madoz, ya en el siglo XIX, nos las volverá a describir ya perfectamente definidas dentro de la relación que de cada una de las localidades de la provincia hace (Madoz, 1987).

Ya en el siglo XX, Torres Balbás (1947) las incluye en su trabajo sobre la vivienda popular española y habrá que esperar a la década de los 70, empujados por las consecuencias del desarrollismo impulsado por el franquismo y las dinámicas de desaparición y transformación a la que se vio expuesta la arquitectura tradicional, para ver aparecer las publicaciones de Carlos Flores (1979) y Luis Martínez Feduchi (1974-1984), donde se incorporarán como una tipología propia de la provincia, distintiva junto a otros tipos como la vivienda alpujarreña.

Los estudios de autores como María Eugenia Urdiales (1979; 1984-1985; 1988; 2003) o Carlos Asenjo Sedano (1972; 1983; 1990), les otorgarán una visión académica desde la Geografía e historia en el caso del segundo, ya a finales de la centuria.



Figura 2. Barriada de cuevas en El Marchal. Fotografía: Miguel Ángel Sorroche Cuerva.

Desde el ámbito institucional, la Junta de Andalucía (AA.VV., 1989) o la misma Diputación de Granada, han abordado su realidad, a través de programas con los que se han querido mejorar las condiciones de habitabilidad de las viviendas, ante la innegable circunstancia de ser un hábitat ocupado por un importante porcentaje de población. La necesidad de registrar sus elementos diferenciales, que las caracterizan y explican su naturaleza, ha sido la excusa por parte de la Diputación granadina por apostar ocasionalmente por convocar encuentros que las analicen (2007).

Hacia un nuevo escenario

No cabe la menor duda de que la actual recuperación del interés por la arquitectura excavada tiene que ver con la nueva visión que de la tradición cultural se tiene. Una nueva sensibilidad, propiciada desde finales de los años 80 del siglo pasado por una mayor preocupación por las cuestiones medioambientales y una mayor formación debido al acceso generalizado al estudio que se ha tenido desde entonces y que ha propiciado un mayor conocimiento de algunas realidades. La actual pandemia de la COVID 19 y el cambio climático que ya venía posicionándose como una cuestión que suscitaba preocupación, han venido a acelerar dicho proceso.

Ya el movimiento moderno y el racionalismo en la arquitectura, vinieron a ensalzar los valores de una arquitectura que en sus planteamientos espaciales, uso de materiales y lógica constructiva se veía como contraposición a los historicismos imperantes a principios del siglo XX. Las características propias que definen a la arquitectura tradicional en cualquiera de sus modalidades, se han vuelto a posicionar como alternativa a problemas de eficiencia, huella medioambiental e incluso espacialidad, y que en muchos casos son carentes a la arquitectura contemporánea (Urdiales, 2003).

A ello se suma la misma situación problemática que está generando el fenómeno migratorio que ha dado lugar a la llamada España vaciada y que afecta a no pocos municipios de la zona que nos ocupa. De este modo lo social se cuele de forma clara en esta valoración, que dota de mayor interés si cabe a los distintos aspectos que puedan revertir la pérdida de población de estas localidades y que a la postre implica la recuperación de unas tipologías tradicionales dentro de las cuales está la cueva (Figura 3).



Figura 3. Barrio de las cuevas e Guadix. Fotografía: Miguel Ángel Sorroche Cuerva.



Figura 4. Cortijo el Agua. Guadix. Fotografía: Miguel Ángel Sorroche Cuerva.

En ese sentido, la sostenibilidad se convierte en uno de los puntos fuertes de esta tipología arquitectónica al representar mejor si cabe, el aprovechamiento de un material como la tierra para construir, hasta el punto de conformar un ejemplo claro de adaptación al llegarse a habitar dentro de él. Así, las condiciones intrínsecas a la tierra de la zona, con un alto contenido en arcillas, hace que la eficiencia tanto en su aprovechamiento como tal, como el de sus características de aislamiento, capacidad térmica, etc., conformen aspectos a tener en cuenta como veremos más adelante.

La valoración de lo ajeno. Los nuevos pobladores.

La estigmatización con la que ha contado este tipo de vivienda, convierte a la valoración de la misma en una línea de trabajo siempre a tener en cuenta, básicamente por el abandono que conocen muchas de estas poblaciones a partir de la década de los sesenta del siglo pasado y que hicieron que muchas de estas cuevas se dejaran cerradas (AA.VV., 1989) (Figura 4).

Su carácter humilde y su vinculación con sectores marginales de población, se mantiene aún como un aspecto que afrontar desde el punto de vista de la recuperación de sus valores positivos (Pérez: 1982). A eso se une que urbanísticamente conforman sectores complejos desde el punto de vista de su gestión por las mismas condiciones de los trazados viarios, así como de la dificultad de dotación de servicios y en ocasiones infraestructuras, lo que genera situaciones como la falta de supermercados o carencia de accesos a sectores o viviendas (Beas; Pérez, 1994).

La vuelta de muchas de estas familias a las localidades de origen, propició una recuperación de estas viviendas, a las que se incorporaron los modelos arquitectónicos de la ciudad, básicamente en los acabados interiores a los que se dotó de elementos como suelos y red eléctrica que permitieron al menos, una mejora en las condiciones de habitabilidad.

Sin duda uno de los procesos más sugerentes y claros que ha conocido esta tipología, fue la de la adquisición por parte de inquilinos extranjeros de propiedades que se han recuperado con una calidad en ocasiones excepcional por el respeto que se ha tenido para ello a las tradiciones constructivas de la zona. Otros propietarios han visto en ellas una oportunidad de contar con una segunda residencia en el campo que está volviendo a recuperar algunos sectores de las poblaciones que cuentan con ellas en sus cascos urbanos (Figura 5).

Nuevas tecnologías constructivas y energéticas

Las características constructivas de este modelo de vivienda no siempre han gozado de una valoración clara. Y sobre todo por la ausencia de criterios de intervención que en ocasiones han provocado una heterogeneidad que rompe con la imagen armónica de estos conjuntos dentro del espacio en el que se insertan. Más aún cuando hay que armonizar el respeto a la tipología tradicional y una incorporación de soluciones que posibiliten el nivel de confort que debe tener una vivienda en la actualidad.

Ya durante el siglo XIX y el XX se produjo el aumento de la incorporación de un módulo exento delante de la cueva, para exteriorizar, más si cabe, los ámbitos domésticos ante una epidemia de tuberculosis que aconsejaba habitar en espacios exteriores y bien aireados. Esta tendencia que ocultó tras ellos el sector excavado, no eliminó la pervivencia de una tradición y conocimiento vinculado con ella.

El medio es indispensable para entender las características constructivas de una tipología que se define como hemos señalado, por su total fusión con la materialidad de la tierra en la

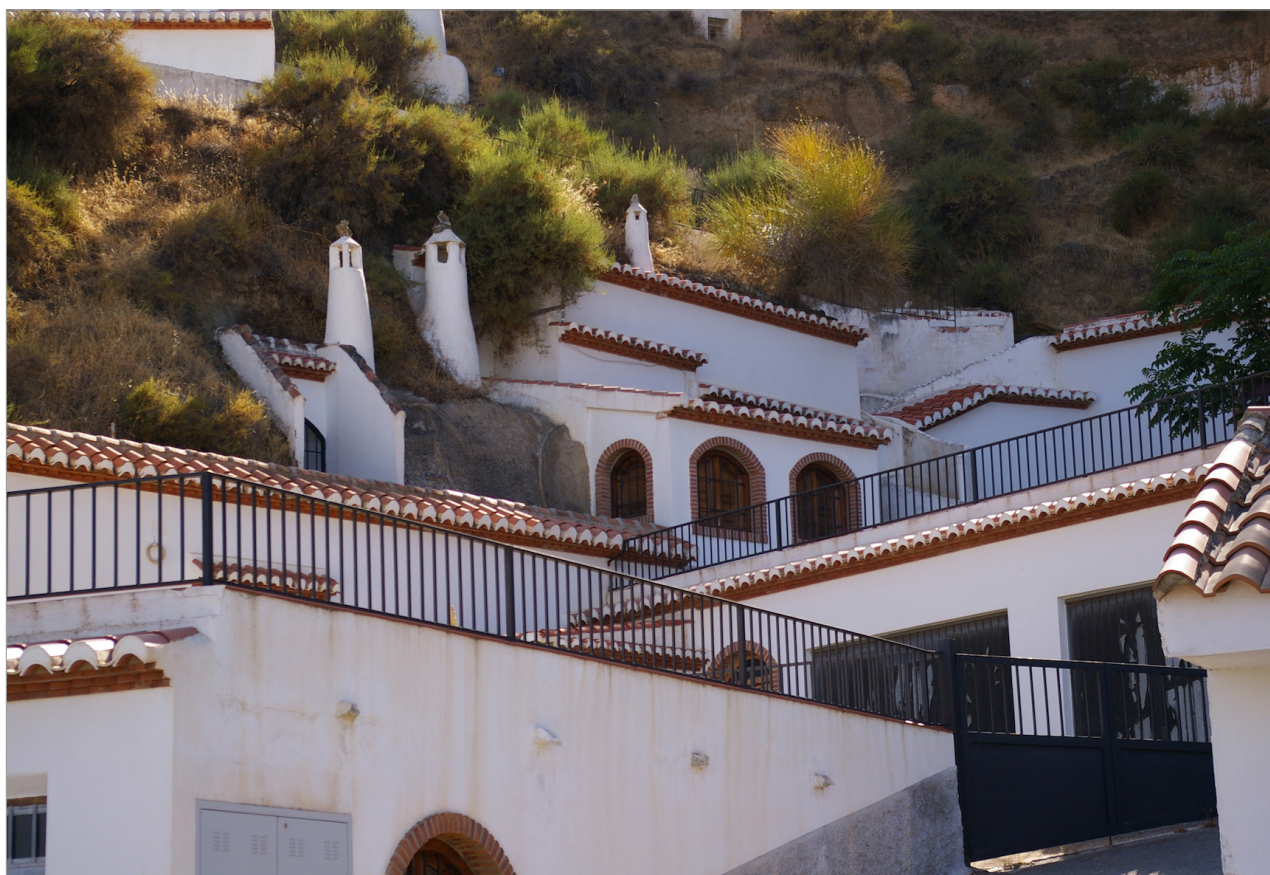


Figura 5. Casas-cueva restauradas en El Marchal. Fotografía: Miguel Ángel Sorroche Cuerva.



Figura 6. Cuevas del Aljibe Quebrado. Guadix. Fotografía: Miguel Ángel Sorroche Cuerva.

que se construye y que además está sujeta a una diversidad geotécnica clara⁴. Organicidad, modulación de espacios, aprovechamiento de materiales como la piedra o la arcilla, la vegetación o la eficiencia térmica, son elementos que confieren a su elaboración un sabio conocimiento de cada uno de ellos para ejecutarla con éxito. Sobre todo si partimos de la base de que cada tipo de terreno condiciona la tipología de cueva, aspectos en conjunto que afectan a su misma estabilidad.

Desde un punto de vista técnico destaca en esta tipología, el sistema constructivo que se emplea y que se está perdiendo a favor de una mayor rapidez edificatoria favorecida por el empleo de maquinaria pesada, pero que no ha podido evitar el que se sigan manteniendo elementos básicos tradicionales como el de la elección correcta del lugar, indispensable para darle solidez a la estructura excavada, o el respeto a una mínima distribución de los espacios interiores. Dicha circunstancia está siendo presenciada por los pocos maestros «picadores» que quedan en la zona, y que están siendo testigos de cómo todo el proceso que empleaban y que era resultado de la transmisión consuetudinaria de padres a hijos del saber acumulado gracias a procesos de ensayo-error-corrección, se ha simplificado en el mejor de los casos y profundamente alterado en las situaciones más drásticas.

La elección del lugar en el que va a construir la vivienda no es una decisión baladí. Requería de una lectura correcta del terreno, sabiendo identificar cada una de las capas, donde la de arcilla compacta e ideal para la construcción, se alterna con el derrubio, formado por materiales

⁴ La provincia de Granada cuenta con cuatro tipos de suelos en los territorios en los que proliferan las viviendas cueva: los conglomerados de la zona de las cuevas en la capital, en el entorno del río Genil y río Darro básicamente; los *bad-lands* de la zona de Guadix y Purullena y que se generalizan en gran parte de la depresión interior de las Hoyas coincidiendo en su mayor parte con la comarca de Guadix; los terrenos areniscos y arcillosos de la depresión de Baza y finalmente los terrenos de la zona más nororiental de la depresión, las Tierras de Huéscar, donde tenemos suelos más duros y compactos. Cuevas en la provincia de Granada. (AA.VV.: 2007, 29).

detríticos apenas consolidados y expuestos a un proceso de deterioro y derrumbe más claro. Elegido el espacio se procede a la demarcación de lo que va a ser la entrada de la vivienda, punto central y distribuidor de la fachada. La norma dicta que se empleen las secciones de arco de medio punto o rebajados para los huecos, cuya función estructural es evidente, simplemente variando las dimensiones de los mismos en base al tránsito de gente o animales que deban soportar (Figura 6).

Una vez abierta la entrada, a la que se da aproximadamente una luz de 1'50 metros y un grosor de 50 centímetros en las jambas y el intradós del arco, se realiza la primera de las habitaciones, desde la cual se abrirán distintos accesos a dependencias, unas más próximas a la fachada como la cocina, el establo o un simple almacén para guardar los aperos del campo, y otras más interiores como los dormitorios. Esta primera sala suele cubrirse con una bóveda de medio punto, rebajada o incluso de doble vertiente, con su eje mayor perpendicular a la fachada, presentándose la cubrición de las salas anexas, por regla general, de medio punto rebajado o de doble vertiente, y siempre con sus ejes mayores perpendiculares a la primera. De esta manera se consigue reforzar la estructura contrarrestando los ejes mayores de cada una de las salas y por lo tanto contraponiendo los empujes.

La generalización de los derrumbes en los que se ven afectadas las fachadas, hace que se refuercen en el mejor de los casos con muros de fábrica de piedra que igualan la superficie, dándoles mayor consistencia, además de rematarse con un alero de teja que viene a sustituir a los más humildes de vegetal. También se encuentran casos en los que el ladrillo refuerza el frente abierto.

Internamente este tipo de vivienda refleja una lógica constructiva en la que la organicidad juega un papel destacado, adaptándose a las condiciones medioambientales en la que se da y a las necesidades de la familia que la genera, que impone una gradación de las funciones desde lo público a lo privado.

El paso de una dependencia a otra permite en la inmensa mayoría de las ocasiones observar el grueso de los muros que se le da a estas separaciones y que dependerá de la naturaleza del material siendo menos gruesos allí donde lo permita la consolidación del terreno en el que se construya la cueva. Este aspecto estructural se traslada también a la cubrición de las dependencias donde los techos abovedados permiten generar descargas hacia los lados de los empujes verticales del terreno.

Desde la primera dependencia a la que se accede desde la calle, en la que la plazoleta o placeta que se abre frente a la fachada se convierte en el espacio recibidor propiamente dicho, se disponen las distintas habitaciones para las que aquella funciona como antesala y distribuidora, siendo normalmente una estancia que se desarrolla en paralelo al exterior para reforzar la consistencia de las paredes⁵. Desde aquí, encontramos accesos a la cocina, generalmente una pequeña dependencia y los establos a los que se accede o bien desde la misma entrada o directamente desde la calle, para en el mejor de los casos, evitar el paso de los animales por la vivienda.

Los dormitorios se distribuyen tomando como referencia el del matrimonio en torno al cual se disponen el de los hijos y las hijas en una clara separación de sexos. Los espacios de transición comunes entre cada una de estas habitaciones apenas existen, siendo simplemente un arco de medio punto o rebajado el que marca el paso entre una y otra, aumentando la sensación de aislamiento la presencia de cortinajes que funcionan como puertas.

⁵ La fachada es un elemento integrador de la cueva, adaptándose a las características de la pendiente. Una organicidad que se plasma en el mismo diseño del corte del terreno que busca una curvatura natural, frente a la menos orgánica línea recta.

Todo el conjunto, interna y externamente se pinta con cal, un material que se generaliza en su empleo desde el siglo XX y que tiene unas claras funciones profilácticas. Las especiales características de la superficie interna de las habitaciones hace que se dé una primera capa de cal con un hisopo, apenas continua y que sirve como base a una segunda ya directamente aplicada con brocha y que es la que cubrirá propiamente toda la vivienda interna y externamente. En otras se deja a la vista la huella del picado, contribuyendo con ello a una estética básica en el acabado de las superficies.

Los componentes exteriores con los que nos podemos encontrar son más diversos que los interiores, destacando entre ellos la plazoleta o placeta, que se abre ante la vivienda, la fachada, los elementos que aparecen dentro de ella como puedan ser los aleros, los huecos, el propio tratamiento pictórico de la misma y finalmente uno de los distintivos más significativos, las chimeneas.

Por lo que respecta al primero de ellos, ya se ha señalado anteriormente cómo la plazoleta aparece estrechamente vinculada con la entrada de la vivienda, incluso con esa primera habitación para la que funciona como antesala. En sí conforma el elemento que conecta a la cueva con el entorno, en la que la ausencia de volúmenes en origen permite la entrada de luz directa y una conexión visual entre los dos ámbitos, exterior e interior, con los que se integra.

Se trata sin duda de un elemento destacado que llega a variar dependiendo de la zona en la que nos encontremos, pasando de ser la simple vereda que discurre por delante de la casa a tomar dimensiones de espacio de relación, una especie de zaguán al que van a dar los distintos accesos de las dependencias dispuestas en la primera línea de fachada, que en ocasiones se acomoda a su perfil curvo. Juega en definitiva el mismo papel que el patio en la arquitectura edificada, siendo su presencia similar a la de las cubiertas de launa de la arquitectura alpujarreña.

Por lo que se refiere a esa fachada, suele variar en función de las posibilidades económicas de la familia, siendo en uno u otro caso un paramento perfectamente distinguible tanto por el color como por la textura de su fábrica.

En él se abren los distintos huecos a través de los cuales se comunican las primeras dependencias con el exterior, caso de la puerta, el más importante y el que suele centrarla, la ventana de la cocina y el acceso al establo, normalmente este último cerrado con portalones de doble hoja que permiten ventilar el interior del espacio destinado a los animales⁶.

Como se ha apuntado anteriormente, suele rematar la fachada un alero de muy variada naturaleza, pero entre los que destacamos los de fábrica, normalmente realizados con teja empuñada y los vegetales que se realizan con especies arbustivas de la zona, mucho más frecuentes en el interior de la depresión.

Por último la chimenea es sin duda el componente distintivo de estos conjuntos habitacionales que conforman el interior de las Hoyas de Guadix y Baza. Su silueta troncocónica rematada por una especie de sombrerete conformado en el mejor de los casos con dos piedras, una plana y la otra esférica, les confiere un carácter casi humano que les ha convertido en objeto de interpretaciones antropológicas en las que su función de guardianes del interior de la vivienda ha adquirido una enorme significación y que unidas a las religiosas como cruces o imágenes, hablan de su dimensión inmaterial. Se localizan cerca de las fachadas, tanto sobre la sala-recibidor como la propia cocina, allí donde es menor el terreno a excavar y por lo tanto donde disminuyen las opciones de debilitamiento (Figura 7).

⁶ En la actualidad muchas de estas dependencias destinadas al ganado han modificado su función adecuándose a otras más acordes con los nuevos modos de vida, caso de su aprovechamiento para otras habitaciones e incluso para cocheras.



Figura 7. Chimeneas en Guadix. Fotografía: Rubén Martínez Olivencia.

El proyecto *Hábitat Excavado y Paisaje Cultural*

Es en este punto donde tiene cabida el proyecto *Hábitat Excavado y Paisaje Cultural*, que se ha definido como un proceso dinámico de intercambio entre los distintos agentes responsables en la conservación de esta tipología edilicia.

Sobre todo por la vertiginosa dinámica en la que nos encontramos, que afecta a nuestras vidas y formas de relación tendentes a la globalización, y el más que presente cambio climático, dos caras de un poliedro complejo que forma la realidad en la que vivimos. En el caso de la primera, la tendencia provocada hacia la homogenización de nuestros patrones de actuación derivados de los intensos procesos de intercambio, dentro de los cuales la información viaja a una enorme velocidad y nuestros hábitos son cada vez más parecidos, la necesidad de identificarnos frente a lo igual enfatiza la necesidad de buscar aquello que nos diferencia. En ese sentido nuestra arquitectura tradicional, sabia respuesta a unos contextos ambientales específicos y a unos modos de vida concretos determinados por evoluciones históricas singulares, está resurgiendo como respuesta a dicha estandarización.

Junto a lo anterior, la necesaria réplica a la irreversible tendencia hacia la que deriva el clima, está exigiendo acciones eficaces que supongan una optimización a la hora de trabajar con los recursos naturales aportados por el territorio. En ese sentido la arquitectura tradicional está recuperando protagonismo como sabia heredera de una larga tradición consuetudinaria, en la que el empleo de los materiales y la respuesta a los condicionantes ambientales la posicionan como fuente de inspiración en la que encontrar solución a los problemas de adaptabilidad a los que nos enfrentamos. Claro ejemplo de ello lo encontramos en la casa-cueva de la provincia de Granada, que

se identifica como una tipología propia cuya relectura proponemos en este proyecto dentro del contexto estepario – subdesértico que nos enmarca.

La creciente sensibilidad que existe hacia cuestiones como el cambio climático, está obligando a revisar muchos campos en busca de respuestas a estas tendencias. En el caso de la arquitectura tradicional, sus características de ejecución la hacen responder a valores de eficiencia y aprovechamiento de materiales próximos a tal punto, que su huella ambiental es mínima si la comparamos con otros procesos constructivos.

La justificación de esta propuesta tiene una doble vertiente. La de desarrollar un proyecto que permita trabajar en una revalorización de la arquitectura excavada como exponente de sostenibilidad, fruto de la conjunción de factores geológicos, climáticos y culturales; y por otro entender la celebración de una serie de actividades programadas con antelación, como excusa para reflexionar, permitiendo valorar la consecución de los objetivos marcados y trazar líneas futuras de actuación que consigan afianzar la recuperación de la arquitectura excavada como patrimonio cultural.

Los distintos aspectos que se considera necesario trazar para aproximarnos con objetividad a este objeto de estudio, deben contemplar su dimensión material, pero a la vez su significación desde un punto de vista de los referentes identitarios, donde lo inmaterial se posiciona de una manera clara.

Por lo que respecta a los orígenes y evolución de una forma de vivir, la indisoluble unión a unos momentos específicos, hace que actualmente la casa cueva fusione aspectos históricos y etnológicos necesarios para su comprensión como vivienda. Resultado de una evolución que llevó desde el aprovechamiento natural a su elaboración artificial, la carga simbólica que guarda permite entender la singular forma de vivir que albergó (Riquelme, 1999; Rivero, 1986).

Respecto a las características constructivas de la arquitectura excavada ya se ha señalado su importancia como ámbito que permitía mantener unos modos de relación, organización del trabajo y traslación consuetudinaria de saber, básicos para su perpetuación y valorización actual.

Un aspecto que se quiere remarcar es el del análisis comparativo con otras regiones del contexto próximo. Así, la importancia de la creación de los hábitats excavados en la cuenca del Mediterráneo tiene un espacio de especial desarrollo con una importante trascendencia histórica. En ese sentido el análisis de la capacidad de esta solución constructiva para adaptarse a distintos contextos y materiales, como ver las posibilidades que el ser humano ha tenido respecto a la adaptabilidad de una misma solución en distintos ámbitos, se convierte en un ejercicio del que se pueden extraer innumerables conclusiones incluso a nivel paisajístico (Navarro; Suárez, 2009). Un aspecto este que no es nuevo y refleja en cualquier caso el interés que siempre ha despertado (Jessen, 1955).

La trascendencia de la presencia humana en la región y la conversión del territorio en paisaje cultural, abriendo con ello una potencialidad clara, hace de esta combinación una fórmula que permite plantear unas aproximaciones desde la generación de desarrollo. En esa línea, la singularidad que representa la arquitectura excavada actualmente es un reclamo de primera categoría dentro de las propuestas que a través del turismo buscan dinamizar este territorio.

La arquitectura excavada en la actualidad debe integrarse en las actuales tendencias arquitectónicas, sensibles a unos problemas de sostenibilidad que están volviendo a recuperar sistemas tradicionales de construcción por ser representativos de un aprovechamiento óptimo de los materiales. Sobre todo cuando las técnicas tradicionales son las más aconsejadas para una tipología constructiva en la que la innovación no aporta soluciones destacadas como es el caso del empleo de maquinaria en su ejecución, sobre todo retroexcavadoras, lo que supone transmitir vibraciones

y empujes que pueden afectar a la estabilidad de los huecos y la terminación de las dependencias⁷. En ese sentido, la necesidad de recoger iniciativas que estén recuperando la cueva como espacio de habitabilidad, sirviendo de proceso reflexivo en torno a las posibilidades de la misma como vivienda contemporánea, se debe convertir en un puntal de las estrategias locales de desarrollo por el papel destacado que puede jugar un elemento tan diferenciador como este.

La dimensión social de la cueva, más allá de lo etnológico, puede plantear el análisis de los ámbitos en su vínculo con el género. La comprensión de los espacios pasa por identificar a todos los actores que participan en los mismos y sus respectivas funciones. De esta manera, el papel preponderante de la investigación está siendo revisado a partir del reconocimiento al papel de la mujer como agente activo de nuestra historia, lo que obliga a replantear las visiones dadas hasta la actualidad. En el caso de los espacios domésticos, la estructura interna de la vivienda refleja desde el punto de vista de su funcionalidad y simbología el distinto rol que hombres y mujeres tienen.

Por último no podemos perder de vista el papel de la educación en el patrimonio excavado. La difusión del patrimonio como herramienta de educación social es fundamental para proyectar la cultura de un territorio como recurso económico de progreso. En este caso, se propone que la generación de conocimiento sobre hábitats excavados se transforme desde la didáctica en una herramienta multidisciplinar y transversal que permita sensibilizar sobre el desarrollo de un territorio a partir de sus valores culturales, arquitectónicos y paisajísticos, proyectando este conocimiento en las aulas y en los diferentes agentes socioeconómicos.

Las distintas escalas del sistema educativo permiten trazar estrategias de contenidos acordes con cada nivel de enseñanza. Así se podría trabajar con todos ellos, a partir de la conformación de equipos de profesionales de la Educación, técnicos de Ayuntamiento, los Centros de Profesorado además de los investigadores de la Universidad.

Conclusiones. La arquitectura excavada, más allá de la vivienda

La peculiaridad de la cueva ha permitido que las nuevas dinámicas impuestas por el devenir económico, hayan otorgado si cabe una nueva oportunidad a su valoración, en este caso vinculada a la explotación del territorio. Si bien las iniciativas más numerosas han ido dirigidas al aprovechamiento turístico de las casas-cuevas, la apuesta por cultivos como la uva, ha permitido la recuperación de una función agraria que se tiene registrada desde al menos el siglo XIX, y donde también se incluyen otras como la tradicional aceituna.

La llegada de las ayudas europeas a partir de la entrada de España de la Unión Europea mediante fondos LIDER, PRODER y FEDER desde la última década del siglo XX, tuvo en las regiones más desfavorecidas un destino que permitió replantear opciones de desarrollo más allá del sector primario agroganadero. Las dinámicas de actividades como el turismo pronto se vieron favorecidas por esta inyección de dinero aportando una opción más, cuando ya lejos de la exclusividad del sol y playa, el turismo de interior y el cultural comenzaban a despuntar. Se abría así la posibilidad de posicionarse en un mercado complejo y competitivo, donde se partía con la ventaja de una calidad ambiental y paisajística reconocida, después de un largo proceso, en julio de 2020 con la declaración del Geoparque de Granada.

La diversificación productiva en el sector primario ha tardado más en llegar. La tradicional visión del agricultor de la zona se ha visto alterada por apuestas como el pistacho y la uva, los dos

⁷ El uso de excavadoras de medianas o grandes dimensiones implica la degeneración de los procesos constructivos y por extensión de la aparición de unas modalidades de cueva que alteran las tipologías modulares tradicionales y buscan solo la compartimentación interior de los espacios con tabiques de ladrillo, p. 35 (AA.VV., 2007: 35).

de larga tradición en la zona. Si del primero se tienen noticias desde el siglo XVI, aunque su producción posteriormente languideció hasta desaparecer, de la segunda se mantuvo su explotación hasta el siglo XIX como hemos indicado, cuando una plaga de filoxera arrasó con las vides de la península. Es este segundo, el que ha proporcionado además la recuperación productiva de la cueva, como espacio ideal por su estabilidad térmica y ambiental, para producir unos caldos que están siendo consumidos en importantes restaurantes nacionales e internacionales.

A lo largo y ancho del territorio que comprende las altiplanicies granadinas, en las comarcas de Guadix, Baza y Huéscar, la función productora había dejado unos antecedentes que se mantenían presentes en el imaginario de la población, incluso testigos complementarios a la explotación agroganadera como es el caso de los columbarios de la localidad de El Marchal, que aportaban alimento a la población y abono para la mejora de la productividad de las vegas del río Alhama (Ruiz y Sorroche, 2021).

Los ejemplos existentes han sido inventariados por el Instituto Andaluz del Patrimonio, o la Diputación de Granada, siendo registrados algunos cortijos que cuentan con la totalidad o parte de sus instalaciones excavadas. Las cuevas del Cojo Burgos y del Cazador en Cúllar Baza, son dos de los ejemplos más destacados o que junto con Fuente Vieja en el municipio de Gorafe, representan una tipología en la que todas sus dependencias son excavadas (AA.VV., 2003).

Vemos por tanto que el impulso por la recuperación no ha hecho más que comenzar y es en esa línea en la que consideramos se debe seguir trabajando para convertir esta tendencia en estructural dentro del organigrama socioeconómico de la zona.

Bibliografía

- AA.VV. (1989): *Arquitectura subterránea*. 2 vols. Sevilla: Junta de Andalucía.
- AA.VV. (2003): *Cortijos, haciendas y lagares. Arquitectura de las grandes explotaciones de Andalucía*. Provincia de Granada. Sevilla: Junta de Andalucía.
- AA.VV. (2007): *Cuevas en la provincia de Granada. Aspectos técnicos, urbanísticos, legales, patrimoniales, perspectivas para el desarrollo local de la provincia*. Granada: Diputación.
- Conama (2018): «Geoparque de Granada. Conservación, Investigación, Educación y Desarrollo Sostenible basados en el patrimonio geológico y la biodiversidad de un territorio». *Rumbo 2030*. Actas del Congreso Nacional de medioambiente 2018, pp. 1-26.
- ASENJO SEDANO, C. (1972): «Las cuevas de Guadix. Sus orígenes». *Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada* (2), pp. 85-101.
- ASENJO SEDANO, C. (1983): *Las cuevas de Guadix*. Granada: Caja de Ahorros.
- ASENJO SEDANO, C. (1990): *Las cuevas: un insólito hábitat de Andalucía Oriental*. Brenes: Muñoz Moya y Montraveta S.L.
- BEAS TORROBA, J.; PÉREZ LÓPEZ, S. (1994): *Geografía de Guadix. Aspectos físicos y humanos*. Granada: Diputación.
- BERTRAND, M. (1997): «Poblamiento y explotación del territorio en la región e Guadix-Baza durante la Edad Media». *Anuario Arqueológico de Andalucía*, vol. II, pp. 98-104.
- BERTRAND, M. (1987): «Trogloditismo artificial y estructuras medievales de poblamiento e la Hoya de Guadix. Estudios comparativos con otras zonas de Andalucía oriental». *Anuario Arqueológico de Andalucía*, vol. II, pp. 200-206.
- FLORES, C. (1979): *La España popular. Raíces en una arquitectura vernácula*. Madrid: Aguilar.

- GALLEGO ROCA, F.J. (1987): *Morfología urbana de las poblaciones del reino de Granada a través del catastro del Marqués de la Ensenada*. Granada: Diputación.
- GÁMEZ NAVARRO, J. (intr.)(1991): *Guadix 1752. Según las respuestas Generales del Catastro de Ensenada*. Madrid: Tabapress.
- MADOZ, P. (1987): *Granada*. Valladolid: Ámbito Ediciones.
- MARCHIONI, M. (1989). *Las cuevas de Guadix. Así piensa la gente de las cuevas*. Guadix: Ayuntamiento.
- MARTÍNEZ FEDUCHI, L. (1974-1984): *Itinerarios de arquitectura popular española*. 5 vols. Barcelona: Blume.
- NAVARRO VALVERDE, F. A., SUÁREZ MEDINA, J. (2009): «Arquitectura etnográfica en las comarcas de Guadix-Baza (Granada). Necesidad de construir paisajes culturales». *Gazeta de Antropología*, 25 (2). <http://hdl.handle.net/10481/6905>
- PÉREZ CASAS, A. (1982): «Los gitanos y las cuevas en Granada». *Gazeta de Antropología* (1) [En línea].
- RIQUELME, CANTAL, J. A. (1999): «La cueva de las ventanas. Píñar (Granada). Recuperación e investigación del patrimonio arqueológico». *Revista de Arqueología de la Universidad de Granada* (20), pp. 12-19.
- RIVERO GALÁN, E. (1986): «Ensayo tipológico de los enterramientos colectivos denominados cuevas artificiales en la mitad meridional de la península ibérica». *Habis* (17), pp. 371-401.
- SORROCHE CUERVA, M. A. (2004) *Poblamiento y arquitectura tradicional en Granada. Patrimonio de las comarcas de Guadix, Baza y Tierras de Huéscar*. Granada: Universidad-Colegio de Aparejadores.
- TORRES BALBÁS, L. (1988 facsímil): «La vivienda popular en España». En F. Carreras Candi: *Folklore y costumbres de España*. Madrid: Ediciones Merino, pp. 200-217.
- URDIALES BIEDMA, M. E. (1979): «Algunos aspectos del hábitat troglodita en la provincia de Granada». *Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada* (9), pp. 311-338.
- URDIALES BIEDMA, M. E. (1984-1985): «La cueva como vivienda. Forma de expresión de la arquitectura popular adaptada al medio geográfico». *Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada* (14), pp. 85-100.
- URDIALES BIEDMA, M. E. (1986-1987): «La cueva: ¿vivienda marginal? Análisis en Benalúa de Guadix». *Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada* (15), pp. 165-196.
- URDIALES VIEDMA, M. E. (1988): «Significación actual de la vivienda troglodítica en el sector oriental del surco intrabético granadino». En *Sierra Nevada y su entorno*, pp. 77-86.
- URDIALES VIEDMA, M. E. (2003): «Las cuevas-vivienda: de infravivienda a vivienda de futuro». *Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y Ciencias Sociales* (7), 11 pp.

Actuación en bienes culturales muebles en caso de emergencia o catástrofe: protocolo de organización del triaje

Action on movable cultural property in the event of an emergency or disaster: protocol for organising triage

Inmaculada Chuliá Blanco

Instituto Valenciano de Conservación Restauración e Investigación

chuliablanca@gmail.com

Resumen: Dentro del ámbito de los bienes culturales muebles y en materia de emergencias todavía son escasos los recursos humanos, los procedimientos técnicos y los protocolos para la singularidad y diversidad de sus colecciones, fondos o depósitos; en la misma medida se carece de una terminología y legislación especializada. En este artículo se proponen algunas pautas en la metodología de asistencia durante la respuesta, con el fin de mejorar la intervención durante las primeras horas tras un siniestro y diseñar una estructura de clasificación y aislamiento para recuperar la conservación del conjunto. Al poner a disposición un modelo utilizado en 2018 durante un simulacro sísmico con el rescate de una colección de pinturas, esculturas y la biblioteca del Casino de Torrevieja, se pretende decretar una normalización en la metodología para empezar a trabajar con directrices ordenadas, e incorporar durante la evaluación, el triaje de los bienes muebles en las fichas de emergencias. Documentos imprescindibles en un Plan de Salvaguarda de la institución.

Palabras clave: Triage, colecciones, estrategias, cuarentena.

Abstrac: Human resources, technical procedures and protocols for the singularity and diversity of its collections, funds or deposits are still scarce in the field of movable cultural property and in emergencies; to the same extent there is a lack of specialised terminology and legislation. This article proposes some guidelines in the methodology of assistance during the response, in order to improve the intervention during the first hours after an incident and to design a classification and isolation structure to recover the conservation of the collection. By making available a model used in 2018 during a seismic drill with the rescue of a collection of paintings, sculptures and the library of the Casino of Torrevieja, it is intended to decree a standardization in the methodology to start working with ordered guidelines, and to incorporate during the assessment, the triage of movable assets in the emergency files. Essential documents in a Safeguarding Plan for the institution.

Keywords: Triage, collections, strategies, quarantine.

Introducción

Para ser eficaces con la respuesta institucional, se necesitan ciertos cambios de gestión del riesgo que afecta al patrimonio cultural mueble, tanto en el enfoque como en la metodología de trabajo. Esos cambios comienzan con la consolidación de un Plan de Autoprotección en la institución y dentro de éste, la extensión del Plan de Salvaguarda de colecciones tanto identificando primero las probabilidades de siniestros, como con una continua monitorización del riesgo y su reducción dentro de un Plan de Conservación Preventiva (PCP) (Herráez, Pastor y Durán, 2019).

En términos generales es una estrategia útil para dar respuesta a siniestros leves, emergencias o catástrofes. Siendo la periodicidad, la magnitud del daño alcanzado y el alto nivel de estrés colectivo, los que marcarán la diferencia entre siniestro, emergencia o catástrofe. Cuando una zona sea declarada catastrófica, se necesitará una respuesta institucional comprometiendo unas necesidades de coordinación y asistencia de mayor complejidad. En definitiva, un planteamiento que debe estar recogido en el Plan de Salvaguarda de Colecciones (Figura 1).

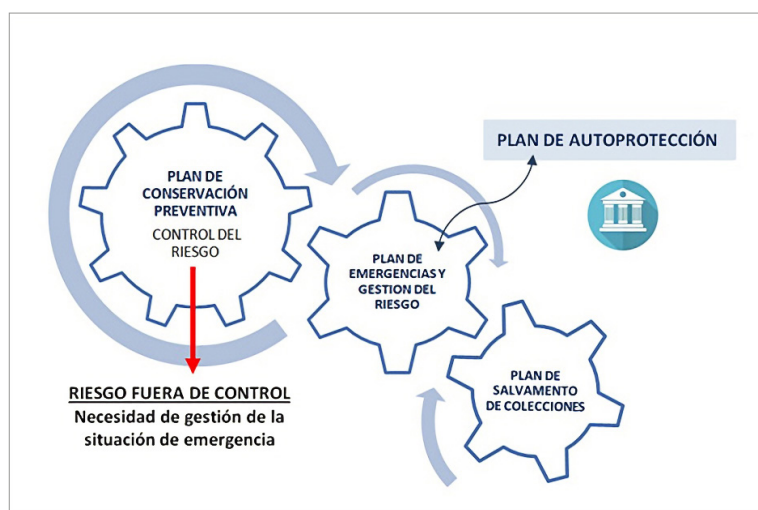


Figura 1. Interrelación del Plan de Salvaguarda de colecciones en una institución. Fuente: Inmaculada Chuliá Blanco.

En este caso, la respuesta institucional a través del Plan de Salvaguarda de Colecciones proporcionará estrategias efectivas, una planificación detallada y la formulación de ordenados protocolos de rescate. Se necesitará dimensionar la organización de las áreas de rescate, identificar los recursos necesarios, protocolos y pliegos de condiciones técnicas. Una de las metodologías que se tendrá que implantar en el Plan de Salvaguarda de Colecciones es el uso del triaje en las fichas de emergencias para el rescate: una herramienta que permite, con una adecuada identificación, la detección inmediata de elementos vulnerables, su rápida individualización, reducir lesiones, destrucción o daños.

La evaluación con un triaje permite, al igual que ocurre con el análisis en el Patrimonio Inmueble, establecer la clasificación del grado de deterioro adquirido durante el siniestro, separando del grupo aquellas obras que pueden contaminar al resto y trasladarlas al área de cuarentena (húmeda o seca) (AA.VV., 2020) con el objetivo de iniciar lo antes posible los tratamientos de estabilización.

El triaje es una metodología coordinada de clasificación y evaluación frente a múltiples víctimas utilizada en el mundo de las emergencias sanitarias (Álvarez, Chuliá Y Hernando, 1992). Este

circuito de reconocimiento, es eficaz en presencia de un indeterminado número de bienes muebles dañados por un siniestro y con riesgo inminente de posible pérdida. Al tratarse de un proceso dinámico y poco habitual en el entorno de los bienes culturales muebles, es necesario elaborar los códigos de evaluación para clasificar el grado de deterioro y es fundamental que los equipos de emergencias se familiaricen con la secuencia y metodología.

Estos equipos deben crearse en la propia institución si reúne en sus plantillas técnicos adecuados. Ante la ausencia de efectivos, será necesaria la ayuda de la Unidad de Rescate de Emergencias. Precisamente, una de las propuestas en el Plan Nacional de Emergencias y Gestión de Riesgos en el Patrimonio Cultural y en lo referente a las competencias con las administraciones locales, establece la responsabilidad de constituir unidades de emergencia a nivel autonómico, dado que no todas las instituciones tienen los mismos recursos.

Estos equipos se constituyen con técnicos multidisciplinares y especializados. En la Comunidad Valenciana esta Unidad de rescate de Patrimonio está asignada desde el 2019 en la Unidad Básica de Evaluación de Daños, dentro del Plan Territorial de Emergencia de la Comunidad Valenciana (Decreto 243/1993, de 7 de diciembre).

Objetivos

En cualquier procedimiento, la documentación determina la comprensión de la metodología establecida y refuerza su operatividad. Con este propósito, se considera significativo crear un modelo documental que contenga las necesidades asistenciales de los bienes, diferenciando su diversidad material.

La finalidad de este modelo, además de reforzar la operatividad, persigue mejorar las capacidades técnicas de los usuarios. En la metodología incluye los procedimientos con criterios de calidad, introduce códigos para la protocolización del triaje en las fichas de emergencia y pautas que ayudan a mejorar la toma de decisiones sobre los bienes afectados.

El objetivo de este modelo persigue la normalización de procedimientos y su simplificación, reforzando una mejor comunicación.

Metodología

Con la complejidad de actividades necesarias en la post-emergencia con la asistencia y posible rescate de las colecciones, se requiere además de un registro documental establecer un programa muy detallado. Se necesita planificar los recursos materiales y humanos, la elaboración de procedimientos ante los posibles impactos negativos además de la creación de fichas de emergencias para el rescate, garantizando su trazabilidad durante la respuesta a la emergencia. Requiere también que la manipulación de las obras sea ejecutada por equipos formados en técnicas de recuperación, que manejen protocolos especiales de rescate y que estén familiarizados con la realización de simulacros. No se pueden plantear las mismas acciones para la colección de un museo de historia natural, una pinacoteca, un archivo, una biblioteca o un yacimiento arqueológico.

La proposición se fundamenta en la experiencia durante un simulacro sísmico en Torrevieja (Alicante), organizado por la Agencia de Seguridad y Emergencias de la Comunidad Valenciana en el 2018. Los simulacros contienen toda la estructura de trabajo y la asignación de roles, son ejercicios que permiten auditar las capacidades de los equipos de reconocimiento e intervención frente a una simulación real, así como su coordinación, preparación física y psicológica.





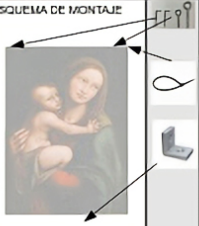
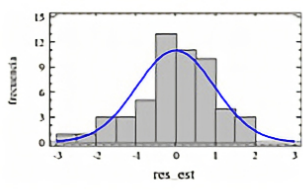
FICHA DE EMERGENCIAS		FICHA DE EMERGENCIAS																	
																			
PLANO/LOCALIZACIÓN 		TRIAGE AVANZADO																	
PRIORIDAD DE EVACUACIÓN (VALOR 1<5) INCENDIO 3 INUNDACIÓN 4		DEPÓSITO DE TRÁNSITO ZONA SECA ZONA HUMEDA CUARENTENA CONTAMINANTES																	
DISTANCIA TECHO 5 METROS DISTANCIA AL SUELO 80 CM	TIEMPO ESTIMADO DE DESMONTAJE 15 min	ALTERACIONES: SEGURIDAD, ESTRUCTURA SOPORTE, BIENESTAR, INFLAMATORIA, DOLORS																	
TIPO DE OBJETO/ dimensiones: Pintura sobre lienzo 00x00x00	OBSTACULOS: desnivel de 50 cm. y tramo de escalera	MATERIAL DE EMBALAJE: ESCALA DE INTERVENCIONES INMEDIATAS																	
SISTEMA CONSTRUCTIVO Y SU MONTAJE: En pared de ladrillo con En la base presenta estructura metálica	SOPORTE HUMANO MANIPULACION:  CARGA: PINTURA 3 KG, MARCO 7 KG	PAUTAS DE CONTROL: Mediciones cada 8 horas																	
ESQUEMA DE MONTAJE: 	ACCESORIOS DE DESMONTAJE: Destornillador cabeza ranura, Cúter o tijeras PROCEDIMIENTO DE EVACUACIÓN: <ul style="list-style-type: none"> -Atropillar pieza siempre con las dos manos - Primero liberar y cortar la traza sujeta al anclaje en la parte derecha - Cuidado con los salientes del marco. Elemento muy pesado - Colocar las manos en el marco y desplazar ligeramente hacia arriba - liberar el cáncamo angula del anclaje 	ÁREA DE OBSERVACIÓN: 																	
NÚMERO DE PIEZAS: 00	RUTA DE EVACUACIÓN: SALA DE DEPÓSITO	TABLA DE MEDICIONES: <table border="1"> <thead> <tr> <th>VALORES REFERENCIA</th> <th>RES</th> <th>TEMPERATURA</th> <th>LUX</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		VALORES REFERENCIA	RES	TEMPERATURA	LUX	1				2				3			
VALORES REFERENCIA	RES	TEMPERATURA	LUX																
1																			
2																			
3																			

Figura 2. Modelo de ficha preparado para el ejercicio del Simulacro de Torrevieja 2018. Fuente: Inmaculada Chuliá Blanco.

Como subgrupo en la Unidad Básica de evaluación de daños, el Institut Valencià de Conservació, Restauració i Investigació (IVCR+i) se encargó de instrumentar un conjunto de medidas para el ejercicio 4 del simulacro, donde se establecieron todos los procedimientos de asistencia y los protocolos creados para el rescate con una colección de pinturas ubicada en un edificio histórico de la ciudad.

Se diseñaron unas fichas de emergencias para el rescate (Figura 2), se establecieron los patrones del triaje, diferentes con el umbral de alerta según tipología, se organizó un área de asistencia y se realizó formación previa al ejercicio.

Metodología del triaje para los bienes culturales muebles

La fuente de partida para la clasificación de los daños por categorías, se basa en el Sistema Manchester (MTS) (Soler, 2010) del mundo sanitario de emergencias, que establece una codificación con 5 niveles al que atribuye un número, un color y un tiempo máximo para el primer contacto. Estos niveles de clasificación sirven para establecer evaluaciones que deben cumplir una serie de reglas: rápidas y completas; precisas y con seguridad. El sistema además, tiene que verificar la «triple E» (etiquetaje, estabilización y evacuación). Por tanto, con las fichas de emergencia, se prepararon un conjunto de variables y se establecieron patrones con los niveles de evaluación para el triaje y para cada situación adversa.

Asimismo, existen distintos tipos de triaje en función de los parámetros de probabilidad de ocurrencia y de gravedad de repercusión que dependerán del tipo de siniestro. Para los bienes culturales se establece un modelo de clasificación en cuatro tipos de amenazas y por colores el grado

de necesidad asistencial, considerando en todas las dimensiones, la urgencia terapéutica como asociación determinante (Tabla 1).

El deterioro material que sufren durante un siniestro las pinturas, esculturas, objetos etnográficos, material arqueológico, cerámica, muebles, cristal arqueológico, metales, huesos, documentos y/o archivos, planos, orfebrería o retablos, conllevan daños similares pero con necesidades asistenciales y plazos terapéuticos diferentes según el siniestro ocurrido (sea terremoto (Feilden, 1997), incendio, inundación o contaminación).

Por consiguiente, cada Ficha de emergencias admite la incorporación de nuevos códigos para el triaje con un circuito distinto según tipología (Figura 2). Los especialistas, así podrán asignar qué nivel de prioridad y requisitos de asistencia terapéutica necesita, ubicarlo en observación por cuarentena (ya sea húmeda o seca) y señalar las pautas de estabilización y manipulación necesarias desde el primer contacto (Tabla 2 y Tabla 3).

Es una herramienta que ayuda a determinar el nivel de prioridad de una obra a través de la identificación de patrones en una cadena de decisiones. Con esto, el control técnico-asistencial favorece un traslado seguro ya sea dentro de la propia institución como a un depósito externo. Asimismo al determinar pautas terapéuticas para su estabilización, mejora su conservación y se evitan drásticas intervenciones posteriores.

La ficha de emergencias con los códigos del triaje está diseñada además, para asegurar una trazabilidad; si su contenido está asociado además, al número de inventario de la obra, con acceso mediante un código QR o similar, la posibilidad de incorporar más información y almacenamiento en *cloud storage* será inmediata, incluso su acceso remoto por otros especialistas.

Con esta metodología se constituyeron unas estrategias con los patrones establecidos y ajustadas a las características del edificio y el tipo de colección. A nivel funcional, se crearon áreas de trabajo y se definieron roles y responsabilidades en los grupos de intervención. Y con el propósito de auditar la comprensión de los ejercicios propuestos, los equipos poseían perfiles técnicos diferentes.


Rojo	URGENCIA ABSOLUTA Plazo terapéutico urgente En cuarentena húmeda/seca	 <p>Modelo etiqueta para el embalaje con código de color y pictogramas</p>
Amarillo	URGENCIA RELATIVA Asistencia pautada	
Verde	LEVE Monitorización	
Gris o Negro	NO URGENTE para investigación	

Tabla 1. ESCALAS Y CODIGOS: asociaciones previstas utilizadas para el triaje en las fichas de emergencias con el Patrimonio cultural mueble. Simulacro de Torreveija. En la derecha, modelo de etiqueta para acompañar a los objetos embalados. Fuente: Inmaculada Chuliá Blanco.

Tabla 2. Ejemplos básicos del triaje en colecciones: herramienta de clasificación y correlación daño/tratamiento. Fuente: Inmaculada Chuliá Blanco.

CATEGORÍA	SIGNIFICADO	CONSECUENCIAS	PATRONES
UMBRAL DE ALERTA 1	Grave peligro	Tratamiento y ESTABILIZACIÓN INMEDIATA; transporte lo antes posible; ASIGNAR EL TIPO DE CUARENTENA	-Contaminación biológica / moho/Presencia de depósitos extraños en superficie, barro, fuel, o grasa. Presencia de hollín, partículas de combustión -Presencia de superficies y materiales mojados, (a tránsito zona húmeda) -Materiales que han soportado una elevada temperatura >300°C, (a tránsito zona seca) -TODO el material fotográfico, películas, microfilm, soportes de información, discos ópticos o sonoros SIN estuches
UMBRAL DE ALERTA 2	Lesiones graves	Observación constante; Rápido tratamiento; Asignar área de estabilización	-Alteración cromática, daños mecánicos y químicos. Presencia de depósitos de grasa y partículas atmosféricas -Corrosión metálica inestable. Piezas descolgadas fragmentadas y con daños mecánicos
UMBRAL DE ALERTA 3	Una lesión mínima o ninguna lesión	Estabilización y observación cuando sea trasladado	Deterioro que se puede estabilizar con pautas y medidas de conservación preventiva
UMBRAL DE ALERTA 4	No probabilidad de supervivencia	Observación e investigación Transporte cuando sea posible	-Calcinación -Fragmentación absoluta y/ o colapso. -Destrucción en más de 90%

Primer triaje: discriminantes y escalas de gravedad

Patrones identificados	Color/Prioridad y Acciones a señalar
<ul style="list-style-type: none"> — Aplastamiento, corrosión, deformación, desgarros, perforaciones o separación de elementos — Fragmentación y diseminación de piezas — Presencia de compuestos orgánicos volátiles COV's: urgente uso de material barrera para aislar (PETRE, Marverseal, plancha de plexiglas, lamina de poliester,..) — Contaminación biológica / moho — Presencia de depósitos extraños en superficie, barro, fuel, o grasa. — Disociación — Presencia de corrosión — Presencia de sales — Presencia de superficies y materiales mojados, (a tránsito zona húmeda) — Materiales que han soportado una elevada temperatura >300°C, (a tránsito zona seca) — Presencia de hollín y partículas de combustión — Soportes y bastidores fragmentados — TODO el material fotográfico, películas, microfilm, soportes de información, discos ópticos o sonoros SIN estuches — Documentos sueltos con tintas deterioradas, cintas adhesivas, fóxin, elementos metálicos oxidados,... 	<p style="text-align: center;"><u>PRIORIDAD URGENCIA ABSOLUTA</u></p> <p>ACCIONES A SEÑALAR EN SITUACIÓN CRÍTICA: Deterioro que implica estabilización, medidas de conservación preventiva, medidas de conservación curativa y tratamiento de restauración posterior.</p> <ul style="list-style-type: none"> — Planificación previa de movimiento de la pieza y recorrido — Primera prioridad: asignar área de cuarentena (seca o húmeda) — Preparar soporte y traslado inmediato — Desinsección / Fumigación con extractos naturales — Traslado a control climático — A triaje de estabilización: zona húmeda, zona seca, aislamiento o cuarentena. — Segregación de materiales afectados por pautas de conservación — A depósitos de congelación o liofilización — En zona húmeda: drenaje o secado — En zona seca: observación y monitorización medioambiental — Monitorización estructural
<ul style="list-style-type: none"> — Marcos sueltos — sospecha de contaminación biológica / plagas — Manchas y presencia de humedad — Todos los objetos que estén dentro de una vitrina — Corrosión metálica inestable — Piezas descolgadas, fragmentadas, daños mecánicos — Oxidación de material — Concreciones y depósitos en superficie: pH ácido y sustancias oxidantes — Alteración cromática, daños mecánicos y químicos 	<p style="text-align: center;"><u>PRIORIDAD URGENCIA RELATIVA</u></p> <p>ACCIONES A SEÑALAR EN SITUACIÓN GRAVE: Deterioro que requiere la aplicación de pautas de estabilización, medidas de conservación preventiva y posible restauración posterior.</p> <ul style="list-style-type: none"> — planificación previa de movimiento de la pieza y recorrido — Objetos de segunda prioridad — Retirada de depósitos con brochas suaves y aspiración (si lo permite) — Encapsular y congelar — Derivar a control ambiental HR/T hasta estabilidad climática — Preparar fundas de poliester o prolipropileno sin sellar para materiales delicados — Segregación de materiales por pautas de conservación

Tabla 3a. Gráfica IVCR+i Método de evaluación de triaje, preparado para el simulacro de sismo en Torrevieja, organizado por la Agencia de Seguridad y Emergencias de la Comunidad Valenciana, 2018. Fuente: Inmaculada Chuliá Blanco.

<ul style="list-style-type: none"> — Presencia de polvo y partículas atmosféricas — Pérdidas de elementos — Fatiga mecánica — Sin diseminación: fracturas, fragmentos agrupados — Contenedores, estuches o cajas abiertas — Pequeñas fracturas, fisuras, golpes, arañazos — Manchas en superficie — Embalaje inadecuado — Ausencia de control HR/T (conservación preventiva) — Archivos, legajos, etc. sin daños, sin protección y desordenados 	<p style="text-align: center;"><u>PRIORIDAD LEVE</u></p> <p>ACCIONES A SEÑALAR EN SITUACIÓN MODERADA: Deterioro que se puede estabilizar con medidas de conservación preventiva.</p> <ul style="list-style-type: none"> — Planificación previa de movimiento de la pieza y recorrido — Objetos de tercera prioridad — Derivar a control ambiental HR/T y observación — Realizar Test de presencia de contaminantes — Segregación de materiales afectados por pautas de conservación
<ul style="list-style-type: none"> — Material calcinado 80% — Material desintegrado 70% 	<p style="text-align: center;"><u>PRIORIDAD NO URGENTE</u></p> <p>ACCIONES A SEÑALAR EN SITUACIÓN TERMINAL:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Planificación previa de soporte para traslado y embalaje — Objetos sin prioridad — Transporte para documentación e investigación

Tabla 3b. Gráfica IVCR+i Método de evaluación de triaje, preparado para el simulacro de sismo en Torre Vieja, organizado por la Agencia de Seguridad y Emergencias de la Comunidad Valenciana, 2018. Fuente: Inmaculada Chuliá Blanco.

Tal y como se ha comentado, las fichas de emergencias contienen todas las escalas y discriminantes para realizar una evaluación con triaje. Por ejemplo para el grupo de fichas con pinturas, ante la presencia de deformaciones en el soporte el triaje derivará al código amarillo asociado a un umbral de alerta 2. Sin embargo para aquellas pinturas con desprendimientos en la policromía o alta humedad en superficie, la escala del triaje indicará un umbral de alerta 1 y la priorización del código rojo. En un espacio limitado de tiempo, se establece el nivel de prioridad, las particularidades de su manipulación y la asignación de una determinada área de observación (Figura 3).

Esta metodología permite manejar adecuadamente los recursos, agilizar la toma de decisiones y atender a un mayor número de obras, sean de la tipología que sean. No todas las instituciones tienen los mismos recursos y en la mayoría se carece de un Plan de Salvamento de Colecciones y/o una jerarquía de rescate.

Competencias de los equipos de respuesta para el control de la emergencia con los bienes culturales muebles.

Durante el simulacro en Torre Vieja, se determinó que para el control de la respuesta, se necesita la organización de un equipo y una metodología basada en cuatro actividades: salvar, clasificar, tratar y estabilizar. Sin interferir en la propia intervención de control de la situación de emergencia (Cirujano y Sousa, 2015).

Durante la post-emergencia se deben seguir las normas preestablecidas en el Plan de Salvamento y Emergencias, que son la base de la operatividad de los equipos:



Figura 3. Modelo de trazabilidad para el triaje. El código de color (rojo, amarillo, verde o gris) se establece cuando se realiza el triaje. Fuente: Inmaculada Chuliá Blanco.

- Se realiza un primer reconocimiento, movilizándose recursos materiales y equipos de intervención.
- Se acredita a todo el personal, equipos de intervención y recursos externos que se presentan.
- Se establecen zonas seguras (dentro del edificio) y/o refugios (fuera del edificio en el caso de tener que trasladar parte de la colección).
- Se organiza la actuación de los equipos de emergencia en las diferentes áreas y se determina un rescate ordenado, planteando un procedimiento según el siniestro.
- Antes de emprender la evacuación de una obra, primero se tendrán que analizar los recursos que se necesitan y los recorridos hasta el área de clasificación.
- Si el número de individuos lo permite, se establecen turnos de rotación en los equipos de rescate para evitar la fatiga y los accidentes.
- Se establece un primer triaje de clasificación de daños y se dan pautas para su estabilización.

Para mejorar ciertos procesos fuera de este marco teórico y teniendo en cuenta que los sucesos catastróficos del pasado han demostrado que se debe aprovechar la formación técnica de sus integrantes, es necesaria la presencia de responsables en cada área capaces de liderar equipos especializados. Cuando las instituciones sean más pequeñas con menos personal y recursos, ciertas funciones estarán compartidas. Básicamente, los integrantes de un equipo de respuesta para las colecciones deberían contar con:

- Responsable del equipo de intervención sobre la colección y las tareas preliminares de rehabilitación.

El coordinador del equipo de recuperación debe formar parte de la institución y debe pertenecer al grupo de técnicos restauradores de bienes culturales. Son los que mejor conocen su tipología, los diferentes formatos y materiales, la mejor forma de manipulación, incluso

aquellas necesidades que pueden llevar a precisar elementos auxiliares durante emergencias complejas.

Tienen autoridad para tomar decisiones difíciles acerca de la priorización, pueden servir de enlace con los otros expertos en emergencias y pueden autorizar el uso de algún espacio adecuado para depósito transitorio dentro de la institución.

– Responsable de seguridad

Corresponde al responsable de seguridad de la institución dirigir y vigilar los bienes rescatados y verificar la trazabilidad de los desplazamientos. Entre sus funciones se incluye la seguridad y control de aquellas áreas afectadas por el siniestro para que no se produzcan robos. Entre sus competencias está también, la acreditación de los equipos de intervención.

– Responsable de operaciones de rescate

El responsable de las operaciones de rescate debe supervisar el movimiento de todas las obras y dar protección a aquellas que permanecen en el área del siniestro, sin exponerlas a nuevos riesgos. La manipulación de colecciones dañadas conlleva un riesgo añadido y es responsabilidad de los técnicos restauradores su control.

– Responsable de los recursos materiales

Aunque la institución deberá disponer de unos recursos materiales básicos para cualquier intervención de emergencia, la función del responsable de recursos materiales requiere la provisión de este material y su coordinación con proveedores, distribuidores y empresas de transporte y almacenaje en el caso de catástrofe.

– Responsable de documentación, inventario de objetos trasladados.

Asumirá el registro y custodia de todo el expediente de la emergencia. Es importante establecer un registro documental desde el principio, que ayudará en el reconocimiento de toda la información. Durante las actividades que se realizan en una emergencia se generaran nuevos expedientes: etiquetas, fichas, cajas, informes, correos, autorizaciones, organigrama, listados de proveedores, equipos de intervención, autorizaciones, etc.

– Responsable de triaje de evaluación

El responsable del triaje debe coordinar al equipo de evaluación de las obras afectadas. Los procedimientos están designados en el protocolo e incluidos en las fichas de emergencias. Sólo técnicos especialistas deben asumir estas funciones: son responsables de determinar el estado de conservación del material afectado y de su prioridad terapéutica.

– Responsable de embalaje y transporte

Su cometido es preparar suministros y supervisar las actuaciones del equipo de embalaje con las obras. Mantendrá un registro de operaciones y junto al responsable de seguridad, garantizará la identificación correcta de las obras afectadas. Ambos coordinarán además, todo el servicio de transporte en el supuesto de derivar parte de la colección o su totalidad, a un nuevo emplazamiento.

– Responsable de depósitos: cuarentena, almacén

En el caso de establecer un almacén externo para albergar la colección afectada, este responsable debe coordinar las tareas preliminares de rehabilitación, monitorear las áreas de cuarentena, establecer un control climático en los depósitos, evitar daños físico-químicos adicionales y diseñar los procedimientos de estabilización.

El entrenamiento de estos equipos internos y/o externos con estrategias operativas incluye la coordinación de actuaciones conjuntas con otros grupos de intervención que se podrán necesitar según la fase de alarma (sobre todo a partir del nivel 2 de emergencia), donde como se ha

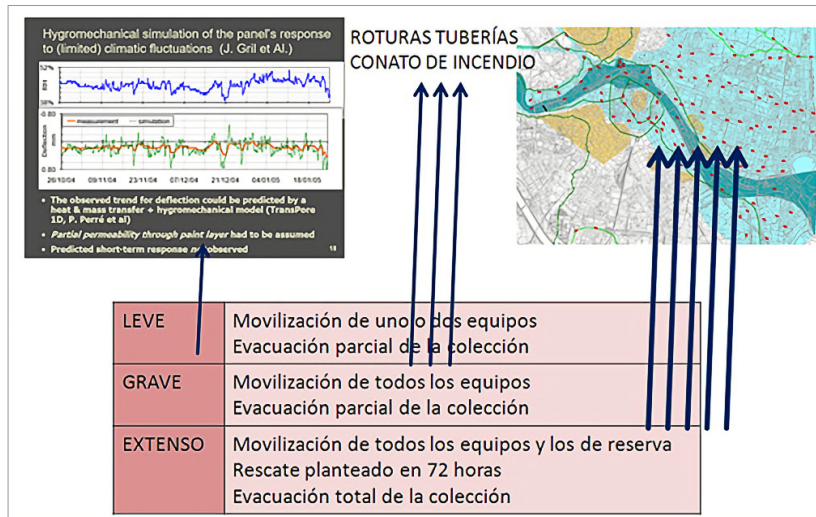


Figura 4. Diferentes necesidades de movilización de recursos humanos. Fuente: Chuliá Blanco



Figura 5. Modelo de organización de la zona de crisis. Fuente: Chuliá Blanco

indicado anteriormente, intervienen equipos externos de bomberos, policía o personal de protección civil (Figura 4).

Es importante señalar además, que deben prepararse para trabajar durante jornadas extensas y desfavorables donde las condiciones serán adversas, posiblemente sin electricidad o saneamiento.

Como organizar las áreas de trabajo durante una emergencia para los bienes culturales muebles

Para organizar la zona de crisis en espacios funcionales de trabajo con capacidad para clasificar, evaluar y proteger, es necesario habilitar cinco áreas de actuación en un espacio seguro, amplio y con buen acceso desde la zona afectada (Figura 5):

1. Área de seguridad.
2. Área de evaluación y triaje.
3. Zona de embalaje.
4. Zona de carga y transporte.
5. Zona de estabilización/tránsito.

El área de seguridad, con acceso restringido, abarca no solo el epicentro del siniestro, incluye toda la zona restringida para que los equipos de emergencias puedan acometer la evaluación, embalaje y transporte o desplazamiento de colecciones. Se mantiene durante la emergencia y post-emergencia.

Durante el triaje se practicará la primera clasificación que debe cumplir una serie de reglas:

- Rápida.
- Completa.
- Ante la duda de en qué categoría incluir al objeto, nos decidiremos siempre por la categoría más grave.
- Segura. En triaje existe la triple E: Etiquetaje, Estabilización y Evacuación.

Fuera de la zona de crisis y para aquellas obras derivadas a cuarentena húmeda o seca, se determinará un depósito o almacén de tránsito. Se puede establecer en otra Institución cercana o próxima, que acredite la seguridad del depósito cumpliendo con los estándares de calidad para su conservación.

La protección y seguridad de los bienes culturales en tránsito: determinar un embalaje adecuado

Uno de los objetivos durante el traslado de los bienes culturales deteriorados durante un siniestro es preservar su integridad sin incrementar sus daños, tanto en la manipulación como durante su traslado. La propia situación de la emergencia multiplica su vulnerabilidad y los daños ocasionados no son visibles inmediatamente, pudiendo transcurrir meses antes de observarse sus consecuencias.

De ahí la importancia, de establecer en el triaje un embalaje proporcionado, con coberturas para su protección y una correcta identificación. Sin esto, el riesgo para la mayoría de bienes de sufrir golpes, arañazos, marcas o su fragmentación es muy elevado (Tabla 4).

Tabla 4
Recomendaciones generales para proteger las obras

-
- Antes de proteger la obra deben ser estudiados aspectos como el volumen, peso, estado de conservación, solidez y aislamiento térmico.

 - Todas las obras deben ir envueltas en papel libre de ácidos y llevar una cobertura impermeable adicional para ser protegida, como el papel burbuja.

 - Se debe calcular una cantidad adecuada de papel burbuja, medir la obra y añadir 10 cm a cada lado, proporcionará mejor protección frente a posibles impactos.

 - Se deben rellenar los espacios huecos dentro del embalaje para inmovilizar la obra y evitar movimientos bruscos durante el transporte.

 - Es importante proteger esquinas o los elementos salientes de cualquier volumen, son los más vulnerables.

 - Algunas obras necesitarán un soporte auxiliar/caja/bolsa para su traslado. Deberá incorporarse con en el embalaje

 - Para evitar disociación de colecciones es muy importante etiquetar el paquete con la información de la pieza o piezas. Si se dispone de tecnología, se puede hacer uso de etiquetas QR.

 - Se deben cumplir las instrucciones sobre la manipulación de las obras para evitar accidentes y sobreesfuerzo.

El uso de etiquetas con el umbral de alerta del triaje (punto rojo, amarillo, verde o gris) es obligatorio. Están diseñadas para la clasificación, señalar el vehículo de transporte, su área de almacenamiento y si deben permanecer en cuarentena (Tabla 1).

El espacio para las zonas de cuarentena se dispondrá dentro de la institución, solo en el caso de necesitar externalizar parte de las obras y depositarlas fuera del recinto, se trasladarán al almacén de tránsito designado. Dependiendo del siniestro se determinará el tipo de depósito y cuarentena, con áreas de observación bajo monitorización ambiental. Este espacio no debe establecerse como centro de restauración, es un espacio para la estabilización. Debe estar dotado con suficiente personal técnico, una infraestructura adecuada con seguridad, control ambiental y laboratorios de análisis. Cuando las obras alcancen sus niveles de conservación iniciales deben restablecerse en la institución.

Especialización en el triaje

Por último, es importante resaltar la especialización de las evaluaciones con un triaje¹, ya sea con el Patrimonio mueble o inmueble. Para la inspección de edificios como museos, iglesias, o inmuebles patrimoniales se necesitarán arquitectos e ingenieros, mientras que para los bienes muebles los especialistas adecuados son los restauradores, en cualquiera de las disciplinas de especialización.

Con el resto de las actividades diseñadas en un Plan de Salvamento, se pueden incorporar grupos con otros perfiles técnicos, siempre que estén formados con las adecuadas competencias.

Tanto arquitectos como ingenieros disponen de fichas técnicas de edificación con un código para su triaje (Figura 6). No obstante en el supuesto de que dichos edificios contengan bienes culturales como pinturas murales, campanas, grandes retablos, coros o sillería, esculturas, sepulcros o cualquier elemento de difícil evacuación, será necesaria la incorporación de restauradores especialistas para decidir intervenciones de protección *in situ*, el uso de lonas ignífugas, deshumidificadores o captadores de humedad, medios auxiliares de ventilación o sujeción temporal, además de determinar su desmontaje en los casos que sea posible.

¹ Triar es clasificar de acuerdo a la gravedad de daños alcanzados para determinar la prioridad de tratamiento y posible evacuación.

INSPECCION Y EVALUACION RAPIDA POSTSISMO DE DAÑOS EXISTENTES EN EDIFICIOS

INFORMACION GENERAL: Nº EXPEDIENTE, GOBIERNO VALENCIANO, INSTITUTO VALENCIANO DE LA EDIFICACION

IDENTIFICACION INSPECCION: Nombre del inspector, Dirección, Puntos de elementos, Acondicionamiento, Evaluación detallada.

IDENTIFICACION DEL EDIFICIO: Localización (Calle, Localidad, Provincia), Tipo de edificio (Planta/balco, etc.), Tipo de estructura (Muro de carga, etc.).

EFECTOS SOBRE LOS OCUPANTES DEL EDIFICIO: Tabla de daños por planta y zona.

ESTADO DE LA EDIFICACION: Tabla de daños y síntomas en el edificio (Paredes, Vigas, Muros de carga, etc.).

OBSERVACIONES: Campo de texto para registrar hallazgos.

DAÑOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Elemento	Síntoma	Causa probable y calificación (*)	Código
Muros de carga	Fisuras verticales y/o rotura	En muro medianero por pérdida de enlace con el muro de fachada	M1
		Vuelco del muro superior bajo cubierta por flexión horizontal	M2
		En fachada, marcando la junta de muros por pérdida de enlace con el muro medianero	M3
		Entre construcciones de distintas alturas y compatibilidad por interacción de cuerpos	M4
		Sobre dinteles de huecos por puntos débiles	M5
	Fisuras horizontales y/o rotura	Vuelco de muro por flexión vertical	M6
		A la altura del forjado por empuje del plano horizontal	M7
		Vuelco de muro de fachada	M8
	Fisuras inclinadas y/o rotura	Vuelco con acompañamiento de muro perpendicular	M9
		En la parte inferior o superior de los huecos por ser puntos débiles	M10
		En machones entre huecos por ser puntos débiles	M11

(*) La calificación de este tipo de lesiones depende en general del ancho de las fisuras producidas, variando desde leve, hasta muy grave, cuando se produce la rotura o colapso.

DAÑOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Elemento	Síntoma	Causa probable y calificación (*)	Código
Pilares de hormigón	Inclinación y/o colapso	Pérdida de verticalidad por planta débil	P1
		Colapso por planta débil	P2
	Fisuras inclinadas y/o rotura	En la parte superior o inferior del pilar por fallo a cortante	P3
		En toda la altura de pilares cortos. Fallo por cortante.	P4
		A la altura de los huecos de fachada. Fallo por cortante debido al confinamiento parcial que produce la fábrica en el pilar. Efecto "infilling".	P5
	Fisuras horizontales y/o rotura	En la parte superior o inferior, más abiertas en los laterales y disminuyendo el ancho hacia el centro. Fallo por flexión	P6
		En la parte inferior por fallo a flexocompresión. Presencia de estribos de confinamiento.	P7
		En la parte inferior, por fallo a flexocompresión. Ausencia de estribos de confinamiento o muy separados	P8
Vigas de hormigón	Fisuras inclinadas y/o rotura	En los extremos de la viga. Fallo por cortante.	V1
	Fisuras verticales	En los extremos de la viga, verticales en la parte inferior de la viga y horizontales en la superior. Fallo por flexión.	V2

(*) La calificación de este tipo de lesiones depende en general del ancho de las fisuras producidas, variando desde leve, hasta muy grave, cuando se produce la rotura o colapso. En el reverso se incluyen unos esquemas orientativos.

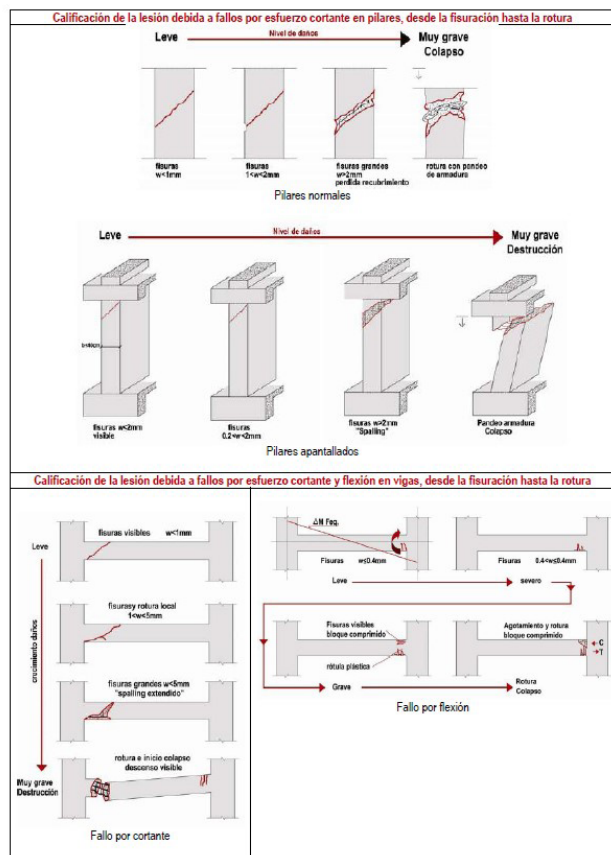


Figura 6. Modelo de inspección de evaluación post-sísmica de daños existentes en edificios: evaluación de daños en elementos estructurales. Fuente: Instituto Valenciano de la Edificación, Generalitat Valenciana.

Para algunas obras de envergadura y complejidad de montaje, aun siendo conveniente una evacuación, no se podrá dictaminar un traslado. Con esta casuística, será necesaria una valoración conjunta y coordinada de especialistas donde se determinarán necesidades asistenciales y procedimientos en el plan director de rehabilitación.

Para la inspección del patrimonio mueble se necesita a los restauradores de bienes culturales. Son facultativos formados para la identificación de los efectos y lesiones que producen los diferentes siniestros en la diversificación técnica de las colecciones.

Conclusiones

La inspección y recuperación del material cultural afectado en un siniestro no es una actividad atractiva. Los procedimientos son complejos y estresantes, se toman decisiones bajo presión y es necesario revisarlos periódicamente, hace falta optimizar metodologías de actuación y sistemas de evaluación. Aunque cada adiestramiento debe adaptarse de manera específica a cada institución en su organización, estructura y procedimientos, los protocolos de clasificación deben ser universales y técnicos, tanto en la fase preventiva como en la fase de intervención. Se necesita normalizar criterios y agilizar decisiones para lograr una operatividad eficaz y universal.

Para evitar situaciones que incrementen el peligro se requiere además de una preparación psicológica, porque el nivel de percepción del riesgo en cada individuo es distinto. Los estudios del comportamiento confirman que los bajos niveles de formación generan conductas frecuentes de inseguridad, pánico y desconcierto, actitudes de hacinamiento y menor cooperativismo (Vega, 2004). Con mayor grado de instrucción, los individuos muestran más autocontrol.

La integración de protocolos en la metodología favorece, además de evaluar bienes culturales de diversidad material y necesidades terapéuticas diferentes, establecer una normalización con una estructura de intervención. Además, garantiza un rápido control de la situación facilitando la toma de decisiones y estableciendo trazabilidad con la información.

Tras la jornada del Simulacro en Torre Vieja se distribuyó un cuestionario estructurado en cinco apartados para determinar posibles modificaciones en los procedimientos. Se consideraron aspectos sobre la gestión de la emergencia, los recorridos establecidos para la evacuación, los recursos humanos, los espacios preparados para la inspección de los bienes culturales muebles afectados, los recursos materiales y los protocolos establecidos en el triaje.

Entre las conclusiones el informe destaca la necesidad de un mayor conocimiento sobre el funcionamiento y operatividad de la gestión de la emergencia por parte de los técnicos de patrimonio. De la misma manera, se plantean mejoras en la coordinación entre los equipos de intervención, sobre todo con los presentes en los niveles más comprometedores de una emergencia como son los agentes de Protección Civil, Bomberos, Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, Unidad Militar de Emergencias, así como mejoras en las estrategias de comunicación.

El control de riesgos y protocolos de evaluación durante el triaje cumplen con los objetivos propuestos como una metodología ágil y segura.

Bibliografía

AA.VV. (2020): *Jornadas Técnicas Internacionales ART-RISK: Conservación preventiva frente a rehabilitación de urgencia del Patrimonio Arquitectónico mediante Investigación sobre Riesgos y*

Vulnerabilidad frente al Cambio Climático, desastres naturales y antrópicos. Pilar Ortiz y Rocío Ortiz, ed. Sevilla: Universidad Pablo de Olavide.

- ÁLVAREZ, C., CHULIÁ, V., HERNANDO, A. (1992): *Manual de Asistencia Sanitaria a las Catástrofes*. Editorial ARAN.
- CIRUJANO, C. y SOUSA, A. L. (2015): *Plan Nacional de Emergencias y Gestión de Riesgos en Patrimonio Cultural*. Madrid: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Disponible en: <http://www.culturaydeporte.gob.es/planes-nacionales/dam/jcr:5f2ccbaa-69d6-4d40-b1eb-3111131093f0/guia-para-la-elaboracion-de-un-plan-de-gestion-de-emergencias.pdf>
- FEILDEN, S. B. M. (1987): *Entre dos terremotos. Los bienes culturales en zonas sísmicas*. ICCROM y Getty Conservation Institute.
- HERRÁEZ, J. A.; PASTOR, M. J. y DURÁN, D. (2019): *Guía para la elaboración e implantación de Planes de Conservación Preventiva*. Madrid: Ministerio de Cultura y Deporte de España.
- SOLER, W. *et al.* (2010): «El triaje: herramienta fundamental en urgencias y emergencias». *Anales del sistema sanitario de Navarra*. Gobierno de Navarra. Departamento de Salud, pp. 55-68.
- VEGA, M. F.: *NTP 390: La conducta humana ante situaciones de emergencia: análisis de proceso en la conducta individual*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1993, pp. 1-11.

Análisis de la calidad del aire en la capilla de Luis de Lucena de Guadalajara. Propuesta metodológica y ejemplo de sostenibilidad

Analysis of indoor air quality in chapel of Luis de Lucena in Guadalajara (Spain). Methodological proposal and example of sustainability

Alexander Gaztañaga Garabieta*

Instituto del Patrimonio Cultural de España. Ministerio de Cultura y Deporte
alexander.gaztanaga@cultura.gob.es

Alba García Bernabé

Instituto del Patrimonio Cultural de España. Ministerio de Cultura y Deporte

Irene Sánchez Pascual

Museo del Romanticismo
irene.spascual@cultura.gob.es

Resumen: En este artículo se presentan el estudio e intervención realizados por el IPCE en la capilla de Luis de Lucena de Guadalajara con el fin de solucionar las patologías que presentaba debido a los problemas de humedad y ausencia de ventilación. Se optó por llevar a cabo un análisis de aerobiología mediante muestreo por impactado en medio de cultivo sólido para valorar la calidad del aire interior como indicador de las condiciones de conservación.

Para el planteamiento de la metodología de toma de muestras se emplearon como referencia normas UNE, EN e ISO de diversos campos, así como las Normas Técnicas de Prevención del INSST. Esto ha sido motivado por la ausencia de pautas específicas para estudios de este tipo en bienes culturales. Por ello, este artículo presenta una propuesta metodológica basada en dichas normas con el fin de aportar diversas reflexiones que ayuden a establecer una norma específica para los análisis de aerobiología en el patrimonio cultural.

Tanto la intervención realizada en la capilla como el seguimiento posterior son ejemplo de mínima intervención en patrimonio cultural, con una búsqueda del máximo respeto y mínimo impacto.

Palabras clave: Aerobiología, metodología, patrimonio cultural, Guadalajara.

Abstract: This article presents the study and intervention carried out by the IPCE in the chapel of Luis de Lucena in Guadalajara with the purpose of solving the problems of humidity and the lack of inner ventilation. It was decided to perform an aerobiological analysis by impact sampling in solid culture medium in order to assess the quality of the indoor air as an indicator of the conservation conditions.

For determining the sampling methodology, UNE, EN and ISO standards of various fields were used as reference, as well as the technical prevention standards of the Spanish occupational safety and health authority (INSST). This approach has been motivated by the absence of specific guidelines for this sort of studies on cultural heritage. For this reason, the present article shows a methodological proposal based on these standards with the objective of providing various reflections to help establish a specific standard for aerobiological analysis in cultural heritage.

Both, the intervention carried out in the chapel and the subsequent monitoring, are examples of minimal intervention in cultural heritage, aiming for maximum respect and minimum impact.

Keywords: Aerobiology, methodology, cultural heritage, Guadalajara.

Historia del edificio

A pesar de su reducido tamaño, la capilla de Luis de Lucena es uno de los inmuebles más emblemáticos de Guadalajara, siendo denominada turísticamente como la «Capilla Sixtina» de esta ciudad (Figura 1). Fue declarada Monumento Nacional en 1914, gozando de la máxima protección desde entonces.

La capilla es el único resto que queda en pie de la antigua iglesia de san Miguel. El templo original fue de posible origen mozárabe en el que se acometieron diferentes obras en el siglo XVI que alteraron por completo su conformación: modificación de la cabecera, cerramiento del pórtico sur, la pérdida de una de sus entradas o la construcción de la torre y el coro. Entre 1530 y 1540 se anexionó la capilla de Luis de Lucena a los muros de los pies de la iglesia. Ya en el siglo XIX, la parroquia fue suprimida en 1831 y finalmente demolida en 1877, quedando exenta la capilla de Luis de Lucena en un muy mal estado de conservación hasta su primera restauración en 1932 (Herrera, 1975: 5-25.; Pradillo, 1989: 205-224; Herrera, 1991; AA.VV., 2017).

Así, la historia también ha jugado en contra de su correcta conservación, puesto que la demolición de la iglesia supuso que dos de los paramentos medianeros, constituidos por materiales muy porosos, quedaran expuestos a la intemperie, generando un importante aporte de humedad en época de lluvias.

Además, la capilla fue un oratorio abierto, por lo que los arcos de los paramentos exteriores, en continuación con la arquería del pórtico de la iglesia de san Miguel, estaban abiertos. Sin embargo, fueron cegados posteriormente, limitando la ventilación del espacio interior (Figura 2).



Figura 1. Vista general de los frescos de la capilla de Luis de Lucena. Fotografía: Alexander Gaztañaga Garabieta.



Figura 2. Fotografía histórica de la capilla de Luis de Lucena, probablemente del primer cuarto del siglo XX. Se aprecia el cegado de los arcos aunque con la presencia de pequeñas aberturas, inexistentes en la actualidad. A su vez, pueden verse a la izquierda algunos restos del muro de la antigua iglesia de San Miguel a la cual se encontraba anexionada la capilla. Fotografía: signatura WUN-06367 del Archivo Wunderlich de la Fototeca del Patrimonio Histórico del Instituto del Patrimonio Cultural de España (Ministerio de Cultura y Deporte).

Por otro lado, durante la Guerra Civil, la construcción de un búnker de hormigón armado bajo tierra y en contacto con la cimentación del bien, supuso la inserción de materiales incompatibles con los originales e introdujo gran dificultad en la correcta transpiración de sus muros; como también lo hizo el taponamiento con tierras por la construcción de una plaza en una de sus fachadas, dadas las modificaciones de la trama urbana de la ciudad.

Entre 1977 y 2005 se realizaron cinco intervenciones tanto en la capilla como en su entorno para la mejora de su conservación, siendo siempre la humedad el principal problema identificado. En 1995 se desarrolló una propuesta para la solución de los daños detectados que dio lugar a las obras de emergencia ejecutadas en 1996 y a las obras de restauración y adecuación de la capilla realizadas durante 1999, trabajos que no resolvieron completamente las patologías por la imposibilidad de intervenir en las fachadas y en el patio del inmueble colindante, de propiedad privada (Jiménez y Gonzalez, 1998; Jiménez, 2006: 117-126).

Intervención arquitectónica

En 2016 se obtuvo finalmente el permiso de la propiedad aledaña para acceder e intervenir en las partes citadas, por lo que se redactó, por parte del Instituto del Patrimonio Cultural de España (Ministerio de Cultura y Deporte), el proyecto de consolidación y restauración de la capilla de Luis de Lucena (AA.VV., 2017). De esta manera, en 2019 se inició la ejecución de dicha intervención, con el fin de eliminar de forma duradera el problema de las humedades.



Figura 3. Vista general del patio trasero antes (izquierda) y después (derecha) de la intervención. Se aprecia la afección por humedad que presentaba inicialmente y la posterior construcción del drenaje perimetral. Con motivo de la intervención se encontraron elementos constructivos de conexión con la antigua iglesia, dejándose a la vista mediante una ventana arqueológica. Fotografía: Alba García Bernabé.

El proyecto recogía diferentes actuaciones complementarias, cuyo objetivo era disminuir el elevado grado de humedad que presentaba el interior de la capilla: ejecución de un drenaje perimetral y encachado en los muros que dan al patio colindante en la zona que anteriormente pertenecía a la torre de la iglesia, completando el drenaje en todo el perímetro del inmueble (Figura 3); colocación de un vierteaguas metálico en la albardilla de piedra hacia el patio colindante; saneado con picado de revocos afectados por la humedad, con posterior revoco y pintura de acabado; limpieza de rejilla de aireación bajo el escalón de entrada y apertura de dos huecos de ventilación del *cávit* hacia el exterior por el patio mediante tubos de PVC. Destacar también, en relación al biodeterioro, la limpieza de fachadas en zonas puntuales con tratamiento biocida¹ y posterior cepillado (Figura 4).



Figura 4. Vista general de la costra biológica que presentaba la fachada y el resultado posterior a su eliminación (derecha). Fotografía: Alba García Bernabé.

¹ El tratamiento biocida consistió en la aplicación de etanol al 70% con un 0,1% de cloruro de benzalconio (Navarro, García y García, 2021; García, 2018:153-154). Así, se redujo notablemente la concentración de esta sal de amonio cuaternaria consiguiendo muy buenos resultados. Este tipo de compuestos suelen emplearse en múltiples productos frente al biodeterioro utilizados en proyectos de restauración pero aplicándose a concentraciones más elevadas. La reducción del cloruro de benzalconio al 0,1%, disuelto en etanol y con un posterior cepillado es una alternativa con menor toxicidad y más respetuosa con el entorno, el bien cultural y las personas.



Figura 5. Interior de la capilla de Luis de Lucena. Se aprecian los daños por humedad que presentaba antes de la intervención (izquierda). Se han empleado revestimientos de mortero de cal natural para favorecer la transpiración de los propios materiales históricos. Fotografía: Alba García Bernabé.

Los criterios de actuación se han basado en la búsqueda de la sostenibilidad y la mínima intervención posible, ajustándola a actuaciones energéticamente eficientes, a través del estudio de su ventilación interior y el uso de materiales y técnicas tradicionales, garantizando la capacidad de transpirar de la propia materialidad histórica a través de su masa. Por estos motivos, se ejecutaron los revestimientos exteriores e interiores con morteros naturales de cal, compatibles con los materiales originales (Figura 5).

En cuanto a la problemática de la renovación del aire interior, dado que la capacidad de ventilación natural de este espacio es muy reducida, con pocos vanos y de pequeñas dimensiones (cabe recordar el cegado que sufrieron a lo largo de la historia los diversos espacios de acceso originales), se decidió instalar un sistema de ventilación mecánica (ventilador-extractor²) que se dispuso en uno de los huecos de ventana ovalados con los que cuenta la edificación. Su reducido tamaño y la disposición en uno de los óculos lo hacen prácticamente imperceptible, tanto desde el exterior como del interior, sin interferir en los valores patrimoniales. La implantación de este sistema se ejecutó a través de la disposición de un temporizador que entra en funcionamiento automáticamente dos horas al día, garantizando el incremento de las condiciones de ventilación de este espacio interior.

Como complemento al correcto funcionamiento del procedimiento se optó por la eliminación del vidrio fijo existente en la puerta de acceso y su sustitución por una reja que permita la entrada del aire; favoreciendo la ventilación cruzada entre este vano y el óculo con el sistema de extracción (Figura 6).

Con el fin de corroborar la mejora en las condiciones de conservación interiores se optó por realizar un estudio de aerobiología por la información que aporta este tipo de análisis en bienes culturales con estas patologías.

Antecedentes de los estudios de aerobiología aplicados al patrimonio cultural

Un estudio de aerobiología consiste en la toma de muestras de una cantidad de aire concreta y el recuento de los microorganismos que aparecen en dicho volumen. Existen distintos sistemas, siendo

² Ventilador helicoidal *HV-STYLVENT* modelo HV-300A, con motor 230V-50Hz y 300 milímetros de diámetro, accionado por control remoto, caudal de 750 o 1100 m³/h en función de la velocidad de extracción y 700 m³/h de impulsión.



Figura 6. Detalle del vidrio de la puerta (izquierda) y su sustitución por una rejilla (derecha) con el fin de favorecer la ventilación pasiva del edificio. Fotografía: Alba García Bernabé.

uno de los más utilizados el del impactado en medios de cultivo sólido. Para ello, un aparato de muestreo al que se programan una serie de variables (caudal, tiempo, etc.) toma una cantidad controlada de aire y lo expulsa sobre una placa con medio de cultivo microbiológico, en el que crecen los distintos microorganismos, que se contabilizan e identifican, aportando una aproximación a su presencia en dicho espacio (Figura 7).

En los entornos en los que la humedad es elevada y/o hay una ausencia de ventilación, la presencia de microorganismos será mayor, sucediendo lo contrario en estancias con una adecuada renovación de aire. También afectan factores como la limpieza del lugar o la presencia de personas, entre otros. Por ello, los análisis de aerobiología aportan información relevante sobre estos parámetros y por lo tanto de las condiciones de conservación de bienes patrimoniales.

En las últimas décadas han sido diversos los estudios realizados para caracterizar la carga microbiológica en el interior de bienes culturales o edificios que los albergan, como por ejemplo museos o archivos (Valentín, Muro y Montero, 2010: 62-82; Mallo, A. C. *et al.*, 2020: 33-46; Savkovic *et al.*, 2021). Este tipo de análisis suponen cierta dificultad por el elevado tiempo que conllevan, pero especialmente por la falta de personal especializado, así como por la necesidad de instrumental específico. A ello se suma que, como se verá más adelante y siendo el propósito principal de este artículo, actualmente no existe una metodología definida para este tipo de estudios sobre bienes culturales.



Figura 7. Vista del instrumental empleado para el estudio de aerobiología en la capilla de Luis de Lucena. Se aprecia el cabezal (de color azul) en el cual se introducen los medios de cultivo sobre los que impacta el aire tomado. Puede verse al fondo, en lo alto, el balcón de la escalera en el que también se tomaron muestras. A la misma altura, a la izquierda, se aprecia la luz procedente del óculo en el que se dispuso el pequeño sistema de extracción. Fotografía: Alexander Gaztañaga Garabieta.

Aun así, los estudios de aerobiología han supuesto un indicador de gran importancia en diversas intervenciones llevadas a cabo sobre patrimonio cultural. Destacar nuevamente que la carga microbiológica de un ambiente depende de factores como la humedad del espacio, la ventilación, la limpieza, así como la presencia de visitantes. Por lo tanto, si un bien cultural presenta alguna patología y se va a proceder a tomar una decisión sobre la intervención a llevar a cabo, un estudio de aerobiología antes, durante y después de cualquier cambio puede suponer un indicador de gran interés que ayude a corroborar la mejora de las condiciones de conservación así como certificar una situación óptima de seguridad para visitantes y personal trabajador.

Cabe destacar especialmente el estudio de aerobiología realizado en la cueva de Altamira, que resultó ser fundamental a la hora de plantear el actual régimen de visitas a su interior (Guichen *et al.*, 2014: 53-108). El antecedente principal del estudio en la Capilla de Luis de Lucena, y por el cual se decidió aplicar esta metodología, fue la investigación realizada en una estancia del archivo municipal de san Cristóbal de La Laguna. En dicho inmueble, con una mínima intervención y con un sistema de ventilación similar al utilizado en la capilla, se consiguió una mejora de las condiciones de conservación que pudo ser corroborada mediante la caracterización de la carga microbiológica ambiental (Maekawa, Beltrán y Henry, 2015: 231-254; Maekawa y Toledo, 2003: 369-382).

Planteamiento de la metodología empleada en el estudio de aerobiología³

Como se ha comentado, uno de los principales problemas a la hora de plantear un estudio de aerobiología en bienes culturales es la falta de metodologías estandarizadas. Por ello, para realizar este análisis en la capilla de Luis de Lucena se comenzó por una lectura en profundidad de la bibliografía existente en este campo, siendo la base fundamental las siguientes fuentes:

- Normas de la Asociación Española de Normalización.
- Normas Técnicas de Prevención (NTP) del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) del Ministerio de Trabajo y Economía Social del Gobierno de España.

Entre las primeras se encuentran algunas de carácter estatal (UNE), europeo (EN) y/o internacional (ISO). Se han tomado normas aplicadas a distintos campos, con el fin de seleccionar aquellos aspectos que se adecuen mejor a las necesidades específicas de este estudio y a las particularidades del trabajo en un bien cultural.

Hay que remarcar que muchas de estas normas están planteadas para entornos en los que una presencia microbiológica baja o incluso la esterilidad del entorno resultan factores fundamentales (por ejemplo en quirófanos o espacios con alimentos). Aclarar por tanto que en el caso de los bienes culturales esos requerimientos no solo no son necesarios, sino que son imposibles de conseguir. Los estudios de aerobiología en el patrimonio cultural no buscan establecer un rango adecuado, sino más bien analizar tendencias o modificaciones ante una intervención arquitectónica o de restauración. Esto es, sirven como un signo más para evaluar las condiciones de conservación, aprovechando la información que aporta la presencia de microorganismos y su relación con factores ya citados como la ventilación, humedad relativa, etc.

La segunda fuente bibliográfica para plantear esta metodología, las NTP del INSST, consisten en una relación de documentos que recogen recomendaciones para realizar inspecciones en entornos laborales. Éstas abarcan una gran diversidad de aspectos, desde cuestiones relacionadas con

³ Este artículo se centra exclusivamente en la discusión sobre la metodología empleada para el muestreo mediante impactado en medio de cultivo sólido. Como complemento a ello también se tomaron muestras por concentración de partículas (instrumental empleado: *Airy Technology INC*, modelo: P611) siguiendo la norma UNE-EN ISO14644-1:2016, para este tipo de análisis hay un mayor consenso en lo que a metodología se refiere.

equipos de protección individual, riesgos biológicos, químicos o psicosociales, entre otros, así como las condiciones de la calidad del aire o las metodologías de muestreo. Al igual que la mayoría de las normas UNE, éstas tampoco son de obligado cumplimiento pero sí que suponen una base fundamental para plantear pautas de prevención, especialmente a la hora de cubrir aquellos aspectos que los documentos UNE, EN e ISO no establecen con exactitud.

También hay que tener en cuenta que, además de para la conservación del patrimonio cultural, los estudios de aerobiología son también indicativos para las condiciones de seguridad tanto del personal empleado como de visitantes, por lo que las metodologías propuestas por las NTP son un recurso de gran interés al plantear un estudio de este tipo.

Cabe puntualizar que uno de los principales problemas encontrados es que normas que en principio persiguen un mismo objetivo, esto es, la evaluación de la carga microbiológica ambiental, se contradicen en sus pautas, recomendaciones o análisis de resultados. Por ello, de la lectura y análisis realizado de toda esta documentación, se fue obteniendo la metodología empleada en este estudio, buscando dar respuesta a las necesidades específicas de monitorización que presenta el patrimonio cultural en general y la capilla de Luis de Lucena en particular.

Así, la relación de normas empleadas fue la siguiente:

– Normas UNE:

- UNE-EN ISO 14698⁴: *Salas limpias y ambientes controlados asociados. Control de la biocontaminación.*
 - (2004) *Parte 1: Principios y métodos generales.*
 - (2004) *Parte 2: Evaluación e interpretación de los datos de biocontaminación.*
- UNE 171330: *Calidad ambiental en interiores.*
 - (2008) *Parte 1: Diagnóstico de calidad ambiental interior.*
 - (2014) *Parte 2: Procedimientos de inspección de calidad ambiental interior.*
- UNE-CEN/TS 16115-1 (2013): *Calidad del aire ambiente. Medición de bioaerosoles. Parte 1: Determinación de esporas mediante sistemas de muestreo de filtro y análisis de cultivos.*
- UNE-EN ISO 16000-19 (2015): *Aire en interiores. Parte 19: Estrategia de muestreo de mobos.*
- UNE-EN ISO 14644-1 (2016): *Salas limpias y locales anexos controlados. Parte 1: Clasificación de la limpieza del aire mediante la concentración de partículas.*

– NTP del INSST:

- NTP 299 (1993): *Método para el recuento de bacterias y hongos en aire.*
- NTP 1064 (2015): *Calidad del aire interior. Contaminantes biológicos (I): estrategia de muestreo.*
- NTP 1065 (2015): *Calidad del aire interior. Contaminantes biológicos (II). Tipos de muestreo.*

A continuación se va a analizar cada uno de los aspectos considerados al plantear la metodología empleada tomando como base las normas antes indicadas.

⁴ De la norma UNE-EN ISO 14698, tanto su parte 1 como la 2, fueron derogadas por la norma UNE-EN 17141 de marzo de 2021. El estudio de la capilla de Luis de Lucena se realizó entre 2019 y 2020 con anterioridad a la aprobación de esta última norma. Aun así, a lo largo del artículo también se tendrá en consideración para que la discusión metodológica aquí presentada se encuentre lo más actualizada posible hasta la fecha (este artículo fue entregado en enero de 2022).

Número de puntos de muestreo interiores

En la parte 2 de la norma UNE 171330 se establece una fórmula para calcular el número de puntos de muestreo dependiendo de la superficie construida del edificio o área de estudio. Teniendo en cuenta que la superficie aproximada de la capilla es de 62 m², se plantean un total de 1,18 localizaciones. En esta misma norma se indica que el número de muestras puede variar, aumentando o disminuyendo dependiendo del criterio del personal técnico y si la problemática es específica de una zona concreta. Por ello, teniendo en cuenta que la finalidad de este estudio era observar las diferencias entre las distintas zonas de la capilla y evaluar la ventilación a lo largo de ella, se optó por aumentar los puntos de muestreo, ya que un único punto podría resultar poco significativo.

En la NTP 1064 no se indica un número determinado de muestras, únicamente se especifica que tiene que ser una cantidad suficiente como para obtener resultados representativos. Por ello, analizando la conformación del edificio en forma de L se optó por tomar cuatro puntos de muestreo en la planta baja y uno en alto, como se verá más adelante.

Como se ha comentado (ver nota al pie 4), la norma 14698 (partes 1 y 2) fue derogada por la UNE-EN 17141:2021, con posterioridad a la investigación que aquí se presenta. Aun así resulta de interés analizar esta nueva norma para que la metodología planteada se encuentre lo más actualizada posible. Así, en la tabla B.2 de la norma del 2021, se indica que para realizar muestreos de aire activo para superficies que se encuentran entre los 52 y 68m², el número mínimo de ubicaciones tiene que ser de 4 puntos. Por lo tanto, aunque la norma UNE-EN 17141:2021 se haya aprobado dos años después del estudio de la capilla de Luis de Lucena, sus recomendaciones coinciden con la metodología aquí planteada.

Disposición de los puntos de muestreo interiores

La norma ISO 16000-19:2012 indica que las muestras deben tomarse en el centro de las estancias y a una distancia mínima de 1 metro respecto a las paredes. En la misma línea, en la tabla 1 de la norma UNE 171330-2:2014 se establece que éstas tienen que posicionarse a una distancia mínima de 100 cm de paredes exteriores con vanos (puertas o ventanas) o a 50 cm en caso de paredes sin aberturas al exterior. Por ello, se optó por la selección del punto intermedio equidistante entre ambos muros para colocar los muestreadores.

A su vez, esta misma norma recomienda evitar la selección de puntos denominados «singulares», definiéndose estos como aquellos de zonas con emisiones de contaminantes o calor o muy cercanos a la pared o suelos. Hay que destacar que el único punto que podría ser clasificado como tal en el estudio de la capilla es la ventana-balcón que se encuentra a mitad de la escalera de acceso a la planta superior (puede verse en la Figura 7 y se indica en color verde en el plano de la Figura 8). Debido a que este punto se encontraba en alto, cerca del óculo en el que se iba a disponer la ventilación forzada y en conexión con el espacio superior del edificio, se optó por seleccionarlo para apreciar posibles diferencias respecto a las muestras tomadas en el nivel inferior. El espacio de la escalera de caracol es relativamente angosto, dejando una pequeña repisa en la ventana que asoma a la capilla, superficie en la que se apoyó el muestreador. Este es un ejemplo de cómo, en muchos casos, a la hora de plantear un estudio de este tipo en un bien cultural, resulta complejo cumplir con las recomendaciones de las normas ya que la mayoría de las veces se tiene que trabajar en condiciones de difícil accesibilidad o espacios reducidos.

Disposición de los puntos de muestreo exteriores

En cuanto a las muestras de control de la capilla respecto de su entorno, en la ISO 16000-19:2012 se indica la recomendación de realizar muestreos también en zonas de referencia o ambiente, a lo

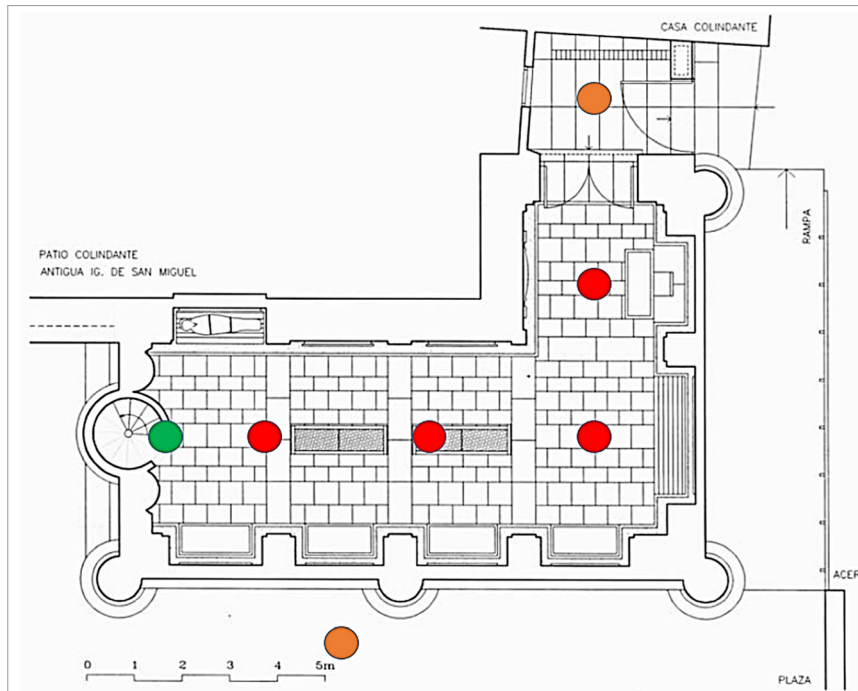


Figura 8. Plano de la capilla de Luis de Lucena. Se señalan en rojo los puntos de muestreo seleccionados en la planta baja, en verde el punto de muestreo del balcón de la escalera y en naranja los controles exteriores. El plano se ha tomado del proyecto realizado por el IPCE en 2017 (AA.VV., 2017).

que se suma que en la NTP 1064 se recomienda que estos puntos de control se sitúen en el exterior. Por ello, como referencia respecto del interior se optó por la selección de dos puntos exteriores para poder comparar los efectos que la ausencia de ventilación y la humedad podrían estar teniendo en la capilla con relación a su entorno inmediato. Así, el primer punto de control que se seleccionó fue el patio de entrada al edificio y el segundo, la plaza que linda con el muro suroeste. De esta forma se pudieron controlar los vanos de acceso de aire exterior al interior de la capilla, ya que la ventilación forzada se iba a colocar en el óculo que da a la plaza, y se iba a eliminar el vidrio que evitaba el acceso de aire exterior desde la puerta.

Altura y apoyo de los puntos de muestreo

En cuanto a la altura del muestreo, volviendo a la tabla 1 de la parte 2 de la norma UNE 171330, se recomienda que éste se efectúe entre los 10 y los 130 centímetros respecto del suelo. En la ISO 16000-19:2012: *Estrategia de muestreo para mohos*, se establece una altura de entre 0,75 y 1,5 metros. La misma recomendación se repite en la NTP 1064 «con el fin de simular la zona de respiración». A esto se suma la necesidad de evitar la colocación del muestreador sobre superficies principalmente por el riesgo de resuspensión del polvo que pudieran presentar.

Teniendo en cuenta todas estas recomendaciones, se tomó como soporte la superposición de los maletines de transporte de instrumental. De esta forma se consiguió una altura desde el suelo al cabezal de muestreo de 77 centímetros, cumpliendo así con todas las normas antes indicadas. Esta selección permitió tener una superficie de reducido tamaño (por lo tanto se evitaba la posible interferencia en la toma de aire), con el espacio óptimo para trabajar, estable y metálico, que permitía su limpieza de manera sencilla garantizando que no presentara polvo u otro tipo de suciedad que pudiera alterar la muestra.

Caudal y tiempo de muestreo

En el Anexo A de la norma UNE-EN ISO 14698-1 se recomienda que, a la hora de seleccionar un dispositivo de muestreo por impacto, este tiene que permitir una regulación del volumen de aire que se adapte a las necesidades pero garantizando un «caudal suficiente para recoger 1m³ en un tiempo razonable», sin especificar en cual consiste.

La norma UNE-EN ISO 16000-19 establece que el muestreo tiene que ser mínimo de un minuto y de un volumen superior a los 50 litros. Para evaluar las condiciones de caudal y tiempo se recomienda efectuar tomas de muestras preliminares de volúmenes de aire distintos para hacer una estimación inicial de la carga microbiológica y a partir de ahí establecer los parámetros específicos para cada caso de estudio.

Siguiendo lo indicado en la norma 16000-19, en la NTP 1064 se diferencia entre los muestreos realizados con sistemas de impactado en agar, como en este caso, que denomina «de corta duración (de 1 a 10 minutos)», de los de larga duración (más de 30 minutos), para referirse a los realizados con filtros. Para los primeros recomienda que el muestreo tenga una duración mínima de 1 minuto, pero no establece el flujo o caudal de aire muestreado. Lo que sí se indica en esta norma es la necesidad de reducir al máximo el transcurso entre unas muestras y otras debido a los importantes cambios que se pueden llegar a producir en poco tiempo.

Teniendo en cuenta todo lo anterior se optó por tomar cada muestra a un caudal de 100 litros por minuto durante cinco minutos por cada medio de cultivo (caudal total 500 litros por muestra).

Número de muestras por punto de muestreo

En cuanto al número de muestras tomadas en cada punto, cabe remarcar que la NTP 1064 establece que se han de tomar como mínimo «por duplicado y de manera simultánea». Esto contradice en parte a lo recomendado por la NTP 1065, donde se menciona que la toma de muestras de manera simultánea por sistemas con dos cabezales suele producir desviaciones en los resultados por las posibles diferencias en el caudal. Por ello, en el estudio de la capilla se optó por realizar muestras duplicadas por cada punto pero tomando una a continuación de la otra, transcurriendo así el mínimo tiempo posible entre cada una y siendo todas obtenidas con el mismo instrumento y condiciones.

Medios de cultivo empleados

Nuevamente, a la hora de seleccionar el medio de cultivo se encontró una gran variedad de criterios. Según el artículo 5.5 de la norma UNE-EN ISO 14698-1 de mayo de 2004 se establece que los medios de cultivo deben ser no selectivos aunque especifica que se podrán incluir aditivos que compensen o minimicen la actividad microbiológica, sin especificar en qué medida o con qué finalidad.

En NTP 1064 tampoco se especifican los medios de cultivo a utilizar. En la tabla 3 de esta norma se indica que los más utilizados son el de Extracto de Malta (MEA) y Trypticase Soy Agar (TSA), pero también enumera otros como el DG18, el Rosa de Bengala o el MacConkey, detallando que la selección de unos u otros depende de los requerimientos de los microorganismos que se deseen monitorizar.

En la NTP 299 se recomienda el uso de dos medios de cultivo: por un lado, *Tryptisoy Agar* (en adelante, TSA) para el conteo de bacterias y por otro *Sabouraud* con cloranfenicol (en adelante, SAB+C) para hongos. Siguiendo esta norma, se optó por el empleo de estos medios para poder

apreciar diferencias en el tipo de microorganismos detectados. Así, se tomaron dos muestras, cada una con un medio distinto, en cada punto de muestreo (recuérdese la recomendación de duplicidad del muestreo de la NTP1064).

Condiciones para la realización de toma de muestras

Como se indica en la NTP 299, el cabezal del instrumento de muestreo tiene que ser autoclavado o limpiado con una solución desinfectante antes de su uso. En la norma UN-CEN/TS 16115-1 se indica como tal el isopropanol o el etanol al 70%. En el caso del estudio realizado en la capilla se optó por esta segunda opción, aplicando con algodón etanol al 70% por ambos lados de la cubierta. Este proceso de desinfección se llevaba a cabo en cada uno de los puntos antes de proceder a la toma de muestras. En este caso el autoclavado resultaba inviable, ya que únicamente podría haberse efectuado en el laboratorio del IPCE y no se podría repetir entre cada muestra.

Además, en lo que a condiciones de muestreo se refiere, en la norma ISO 16000-19:2012 se recomienda el cierre de puertas y ventanas del espacio a analizar durante las 8 horas anteriores y durante todo el proceso de muestreo con el fin de no alterar la calidad del aire interior. En el caso de la capilla los muestreos se iniciaban a primera hora de la mañana tras mantenerse el edificio cerrado desde la jornada anterior.

Un resumen general de los aspectos fundamentales de la metodología se muestra en la Tabla 1.

Una vez tomadas las muestras siguiendo esta metodología, las placas de medio se sellaban con film de laboratorio y eran transportadas al IPCE, donde se introducían en la estufa de cultivo a 28°C. Se procedía al conteo del número de colonias que crecían durante los días siguientes (Figura 9).

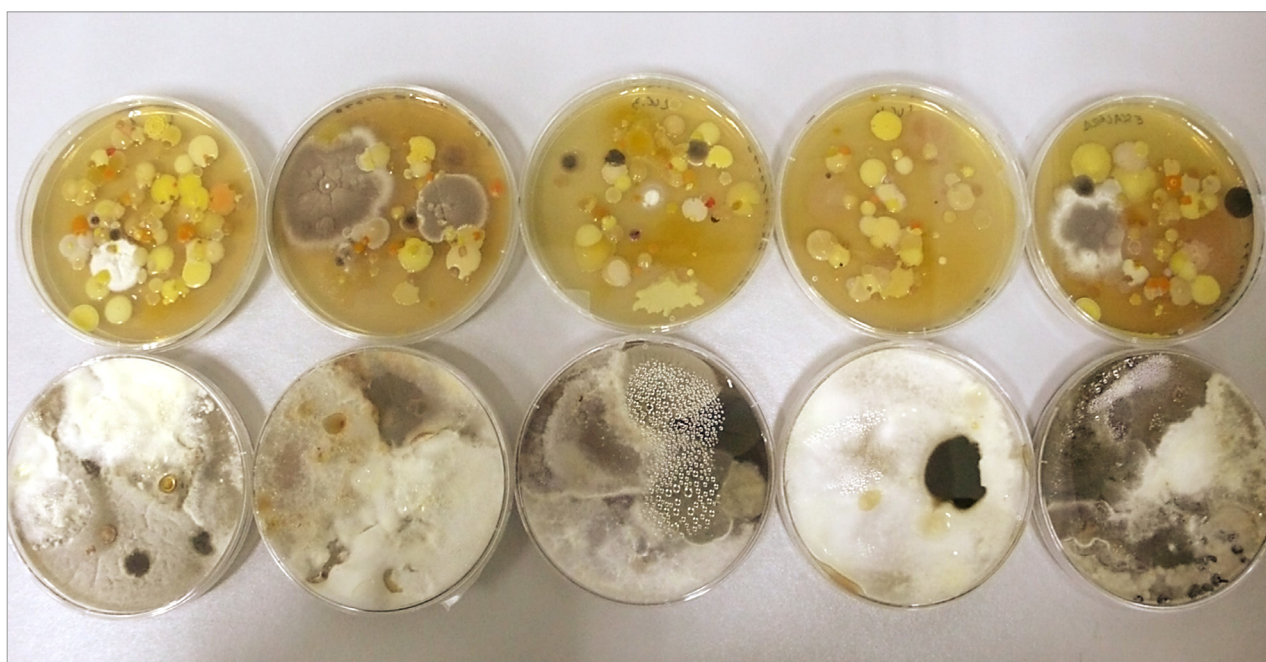


Figura 9. Vista general de los medios de cultivo a los tres días desde la toma de muestra. Puede verse como en las placas de TSA (superiores) el conteo puede efectuarse con mayor facilidad que en las de *Sabouraud* con cloranfenicol (inferiores) las cuales presentan un gran crecimiento. Fotografía: Alexander Gaztañaga Garabieta.

Tabla 1
Resumen de la metodología empleada en la capilla de Luis de Lucena

	Pautas de referencia	Pautas empleadas
Instrumento de muestreo	-	PCE-AS1
Número de puntos de muestreo interiores	1,18 puntos ⁽¹⁾ 4 puntos ⁽²⁾	4 (planta baja) + 1 (balcón de la escalera)
Número de puntos de muestreo de control	-	2 (exteriores)
Altura del cabezal de muestreo	0,10-1,30m ⁽¹⁾ 0,75-1,5cm ⁽³⁾⁽⁴⁾	0,77m
Medios de cultivo empleados	<i>Malt Extract Agar</i> (MEA) ⁽⁴⁾ <i>Trypticase Soy Agar</i> (TSA) ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ DG18 ⁽⁴⁾ Rosa de Bengala ⁽⁴⁾ <i>MacConkey</i> ⁽⁴⁾ <i>Sabour.+cloran.</i> (SAB+C) ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	SAB+C TSA
Caudal y volumen	>50l / mínimo 1 minuto ⁽³⁾	100 l/min.
Tiempo de muestreo	>1 min. ⁽³⁾⁽⁴⁾ 1-10 min. ⁽³⁾⁽⁴⁾	5 min./muestra

En todo momento se empleaban guantes de nitrilo y se desinfectaba el cabezal de muestreo en cada punto con una solución de etanol al 70% ⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

Las puertas se mantenían cerradas al menos durante las 8 horas anteriores y durante todo el periodo de toma de muestras ⁽³⁾. Todas las muestras se recogían aproximadamente entre las 8:30 y 12 de la mañana, intentando reducir al máximo el tiempo de monitorización.

⁽¹⁾ Norma UNE 171330-2

⁽²⁾ Norma UNE-EN 17141:2021

⁽³⁾ ISO 16000-19:2012

⁽⁴⁾ NTP1064

⁽⁵⁾ NTP299

⁽⁶⁾ Norma UN-CEN/TS 16155-1

Resultados

Antes de la intervención

Como puede verse en los gráficos (Figura 10), en los cuatro puntos tomados en la planta baja el crecimiento⁵ fue muy notable, superando, en todos los cultivos de TSA, los índices exteriores. Así, pudo corroborarse el «efecto incubadora» que se daba en el interior de la capilla. La ausencia de ventilación en combinación con la humedad provocaba que la carga microbiológica interior fuera superior a la exterior, con el consiguiente riesgo para los bienes culturales.

Si se interpretan los datos según la tabla 2 de la norma UNE 171330-2:2014, en la que se especifica que las bacterias no deben superar las 600ufc/m³ y las 200ufc/m³ en el caso de hongos, puede verse que en ningún caso se han superado estos límites de confort. En cambio, si se compara

⁵ En los gráficos se muestra el número total de colonias cuantificadas en cada placa, esto es, por cada 500 litros (0,5 m³) de aire.



Figura 10. Representación gráfica del número máximo de colonias cuantificadas en los medios de cultivo de cada uno de los puntos de muestreo antes de la intervención de mejora. Gráficos: Irene Sánchez Pascual.

la relación interior/exterior haciendo uso de la tabla 3 de esta misma norma⁶ puede verse que en varios puntos se superan los límites, lo cual es indicativo de las alteraciones interiores y la necesidad de tomar medidas para su control.

Cabe destacar que la selección del «punto singular» del balcón de la escalera sirvió para identificar diferencias respecto al resto del edificio, con un menor crecimiento de microorganismos⁷ probablemente por encontrarse a la altura del óculo y tener mejor ventilación.

Los datos de la toma de muestras efectuada el 29 de octubre de 2019 son los últimos disponibles antes de que el sistema de extracción se pusiera en marcha.

Cabe puntualizar que no se añade el gráfico de la toma de muestras del 25 de junio ya que, en apenas 24 horas, se dio un crecimiento de *Aspergillus niger* que cubrió completamente todas las placas de cultivo del interior (no en las muestras del exterior), no permitiendo el desarrollo del resto de microorganismos. El día anterior a la toma de muestras se había procedido a la apertura de

⁶ Se establece que si las bacterias y hongos exteriores son iguales a 1, las bacterias del interior tienen que ser inferiores a 1,75 y los hongos inferiores a 0,75 respecto del exterior.

⁷ Esta tendencia solo se vio alterada en la toma realizada el 29 de octubre de 2019, donde se dio un notable crecimiento en la placa de TSA.



Figura 11. Representación gráfica del número máximo de colonias cuantificadas en los medios de cultivo de cada uno de los puntos de muestreo después de la intervención de mejora. Gráficos: Irene Sánchez Pascual.

las rejillas de ventilación del *cáviti* que, como se ha indicado, no funcionaba adecuadamente por encontrarse incompleto. Por ello, la presencia de este hongo se ha relacionado con la falta de una adecuada ventilación de este espacio. Los hongos del género *Aspergillus sp.* suponen un riesgo por su producción de micotoxinas (INSST, 2012), apareciendo habitualmente en sistemas de ventilación. El INSST plantea la necesidad de «disponer de ventilación adecuada (...)», evitar la humedad relativa alta y condensaciones, además de implantar un programa periódico de limpieza y mantenimiento de locales, instalaciones y equipos, especialmente el sistema de climatización-ventilación del edificio», esto es, lo que se perseguía con la intervención realizada.

Exceptuando este caso, en general no se procedió a una identificación al microscopio de las especies, ya que la finalidad del estudio era cuantificar el número total de las mismas y sus variaciones y no existía ningún microorganismo diana o control. Además, en la NTP 299 se recomienda que la identificación se realice cuando se superen las 500 ufc/m³, algo que no ha sucedido en este caso.

Tras la intervención

Tras un mes en funcionamiento del sistema de extracción, pudo verse cómo en todas las muestras tomadas tras la intervención el nivel de microorganismos identificado en el interior fue siempre inferior al exterior (Figura 11), pudiendo apreciarse un equilibrio de la capilla respecto de su entorno y habiendo desaparecido el «efecto incubadora» antes indicado.

Conclusiones y discusión

Cabe destacar que con el estudio aquí presentado se pudo corroborar la existencia de lo que se podría llamar un «efecto incubadora» en la capilla. Muestra de ello es la elevada presencia de microorganismos en el interior en comparación con los datos exteriores, confirmándose así, el problema de ausencia de ventilación y elevada humedad. A su vez, se ha certificado la solución de este problema gracias a la intervención realizada, especialmente por el incremento de la ventilación, que ha conseguido poner fin a dicha problemática, obteniéndose una relación interior-exterior de la carga microbiológica óptima.

La finalidad de este artículo es la de aportar algunas pautas a la hora de plantear el establecimiento de una metodología adecuada para estudios de este tipo realizados en bienes culturales. Por ello, cabe discutir sobre algunos de los aspectos aquí tratados para que se tengan en consideración en futuros casos similares.

Por un lado, siguiendo el mismo orden anterior de discusión sobre la metodología, en cuanto al número de muestras tomadas cabe destacar las escasas variaciones encontradas entre las cuatro interiores tomadas en la planta baja. Esto indica las similares características que presenta el espacio, pudiéndose plantear la reducción del número de muestras en espacios tan uniformes. La selección del punto de muestreo del balcón ha ayudado a identificar diferencias entre esta zona y el resto. A su vez, la toma de dos puntos exteriores a modo de control ha aportado información fundamental para la comprensión de lo que sucede en el interior.

En cuanto a la disposición espacial y altura del muestreador, se consideran como óptimos los parámetros utilizados en este estudio. Una vez más, cabe destacar la necesaria flexibilidad de este tipo de estudios en bienes culturales, como ha podido verse con el caso del punto tomado en la escalera.

Sobre el caudal y el tiempo de muestreo cabe subrayar que son los parámetros más complejos de establecer y tienen que adaptarse a la carga microbiológica identificada en cada espacio mediante la realización de unas primeras mediciones iniciales. En el caso del análisis aquí efectuado se considera adecuado el caudal elegido, ya que ha permitido un crecimiento de microorganismos suficiente como para poder llevar a cabo un conteo efectivo de los mismos. Aun así, en algunas de las tomas se han encontrado problemas al respecto por el elevado crecimiento y en muy poco tiempo de la especie *Aspergillus niger*, aunque, por otro lado, esto ha servido como indicativo de los problemas de ventilación que sufría el edificio. Debido a ello se podría plantear la reducción del tiempo de muestreo (especialmente cuando se utilizan medios de cultivo para hongos como el de *Sabouraud* con cloranfenicol, como puede verse en la Figura 9), pero con la condición de aumentar el número de muestras tomadas, esto es, la cantidad de placas de cultivo por cada punto.

En relación con esto, analizando el crecimiento, se plantea la duda de si tomar todas las muestras de un punto con un mismo medio de cultivo, y que este sea genérico, o combinar distintos. Como ha podido verse, el número de colonias identificadas sobre TSA es mayor, permitiendo una mejor interpretación de los datos si lo que se busca es cuantificar y no tanto identificar las especies.

Este artículo no busca fijar una metodología concreta, más bien se pretende abrir el debate sobre la metodología empleada en este tipo de estudios y la necesidad de establecer unas pautas mínimas que se adecuen a las necesidades del patrimonio cultural. Así, la discusión sobre el método empleado en este estudio está abierta a cualquier aportación, ampliación o modificación de investigaciones futuras. Como ha quedado demostrado, los estudios de aerobiología pueden suponer una herramienta más en la evaluación del estado de conservación de los bienes culturales que aporta información de gran valor a la hora de plantear mejoras en su gestión. Sin embargo, la ausencia de un método mínimo validado hace que no se puedan comparar resultados de casos similares.

En general, la intervención realizada sobre la capilla de Luis de Lucena de Guadalajara y especialmente la mejora de sus condiciones de conservación interior se puede considerar un ejemplo de sostenibilidad ya que, con la mejora del funcionamiento del *cávit*, la implantación de un pequeño sistema de ventilación y la eliminación de un vidrio se ha conseguido reestablecer el equilibrio entre el bien cultural y su entorno, favoreciendo la ventilación natural pasiva del edificio. Todo ello, sin necesidad de grandes sistemas de climatización que, en general, suelen venir acompañados de una fuerte inversión económica inicial, un costoso mantenimiento, un gran impacto negativo en el medio ambiente por el elevado consumo energético y emisión de contaminantes y su interferencia estética con los valores patrimoniales, algo que se ha evitado en este caso.

Bibliografía

AA.VV. (2017): *Proyecto de las obras menores de consolidación y restauración de la capilla de Luis de Lucena (Guadalajara)*. Madrid: Instituto del Patrimonio Cultural de España.

GARCÍA MARTÍNEZ, E. (2018): «Intervención en el banco decorativo modernista de Federico Marés. Real Jardín Botánico de Madrid (España)». *Informes y trabajos*, 18, pp. 147-160.

GUICHEN, G. *et al.* (2014): *Programa de investigación para la conservación preventiva y régimen de acceso de la cueva de Altamira (2012-2014). Informe final (volumen I)*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Disponible en: <https://ipce.culturaydeporte.gob.es/dam/jcr:1bcf7df2-bb5e-4fc8-830d-996942658037/programa-investigacion-altamira.pdf> [Consulta: 25 de enero de 2022].

HERRERA CASADO, A. (1975): «La capilla de Luis de Lucena en Guadalajara (revisión y estudio iconográfico)». *Revista de Estudios Wad-Al-Hayara*, 2, pp. 5-25.

HERRERA CASADO, A. (1991): *La capilla de Luis de Lucena*. Guadalajara: AACHE Editores.

INSST

– (2015): *NTP 1064: Calidad del aire interior. Contaminantes biológicos (I): estrategia de muestreo*. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/329558/ntp-1064w.pdf/273f6a27-124e-4908-8a07-3d9cd6571401> [Consulta: 25 de enero de 2022].

– (2015): *NTP 1065: Calidad del aire interior. Contaminantes biológicos (II). Tipos de muestreo*. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/329558/ntp-1065w.pdf/0542df2c-757a-46b8-b75b-2d0246a156a5> [Consulta: 25 de enero de 2022].

– (2012): *Aspergillus spp.* Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/353749/Ficha+Aspergillus+spp.pdf/fc87d0c4-023a-4dda-95dc-cd26d346e1f2?version=1.0&t=1528734451245> [Consulta: 25 de enero de 2022].

– (1993): *NTP 299: Método para el recuento de bacterias y hongos en aire*. Disponible en: https://www.insst.es/documents/94886/327166/ntp_299.pdf/c33a7078-3608-4c56-914e-12946c3c660c [Consulta: 25 de enero de 2022].

JIMÉNEZ CUENCA, C. y GONZÁLEZ PASCUAL, M. (1998): *Proyecto de Restauración y Adecuación de la capilla de Luis de Lucena*. Madrid: Instituto del Patrimonio Histórico Español.

JIMÉNEZ CUENCA, C. (2006): «La capilla de Luis de Lucena (Guadalajara). Un monumento recuperado». *Bienes culturales: revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español*, 6, pp. 117-126.

MAEKAWA, S., BELTRAN, V. L. y HENRY, M. (2015): «Historic Archive of San Cristobal de La Laguna, Tenerife, Spain: Ventilation and Conservation Heating». En: *Environmental Management for Collections. Alternative Preservation Strategies for Hot and Humid Climates*. Los Ángeles: The Getty Conservation Institute, pp. 231-254.

- MAEKAWA, S. y TOLEDO, F. (2003): «Sustainable climate control for historic buildings in subtropical climates». *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 14 (3), pp. 369-382.
- MALLO, A. C. *et al.* (2020): «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». *Ge-Conservación*, 17 (1), pp. 33-46.
- NAVARRO CASAS, J., GARCÍA MARTÍNEZ, E. y GARCÍA PÉREZ, Á.L (2021): «Mantenimiento de las portadas de la catedral de Sevilla. Un ejemplo de intervención sostenible». *Ge-conservación*, 19, pp. 225-235.
- PRADILLO ESTEBAN, P. J. (1989): «La iglesia de San Miguel de Guadalajara: aproximación histórica y análisis artístico». *Revista de Estudios Wad-Al-Hayara*, 16, pp. 205-224.
- SAVKOVIC *et al.* (2021): «Diversity and seasonal dynamics of culturable airborne fungi in a cultural Heritage conservation facility». *International Biodeterioration & Degradation*, 157.

UNE

- (2021) *UNE-EN 17141. Salas limpias y ambientes controlados asociados. Control de la biocontaminación.*
 - (2016) *UNE-EN ISO 14644-1. Salas limpias y locales anexos controlados. Parte 1: Clasificación de la limpieza del aire mediante la concentración de partículas.*
 - (2015) *UNE-EN ISO 16000-19. Aire en interiores. Parte 19: Estrategia de muestreo de mobos.*
 - (2014): *UNE 171330. Calidad ambiental en interiores. Parte 2: Procedimientos de inspección de calidad ambiental interior.*
 - (2013): *UNE-CEN/TS 16115-1. Calidad del aire ambiente. Medición de bioaerosoles. Parte 1: Determinación de esporas mediante sistemas de muestreo de filtro y análisis de cultivos.*
 - (2008): *UNE 171330. Calidad ambiental en interiores. Parte 1: Diagnóstico de calidad ambiental interior.*
 - (2004): *UNE-EN ISO 14698: Salas limpias y ambientes controlados asociados. Control de la biocontaminación. Parte 1: Principios y métodos generales.*
 - (2004): *UNE-EN ISO 14698: Salas limpias y ambientes controlados asociados. Parte 2: Evaluación e interpretación de los datos de biocontaminación.*
- VALENTÍN, N., MURO, C. y MONTERO, J. (2010): «Métodos y técnicas para evaluar la calidad del aire en museos». *11ª Jornada de Conservación de Arte Contemporáneo*. Madrid, febrero 2010. Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, pp. 62-82.

BLOQUE 2. TECNOLOGÍA
E INNOVACIÓN EN LA
CONSERVACIÓN DE LOS
BIENES CULTURALES.
CASOS DE APLICACIÓN.

Indicadores de falsificación en los «grafitos excepcionales» del yacimiento arqueológico de Iruña-Veleia (Álava)

Counterfeiting indicators on the «exceptional graffiti» from Iruña-Veleia archaeological site (Álava)

José Vicente Navarro Gascón

Emérito. Instituto del Patrimonio Cultural de España. Ministerio de Cultura y Deporte
vicente.navarro@cultura.gob.es

Resumen: El estudio mediante microscopía electrónica de barrido y técnicas de diagnóstico por imagen sobre un conjunto de grafitos en cerámicas romanas del yacimiento arqueológico de Iruña-Veleia ha permitido la identificación de un elevado número de indicadores de falsificación entre los que destacan la detección de innumerables restos de metales modernos e inalterados dejados en los trazos de los grafitos por los objetos utilizados en su elaboración, la destrucción sistemática de las costras y depósitos de enterramiento, retoques y correcciones de los textos, así como numerosas anomalías derivadas de las relaciones entre grafito y soporte cerámico.

Palabras clave: Iruña-Veleia, grafitos romanos, falsificación.

Abstract: The study by scanning electron microscopy and diagnostic imaging techniques on a set of graffiti on roman ceramics from the archaeological site of Iruña-Veleia allowed the identification of a high number of forgery indicators. Among them the detection of innumerable remains of modern and unaltered metal particles left in the graffiti by the objects used in his elaboration, the systematic destruction of burial crusts, tweaks and text modifications and numerous anomalies derived from the relationships between graffiti and ceramic fragments stand out.

Keywords: Iruña-Veleia, roman graffiti, forgery.

Introducción

El yacimiento arqueológico de Iruña-Veleia, considerado como el yacimiento romano más importante del País Vasco, se encuentra situado en el municipio de Iruña de Oca (Álava) (Figura 1). Su existencia se conoce desde la antigüedad y las excavaciones se han escalonado a lo largo del tiempo, adquiriendo continuidad desde finales del siglo XX, sin citas de hallazgos de grafitos relevantes en este periodo.

En 2002 la gestión del yacimiento es asumida por la empresa LURMEN, S.L. en el marco del *Proyecto Iruña-Veleia III Milenio*, bajo el patrocinio de Eusko Trenbideak. Tras la campaña de ex-

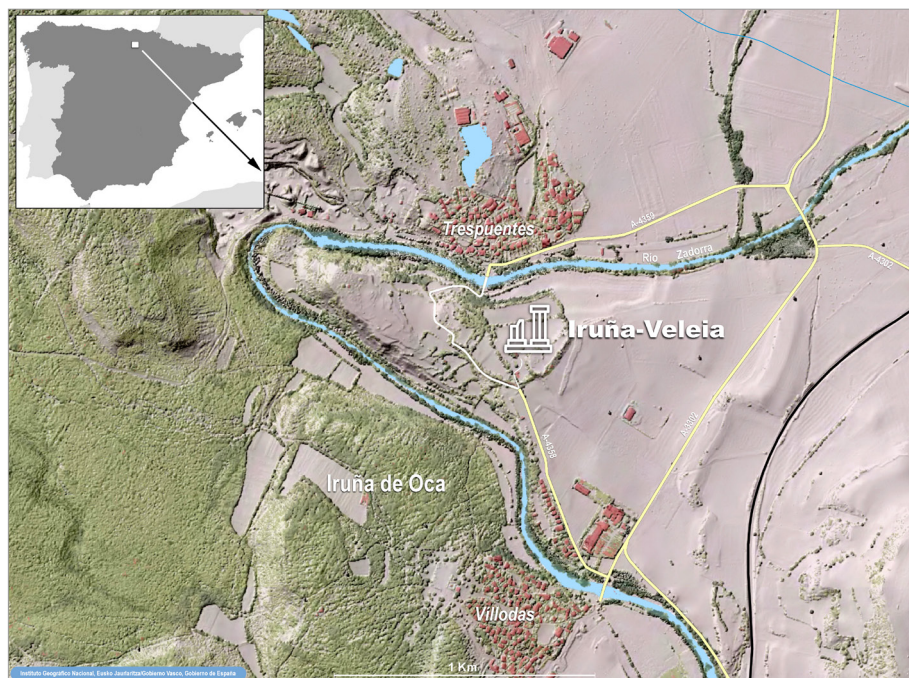


Figura 1. Situación del yacimiento arqueológico. Modificado sobre base cartográfica del Instituto Geográfico Nacional.

cavación del año 2005 la empresa anuncia en 2005 y 2006 el hallazgo de un elevado número de grafitos sobre cerámica, hueso y vidrio que, por su contenido y cronología (siglos I-V d.C.), son catalogados como excepcionales. Por sus implicaciones históricas adquieren notoriedad los textos en euskera y los dibujos con temática cristiana, sin paralelismos con lo encontrado hasta la fecha en este y otros yacimientos. La autenticidad estaba avalada por los análisis sobre continuidad de pátinas realizados por la empresa en los laboratorios del CEA-CNRS, CE de Saclay (Francia). Posteriormente se sabría que los análisis nunca fueron realizados.

Las dudas sobre la autenticidad surgen por los numerosos errores y anomalías que los especialistas encuentran en la lectura de los grafitos y por el contexto de su aparición, en las mesas de lavado, fuera del control de los arqueólogos. En 2008, una Comisión Científica pluridisciplinar nombrada por la Diputación Foral de Álava (DFA) presenta sus conclusiones confirmando las sospechas de falsedad de muchos de los grafitos examinados¹ y la polémica es judicializada tras la querrela presentada por la DFA, siendo denunciados el director de la excavación y dos de sus colaboradores, entre ellos el autor de las analíticas falsas. La instrucción del sumario del caso Veleia ha sido una de las más largas de la historia judicial del País Vasco, con resultado de sentencia condenatoria en 2020, posteriormente ratificada en 2021 por la Audiencia Provincial de Álava. Un análisis de la evolución de la polémica puede consultarse en Rodríguez Temiño (2017).

El presente artículo tiene como base los informes periciales realizados por el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) sobre las piezas intervenidas en las actuaciones judiciales (Antelo *et al.*, 2014; Navarro, 2013 y 2014). Dichos informes se basan en el estudio de evidencias

¹ Las actas e informes de la Comisión y los documentos aportados por LURMEN, S.L., son accesibles a través de la dirección web: www.araba.eus/publicar/Veleia/ (Ciprés *et al.*, 2008; Galán, 2008; Gorrochategui, 2008; Lakarra, 2008; Madariaga, 2008; Núñez, 2008, Velázquez, 2008 y otros).

físicas, al margen de interpretaciones epigráficas, lingüísticas o históricas, y los resultados son concluyentes, certificando la falsedad de la mayor parte de los grafitos estudiados, entre ellos todos los catalogados como excepcionales.

Piezas seleccionadas para estudio

El material analizado corresponde a un conjunto de 39 piezas seleccionadas en función del tipo de grafito (textos en latín, euskera, jeroglíficos, dibujos esquemáticos, religiosos, escenas, árboles genealógicos), soporte cerámico (*terra sigillata* hispánica, cerámica común,...) y estado de conservación (Figura 2). Como criterio de proporcionalidad se ha incluido una importante representación de las piezas de la UE 51144, por ser la que tiene asignados un mayor número de grafitos, muchos de ellos polémicos. Como elemento de referencia, en la selección se han incluido piezas cuya autenticidad no estaba cuestionada.



Figura 2. Conjunto de piezas seleccionadas para estudio. Fotografías: José Vicente Navarro Gascón.

Técnicas de estudio

Dado el carácter de depósito judicial y con objeto de no introducir alteraciones en la morfología y estado de superficie de los grafitos, el estudio se realiza sin toma de muestras mediante técnicas no destructivas:

- Examen y estudio mediante estereomicroscopio.
- Diagnóstico por imagen mediante pares fotográficos obtenidos en el espectro visible y fluorescencia inducida por luz ultravioleta (imágenes FUV), método que permite contrastar la respuesta de los soportes cerámicos, depósitos químicos y tierras adheridas y diferenciar entre grafitos originales y los inscritos con posterioridad a la exhumación de la pieza. Para inducir la fluorescencia se han utilizado tubos SYLVANIA BLACK LIGHT-BLUE F8W/BLB-T5. La adquisición de imágenes se ha realizado con una cámara digital NIKON D100 con detector CCD con un objetivo Micro-NIKKOR de 55 mm e interponiendo filtro de corte en cámara.
- Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX), utilizada para el examen textural y composicional de los soportes cerámicos, trazos de los grafitos, depósitos superficiales y restos de herramientas presentes en las inscripciones. Se ha empleado un microscopio Hitachi VP-SEM S-3400N acoplado con un espectrómetro de dispersión de energías Bruker Quantax X-Flash SDD con una resolución espectral de 125 eV, trabajando sobre imágenes de contraste composicional obtenidas mediante la señal de electrones retrodispersados (imágenes BSE) bajo condiciones de presión variable, método que permite realizar el examen y los análisis sin necesidad de aplicar capas conductoras superficiales.

Resultados

Análisis del soporte cerámico de los grafitos

En la elaboración del cuerpo de las *terrae sigillatae* se han utilizado pastas arcillosas cálcicas sobre la que se ha aplicado una barbotina elaborada con una arcilla ferruginosa depurada de partículas desgrasantes y con alto contenido de óxidos fundentes (K₂O) que facilita la formación durante la cocción de la delgada capa sinterizada roja que las caracteriza, mientras que en las cerámicas comunes se han utilizado pastas arcillosas cálcicas.

El desarrollo de una estructura microporosa durante la cocción de las pastas cálcicas (Enrique *et al.*, 1985) introduce factores de interés en relación con su aptitud para la fijación de contaminantes químicos durante el enterramiento arqueológico, muy distinta con respecto a los barnices vitrificados de las TSH. En las imágenes FUV se observa que, después del lavado, estos depósitos se mantienen de forma preferente en la superficie de las cerámicas comunes, en los bordes de rotura y zonas erosionadas de las TSH y cerámicas comunes y, caso de ser originales, en los fondos de los trazos donde aflora el cuerpo cerámico interno, mientras que en los barnices sólo se mantienen las costras.

El cuarzo es el principal tipo de desgrasante que aparece en la matriz de las cerámicas, con tamaños de grano de limo (2-60 µm) o arena muy fina (60-120 µm); con carácter accesorio aparecen otros silicatos, nódulos y partículas de óxidos de hierro, pseudomorfos de pirita, circones (ZrSiO₄), monacitas ((La,Ce,Th)PO₄)... Como excepción, en la cerámica negra de la pieza 12048 se ha utilizado una carga de granos romboédricos de carbonato cálcico.

Morfología de los trazos

Del examen comparativo de la morfología de los trazos no se obtienen resultados concluyentes en relación con la determinación de la autenticidad o falsedad, aunque en base a otros indicadores se han constatado diferencias entre los trazos de grafitos que han sido catalogados como originales y los de factura reciente.

Los trazos de grafitos originales, todos ellos sobre *terrae sigillatae*, presentan una tipología variada:

- Bordes dentados, consecuencia de la rotura frágil del barniz, sobre los que se inscribe un surco más profundo (11162). Esta morfología es la habitual en los grafitos cuestionados realizados sobre este tipo de soporte.
- Incisiones superficiales que no perforan completamente la capa vitrificada (12799). Ningún grafito cuestionado presenta estas características, aunque sí aparecen trazos individuales (trazos «deslizantes» y arañazos) que se ajustan a esta tipología.
- Trazos obtenidos mediante «picoteado» (11392, 11481) dando lugar a un rosario de desconchamientos sobre los que puede inscribirse un surco más profundo.

El comportamiento de las cerámicas comunes es mucho más homogéneo. Los trazos suelen presentar secciones redondeadas, con bordes de surco poco pronunciados, sobre los que puede haberse grabado un trazo cortante más profundo. Dentro de este grupo destaca la pieza 11156 por presentar dos modos de ejecución, uno muy tosco, con bordes dentados muy marcados, realizados mediante incisiones con un objeto con hoja plana punzante, y otro muy preciso y rectilíneo, utilizado en un reducido número de letras, constituyendo una anomalía de difícil valoración. Ninguna de las cerámicas comunes ha sido valorada como auténtica, por lo que no se dispone de piezas de referencia en grafitos originales.

En las *terrae sigillatae*, una vez seccionado el barniz, el sustrato corresponde a una pasta arcillosa cálcica y los surcos se comportan siguiendo las pautas de una cerámica común. En algunos casos la alteración ha eliminado la práctica totalidad del barniz.

Restos de herramientas en las inscripciones

Como consecuencia de la abrasividad de los fragmentos cerámicos sobre los que se inscriben los grafitos, el desgaste de los útiles metálicos utilizados en su elaboración ha dejado un rastro de partículas metálicas micrométricas que se alinean en el fondo de los trazos. Su detección sólo ha sido posible mediante el rastreo detallado de los trazos con microscopía electrónica de barrido.

Restos de metales modernos e inalterados

Su localización está exclusivamente circunscrita al recorrido de los trazos y la ausencia de alteración, inviable en un contexto arqueológico, indica que se trata de restos recientes. Se han identificado en 35 de las 39 piezas estudiadas, constituyendo el nexo común entre todas ellas. Las únicas piezas en las que no se ha detectado este tipo de indicios tienen todos los surcos totalmente colmatados por tierras (11156, 11413 y 17194) impidiendo su examen. Pueden presentarse de distintas formas:

- Escamas apiladas sobre los granos de cuarzo del desgrasante cerámico (Figuras 3A). Su número y tamaño está afectado por factores variados: cantidad, tamaño y angulosidad de los granos de desgrasante, grado de sinterización alcanzado en el cuerpo cerámico durante la cocción, dureza del instrumento utilizado, presión aplicada durante el grabado.

- Cuñas microscópicas incrustadas en las microfisuras producidas durante el grabado del grafito en la capa de barniz vitrificado de las TSH. Por su largo recorrido y alto contenido en partículas presentan especial interés los trazos ‘deslizantes’ en los que la punta metálica ha resbalado sobre la superficie vitrificada sin llegar a perforarla totalmente o, incluso, sin generar un trazo perceptible, dando lugar a la formación de rastros continuos con un elevadísimo número de partículas (Figura 3B). Este tipo de trazos es especialmente importante en las piezas 10765, 10776, 10942, 11139, 11392, 11417, 11419, 11429, 11459 y 12108.
- Partículas inalteradas que aparecen semienterradas en las tierras que rellenan los trazos o, incluso, atrapadas entre la pared del trazo y el relleno (detectadas en las piezas 10776, 10942, 11429, 11530, 12108, 12697 y 13397).

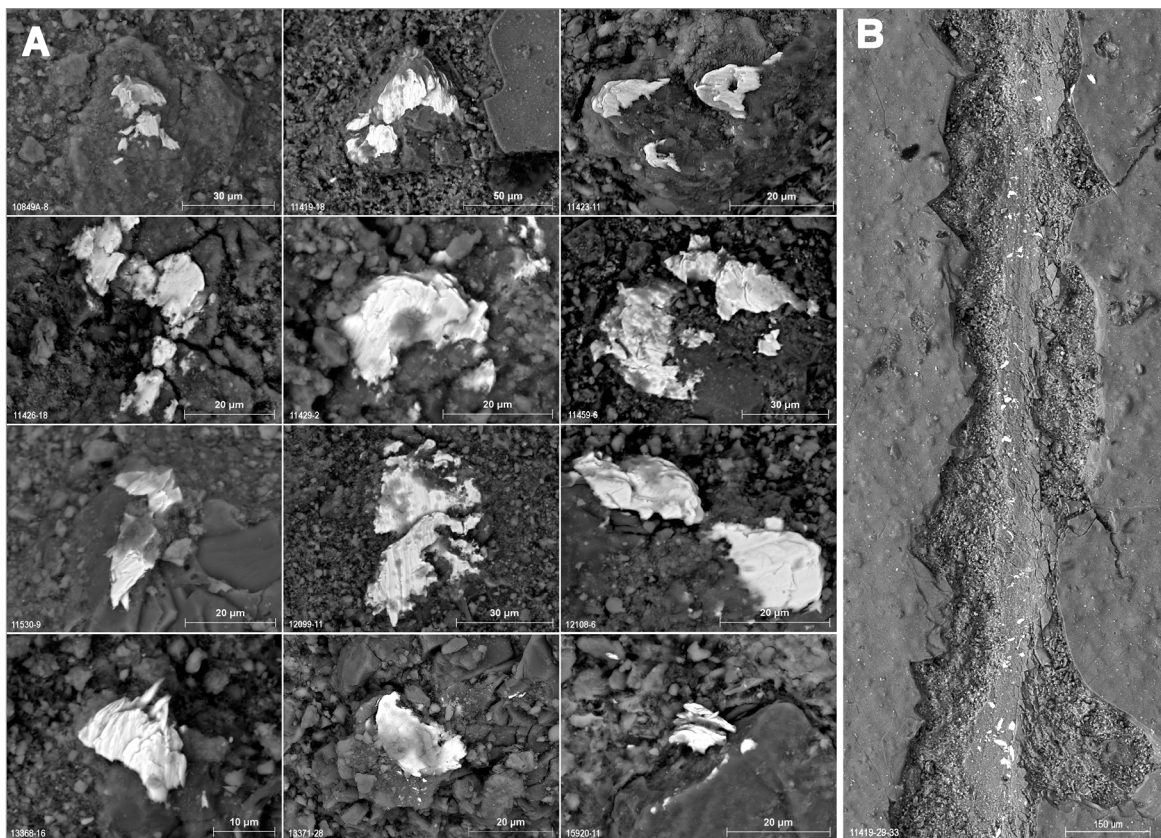


Figura 3. Formas de presentación de las partículas metálicas en los trazos: A) Apilamientos de escamas micrométricas sobre los granos del desgrasante de las cerámicas, B) Rastro continuo de partículas incrustadas en un trazo deslizante. Fotografías: José Vicente Navarro Gascón.

Se han identificado los siguientes tipos de aleaciones:

- **Acero común:** En la mayor parte de las partículas detectadas se identifica una aleación de hierro y manganeso (Fe-Mn0,5-0,7%) con bajas proporciones de cromo, cobre o níquel (<0,1-0,2%) (identificadas en 31 grafitos).
- **Acero inoxidable:** Sólo hay dos piezas (13397 y 17050) en las que el acero inoxidable (Fe-Cr10-12%) ha sido el único tipo de aleación identificada. En otras piezas aparece como partículas aisladas que acompañan al acero común y en uno de los casos las partículas corresponden a acero inoxidable especial (hierro aleado con cromo, níquel, manganeso y molibdeno).
- **Níquel.** Se presenta como partículas aisladas, muy escasas y asociadas a restos de acero común (grafitos 10776, 11459, 11709, 15920) que se han interpretado como restos de acero ni-

quelado. En su análisis se detectan, además de las líneas espectrales del níquel, las del cobre, en relación con la capa intermedia de cobre introducida en el niquelado electroquímico.

- **Hierro no aleado** (o aleado con elementos fuera de los rangos de detección del espectrómetro utilizado). Aparece como único tipo de indicio en la pieza 11392 (grafito original muy retocado), en un pequeño retoque de la pieza 10826 y en el anverso de la pieza 10942.
- La **cuprita** (óxido cuproso), forma de alteración habitual en los objetos arqueológicos de aleaciones con base de cobre (cobre, latón, bronce), aparece en forma de agregados microscópicos de cristales idiomorfos en nueve puntos distintos de los trazos de la pieza 11417. Se interpreta como resultado del desgaste de una punta de cobre alterado para reparar los surcos previamente abiertos con un objeto de acero común.
- **Plomo**. Junto con partículas de acero común, aparecen restos de plomo alterado en dos piezas. Pueden proceder, al igual que la cuprita, de una aleación de bronce ternario en un objeto utilizado para reparar trazos previamente ejecutados con acero. Así lo sugiere la identificación de pequeñas proporciones de cobre y estaño, junto al plomo, en alguno de los análisis realizados.
- **Otras aleaciones**. Con carácter puntual se han identificado partículas de aleación de Cu-Zn-Ni (posible alpaca de baja calidad), latón y cinc.

Las partículas metálicas descritas aparecen asociadas a otros indicadores de falsificación: costuras seccionadas, tierras introducidas a posteriori sobre los trazos, fracturaciones anómalas, retoques y correcciones. Por su localización (Figura 4), estrictamente circunscritas a los trazos, y ausencia de alteración, sólo pueden proceder del proceso de grabado de los grafitos, no existiendo ningún tipo de indicio que permita relacionarlas con otro tipo de operaciones. A este respecto, en los propios protocolos de la empresa sobre el tratamiento y manipulación de las piezas en campo se señala²:



Figura 4. Esquemas de situación de los restos metálicos en algunas de las piezas estudiadas. Cada punto marcado representa una zona de concentración de indicios. Fotografías: José Vicente Navarro Gascón.

² Documentación judicial aportada por Lurmen, S.L. (2013): Informe A2. Anexo 2, p. 3. «Declaración sobre el tratamiento y manipulación de las piezas en campo y durante la fase de procesamiento y estudio de Lurmen; así como de otras vicisitudes posteriores que han seguido los hallazgos de Iruña-Veleia».

«... Esta limpieza, para la que se podía contar con colaboradores, se llevaba a cabo, siempre de forma manual, utilizando en la medida de lo posible agua destilada y valiéndose de las propias manos y diferentes accesorios como cepillos de dientes, pinceles, varillas de madera, etc., dependiendo de la naturaleza de la costra y/o suciedad a eliminar. La directiva expresa era no utilizar para ello objetos metálicos como hojas de cutter, varillas metálicas o alambres excepto en algunos casos como, por ejemplo, para vaciar las cañas llenas de tierras de los huesos».

Restos de metales originales en los trazos

La pieza 12779 (ficha de juego en cerámica TSH) constituye un ejemplo excepcional por haberse identificado, junto a otros indicadores de autenticidad, restos metálicos originales con un estado de alteración acorde a su antigüedad. Estos restos aparecen en forma de costras de oxihidróxidos de hierro que se alinean a lo largo de los trazos sobre los restos de barniz fisurado.

Partículas metálicas fuera de los trazos

La presencia de restos metálicos fuera de los trazos es muy reducida, generándose como consecuencia del roce de la cerámica sobre una superficie metálica de apoyo o un objeto metálico. El grupo más importante se presenta en forma de «nubes» de partículas que se concentran en torno a un punto de rozamiento preferente o forman un rastro sin contornos definidos. Se han detectado:

- Acero inoxidable (10942, 12098), con contenidos de cromo (Cr:14-17%) superiores a los identificados en las partículas de este tipo localizadas en los trazos.
- Acero inoxidable con cromo, manganeso, cobre y níquel (13368).
- Fosfoniquelado (11424).
- Plomo (11459)
- Plata (12098)
- Aleaciones de oro (12098, 13368 y 11424) que se interpretan como resultado del roce continuado de anillos o abalorios que portan las personas que han trabajado sobre las piezas sujetándolas con las manos.

Un segundo grupo aparece en forma de esquirlas micrométricas, unitarias y sin procedencia definida. Su presencia es anecdótica: níquel (10942), latón (11413 y 12108), zinc (15920).

Depósitos superficiales

Durante el período de enterramiento arqueológico se han depositado sobre la superficie de los fragmentos cerámicos una serie de materiales, obligatoriamente sujetos a los principios de superposición de estratos. Su correcta ubicación permite reconstruir la secuencia estratigráfica original, anterior a la exhumación de las piezas.

Costras y concreciones

Las veladuras y costras de carbonato y fosfato cálcico presentes en las piezas examinadas son un precipitado químico, de origen bioinducido en muchas ocasiones, y constituyen el primer episodio sedimentario registrado sobre la superficie cerámica. Se identifican tipos diferenciados, que pueden superponerse:

- Veladuras que pueden no ser apreciables en el rango visible, aunque evidenciables en las imágenes FUV por generar una señal que destaca del tono de la pasta cerámica. En las

superficies de las cerámicas TSH, debido a la baja o nula porosidad del barniz es difícil que tras el lavado se mantengan restos significativos, por lo que es poco factible su detección a partir de la señal FUV. Sin embargo, su presencia sí queda registrada en los cantos y bordes de fractura, al igual que en el fondo de los trazos originales, donde aflora el núcleo poroso de la cerámica, dando lugar a una señal fluorescente. Cuando los trazos erosionan estas veladuras la señal FUV desaparece (Figura 5A).

- Costras compactas que pueden llegar a cubrir gran parte de la superficie. En el campo visible presentan una coloración blanca-grisácea mientras que en las imágenes FUV presentan una coloración amarillo-verdosa intensa (Figuras 5B y 5D). Su componente habitual es el carbonato cálcico, pudiendo intercalar niveles de fosfato cálcico; este último es predominante en algunas piezas. En la base de las costras carbonatadas (piezas 11162, 11139, 11419, 11426, 11530, 12799 y 13368) puede aparecer una película de carbonato cálcico fibroso/acicular, apenas perceptible, que señala un medio de deposición con aguas bicarbonatado-cálcicas (Figura 5D).
- Estructuras vasculares y formas filamentosas de origen biológico que han sido reemplazadas por carbonato y/o fosfato cálcico. Constituyen el rasgo más característico de las piezas estudiadas. Se fijan con más facilidad, en las zonas donde aflora la textura microporosa de la cerámica: superficies de cerámica común, surcos decorativos, fracturas y fondos de trazos originales, ampollas y daños del barniz de las *terrae sigillatae*. Son fácilmente identificables por su morfología y su elevada señal FUV (Figuras 5C y 5E).

La presencia de costras en el fondo de los surcos es un indicador de antigüedad/autenticidad del grafito, sólo verificable en un número muy reducido de piezas sin contenido epigráfico relevante (10826, 11162, 11392, 11481 y 12799) (Figura 6), aunque alguna de ellas presenta retoques recientes.

Por el contrario, son muy numerosas las piezas en las que los trazos seccionan las costras macro y/o microscópicas en todos los puntos donde confluyen (10776, 10849, 10942, 11139, 11156, 11392, 11413, 11419, 11423, 11424, 11426, 11459, 11530, 12047, 12099, 12110, 12697, 13368, 13371, 15920, 17050 y 17194) (Figuras 5B, 5C, 7 y 8) y/o el grafito se inscribe y secciona una superficie cubierta por una veladura de depósitos químicos (11424, 11709, 12098, 12110) (Figuras 5A y 7A). Todos ellos constituyen indicadores de una ejecución reciente, posterior a la formación de las costras y a la exhumación de las piezas.

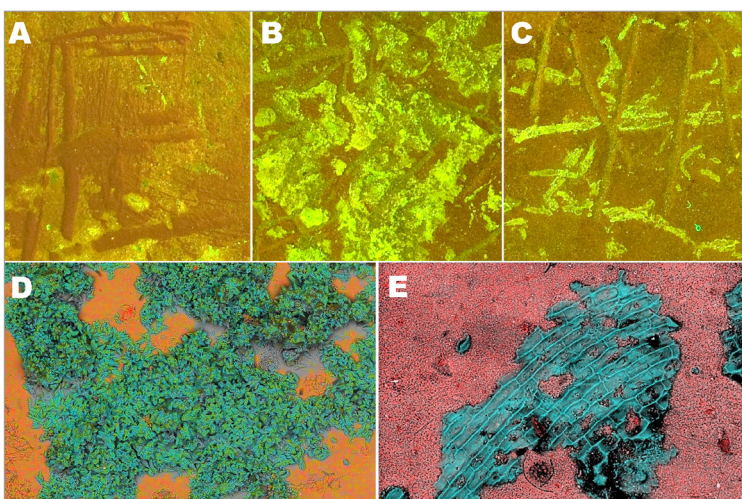


Figura 5. Imágenes FUV de distintos tipos de costras: A) Veladuras, B) Costras masivas, C) Costras bioinducidas. D, E): Mapas de distribución de elementos realizados sobre costras masivas y bioinducidas de carbonato cálcico. Fotografías: Tomás Antelo Sánchez y José Vicente Navarro Gascón.

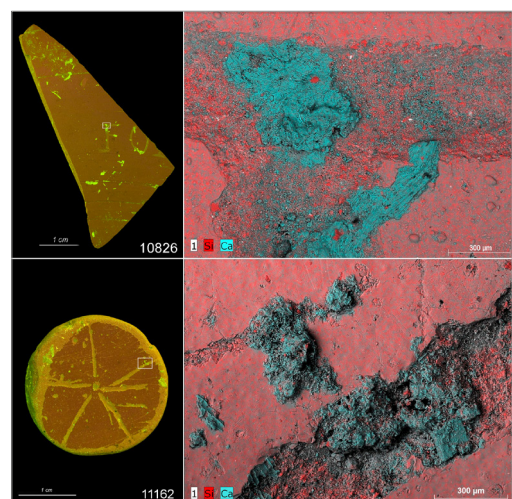


Figura 6. Mapas de distribución de elementos realizados sobre restos de costras de carbonato cálcico en trazos de piezas originales. Fotografías: Tomás Antelo Sánchez y José Vicente Navarro Gascón.

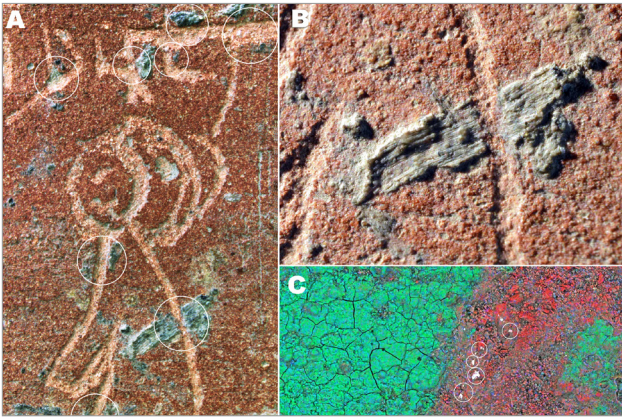


Figura 7a y 7b. Detalles de la pieza 12099, donde los trazos seccionan la veladura superficial y las costras. **7c.** Mapa de distribución de elementos de una costra fosfatada seccionada por el grafito en la misma pieza donde se han señalado los restos de acero existentes en el fondo del trazo. Fotografías: José Vicente Navarro Gascón.

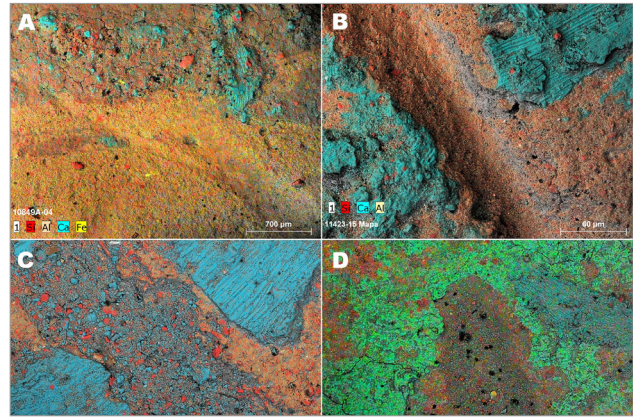


Figura 8. Mapas de distribución de elementos realizados sobre costras seccionadas por los trazos. En A y B no hay indicadores geoquímicos de la existencia previa de costras en el fondo de los surcos. En C y D se han introducido tierras *a posteriori*, invirtiendo la estratigrafía original. Obsérvese la anomalía composicional existente entre la costra fosfatada y las tierras de relleno en D. Fotografías: José Vicente Navarro Gascón.

Un caso especial lo constituyen los «trazos invasivos», cuyo recorrido excede la superficie cerámica e invade los cantos de los bordes de los fragmentos seccionando los depósitos y costras existentes en ellos (piezas 11426, 11530, 12108, 12697) (Figura 9). Señalan que el grafito es posterior a la formación de los depósitos y evidencian que el fragmento se encontraba roto antes de ser grabado y que las pérdidas de texto por fragmentación que presentan son ficticias. La presencia de tierras de relleno en los trazos no permite incluir en este grupo otros ejemplos con una idiosincrasia similar (11305, 13397, 15910), piezas limpias con tierras en los trazos invasivos que impiden valorar la señal FUV.

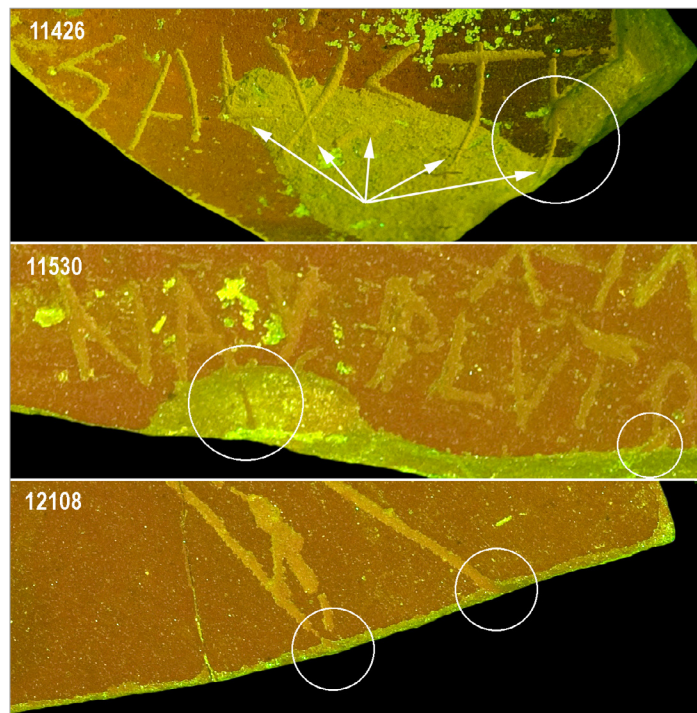


Figura 9. Imágenes FUV de detalle de trazos invasivos que seccionan las veladuras existentes en los bordes de rotura de algunas piezas. Fotografías: Tomás Antelo Sánchez.

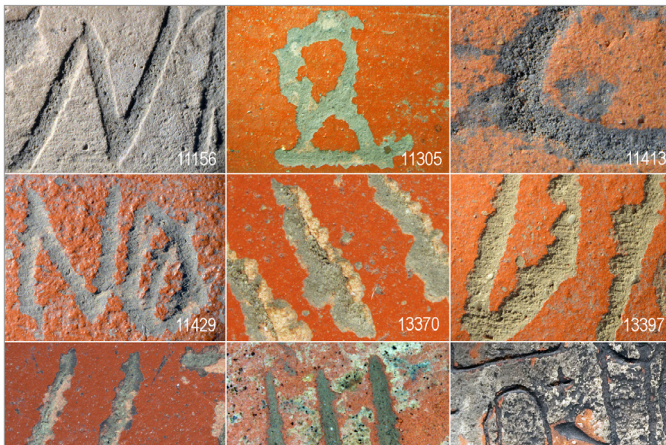


Figura 10. Detalles de las tierras que rellenan surcos de trazos en distintas piezas. Fotografías: José Vicente Navarro Gascón.

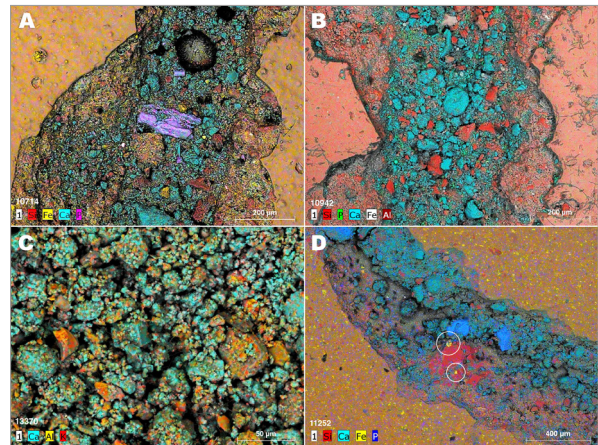


Figura 11. Mapas de distribución de elementos realizados sobre las tierras de relleno en distintas piezas. La pérdida asimétrica del relleno visible en D deja al descubierto granos de cuarzo del desgrasante cerámico con restos de acero incrustados. Fotografías: José Vicente Navarro Gascón.

La situación de las costras influye en algunos casos en la escritura del grafito, observándose letras cuya grafía se deforma para acoplarse a ellas, sin que ello sea obstáculo para que en otros puntos hayan sido seccionadas (11419, 13368). En otros ejemplos aparecen letras que se detienen al tocar una costra (10776, 11139, 11530, 13368) o incluso letras con trazos incompletos que generan la sensación óptica de estar cubiertas por las costras (15920).

Depósitos detríticos y tierras de relleno de los trazos

Muchos de los surcos del trazado del texto o el dibujo de los grafitos aparecen total o parcialmente rellenos por tierras de color gris, gris oscuro o negro, granulometría fina (5-20 μm) y variable estado de compactación que, cuando colmatan los trazos, impiden el acceso analítico al fondo de los surcos y dificultan la evaluación de las imágenes FUV (Figura 10).

Sedimentológicamente corresponden a un depósito detrítico de partículas de tamaño limo, no cementado y estratigráficamente posterior a la formación de las costras. Su componente principal (Figura 11) son partículas de carbonato cálcico, entre las que se reconocen fragmentos de costras biológicas y bioclastos, granos de cuarzo y otros silicatos, partículas angulosas de fosfato cálcico, un moderado contenido de matriz filosilicatada, partículas carbonosas y, como accesorios, cristales y fragmentos de cristales de circones e ilmenitas e, incluso, fragmentos cerámicos. Los restos carbonosos pueden ser mayoritarios en algunos rellenos y en otros aparecen zonas con alto contenido de hifas y materia orgánica, generando una señal FUV intensa. Esporádicamente aparecen partículas metálicas alteradas que relacionan las tierras con un entorno arqueológico de procedencia: óxidos de hierro, cloruros, óxidos y carbonatos de cobre, carbonato de plomo, sulfuros y cloruros de plata. La morfología y tamaño de estas partículas no guarda ninguna relación con los restos metálicos anteriormente descritos.

Como rasgo general suelen presentar grietas de contracción por desecación, con pérdidas volumétricas asociadas, o huellas de cepillado, indicadores de su bajo estado de agregación. La permanencia de estas tierras sobre los grafitos resulta cuestionable, especialmente cuando las superficies fueron limpiadas por la empresa según sus propios protocolos³:

³ (Op. Cit.) Documentación judicial aportada por Lurmen, S.L. (2013): Informe A2. Anexo 2, p. 3.

«... en lo que se refiere a los materiales de la UE 51144 se procedió a una limpieza bastante exhaustiva de los hallazgos relevantes, mediante cepillado de las superficies y haciendo saltar costras, por apalancamiento mecánico manual (normalmente con la uña, bien con una espátula de madera), allá donde se veía o se presumía la presencia de grabados o inscripciones».

Estos depósitos pueden ser considerados un elemento móvil. Su composición y textura no cambian si procediendo del medio de enterramiento arqueológico (o de los residuos del lavado) fuesen aplicados sobre los trazos, no siendo un indicador válido de autenticidad o falsedad. Su valoración debe realizarse a partir de sus interrelaciones con el resto de los indicadores, concurriendo anomalías que señalan que nos encontramos con adiciones posteriores al grabado del grafito:

- Ruptura e inversión de la secuencia estratigráfica original en trazos que seccionan costras y se encuentran rellenos por tierras (Figuras 8C y 8D). Dado que no se puede eliminar una costra del fondo de un surco sin quitar las tierras que la recubren, la presencia de tierras en surcos que han seccionado costras es un indicador de que han sido incorporadas con posterioridad a la ejecución del grafito. En algunas piezas, además, no hay coherencia compositiva entre ambos estratos (Figura 8D).
- Partículas metálicas inalteradas de acero común, acero inoxidable o acero niquelado semienterradas en las tierras de relleno (10776, 10942, 11429, 11530, 12108, 12697 y 13397).
- Partículas metálicas inalteradas incrustadas en las paredes de los surcos y parcialmente cubiertas por tierras añadidas a posteriori, o en fondos de surco que han quedado al descubierto por pérdidas del relleno (11252, 11305, 13370) (Figura 11D).
- Presencia de fragmentos de barniz vitrificado o de restos del propio cuerpo cerámico, incluso en piezas carentes de barniz (11424).
- Pérdidas de tierras que dejan al descubierto fondos de surco con color de corte fresco en las imágenes obtenidas con luz visible, carentes de señal FUV.
- Pérdidas de tierra asimétricas, que afectan siempre al mismo lateral de un conjunto de trazos (11252, 13370, 15910), indicador de una aplicación realizada barriando lateralmente la superficie grafitada (Figura 11D).
- Tierras sobre fracturas reparadas (11429), en contra de los protocolos que cita la empresa⁴:

«se consideraba importante la limpieza de cantos o bordes de los fragmentos, en especial en los casos en los que se sabía que un hallazgo constaba de varios fragmentos, para facilitar su ulterior remontado».

Relaciones entre grafito y alteración

La evolución de los trazos de un grafito original debe ser coherente con la del soporte cerámico sobre el que aparece, experimentando con el tiempo un deterioro similar. Esta situación se incumple en las piezas 12098 y 12110 (Figura 12) en las que el estado de los trazos contrasta con el deterioro superficial generalizado y en las piezas 12047 y 12048, donde los trazos seccionan las improntas de bioturbación existentes. En el resto de las piezas la alteración superficial no es un parámetro observable.

⁴ (Op. Cit.) Documentación judicial aportada por Lurmen, S.L. (2013): Informe A2. Anexo 2, p. 3.

Relaciones entre grafito, fracturación y subfragmentación

En el examen de las relaciones del grafito y los bordes de los fragmentos cerámicos sobre los que se inscriben se aprecian situaciones anómalas:

- Líneas de trazos que se interrumpen antes de alcanzar el borde señalando que se encuentran intencionadamente incompletos (12048, 12110).
- Grafitos con dibujos o textos incompletos, simulando una fragmentación posterior a su ejecución, si bien se aprecia que el comienzo o final de las líneas de texto se ajusta a los bordes de rotura, indicando que el fragmento ya estaba roto cuando fue grabado (11429, 11530) o, según se ha señalado anteriormente (Figura 9), invaden y seccionan los depósitos del propio borde de rotura o, como sucede en la pieza 11429, los bordes de rotura presentan un recorrido inverosímil al no afectar a ninguna de las 18 letras de las nueve líneas del texto que atraviesan (Figura 13). En algunas piezas se ha podido comprobar la inexistencia de la continuidad del grafito cuando se ha recuperado el fragmento adyacente (11139, 11305, 11417, 12098).

Muchas piezas se encuentran subfragmentadas (10776, 11139, 11305, 11392, 11419, 11429, 11530, 11709, 12098, 12099, 12108, 17050), detectándose evidencias de fracturaciones anómalas y recientes, que se suman al resto de los indicadores de falsificación:

- Subfragmentación con pérdida de elementos comprometedores. En la reconstrucción realizada en la pieza 10776 (abecedario) aparece el hueco vacío correspondiente a la letra J, inexistente en el alfabeto romano (Figura 14A).
- Huellas de impactos de golpes, difícilmente interpretables como «accidentales», asociados a las líneas de fractura en las piezas 11709, 12108 y 17050 (Figuras 14B y 14C).
- Planos de fractura que carecen de la señal FUV apreciable en el resto de la pieza (Figuras 14B y 14C).
- Fragmentos cuyo plano de rotura carece de pérdidas o erosiones, permitiendo un ensamble perfecto (11305, 11419, 11429, 11530, 12099, 12108,...).

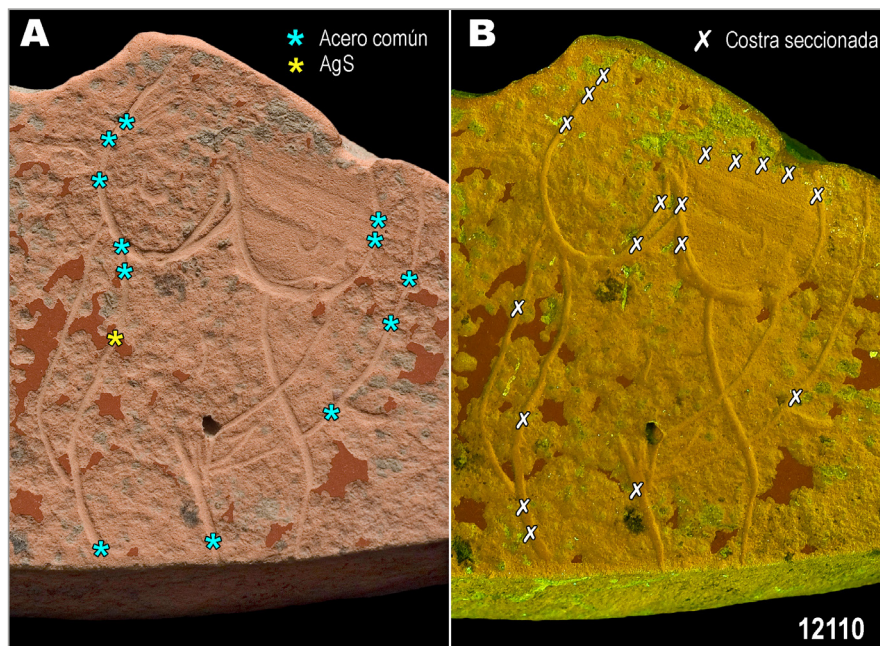


Figura 12. Imágenes obtenidas con luz visible y FUV en una pieza donde los trazos recientes se inscriben sobre una superficie muy alterada cubierta por una veladura. Se ha marcado la situación de los restos metálicos y costras seccionadas. Fotografías: Tomás Antelo Sánchez.

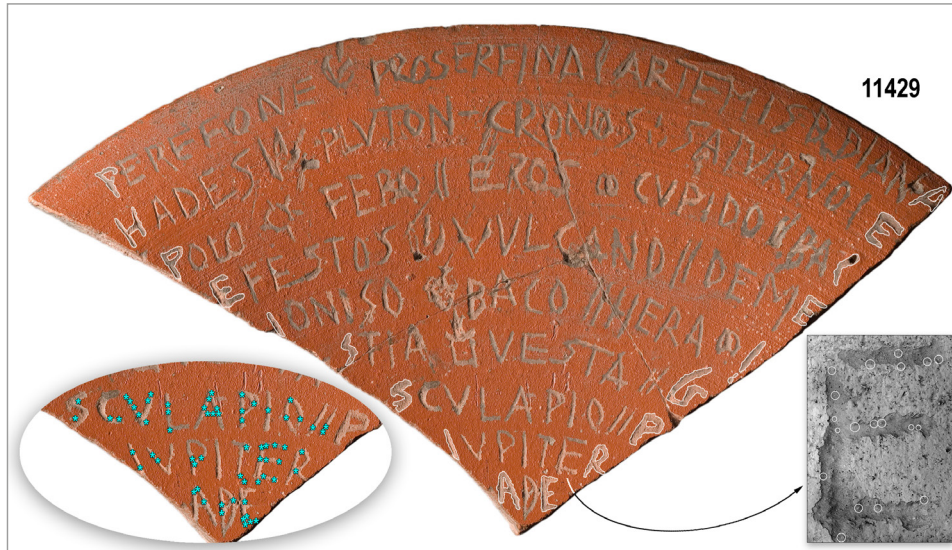


Figura 13. Imagen general de la pieza 11429 en la que los bordes de rotura laterales no afectan a ninguna de las 18 letras de las 9 líneas del texto y detalles de la situación de los restos de acero inalterado detectados en las líneas del vértice inferior. Sobre las fracturas reparadas aparecen tierras incorporadas *a posteriori*. Fotografías: Tomás Antelo y José Vicente Navarro Gascón.

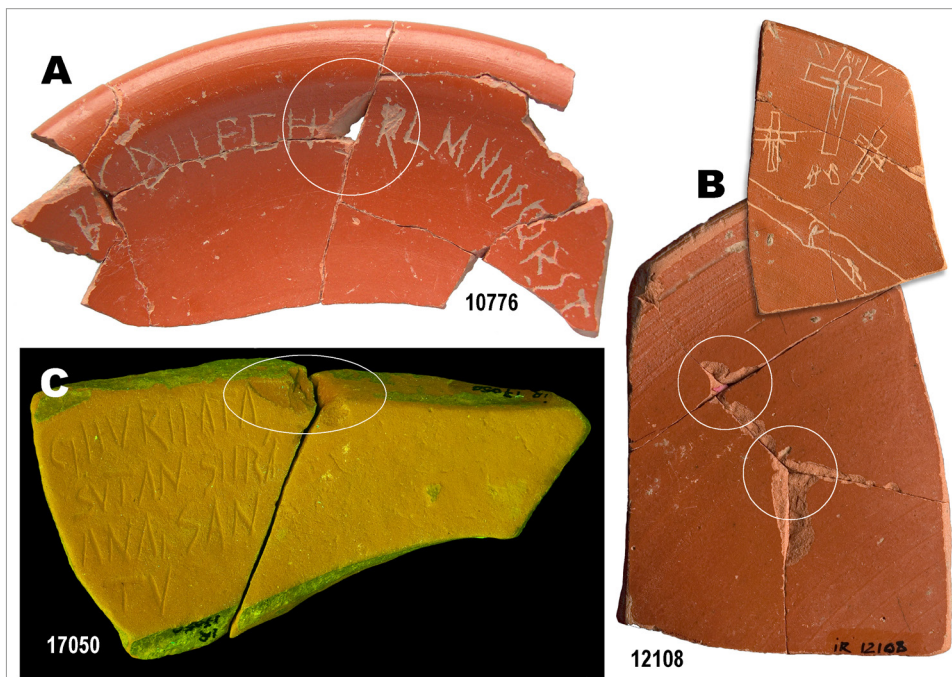


Figura 14. Detalles de fracturas anómalas: A) Pieza reconstruida por Lurmen, S.L., con un hueco visible en la zona central que corresponde a la letra J, inexistente en el alfabeto romano. B) Huellas de impactos en el reverso de la pieza 12108. C) Texto en euskera interrumpido en una fractura de origen reciente y huella de impacto asociada, donde es evidente la ausencia de señal FUV. Fotografías: José Vicente Navarro Gascón y Tomás Antelo Sánchez.

- Textos interrumpidos al llegar a una línea de fractura reciente, comprobándose que el grafito no continúa en el fragmento adyacente cuando se ha recuperado en la excavación (11305, 12098, 17050) (Figura 14C).
- Trazos que se interrumpen o letras incompletas al aproximarse a una línea de fractura reciente (11709).

Correcciones y retoques

La pieza 11530, en la que aparece un listado de nombres, reúne todos los indicadores posibles de falsificación (costras seccionadas, restos de acero, trazos invasivos, simulación de pérdida del texto,...) y constituye un excelente ejemplo de grafito reciente que ha sido modificado *a posteriori* con objeto de ocultar errores cometidos en su ejecución. Inicialmente grabado con sintaxis del castellano, concatenando los nombres mediante la conjunción Y, las letras Y han sido posteriormente retocadas para ser transformadas en letras X (Figura 15). En las correcciones se cometen errores que han sido ocultados en la transcripción oficial, señalando que el transcriptor era consciente de la falsificación.

Algunas piezas con trazos presumiblemente originales presentan huellas de un retrabajado posterior, observándose costras seccionadas, trazos añadidos y restos metálicos a lo largo de las zonas retrabajadas. En la analítica realizada sobre las partículas metálicas que aparecen en estas piezas sólo se identifica hierro (no aleado con otros elementos), mientras que en el resto de las piezas catalogadas como falsas se identifican aleaciones de hierro asignables a aceros, comunes, inoxidables y niquelados.

- En la pieza 10826 (original) aparecen restos metálicos modernos en la serifa de la base de la letra F. En la pieza 11481, aparece una pequeña incisión, llena de partículas metálicas inalteradas, que no afecta al grafito.
- La pieza 10942, inscrita en ambas caras, presenta restos de acero común en una de ellas mientras que en la otra sólo aparece hierro. Esta última presenta indicios de trazos originales retrabajados.



Figura 15. Detalles de los retoques realizados en la pieza 11530, inicialmente escrita con sintaxis castellana, para transformar las letras Y en X. Se retoca erróneamente la Y de SYLVANO y se mantiene la Y en POMONA Y PLVTON. Estos errores se ocultan en la transcripción. Fotografías: Tomás Antelo Sánchez y José Vicente Navarro Gascón.

- En la pieza 11392, los surcos se han retrabajado totalmente, dejando abundantes restos metálicos inalterados, las costras se encuentran seccionadas y se ha añadido algún tramo de trazo nuevo.

Revisión de series fotográficas

Con objeto de identificar posibles modificaciones sufridas por las piezas examinadas antes de su entrada en el IPCE se ha realizado una revisión de la documentación fotográfica existente. Esta corresponde a tres series distintas:

- Fotografías realizadas por la empresa.
- Fotografías realizadas por la DFA tras la recepción de las piezas (2006).
- Fotografías realizadas por el IPCE (2012 y 2013).

En el examen comparativo de las distintas series no se ha encontrado ningún cambio o modificación que afecte a los trazos de los grafitos. Se han apreciado pequeñas pérdidas de costras ubicadas fuera de los trazos en varias piezas sobre cerámicas TSH, donde la adhesión sobre el barniz es más débil, así como pequeñas pérdidas de tierras de relleno de los trazos, consecuencia de su estado de agrietamiento y contracción por pérdida de humedad.

Conclusiones

La metodología y técnicas de estudio utilizadas han mostrado notable eficacia en la determinación de la originalidad o falsedad de los grafitos estudiados.

Las piezas catalogadas como originales corresponden en su totalidad a *terrae sigillatae*, con grafitos carentes de excepcionalidad, que conservan restos de costras en los trazos e, incluso, restos alterados de los objetos metálicos utilizados en su elaboración. En algunos grafitos originales se aprecian huellas de modificaciones y trazos recientes.

Se ha detectado un elevado número de indicadores de falsificación que afecta a 34 de las 39 piezas seleccionadas. Todas las que presentan un contenido epigráfico relevante se encuentran dentro de esta categoría:

- Las costras han sido seccionadas por los trazos en todos los puntos donde confluyen, introduciéndose tierras que alteran la secuencia estratigráfica original. La conservación de tierras en trazos sobre superficies limpias sugiere intencionalidad. Las pérdidas de tierras dejan al descubierto fondos de trazo con un color de corte fresco, carentes de la señal FUV característica de las superficies que han estado en contacto con el medio de enterramiento.
- Los objetos metálicos utilizados en la ejecución de los grafitos han dejado rastros de partículas micrométricas, en su mayor parte de acero común y acero inoxidable, estrictamente circunscritas al recorrido de los trazos. Por su composición y ausencia de alteración, son inequívocamente recientes. Su presencia no guarda ninguna relación con las operaciones de lavado y procesado de los supuestos hallazgos.
- En un número muy reducido de piezas aparecen huellas del roce con superficies u objetos metálicos en forma de nubes de partículas micrométricas de acero inoxidable, fosfoniqueado, oro... fuera de los trazos y sin aparente relación directa con el proceso de fabricación del grafito.
- Un elevado número de piezas se encuentran subfragmentadas, reconociéndose roturas anómalas y recientes con huellas de impacto asociadas. En la reconstrucción de alguna de estas piezas se pierde algún elemento comprometedor, como letras inexistentes en el alfabeto romano.

- Se reconocen interrupciones ficticias de textos o dibujos en los bordes de los fragmentos cerámicos cuando se han recuperado los fragmentos colindantes o cuando la interrupción tiene lugar en una fractura inequívocamente reciente. En otros casos, las inscripciones invaden y seccionan las pátinas de las superficies de rotura señalando que son posteriores a la exhumación. En una de las piezas los bordes de rotura presentan recorridos inverosímiles al atravesar una compleja sucesión de líneas de texto sin afectar a ninguna letra.
- Se han identificado retoques sobre piezas falsas con objeto de corregir errores de sintaxis en textos castellanizados y ocultación de errores en la transcripción oficial.
- En el estudio de las series de imágenes disponibles no se ha encontrado ninguna modificación que afecta al recorrido de los trazos, aunque sí se han localizado pequeñas pérdidas de costras superficiales y de tierras de relleno.

Bibliografía

- ANTELO, T., ANAYA, A.; BUESO, M., GARCÍA, A., DOMINGO, A. y VEGA, M. (2014): *Informe de examen por imagen 31124. Conjunto de piezas cerámicas con grafitos del yacimiento de Iruña-Veleia*. Informe pericial solicitado por el Juzgado nº 1 de Vitoria-Gasteiz. Archivo IPCE. Nº reg. 31124.
- CIPRÉS TORRES, P. y SANTOS YANGUAS, J. (2008): *Informe epigráfico-histórico sobre los graffitti hallados en Iruña-Veleia en 2005 y 2006*. Disponible en https://www.araba.eus/publicar/Informes/Veleia_Inf_08.pdf [Consulta: 1 de diciembre de 2021].
- ENRIQUE NAVARRO, J. E., AMOROS ALBARO, J. L. y MONZO FÚSTER, M. (1985): *Tecnología cerámica. Vol II. Pastas cerámicas*. Valencia: Instituto de Química Técnica. Universidad de Valencia.
- GALÁN ALLUÉ, J. M. (2008): *Informe sobre los grafitos con supuestos jeroglíficos y nombres egipcios*. Disponible en https://www.araba.eus/publicar/Informes/Veleia_Inf_14.pdf [Consulta: 1 de diciembre de 2021].
- GORROCHATAGUI, J. (2008): *Dictamen de Joaquín Gorrochategui a la Comisión Asesora de la Diputación Foral de Álava sobre los hallazgos epigráficos de Iruña-Veleia. Campañas 2005 y 2006*. Disponible en https://www.araba.eus/publicar/Informes/Veleia_Inf_40.pdf [Consulta: 1 de diciembre de 2021].
- LAKARRA, J. A. (2008): *Informe sobre supuestas inscripciones eusquéricas antiguas de Veleia*. Disponible en https://www.araba.eus/publicar/Informes/Veleia_Inf_07.pdf [Consulta: 1 de diciembre de 2021].
- NAVARRO, J. V. (2013): *Análisis de fragmentos cerámicos con grafitos del yacimiento arqueológico romano de Iruña-Veleia*. Informe pericial solicitado por el Juzgado nº 1 de Vitoria-Gasteiz. Archivo IPCE. Nº reg. 31124.
- (2014): *Revisión y ampliación de los resultados obtenidos en el análisis de los ostraca nº 10942, 11392 y 12108 del yacimiento arqueológico Iruña-Veleia*. Informe pericial solicitado por el Juzgado nº 1 de Vitoria-Gasteiz. Archivo IPCE. Nº reg. 31124.
- NÚÑEZ, J. (2008): *Informe sobre los motivos iconográficos presentes en los denominados 'grafitos de carácter excepcional' del conjunto arqueológico de Iruña-Veleia*. Disponible en https://www.araba.eus/publicar/Informes/Veleia_Inf_11.pdf [Consulta: 1 de diciembre de 2021].
- RODRÍGUEZ TEMIÑO, I. (2017): «The 'exceptional finds' of Iruña-Veleia (Álava). Syntax of an archaeological forgery». *Zephyrus*, 79, pp. 197-217.
- VELÁZQUEZ, I. (2008): *Informe sobre los grafitos latinos de Iruña-Veleia*. Disponible en https://www.araba.eus/publicar/Informes/Veleia_Inf_41.pdf [Consulta: 1 de diciembre de 2021].

Conservación de materiales superfrágiles mediante polímeros de silicona en yacimientos arqueológicos subacuáticos

Conservation of superfragile materials using silicone polymers in underwater archaeological sites

Luis Carlos Zambrano Valdivia

Museo de Cádiz

luisc.zambrano@juntadeandalucia.es

Resumen: La obtención del registro arqueológico subacuático se enfrenta a unas circunstancias complejas debido a la naturaleza del medio acuático. Adaptación humana aparte, la dificultad del registro se complica frecuentemente a causa del estado de conservación de los materiales sumergidos. Toda una serie de alteraciones físico-químicas originadas por la saturación hídrica como factor común han generado un campo de especialización propio: la conservación arqueológica subacuática. Dentro de este campo, los materiales orgánicos (artefactos y ecofactos de madera, plantas, cuero, hueso, plumas o pelo) constituyen un grupo conocido por su elevada problemática de conservación. El éxito de su tratamiento reside en comprender la intervención como un conjunto de acciones coordinadas que van desde el hallazgo *in situ* hasta el laboratorio de conservación. Los daños en la extracción de muchos materiales orgánicos suponen la destrucción irremediable de objetos únicos. Mediante un sistema combinado de extracción con moldes subacuáticos e impregnación forzada con polímeros de silicona se ha obtenido la solución para conservar una de las tipologías de objetos más frágiles que pueden hallarse en el contexto subacuático: la cordelería náutica fabricada con fibras vegetales. Se exponen en este artículo los principales logros en este proceso de investigación así como su transferencia al ámbito académico dentro del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática de la Universidad de Cádiz y el Campus de Excelencia Internacional del Mar (CEI-Mar).

Palabras clave: Conservación, moldes, arqueología subacuática, silicona.

Abstract: Obtaining the underwater archaeological record faces complex circumstances due to the nature of the aquatic environment. The difficulty of recording is frequently compounded by the state of conservation of the submerged materials. A whole series of physical-chemical alterations caused by water saturation as a common factor have generated a field of specialization of its own: underwater archaeological conservation. Within this field, organic materials (artifacts and ecofacts made of wood, plants, leather, bone, feathers or hair) constitute a group known for its high conservation problems. The success of its treatment lies in understanding the intervention as a set of coordinated actions that go from the discovery *in situ* to the conservation laboratory. The damage in the extraction of many organic materials supposes the irremediable destruction of unique objects.

Through a combined system of extraction with underwater molds and forced impregnation with silicone polymers, the solution has been obtained to preserve one of the most fragile types of objects that can be found in the underwater context: nautical ropes made of vegetable fibers. The main achievements in this research process are presented in this article, as well as its transfer to the academic field within the Master's Degree in Nautical and Underwater Archeology of the University of Cádiz and the Campus of International Excellence of the Sea (CEI-Mar).

Key words: Conservation, molds, underwater archaeology, silicone.

Introducción

La arqueología náutica, como rama especializada de la arqueología subacuática, analiza los distintos elementos que conforman el barco. La estructura flotante: el casco y el sistema de propulsión eólica: el aparejo, comprenden toda una serie de piezas interconectadas entre sí. Esta estructura móvil de casco y aparejo náutico es uno de los vestigios constructivos más antiguos y trascendentales para el desarrollo de las sociedades humanas a través de la historia.

Las evidencias arqueológicas nos muestran que este conjunto de piezas está fabricado en su práctica totalidad con materiales orgánicos: la madera para la quilla, roda, codaste, tracas, cuaderñas, baos, varengas, mástiles y vergas, o las fibras vegetales para velas, estopa y jarcias. Tras siglos de enterramiento subacuático, si se dan las condiciones adecuadas, dichos materiales pueden hallarse en un estado de conservación suficientemente apto para su registro documental. Las maderas al igual que las fibras vegetales ya sean de tallos, semillas u hojas sufren un proceso de transformación donde el agua circundante rellena el espacio de los compuestos celulósicos hidrolizados. Estos objetos se presentan en apariencia inalterados pero su resistencia física ha disminuido drásticamente a causa de las transformaciones químicas. Los compuestos que otorgaban flexibilidad y dureza a la madera y a las fibras se han sustituido por agua hasta superar el 400% en el ensayo de humedad máxima, situación que los coloca en el nivel máximo de degradación (De Jong, 1977: 295-338). En consecuencia, los objetos originalmente resistentes se tornan en piezas frágiles incapaces de mantener su integridad fuera de la protección ofrecida por el lecho marino.



Figura 1. La cabuyería náutica enterrada en el lecho marino supone un reto para la excavación y conservación debido a la extrema fragilidad del material unido a la compleja disposición de los restos. Fotografía: Luis Carlos Zambrano Valdivia.

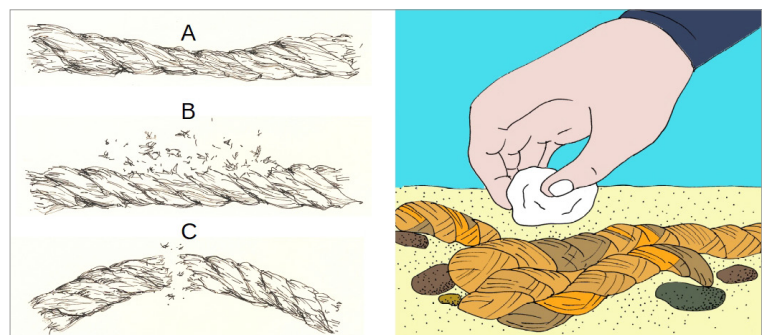


Figura 2. Riesgos de deterioro en cordelería arqueológica sumergida durante el proceso de recuperación: aplastamiento (A), erosión (B) y fractura (C). Fotografía: Luis Carlos Zambrano Valdivia.

Cuando el investigador se enfrenta a la excavación de los restos orgánicos puede apreciar empíricamente el grado de dureza del material orgánico, siendo esta la primera evidencia diagnóstica del deterioro ocasionado por la suma de factores extrínsecos (condiciones medioambientales) y factores intrínsecos (especie biológica, técnica de fabricación y huellas de uso). Un tercer factor es el «tiempo de abandono» o exposición a los agentes extrínsecos que estará condicionado a su vez por la estabilidad de las condiciones medioambientales: a mayor variabilidad, mayor deterioro. En el desarrollo de la excavación se produce una ruptura definitiva de las condiciones medioambientales que rodean al objeto. En este momento el material es vulnerable a toda una serie de procesos degradativos causados por la readaptación a las nuevas condiciones físico-químicas. Sin embargo, debido a la potencialidad del daño, existe un riesgo por encima de todos que es la alteración mecánica por erosión, impacto, tracción o cizalla durante la manipulación del objeto.

En el transcurso de una excavación, un ligero movimiento en la columna de agua por un aleteo incontrolado equivale a un tsunami para los restos de cordelería náutica que afloran en el sedimento. La degradación del material pondrá el límite a las posibilidades de manipulación indispensables para excavar y recuperarlo con éxito. Pero obviamente, no todos los objetos de un yacimiento presentan el mismo grado de deterioro. Por lo general, la excavación de los restos puede progresar con normalidad si los investigadores extreman el cuidado y aplican medidas preventivas como pueden ser barreras perimetrales con bolsas de arena. Excavar materiales antiguos y consecuentemente degradados obliga a planificar concienzudamente el trabajo para minimizar el riesgo de alteración. Las recomendaciones internacionales en materia de Patrimonio Histórico-Cultural (Convención UNESCO-Paris, 2001) hacen hincapié en este aspecto. No obstante y a pesar de los avances experimentados con la incorporación de conservadores subacuáticos en los proyectos de excavación, se mantiene la problemática de recuperar objetos de fibras vegetales; un patrimonio extremadamente vulnerable y esencial para el conocimiento histórico.

Las fibras vegetales en forma de escotas, drizas, brazas, obenques, cabos de ancla, guindalezas, cabos de amarre y un gran etcétera de cabuyería auxiliar son elementos indispensables para la navegación a vela (Figura 3). Estos elementos no han sido, sin embargo, suficientemente atendidos por la Arqueología Náutica que se ha centrado tradicionalmente en el estudio del casco y su técnica constructiva.

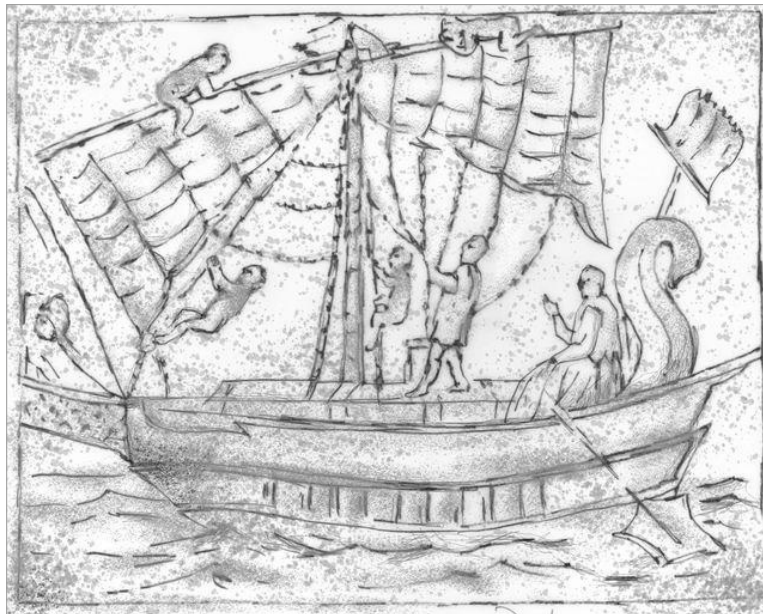


Figura 3. Marineros trabajando en el aparejo. Fotografía: Luis Carlos Zambrano Valdivia.

De este modo tenemos un conocimiento muy preciso sobre la construcción de barcos en determinados periodos históricos pero un enorme vacío en cuanto a las técnicas de navegación. La escasez de evidencias arqueológicas relacionadas con el aparato propulsor en las embarcaciones de época antigua, velas, mástiles, vergas y jarcias, hace que los investigadores formulen sus hipótesis apoyados en la documentación literaria o iconográfica. La notoria falta de evidencias arqueológicas (Charlton, 1996: 55-72) no debe achacarse exclusivamente a la pérdida de estos elementos durante el periodo de abandono. Importantes conjuntos de cordelería náutica se han recuperado de forma fragmentaria como es el caso del pecio del siglo IV a.e.c. de *Ma'agan Mikhael* (campana arqueológica 1987-1989). 45 cm de cuerda divididos en cinco piezas, 40 cm en cinco piezas, 134 cm en ocho piezas, 33 cm en dos piezas, 142 cm en diez piezas, 19 cm en dos piezas, 768 cm en diecinueve piezas (una pieza de 55 cm), 393 cm en seis piezas. Este conjunto de cuerdas donde se incluyen varios nudos fue identificado, a excepción de una sola pieza, como *Scirpus holoschoenus* o *junco común* (Shimony; Yucha; y Werker, 1992: 58-62). En el momento del hallazgo, su estado de conservación fue descrito como excepcionalmente bueno. *Ma'agan Mikhael* es un buen ejemplo de lo expuesto por Charlton (1996), quien afirma que solo pequeños fragmentos de cuerdas sobreviven a la mayoría de pecios submarinos de la Edad Antigua. La degradación natural es sin duda la causa principal de esta situación pero no la única, las prácticas negligentes en la recuperación tienen mucha responsabilidad. Es difícil saber cuántos de estos vestigios han desaparecido durante el proceso de excavación y en qué circunstancias. En la práctica se asume con resignación que cierto tipo de restos arqueológicos están literalmente condenados a desaparecer, reconociendo implícitamente la incapacidad técnica para evitarlo. No solamente son cuerdas o trenzados de fibras, también alfombras vegetales, cestería, y un sinnúmero de objetos de naturaleza orgánica elaborados con fibras vegetales entrelazadas que como ya se ha comprobado tienden a desaparecer durante la excavación arqueológica.

Las técnicas de moldeo subacuático en combinación con tratamientos de consolidación específicos para materiales extremadamente fragilizados, se postulan como una solución para preservar el valioso legado histórico de los objetos de fibras vegetales en yacimientos arqueológicos subacuáticos.

Metodología experimental

La metodología empleada para investigar el procedimiento de moldeo subacuático (Zambrano, 2015: 55-75) se estructura en tres partes: 1/ el objeto a moldear, 2/ el producto de moldeo y 3/ la técnica o implementación práctica de moldeo. El carácter experimental de esta investigación ha supuesto el desarrollo de nuevos instrumentos y técnicas dirigidas a resolver problemas tales como la obtención de material orgánico para la experimentación, la caracterización físico-mecánica del material fragilizado, la caracterización física del elastómero en condiciones de saturación hídrica o el análisis de eficacia del moldeo sobre objetos fragilizados. Todo este desarrollo experimental puede sintetizarse del siguiente modo:

Objeto a moldear. El objeto a moldear es cuerda de cáñamo (*Cannabis sativa*) con un diámetro de 3 mm formada por 3 cordones tendidos en «Z». Para obtener las muestras se han desarrollado diferentes métodos de envejecimiento y caracterización:

- Método para el envejecimiento de cuerdas de cáñamo.
- Método para determinar el Contenido de Humedad Máximo (MMC%).
- Método para determinar el Índice de Resistencia a la Presión (PRI%).
- Método de análisis colorimétrico para monitorizar el proceso de envejecimiento.

Producto para moldear. El producto para moldear es el elastómero de silicona SILASTIC 3481 de *Dow Corning*. Para su empleo subacuático han sido modificadas las proporciones del producto base

y los componentes adicionales. Para conocer el comportamiento del elastómero en su aplicación subacuática se han realizados ensayos normalizados de caracterización física:

- Método para determinar la viscosidad.
- Método para determinar el tiempo de curado y la dureza.
- Método para determinar la gravedad específica.

Método de moldeo. Se ha creado un sistema experimental de moldeo subacuático en laboratorio que relaciona los tres parámetros fundamentales para determinar la eficacia del moldeo subacuático destinado a la recuperación de materiales orgánicos fragilizados.

- Degradación del objeto.
- Viscosidad del elastómero.
- Presión de moldeo.

Materiales súperfrágiles

Dada la escasez de cordelería histórica conservada y el problema ético de experimentar con piezas originales se ha desarrollado una técnica para obtener artificialmente un material sustitutivo con características similares. La cuerda de fibras de cáñamo (*Cannabis sativa*) artificialmente envejecida mediante un proceso controlado para reducir su consistencia de forma controlada en tres niveles de degradación, reúne cualidades excepcionales para experimentar la técnica de moldeo subacuático de objetos súper-frágiles.

Con el método de envejecimiento acelerado se puede disponer de un material de experimentación con características de consistencia muy similares a las de las cuerdas degradadas en contextos subacuáticos (Zambrano; Gil, y Bethencourt, 2014: 77-82). Asimismo, el método permite obtener material homogéneo con distintos niveles de degradación representativos de la casuística de hallazgos más frecuente en contextos arqueológicos.

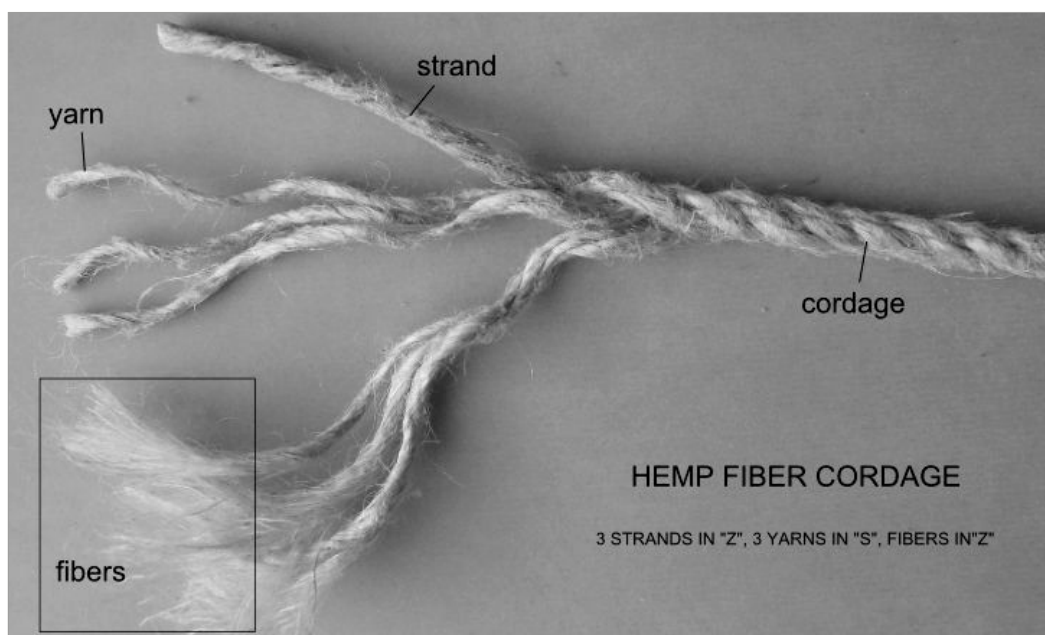


Figura 4. Descomposición de las distintas parte de un cabo (cordage) de tres cordones (strands) tendidos en «Z», tres hilos (yarns) tendidos en «S» y un número indeterminado de hebras torcidas en «Z». Fotografía: Luis Carlos Zambrano Valdivia.

El método para la determinación del contenido de humedad máxima (MMC %) es una adaptación de un método bien conocido en la bibliografía especializada (de Jong, 1977: 295-338). Este método permite caracterizar el nivel de degradación de objetos de fibras vegetales midiendo la cantidad de agua contenida en la muestra húmeda respecto a la muestra seca. El porcentaje de agua contenida es un indicador claro del agua absorbida a consecuencia de la hidrólisis de la celulosa, principal componente de la fibra vegetal.

El segundo método de caracterización es el ensayo para medir el Índice de Resistencia a la Presión (Figura 5). Este ensayo se basa en métodos que relacionan la degradación del material con la pérdida de resistencia mecánica a la penetración (Zambrano; Gil, y Bethencourt, 2014: 77-82). El método permite caracterizar de forma fiable, con sencillez y bajo coste, muestras de cuerda muy deteriorada, tanto arqueológica como artificialmente envejecida.

Minutos	Diámetro 0	Diámetro 1	PRI %
50	4,05	2,35	58,02
65	4,56	1,65	36,18
70	4,78	1,61	33,68

Figura 5. Tabla de PRI %. Fuente: Luis Carlos Zambrano Valdivia.

Productos de moldeo

Los elastómeros de silicona bi-componentes RTV han demostrado su capacidad para construir moldes flexibles dentro del agua (Zambrano, 1995: 1-16). En las pruebas de laboratorio realizadas se ha observado que la reacción de fraguado es ligeramente afectada por el medio acuático y en ningún caso es un obstáculo para completar el proceso de reticulado.

También se ha comprobado mediante ensayos físicos que tras completarse el proceso de reticulado no existen diferencias significativas entre las muestras curadas en seco y en agua. Algunas de las diferencias observadas mediante los ensayos físicos han permitido optimizar el método de moldeo subacuático en aspectos relativos a la operatividad.

La más importante aportación al método de moldeo subacuático es la incorporación a la silicona de un aditivo tixotropante para mejorar su manipulación. El elastómero de silicona RTV bi-componente (Silastic 3481 – base), modificado con aditivo tixotropante (Silactic Thixo Additive) posee numerosas ventajas sobre otros elastómeros fluidos en la tarea de moldeo subacuático. La mejor característica del elastómero tixotropado es la posibilidad de control que ofrece en la fase de aplicación.

La viscosidad del elastómero permite construir un molde de forma progresiva y controlada sobre el objeto sumergido. La silicona se adapta de forma manual presionando ligeramente sobre

la superficie del objeto ya se encuentre este en posición horizontal, inclinada o vertical. Solo se requiere un cierto grado de textura para favorecer el agarre del producto. La única limitación del método está pues en superficies lisas y posiciones invertidas. Ambas circunstancias no son imposibles, aunque sí bastante improbables en el contexto de la arqueología subacuática.

La incorporación de aditivos fluidificantes aporta mayor plasticidad a la mezcla sin afectar la thixotropía del elastómero modificado. La mayor plasticidad de la mezcla supone reducir la presión necesaria para adaptar el elastómero sobre el objeto. Tres formulaciones del elastómero thixotropado: (1) sin fluidificante, (2) con 5% de fluidificante y (3) con 10% de fluidificante, han sido caracterizadas mediante ensayos físicos para conocer tanto el proceso de fraguado, como el producto final. Los ensayos físicos se han realizado por duplicado, con mezclas polimerizadas en agua y en seco. Asimismo se han realizados ensayos adicionales con la formulación estándar (recomendada por el fabricante) con la finalidad de comparar las diferentes mezclas. De este análisis se obtienen importantes datos para optimizar el método de moldeo subacuático.

El aditivo thixotropante (Silastic Thixo additive) añadido al 5% sobre la base del elastómero aumenta significativamente la viscosidad de la mezcla estándar que pasa de 20.573 mPas (mezcla ST) a 331.660 mPas (mezcla V1). El aditivo fluidificante (200 Fluid 50 cs) añadido sobre la mezcla V1 en proporción del 5% y 10% proporciona mezclas con menor viscosidad denominadas V2 (249.600 mPas - 5%) y V3 (194.933 mPas) respectivamente. Las mezclas resultantes mantienen sus cualidades thixotrópicas a pesar de reducir la viscosidad.

Método de moldeo

El sistema experimental de moldeo es una innovación que permite realizar ensayos de moldeo con presión controlada. El sistema también permite realizar variaciones en todos los demás factores intervinientes en la operación de moldeo: características del producto de moldeo, del objeto a moldear y del medio ambiente donde se realiza el molde.

Del sistema experimental se obtienen probetas (moldes de silicona) de reducido tamaño (4x4x2 cm) a partir de las cuales, mediante vaciados, se obtienen copias de escayola u otro material endurecible. El sistema experimental requiere una sencilla instrumentación que puede ser fabricada con un coste reducido. Esta circunstancia hace que el sistema sea accesible para pequeños laboratorios interesados en su empleo.



Figura 6. Cubeta, molde y cofre de encapsulado para la fabricación de probetas en laboratorio. Fotografía: Luis Carlos Zambrano Valdivia.

Evaluación de eficacia del procedimiento

La cuantificación del efecto de alteración sobre las muestras degradadas se ha realizado mediante técnicas de análisis creadas *ex-profeso* o adaptadas para esta finalidad. Las técnicas de análisis empleadas son: 1) determinación del índice de eficacia de la cubrición, 2) ensayo de moldeo sobre muestras no deformables, 3) ensayo de moldeo con silicona no-tixotropada sin presión, 4) análisis de la deformación en sección transversal, 5) análisis de textura con perfilómetro óptico y 6) análisis de textura con microscopía estereoscópica. Este conjunto de técnicas constituye por sí mismo una aportación metodológica para el estudio de alteraciones físicas en muestras muy degradadas.

Los resultados obtenidos en el análisis de alteración sobre muestras moldeadas permiten extraer las siguientes conclusiones agrupadas en los apartados de 1) cubrición y 2) deformación.

La óptima cubrición repercute en mayores garantías de preservar el objeto durante la extracción debido a que la fijación del objeto disminuye los riesgos de disgregación o fractura ocasionados por impactos y vibraciones. La adición de aceite de silicona fluidificante (200 Fluid 50 cs) a la mezcla de moldeo en proporción del 10% respecto del peso del pre-polímero (Silastic 3481 Base) reduce considerablemente la viscosidad del producto desde 331.600 mPas (0% aceite de silicona) hasta 194.933 mPas (10% aceite de silicona).

La viscosidad de la silicona es un factor determinante para la cubrición del objeto en el proceso de moldeo subacuático. Cuanto más fluida es la mezcla de silicona se obtienen mejores niveles de cubrición independientemente del nivel de degradación del objeto.

La presión de moldeo en los niveles analizados (0,98 N —alta—, 0,73 N —media—y 0,49 N —baja-) es un factor de difícil traslación a la intervención manual carente de un control preciso. La interpretación de los resultados permite, sin embargo, comprobar la interacción de este factor con la plasticidad de la silicona y la del objeto degradado.

Los resultados demuestran que la cubrición de objetos muy degradados (grupo D1) empeora considerablemente con altos niveles de presión. La presión ejercida sobre la silicona se transmite hasta el objeto y produce importantes deformaciones volumétricas y texturales. Para los grupos de objetos menos degradados (D2 y D3) se constata que conforme aumenta la consistencia del objeto, el efecto de la presión de moldeo pierde relevancia sobre la calidad de la cubrición (Figura 7).

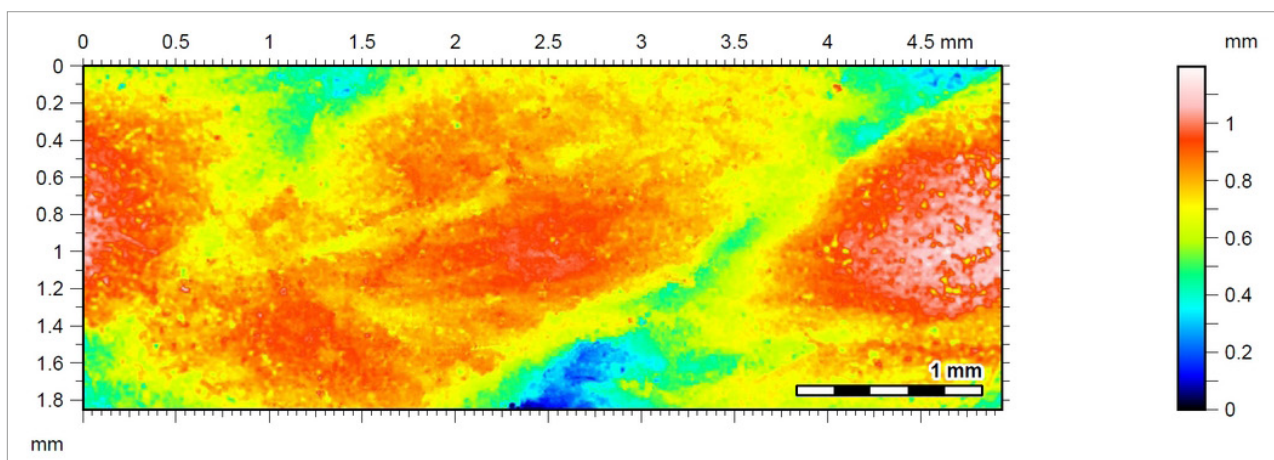


Figura 7. Imagen del perfil de rugosidad para el estudio topográfico de una muestra poco degradada (D3P1V1) con una buena definición de estratos. Fotografía: Luis Carlos Zambrano Valdivia.

Tratamiento experimental de consolidación y secado

Consolidar el material superfrágil envuelto por el exoesqueleto de silicona es un paso ineludible para completar la conservación a largo plazo del objeto. Dentro del molde de silicona el objeto recuperado sigue siendo tan frágil dentro del yacimiento como en el laboratorio de conservación. Esto es así porque el molde cumple la función de embalaje provisional y de nada sirve recuperar con éxito el objeto si al retirar el molde se van a producir alteraciones iguales o incluso mayores que al extraerlo. Así pues, al desarrollar un método de recuperación con molde es inevitable proponer un tratamiento de la pieza superfrágil contenida en el interior del molde de silicona.

El tratamiento de estabilización dimensional propuesto para la conservación de los materiales superfrágiles es la plastinación o técnica de impregnación con polisiloxanos reactivos (Figura 8) desarrollada por Wayne Smith (2003) y empleada con éxito en el Laboratorio del Centro de Arqueología Subacuática del IAPH (Bouzas; Castro; y Zambrano, 2008: 108-119). En dicho tratamiento se sustituye el agua contenida en las fibras por silicona capaz de sostener y dar consistencia al material residual. Previamente es preciso interponer un disolvente orgánico de carácter polar (acetona) miscible con ambos componentes. La estabilización de materiales orgánicos moldeados con elastómero de silicona se ha ensayado con varias muestras de cuerda con nivel de degradación D2 siguiendo el método de plastinación con polisiloxanos a temperatura ambiente. Las muestras han sido moldeadas con silicona fluida (formulación estándar del fabricante) dentro de agua. Al cabo de 24 horas, el molde con la muestra en su interior se extrae del recipiente de moldeo y se introduce en un baño de acetona durante 24 horas. Transcurrido ese tiempo se cambia la acetona usada por acetona nueva y se mantiene 72 horas. Finalizado el proceso de deshidratación, la muestra se introduce en la mezcla de aceite de silicona-*crosslinker* dejando reposar 24 horas. Al cabo de ese tiempo se introduce en la campana de vacío y se inicia el proceso de impregnación controlado por la emisión de burbujas. Progresivamente se aumenta el vacío hasta que finalmente cesa la emisión de burbujas, en total 6 horas. Se deja reposar y transcurridas 24 horas se aplican unas gotas de catalizador y se introduce el molde con la muestra en una caja de plástico cerrada conteniendo un algodón humedecido para mantener un ambiente húmedo. Al cabo de 3 horas, la muestra puede ser retirada del molde.

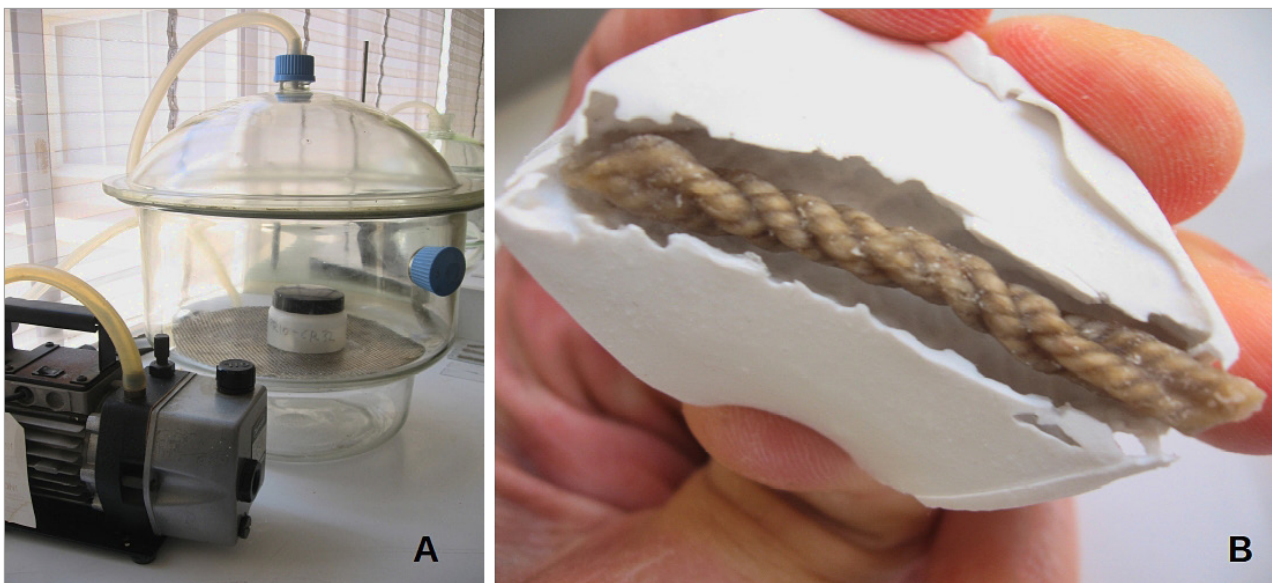


Figura 8. El tratamiento de plastinación se realiza en una cámara de vacío para favorecer la penetración del polímero en el interior del material orgánico (A), posteriormente cuando se ha completado el proceso de polimerización, se puede extraer la cuerda adecuadamente consolidada (B). Fotografía: Luis Carlos Zambrano Valdivia.

La valoración del tratamiento se ha realizado analizando los aspectos más importantes en la conservación de materiales orgánicos saturados de agua: 1/ estabilidad dimensional, 2/ inercia higroscópica y 3/ alteración del color.

Estabilidad dimensional. Las dimensiones para comparar la contracción de la muestra tratada (D_p) se obtienen a partir de la muestra plastinizada y seca. Ambas mediciones, iniciales y finales, se obtienen con gran precisión mediante la aplicación informática JMicrovisión que permite situar los mismos puntos de medición en la copia antes de tratar y en el original después del tratamiento. La escasa desviación dimensional, $-2,41\%$ en anchura y $+1,51\%$ en longitud, experimentada por la muestra tratada demuestra la eficacia del método de impregnación con polisiloxanos sobre objetos moldeados. Llama la atención, sin embargo, la contraria respuesta en función del eje medido: aumento en el longitudinal y contracción en el transversal. Esta diferencia sorprende no tanto por la contracción del diámetro que es suma de la contracción de las paredes celulares de las fibras, como por el aumento longitudinal.

Estabilidad higroscópica. Para comprobar la inercia higroscópica del polisiloxano se ha sometido la pieza tratada a un proceso de humectación estática en cámara climática al 75% HR durante 168 horas (una semana). Para comprobar la captación de humedad se han realizado pesadas cada 12 horas en una báscula de precisión. La muestra no experimenta ganancia de peso. Ante este resultado se ha ensayado la humectación forzada. Se ha pesado la muestra en una balanza de precisión en condiciones de HR 65% y temperatura 23°C , obteniendo un peso de $0,35\text{ g}$. Posteriormente se ha introducido la muestra en agua desmineralizada llevándola a vacío (5 mm Hg) durante 5 minutos. Transcurrido ese tiempo, se ha quitado el exceso de agua con un ligero toque de papel secante. El peso resultante ha sido de $0,37\text{ g}$. La muestra ha tenido una ganancia del $5,5\%$ de peso por el agua absorbida. Sin embargo, no se ha observado ninguna alteración de tamaño. Se interpreta que el agua ha quedado retenida en espacios interfibrilares. Al estar infiltradas en silicona, las fibras son impermeables al agua pero existen huecos donde puede albergarse este elemento.

Alteración de color. Para determinar la variación de color entre la pieza sin tratar y la pieza plastinizada se ha empleado un examen visual sobre un código *Calleux-Boubeé* de colores normalizado (Figura 9). El resultado numérico de los colores identificados para ambas piezas demuestra una variación poco significativa. El color de la muestra húmeda y la muestra plastinizada es muy similar, marrón oscuro (R 69) y marrón (P 70). Por contra, la muestra secada sin tratamiento cambia a un color amarillo aceituna (S 87).

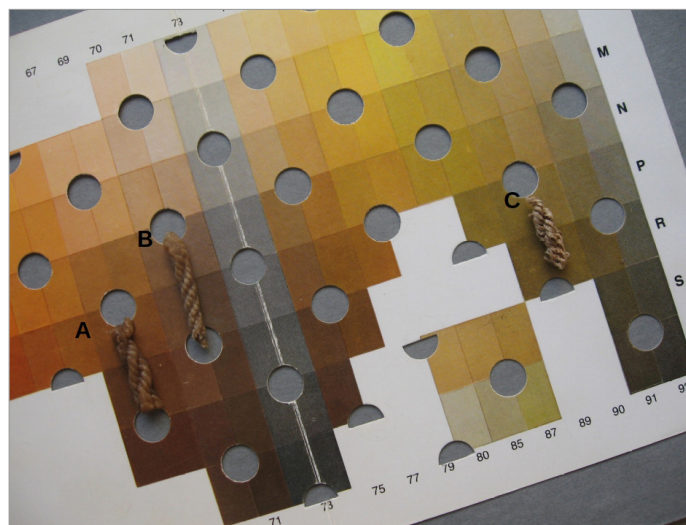


Figura 9. Alteración cromática de muestras: húmeda sin tratar (A), seca plastinizada (B) y seca sin tratar (C). Fotografía: Luis Carlos Zambrano Valdivia.

Transferencia del conocimiento

En la Convención UNESCO 2001 del Patrimonio Cultural Subacuático se recalca la obligación de atender la conservación de los vestigios materiales en el transcurso de excavaciones arqueológicas subacuáticas. Con este fin se recomienda establecer un programa de conservación donde se prevea el tratamiento de los restos en el transcurso de la excavación, en su traslado y a largo plazo. De igual modo, se insta a los estados firmantes a promover la formación en esta disciplina científica.

La efectividad de dicho programa de conservación dependerá en última instancia de que el equipo humano esté preparado para realizar determinadas intervenciones como son el izado de objetos voluminosos, la recuperación de objetos superfrágiles o el embalaje provisional de objetos metálicos, orgánicos o silíceos. Igualmente, resultará útil conocer técnicas de registro no-destructivo como el moldeo subacuático con polímeros sintéticos, un recurso especialmente valioso para la conservación *in situ*.

Esta idea derivada de las recomendaciones de la Convención de UNESCO 2001 ha sido el motor de un curso dirigido a estudiantes y profesionales del Patrimonio Cultural Subacuático, tanto arqueólogos como conservadores-restauradores de arqueología, interesados en ampliar sus competencias en las técnicas de conservación. Dicho curso de especialización celebrado en 2019 se enmarca en el programa de la Escuela Internacional Doctoral en Estudios del Mar (EIDEMAR) perteneciente al *Campus* de Excelencia Internacional del Mar (CEI-Mar).

El curso para 10 alumnos con 25 horas presenciales (15 de prácticas) se estructuró en 6 bloques temáticos: 1/ método y técnica de la arqueología subacuática, 2/ el programa de conservación en arqueología subacuática, 3/ la conservación preventiva de cerámica y materiales pétreos, 4/ la conservación preventiva de objetos metálicos, 5/ la conservación preventiva de objetos orgánicos y 6/ el moldeo subacuático; recurso de investigación y conservación (Figura 10).



Figura 10. Prácticas de excavación y moldeo subacuático en aguas confinadas con fragmentos de cabuyería artificialmente envejecida durante el curso de especialización EIDEMAR 2019 - UCA. Fotografía: Luis Carlos Zambrano Valdivia.

Conclusiones

Se concluye que el método de moldeo subacuático combinado con la infiltración de polímeros de silicona constituye una medida de conservación útil para el tratamiento de objetos orgánicos extremadamente frágiles en yacimientos subacuáticos. Los principales logros de esta investigación relacionados con la metodología de moldeo se detallan a continuación.

La extracción segura del objeto fragilizado exige un buen nivel de cubrición en el moldeo. Sin embargo, la práctica del moldeo para extraer objetos de fibras muy fragilizados puede ser contraproducente si se emplean parámetros erróneos de presión de moldeo y viscosidad de silicona.

La presión adecuada del elastómero sobre el objeto es la mínima necesaria para adaptar la silicona sobre el sustrato, independientemente del nivel de degradación del objeto. El incremento de presión no mejora sustancialmente la calidad de la cubrición y constituye en sí mismo un riesgo para la integridad del objeto.

La deformación volumétrica y textural del objeto sometido a moldeo está directamente relacionada con su nivel de degradación. Independientemente de los niveles de presión de moldeo y viscosidad de la mezcla, las muestras analizadas tienen menos deformación cuanto mayor consistencia presentan.

La forma del objeto (volumen) y el relieve (textura) son valores documentales que deben preservarse durante la operación de moldeo. Los ensayos de presión y viscosidad sobre muestras muy degradadas demuestran que la preservación volumétrica (forma) y textural (relieve) no se comportan de forma correlativa.

La mezcla de silicona más viscosa produce un efecto de compactación estructural que contribuye a preservar la forma del objeto. Al mismo tiempo, se produce un efecto de borrado sobre el relieve del objeto, tanto más acusado cuanto menor es el tamaño del elemento estructural. La mezcla de silicona más fluida permite un registro con mayor definición del relieve. Por el contrario, este factor produce un efecto de disgregación estructural que distorsiona la forma del objeto.

La consolidación del objeto moldeado mediante un sistema de infiltración forzada con polímeros de silicona es una técnica verificada mediante los ensayos realizados con probetas de cuerda de cáñamo artificialmente envejecida. La eficacia del tratamiento se comprueba con resultados satisfactorios en los análisis de estabilidad dimensional, estabilidad hídrica y alteración del color.

Finalmente, la transmisión del conocimiento metodológico ha sido posible a través de un curso de especialización teórico-práctico donde estudiantes de doctorado han adquirido los contenidos y destrezas necesarios para aplicar el procedimiento de moldeo subacuático.

Agradecimientos

El contenido principal de este artículo es un extracto de la Tesis Doctoral *Desarrollo de Técnicas de Moldeo In Situ con Polímeros Sintéticos Aplicados a la Conservación del Patrimonio Arqueológico Subacuático* codirigida por Manuel Bethencourt Núñez y M^a Luisa Almoraima Gil Montero en el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales de la Universidad de Cádiz, año 2015.

Dicho trabajo de investigación ha sido posible gracias al apoyo económico recibido por parte del proyecto incluido en el Plan Nacional de I+D+I/FEDER: *Estudio de la influencia de las condiciones físicas, químicas y biológicas en el deterioro y salvaguarda del Patrimonio Histórico Subacuático* (ARQUEOMONITOR), Referencia CTM2010-16363.

Bibliografía

- BOUZAS, A., CASTRO, J. M. y ZAMBRANO L. C. (2008): «Tratamiento de la madera arqueológica saturada de humedad por el método denominado plastinación». *PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 65, pp. 108-119.
- CHARLTON, W. (1996): *Rope and the art of knot-tying in the seafaring of the ancient eastern Mediterranean*. Tesis Doctoral. Texas A&M University.
- DE JONG, J. (1977): «Conservation techniques for old waterlogged woods from shipwrecks found in Netherlands». *Biodeterioration Investigation Techniques*, pp. 295-338.
- SHIMONY, C.; YUCHA, R. y WERKER, E. (1992): «Ancient anchor ropes from the dead sea». *Atiqot*, 21, pp. 58-62.
- SMITH, C. W. (2003): *Archaeological conservation using polymers. Practical applications for organic artifacts stabilization*. College Station: Texas A&M University Press.
- Unesco (2001): *Guidelines to the Annex of the UNESCO 2001 Convention Published in 2013 by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Endorsed by the Scientific and Technical Advisory Body of the 2001 Convention on the Protection of the Underwater Cultural Heritage*.
- ZAMBRANO, L. C. (1995): *Nuevo procedimiento para la obtención de moldes subacuáticos*. España, Patente de invención: ES2 119 649. 9501565 1995 08 95.
- ZAMBRANO, L. C., GIL, M. L. A. y BETHENCOURT, M. (2014): «Physical characterization of super-fragile materials in underwater archaeological sites». En: *Science, Technology and Cultural Heritage*. Edición de Rogerio-Candelera, M. A. Press/Balkema: pp. 77-82.
- ZAMBRANO, L. C. (2015): *Desarrollo de técnicas de moldeo in situ con polímeros sintéticos aplicados en la conservación del Patrimonio Arqueológico Subacuático*. Tesis doctoral no publicada. Universidad de Cádiz.

Aplicaciones de los Modelos Digitales de Elevación a la conservación del patrimonio

Some applicatios of Digital Elevation Models to Heritage Conservation

José Manuel Lodeiro Pérez. *In memoriam*

María Isabel Herraéz Martín*

Instituto del Patrimonio Cultural de España. Ministerio de Cultura y Deporte
isabel.herraéz@cultura.gob.es

Marta Iriondo Silván

Instituto del Patrimonio Cultural de España. Ministerio de Cultura y Deporte
marta.iriondo@cultura.gob.es

Ioanna Ruiz de Torres Moustaka

Instituto del Patrimonio Cultural de España. Ministerio de Cultura y Deporte
ioanna.ruizdetorres@cultura.gob.es

Teresa Valle Fernández

Instituto del Patrimonio Cultural de España. Ministerio de Cultura y Deporte
teresa.valle@cultura.gob.es

Resumen: El artículo describe algunos ejemplos del uso de los Modelos Digitales de Elevación para la documentación, examen y diagnóstico de Bienes Culturales, en su aplicación a tres proyectos de conservación–restauración de pinturas murales, guadamecés y mosaicos, desarrollados en el Instituto del Patrimonio Cultural de España.

Palabras clave: Fotogrametría, MDE, Modelos digitales de Elevación, Conservación del Patrimonio, Documentación del patrimonio, pintura mural, guadamecés, mosaicos.

Abstract: The article describes some examples of the use of Digital Elevation Models used in the documentation, examination and diagnosis of Cultural Property, in their application to three conservation-restoration projects of mural paintings, «guadamecés» and mosaics, developed at the Institute of Cultural Heritage of Spain.

Keywords: Photogrammetry, DEM, Digital Elevation Models, Heritage Conservation, Heritage Documentation, mural paintings, «guadamecés», mosaics.

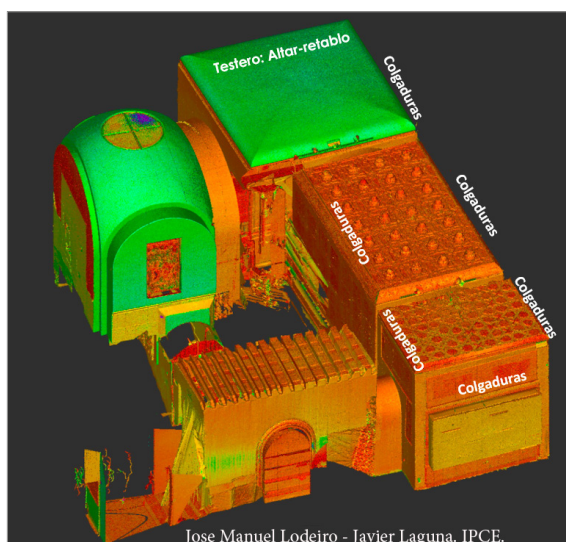


Figura 1. Modelo 3D de la Capilla. Museo Nacional de Artes Decorativas de Madrid. Fotografía: Archivo IPCE.



Figura 2. Proceso de documentación fotogramétrica del mosaico del Triunfo de Baco, Museo Arqueológico de Sevilla. Fotografía: Archivo IPCE.

Introducción

El Gabinete de Fotogrametría del IPCE se ocupa de la documentación mediante imágenes digitales para obtener una perfecta definición geométrica de las intervenciones que se llevan a cabo por los distintos especialistas de la Institución (Lodeiro, 1992: 13-29; 1995; 2010a:18-31; 2010b: 241-259; 2010c: 8-17; Lodeiro y Laguna, 2014:188-204).

Para ello se emplean diferentes metodologías, desde levantamientos topográficos, escaneados 3D (Figura 1), así como otras documentaciones fotogramétricas (Figura 2), tanto estereoscópicas con sus posteriores restituciones, como de intersección u oblicua, generando ortofotografías¹, Modelos Digitales de Elevación (MDE)² y modelos 3D (Florinsky, 2011: 31-43; 2016: 77-108, Guth *et al.*, 2021; Croneborg *et al.*, 2015; Cantos *et al.*, 2009: 237-251; González Pascual *et al.*, 2009: 32-37...). Estas técnicas se emplean de forma independiente o combinada, según las necesidades requeridas para cada proyecto.

Con la técnica de la fotogrametría convergente (oblicua o de haces), podemos generar a partir de imágenes fotográficas del objeto, los modelos 3D, nubes de puntos, mallas, triangulación con textura y ortofotografías (Figura 3).

En el IPCE se emplea el *software MetaShape*,³ que en sus últimas versiones ha incorporado la generación de MDE.

Al ser una aplicación que no consume demasiados recursos del sistema y de ágil elaboración, desde el Gabinete de Fotogrametría se empezaron a generar los MDE de los diferentes trabajos, aportándolos junto con el resto de la documentación solicitada en cada proyecto. La información más eficaz e interesante se ha obtenido en bienes culturales que presentan poca variación en la profundidad del objeto.

¹ Las imágenes digitales captadas están corregidas en la ortofotografía (de *orto*, exacto) por lo que no presentan errores o deformaciones de perspectiva.

² MDE (Modelos Digitales de Elevación) o DEM (*Digital Elevation Models*). Los MDE son un recurso utilizado habitualmente en topografía para representar las variaciones de altura de la superficie terrestre con respecto al nivel del mar. La imagen digital y la información matemática (Precisión y Apreciación) permiten caracterizar el relieve y sus alteraciones.

³ *Software* denominado anteriormente *Agisoft Photoscan*, empleado para el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y la generación de datos espaciales en 3D.



Figura 3. Iglesia de San Vicente do Pino, Monforte de Lemos (Lugo). Plantas y secciones. Escáner-Fotogrametría convergente. Fotografía: Archivo IPCE.

Desde la perspectiva de la generación de los MDE y de su utilidad en la documentación del patrimonio, resulta determinante el grado de definición alcanzado, que al igual que en las ortofotografías, depende de la resolución de las imágenes.

Definiremos dos conceptos básicos: la Precisión y la Apreciación.

La Precisión de una documentación es la calidad métrica del trabajo, que depende de los equipos así como de las metodologías empleadas. Según el proceso metodológico que se aplique es posible alcanzar diferentes precisiones. Por ejemplo, una cinta métrica metálica bien utilizada en cortas distancias, aportará mayor precisión que un taquímetro utilizado en modo radiación.

La Precisión que se requiere alcanzar depende del error gráfico y por tanto de la Escala (E) a la que se va a representar la documentación.

$$\text{Precisión} = 0,2 \text{ mm} \times \text{Denominador de la escala}$$

Por ejemplo, al documentar una catedral, si empleamos una escala E=1/100, la precisión será $0,2 \times 100 = 20 \text{ mm}$, definida en 2 cm.

De igual modo, para documentar con mayor definición un retablo, emplearíamos la escala E=1/20, y la precisión será $0,2 \times 20$, definida en 4 cm. En este caso será preciso trabajar con otros equipos y métodos que permitan asegurar una mayor precisión.

El segundo concepto es el de Apreciación, que define la calidad gráfica de la documentación y se expresa indicando la equivalencia de 1 píxel de la imagen referido a la imagen real.

La Apreciación depende del tamaño del píxel en el sensor (tps)⁴ y de la escala de la imagen (E).

$$\text{Apreciación} = \text{tps} \times \text{Distancia cámara-objeto (mm)} / \text{Focal de cámara (mm)}$$

El tps (micras) de una cámara digital viene definido por el tamaño del sensor y el número de píxeles de este. Por ejemplo, en la CANON EOS 5D⁵, para el tamaño del sensor 36 x 24 mm, los píxeles serían 5616 x 3744.

$$\text{Tps} = 36/5616 \text{ o } 24/3744 = 0,00641 \text{ mm. Por tanto tps} = 6,41 \mu$$

Con dicha cámara modificando la distancia al objeto y la distancia focal, tendríamos los siguientes resultados:

Distancia = 10 m, focal 50 mm à Apreciación = $0,00641 \times 10000 / 50 = 1,28 \text{ mm}$
Distancia = 1 m, focal 50 mm à Apreciación = $0,00641 \times 1000 / 50 = 0,13 \text{ mm}$
Distancia = 1 m, focal 24 mm à Apreciación = $0,00641 \times 1000 / 24 = 0,27 \text{ mm}$

Se comprueban dos cuestiones básicas: con la misma cámara y focal, cuanto más cerca esté el objeto a documentar, mayor apreciación se obtiene; Con la misma distancia de trabajo, cuanto más corta sea la focal utilizada, menor apreciación se alcanza.

Con todo esto, se pueden calcular las focales y distancias a las que se debe trabajar para alcanzar una determinada apreciación, y por tanto la calidad del MDE que se genera a partir de dichas imágenes.

Casos prácticos

Se analizan a continuación tres casos de documentación de bienes ejecutados por el Gabinete de Fotogrametría del IPCE, en los que se ha empleado la cámara CANON EOS 5D, exponiendo los resultados obtenidos y las ventajas del uso de los MD *ScanStation*.

⁴ El tamaño del sensor se refiere a las dimensiones físicas y se mide generalmente en milímetros (algunas veces en pulgadas). El tamaño del píxel (µm) condiciona la resolución del sensor (mpx) y la densidad (mpx/cm²).

⁵ CANON EOS 5D Mark II, cámara réflex digital de un solo lente (DSLR), sensor CMOS de 21.1 megapíxeles.

I. Pinturas murales de la iglesia del Monasterio de San Vicente do Pino en Monforte de Lemos, Lugo

En su aplicación en el ámbito de intervenciones de conservación y restauración de superficies murales, la adaptación del MDE permite obtener un documento previo de las superficies arquitectónicas de variable dimensión, ya sean verticales o techumbres, caracterizadas por una orografía reducida y diferencias de cota mínimas.

Para este proyecto se realizaron las ortofotografías del retablo mayor, las pinturas murales de la cabecera, el retablo pétreo y paramentos con restos pictóricos existentes en el brazo izquierdo del crucero, y aquellos visibles en la nave de la iglesia.

Se generó un modelo 3D empleando el escáner LEICA *ScanStation* C10 y se documentaron mediante fotogrametría convergente todos los elementos descritos aplicando el *software MetaShape*.

La escala de representación requerida fue $E=1/25$, dadas las grandes dimensiones de los espacios a documentar con alturas superiores a los 15 m.

En las zonas de intervención se distribuyeron unas dianas (B&W) reconocibles por el programa operativo del escáner. A partir de ellas, por intersección inversa, se definieron las estaciones desde las que se darían las coordenadas por radiación a una serie de puntos del objeto, que permiten el ajuste geométrico de cada uno de los modelos fotogramétricos. De esta forma, tanto estos modelos como el modelo de escáner, se encuentran en un único sistema de coordenadas y todo el trabajo está perfectamente interrelacionado.

Sobre una plataforma elevadora se anclaron dos flashes ubicados a 45° , a cada lado de las dos cámaras CANON EOS 5D Mark II. Una cámara dispone de un objetivo de 24 mm para asegurar una buena construcción geométrica, y la otra un objetivo de 50 mm para alcanzar una buena apreciación en las ortofotografías.

La plataforma se desplazaba en sentido horizontal a lo largo de cada uno de los paramentos a registrar, haciendo tomas en sentido ascendente en vertical, con un solapamiento entre imágenes del 70 %, tanto en vertical como en horizontal.

Con este sistema se alcanzaron apreciaciones muy próximas al valor prefijado para este proyecto, en el que 1 píxel de la imagen equivale a 1 mm de obra real.

Finalizada la documentación fotográfica se realizó la geométrica. Empleando el escáner LEICA C10 se midieron todas las dianas B&W visibles desde todas las estaciones de escáner, y posteriormente se tomaron medidas de la «vuelta de horizonte»⁶ con una definición media para tener la geometría de la iglesia.

Mientras tanto, con la estación topográfica LEICA TS15 se asignaron coordenadas al menos a 6 puntos en cada uno de los paramentos documentados, situando la estación lo más frontal posible a la superficie para obtener su posición espacial. Desde ésta, por radiación, se midieron los puntos del objeto que fueran perfectamente identificables en las imágenes tomadas.

Con este procedimiento, la documentación de nubes de puntos de todos los elementos se ha generado en un único sistema, tanto de escáner como de *PhotoScan*. A partir de las nubes de puntos se elaboraron las correspondientes secciones, y sobre ellas se incorporaron las ortofotografías y los MDE.

⁶ «La “vuelta de horizonte” consiste en tomar las lecturas horizontales (Lh) de los puntos a observar desde el punto de estación (todos ellos en CD y CI), comprobando que el error de cierre respecto a una referencia elegida es inferior a la tolerancia de cierre angular previamente calculada» (Cuartero, 2017: 45).

Todas las ortofotografías se representaron a una escala $E=1/25$, aunque se obtuvieron apreciaciones de 1 píxel a 1 mm, mientras que los MDE generados tenían apreciaciones de 2 mm.

En paramentos murales la mayoría de los datos obtenidos serían sólo apreciables mediante inspección con luz rasante, lo que no siempre resulta eficaz debido a la dificultad de acceso, en general grandes superficies ubicadas a gran altura, y la dificultad para realizar registros fotográficos con idéntica iluminación en todos los niveles de andamio.

El MDE resulta una herramienta de gran utilidad tanto durante los estudios previos y la redacción del proyecto de ejecución, como en el transcurso de la intervención. Aporta información difícilmente apreciable antes de poder acceder con medios auxiliares a las superficies, y una vez instalados los andamios para la ejecución del trabajo, estos suelen dificultar la inspección integral y las tomas fotográficas, por lo que sustituye al habitual sistema de montajes previos empleados para realizar una documentación global en las cartografías.

En las fases preliminares de la intervención, el MDE permite definir numerosos elementos del procedimiento de ejecución mural, así como localizar previamente elementos de deterioro y zonas susceptibles de requerir una preconsolidación o una intervención urgente. Del mismo modo, facilita la planificación de una inspección estratigráfica, permitiendo localizar áreas con mayor probabilidad de contener decoraciones ocultas y revestimientos singulares. Durante el transcurso de la intervención, contribuye a validar los elementos referenciados en las cartografías temáticas.

El relieve de estas imágenes topográficas se puede potenciar forzando la iluminación con focos laterales en ángulos inferiores a 45° , de forma que se genera luz rasante desde el inicio. Esto complementaría de forma exponencial los registros realizados con luz difusa, para lo que habría que establecer un protocolo de documentación específico. Por otro lado, las imágenes obtenidas pueden ser tratadas mediante filtros para resaltar zonas de mayor contraste y facilitar la lectura. Esto permite visualizar mejor las irregularidades, al no tener la interferencia del intenso color que aporta de forma automática el documento.

Los siguientes ejemplos referidos a San Vicente do Pino ejemplifican la ingente cantidad de información que se puede extraer en un solo paramento.

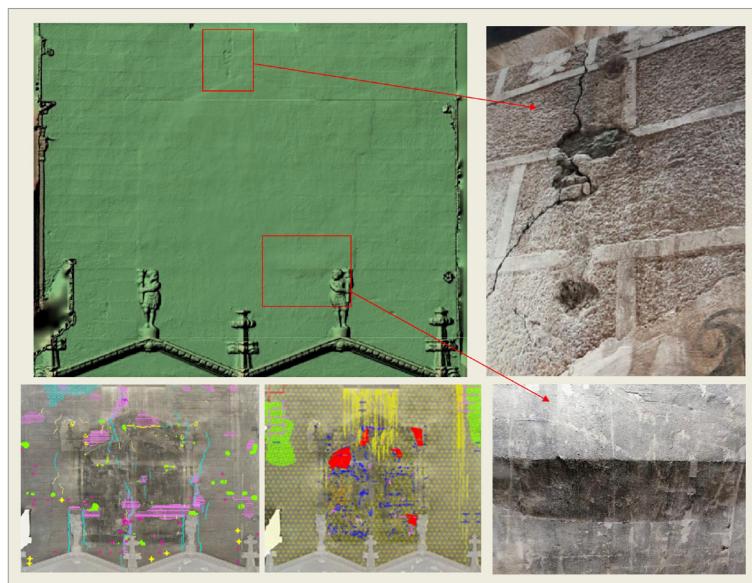


Figura 4. Fotos comparativas del MDE y cartografía de daños iniciales. Grisalla descubierta en el brazo norte del crucero. Fotografía: Archivo IPCE.

Las fotos comparativas del MDE y la cartografía de daños iniciales en la grisalla descubierta en el brazo norte del crucero (Figura 4), permiten reconocer elementos de la tecnología constructiva y del procedimiento de ejecución:

- caracterización de la fábrica en lagunas que dejan a la vista el muro;
- ubicación de mechinales y del sistema de anclaje de los andamios;
- límites de los revestimientos como andamiadas y jornadas de trabajo;
- estratigrafía de las diferentes capas, inserciones de diferentes épocas y acabados, jabelgas y blanqueados aplicados con mucha textura;
- decoraciones en relieve (falso despiece de sillares, esgrafiados, pastillajes y otros detalles ornamentales);
- improntas incisas del dibujo preparatorio y marcas de herramientas;
- pinceladas muy empastadas, etc.

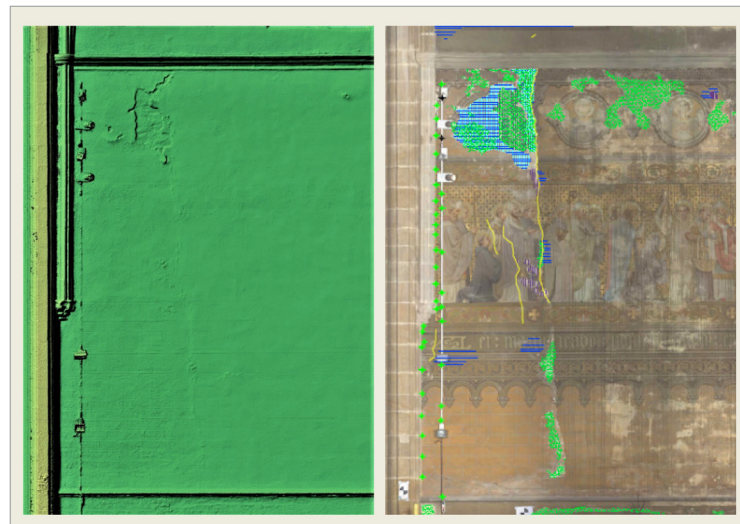


Figura 5. Fotos comparativas del MDE y cartografía de daños iniciales. Muro norte del Presbiterio. Fotografía: Archivo IPCE.

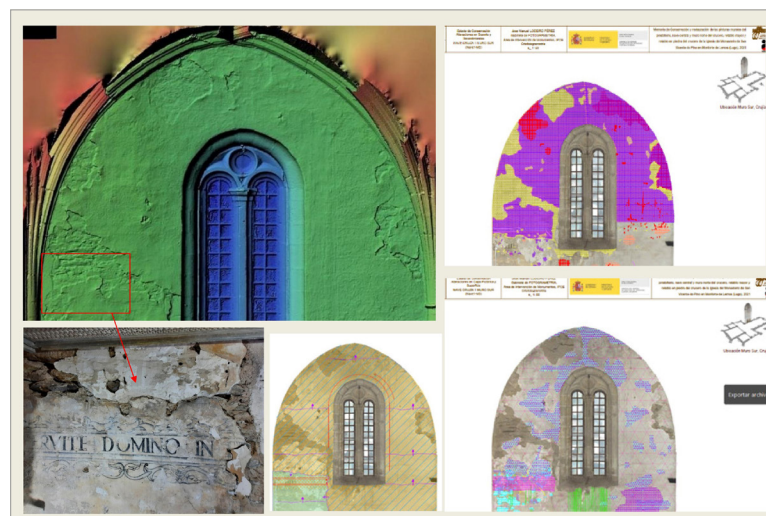


Figura 6. Fotos comparativas del MDE y cartografía de daños iniciales. Primera cruzía del muro sur de la Nave. Fotografía: Archivo IPCE.

En las fotos comparativas del MDE y del estado de conservación de la pintura en el muro norte del presbiterio (Figura 5) y en el paramento de la primera crujía del muro sur de la nave (Figura 6), resultan muy evidentes los elementos de deterioro que definen el precario estado de conservación:

- desplazamiento de planos de la fábrica debido a asentamientos estructurales;
- grietas y grandes fisuras, oquedades con separación, deformación y abultamiento entre estratos de mortero;
- efectos de escorrentía y filtraciones procedente de los vanos o la cubierta;
- perforaciones y huecos;
- pérdidas de material constitutivo en lagunas del soporte y pictóricas;
- improntas de incisiones, abrasiones y golpes, etc.

II. *Capilla*, Museo Nacional de Artes Decorativas de Madrid.

Se trata de un montaje museográfico realizado en los años 40 del siglo XX, que reproduce en un único espacio el ambiente de una capilla del siglo XVI. La pieza central del conjunto es un retablo dedicado a San Miguel, que procede del Convento de Las Gordillas de Ávila. El resto de los paramentos perimetrales se cubre con doce colgaduras o paneles, con decoración geométrica y heráldica, del antiguo Convento de San Clemente de Toledo.

La peculiaridad de estas piezas es que están todas realizadas sobre un soporte de piel curtida empleando la técnica del guadamecí, cuyo origen surge en el ámbito hispano-musulmán expandiéndose por Europa occidental entre los siglos XVI y XVIII. La época dorada de esta técnica se desarrolla en la península entre los siglos XVI y XVII, siendo el retablo un magnífico ejemplo de ello y encontrándose entre los escasos ejemplares conservados.

El retablo de San Miguel, consta de un soporte formado por 56 piezas de cuero, cubiertas de pan de plata corlada y una rica iconografía realizada al óleo. En la parte alta de la composición, se representa la lucha de los ángeles y los demonios, presididos por el arcángel San Miguel mientras que en la mitad inferior, encuadrados dentro de una arquitectura renacentista, figuran San Miguel, San Rafael y San Gabriel. Tiene una superficie aproximada de 12m².

Las colgaduras murales laterales, están conformadas por distintos números de piezas de cuero en las que se despliega una decoración vegetal, estampada y seriada, ocupando una superficie aproximada de 87 m², con dos técnicas de ejecución diferentes, posiblemente debido a su ubicación en distintas estancias del convento. Todas ellas presentan el escudo del obispo de Calahorra, Don Juan de Ochoa y Salazar, por lo cual se datan hacia 1575⁷.

El objetivo era conocer el estado actual de las piezas previo a una futura intervención, y con este fin ha sido necesaria una exhaustiva documentación gráfica de las mismas para determinar las técnicas de ejecución y caracterizar las alteraciones.

Se documentaron mediante ortofotografías los guadamecís accesibles, distribuidos por la mayor parte de la sala. Con el fin de asegurar un sistema único de coordenadas, se dispusieron dos tipos de dianas siguiendo el procedimiento descrito para San Vicente Do Pino.

Además de medir con el taquímetro todos los puntos de control con un error del orden de 3 mm, se tomaron diferentes medidas entre las dianas reconocibles por el *MetaShape*, con el fin de asegurar

⁷ Información facilitada por D. Félix de la Fuente y equipo del MNAD, Madrid.

una precisión que oscila en cada uno de los elementos dependiendo de las distancias: en el retablo 0,34 mm, en los paneles laterales 0,30 mm y para los elementos independientes, entre 0,23 y 0,30 mm.

Las imágenes se tomaron desde un trípode extensible y se iluminaron con flashes colocados a 45°. Cada elemento se fotografió incluyendo una carta de color (RGB) para conseguir una representación colorimétrica lo más ajustada a la realidad.

Para definir con precisión la disposición de cada guadamecí se generó un modelo 3D de la sala del Museo donde se conservan. La unión de estas nubes se realizó a partir de las dianas colocadas en la sala, registradas topográficamente (Ver Figura 1).

La documentación generada consistió en la nube de puntos del escáner, los diferentes paneles generados en *MetaShape*, las ortofotografías de cada panel de guadamecés, los modelos 3D y los MDE. Todos estos archivos se incorporan en un único fichero sobre el plano de *AutoCad* (Figura 7).

El trabajo realizado estaba condicionado por las particularidades de la sala: un espacio reducido, con diferencias de nivel en el pavimento y limitaciones de acceso y movimiento que dificultaban la completa documentación. Además, hay que tener en cuenta las grandes dimensiones de los guadamecés, algunos con más de 24 m² de superficie, y la escasa iluminación de la sala, que dificultaba la realización de un profundo informe del estado de conservación.

En el momento del montaje museográfico de la capilla, el acceso se realizaba por una puerta adintelada de mayor tamaño que la actual, un vano de reducidas dimensiones rematado con arco de medio punto. También se alteró la naturaleza flexible de los guadamecés, pues para su exposición fueron dispuestos sobre soportes rígidos como tableros y bastidores de madera.

En los estudios previos que se realizaron sobre el estado de conservación, resultaba imprescindible conocer las dimensiones exactas de las piezas, así como de los vanos de acceso y pasillos

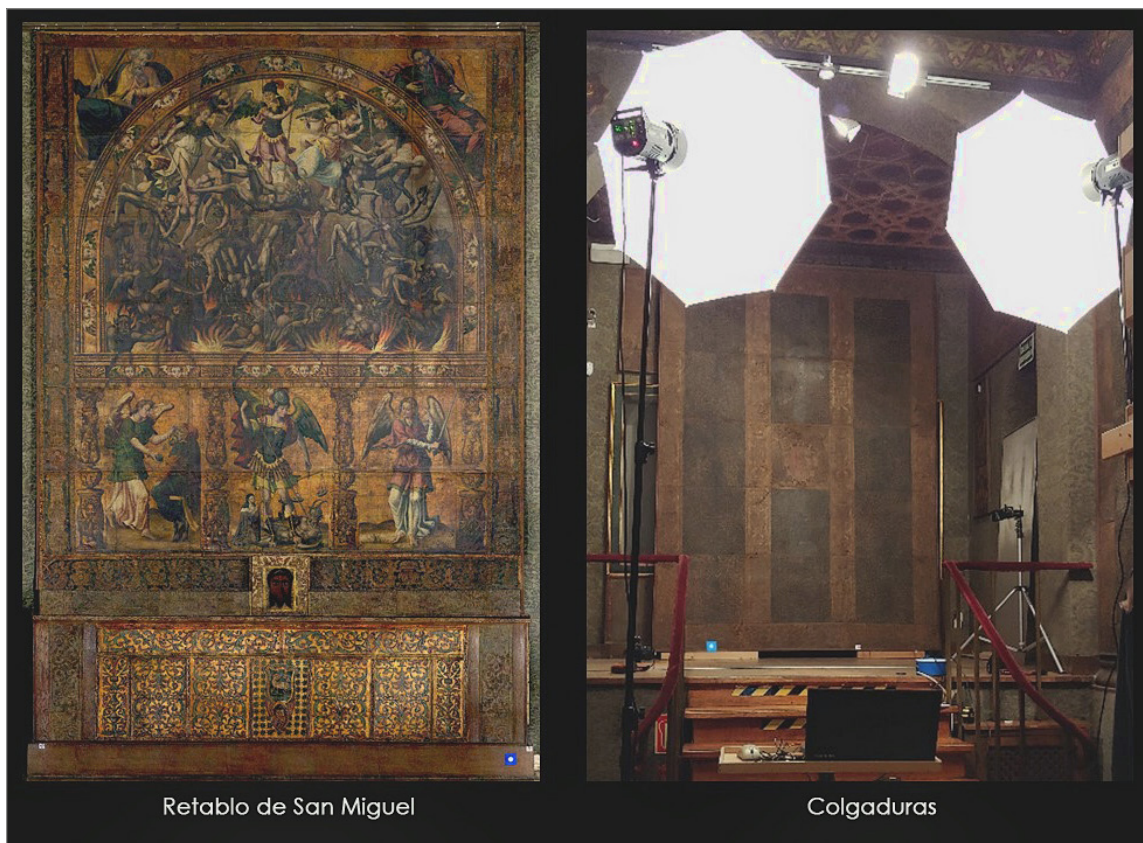


Figura 7. Procedimiento de obtención de datos, con localización de las dianas. Capilla. MNAD. Fotografía: Archivo IPCE.

de la planta, las diferencias de nivel y las rutas de salida de la sala de exposición, para poder planificar el movimiento de los objetos en un posible desmontaje y traslado.

Los MDE aportados por el gabinete de fotogrametría, ofrecen una información de calidad en objetos con escaso volumen, y en el caso de estos guadamecés, con un grosor aproximado de 0,3 mm, aportaron interesantes detalles sobre la técnica de ejecución y el estado de conservación en relación a sus alteraciones e intervenciones.

Respecto a la técnica de ejecución, en el retablo se pueden observar, gracias a los MDE, los dobladillos del montaje de las piezas, las incisiones del encaje de los dibujos subyacentes, además de ayudar a determinar la presencia de lámina metálica visible u oculta, gracias a la alta resolución superficial obtenida (Figura 8).

Este alto nivel de resolución, nos permite realizar una valoración más precisa del estado de conservación, caracterizando algunas de las alteraciones del soporte de cuero como pueden ser las pérdidas de grano, desgastes superficiales, exfoliaciones, desgarros, grietas, separación de estratos, pliegues o bolsas (Figura 9).

En las distintas intervenciones que a simple vista no se apreciaban, se consiguen diferenciar los elementos añadidos de los originales: recosidos, chiflados posteriores, puntos de adhesión o la aplicación de parches por el reverso. En el caso de algunas colgaduras, se observa el uso del moldeado mediante planchas (Figura 10).

Estos registros, que por las dimensiones y altura de las piezas serían complicados de realizar con el sistema tradicional de fotografía con luz rasante, potencian los relieves de los guadamecés. El registro monocromático obtenido con los MDE evita la posible distorsión creada por la visión de la imagen real.

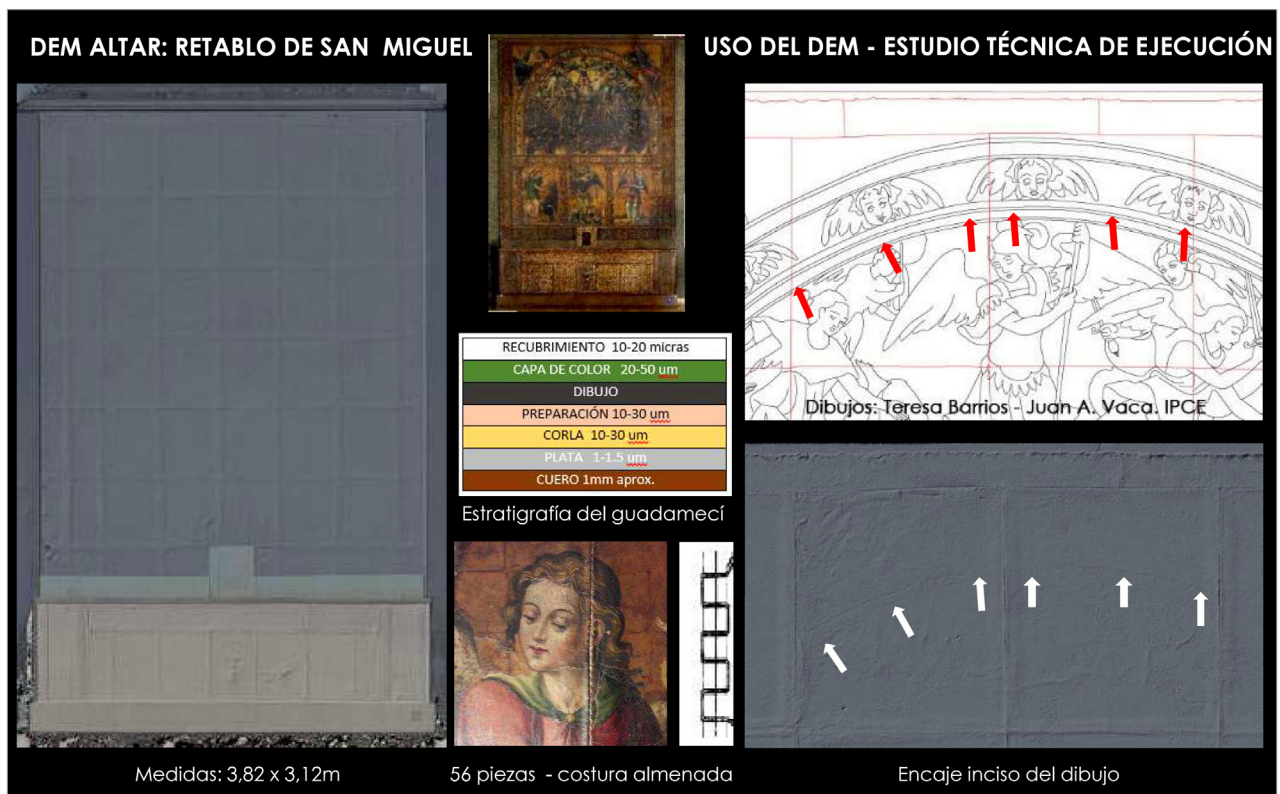


Figura 8. Estudio de las técnicas de ejecución. Despiece del retablo, estratigrafía, detalle de costura y dibujo preparatorio inciso de las arquitecturas. Fotografía: Archivo IPCE.



Figura 9. Estado de conservación. Alteraciones e intervenciones: faltas matéricas, arrugas, exfoliaciones, parches, injertos, adhesiones. Fotografía: Archivo IPCE.

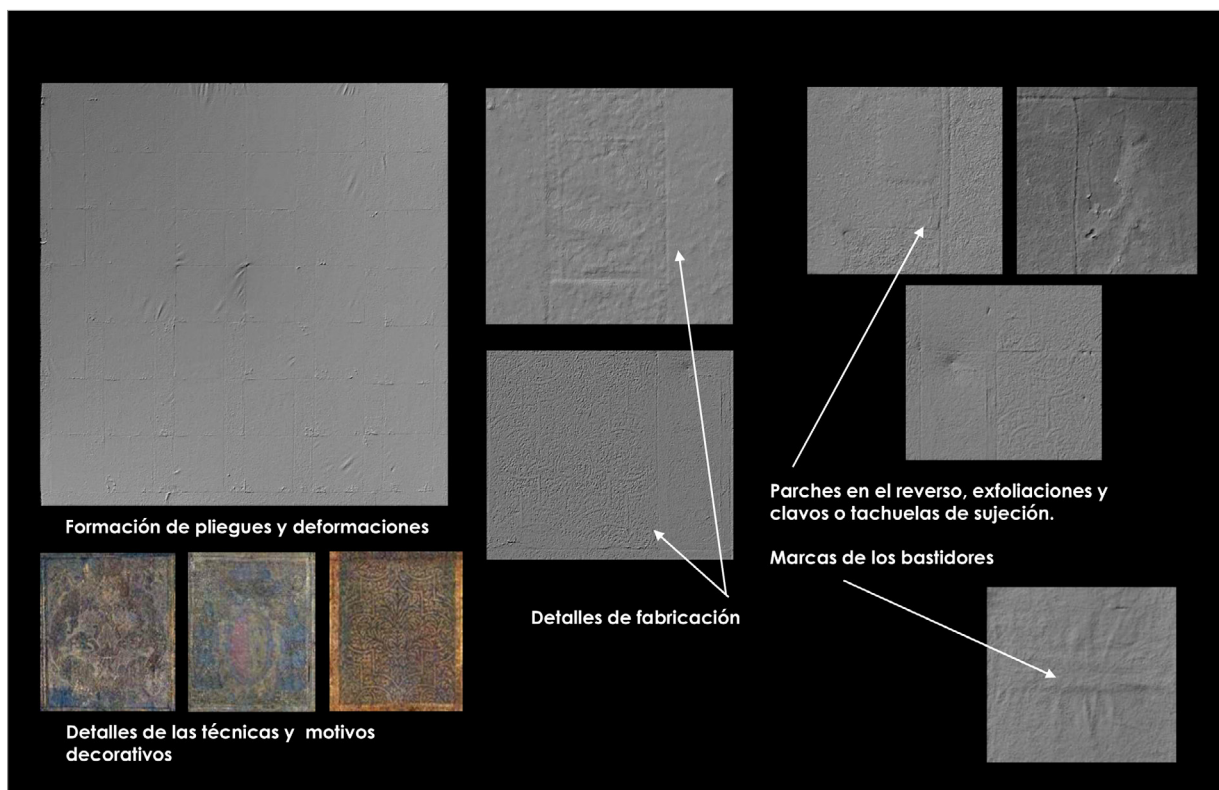


Figura 10. Antiguas intervenciones como injertos con bordes chiflados o un parche trasero dentado. Fotografía: Archivo IPCE.

III. Mosaicos del Museo Arqueológico de Sevilla

En esta ocasión se documentaron cinco mosaicos de gran formato expuestos en el Museo Arqueológico de Sevilla, con el objetivo de que sirvan de apoyo a las futuras operaciones de desmontaje y traslado que se llevarán a cabo con motivo de la rehabilitación del Museo.

Para la documentación de los mosaicos se requerían apreciaciones muy altas que permitieran obtener la máxima información, por lo que se fijó que un píxel en la imagen debería de corresponder con 0,2 mm de la realidad del objeto.

Para los mosaicos horizontales, la equipación del Gabinete de Fotogrametría del IPCE resultaba insuficiente, motivo por el que se contrató a la empresa Scanner, Patrimonio e Industria, S.I.⁸ que disponía de unos mecanismos que permiten la automatización del proceso de documentación.

Con la cámara CANON EOS 5D MARK II y el objetivo de 50 mm de LEICA, las imágenes habrían de tomarse a una distancia de 1,5 m de los mosaicos. En los mosaicos horizontales se empleó luz natural y luz difusa empleando focos, eliminando de esta forma el reflejo que produce el uso de flashes.

Cada mosaico se registró de forma independiente, por lo que hay un sistema de coordenadas para cada uno.

De cada mosaico se realizaron fotografías con una superposición igual o superior al 70 %, con una apreciación de 1 Pixel a 0,2 mm, lo que permite visualizar cada mosaico en un ordenador a escala 1/1, posibilitando el examen y diagnóstico sin necesidad de desplazamientos.

Para facilitar el manejo de la información se ha generado para cada mosaico un archivo PDF de la ortofotografía, otro para el MDE y un tercer archivo con la transparencia de ambas imágenes superpuestas.

Los cinco mosaicos documentados, de diferentes procedencias cada uno, han sido extraídos de su lugar de origen mediante su división en varias secciones, procedimiento muy habitual entre los años 60 y 80 del pasado siglo. Antes del montaje, se eliminaba el mortero original de cada una de las secciones de mosaico, sustituyéndolo por un mortero nuevo de cemento, con frecuencia reforzado con una malla metálica. Finalmente, el mosaico se volvía a montar anclando cada sección sobre el muro en el caso de los mosaicos expuestos verticalmente y sobre el pavimento en los expuestos horizontalmente. En los ejemplos que se exponen a continuación, las juntas de los cortes de la extracción no son fáciles de identificar, puesto que han sido reintegradas con teselas originales.

La localización de dichas juntas resulta de gran importancia, ya que para el desmontaje de los mosaicos es preciso definir las secciones existentes y evitar realizar nuevos cortes.

Con los MDE ha sido posible localizar la posición de dichas juntas en los cinco mosaicos, tal y como se aprecia en el MDE del mosaico del Triunfo de Baco. De este modo, la extracción de las teselas de las juntas se puede llevar a cabo con precisión dejando intactas las secciones originales.

Por otra parte, el registro monocromo de los MDE facilita la visualización de todas las irregularidades de la superficie de los mosaicos, eliminando la confusión visual que producen los colores.

⁸ SCANNER PATRIMONIO E INDUSTRIA S.I., es una empresa *Spin-Off* de la Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Escuela Politécnica Superior de Huesca y del Departamento de Ciencias de la Antigüedad de la Universidad de Zaragoza. <https://3dscanner.es/>

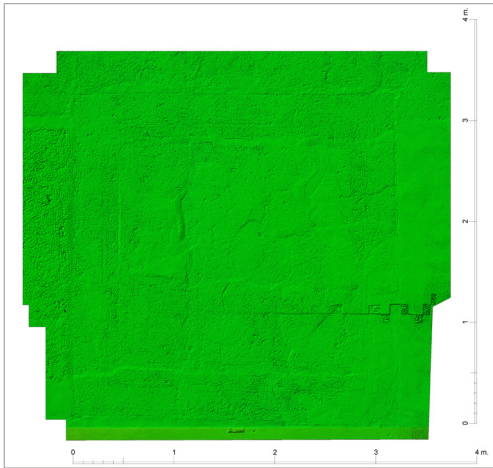


Figura 11. MDE del mosaico del Triunfo de Baco. Museo Arqueológico de Sevilla. Se aprecian las secciones practicadas con mucha claridad. Fotografía: Archivo IPCE.

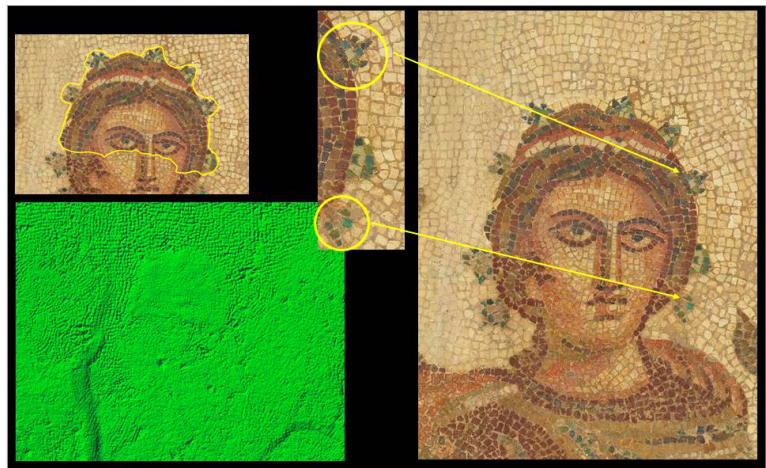


Figura 12. Detalle del MDE y de la ortofotografía de la corona de Baco. Fotografía: Archivo IPCE.

La información aportada por los MDE resulta mucho más valiosa si se combina con el estudio detallado de las ortofotografías. El examen combinado del MDE y de la ortofotografía del mosaico del Triunfo de Baco, expuesto en la sala XIII, ha permitido identificar posibles reintegraciones miméticas con teselas. La gran resolución de la ortofotografía facilita la visualización de la superficie musiva desde un ordenador, con aumentos superiores a la escala real. De este modo, se han localizado teselas repintadas en la corona de Baco. Al examinar el MDE se ha comprobado que la parte superior de la cabeza de Baco presenta una textura y relieve diferentes a las zonas circundantes, lo que lleva a pensar que se trata de una posible reintegración con teselas.

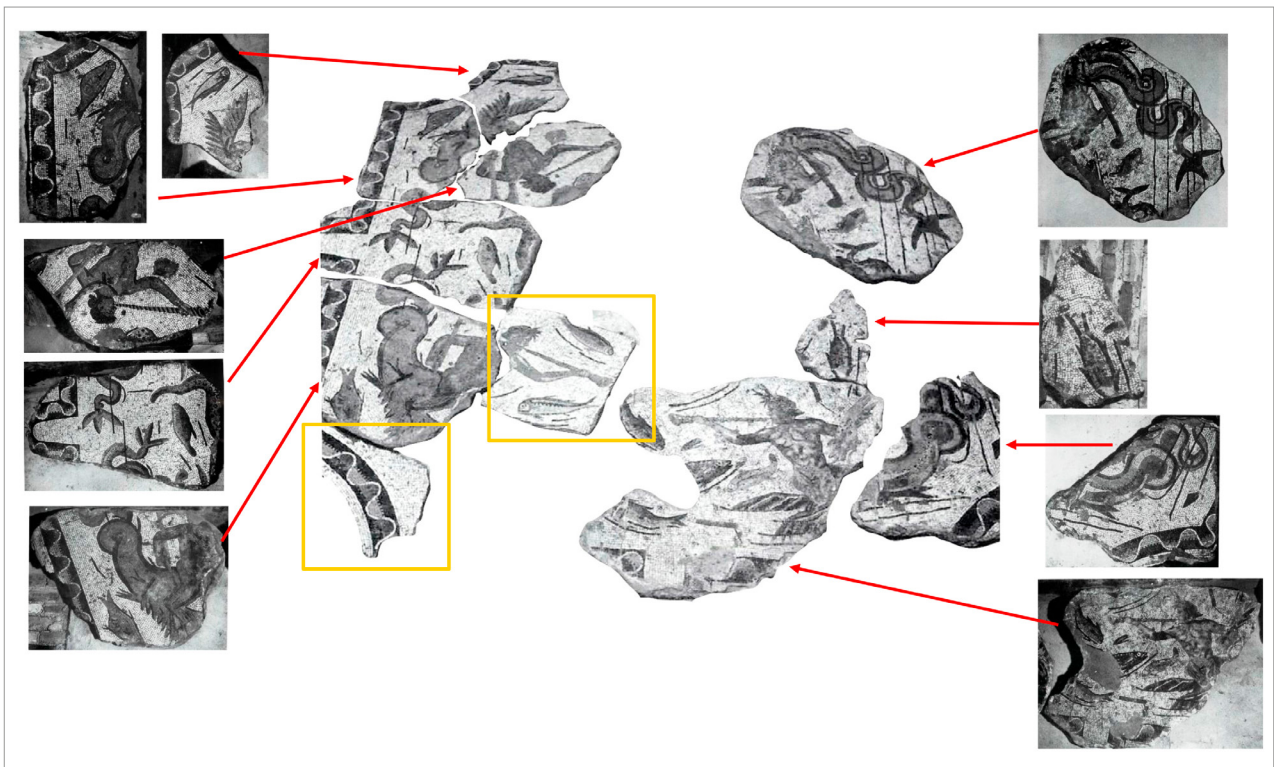


Figura 13. Secciones originales. Imágenes extraídas del CMR de Itálica (I) de Antonio Blanco Freijeiro. Fotografía: Antonio Blanco Freijeiro.

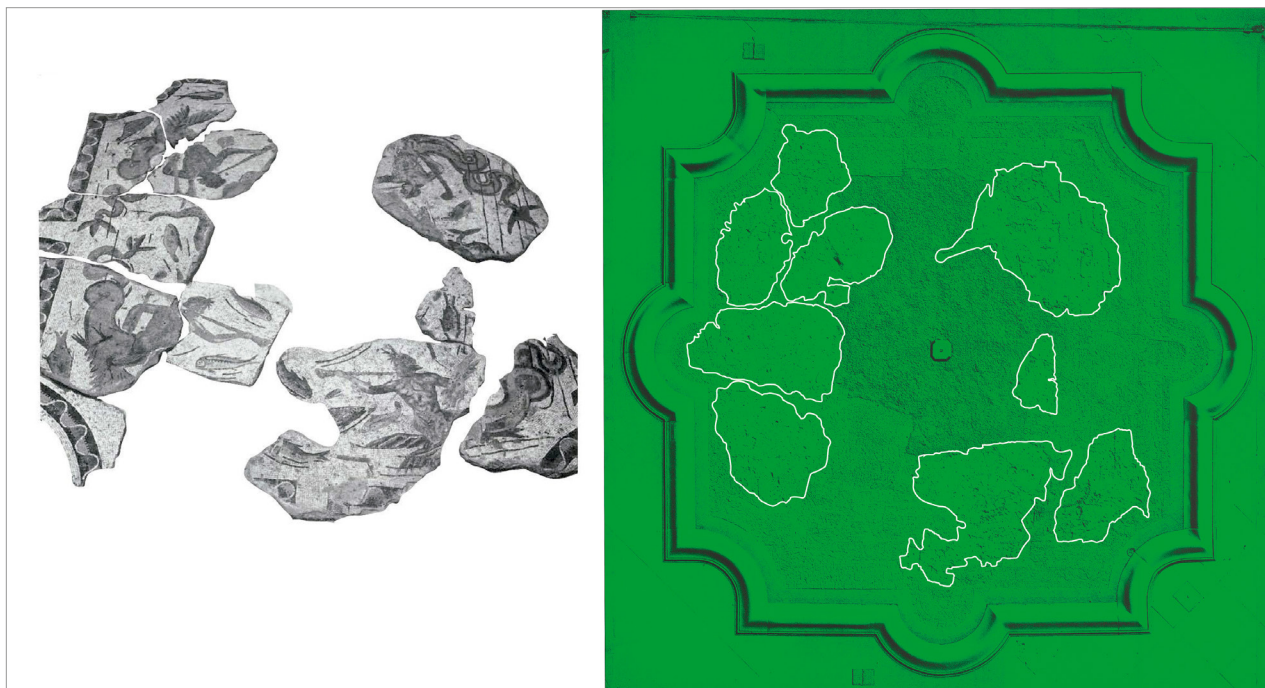


Figura 14. Secciones originales y MDE. El perímetro de las zonas más pulidas coincide con la forma de las secciones originales. Fotografía: Ioanna Ruiz de Torres Moustaka.

Asimismo, es posible obtener información muy útil contrastando fotografías históricas con los MDE. En el caso del mosaico de la Fuente de los Tritones resultaba complicado distinguir las partes originales de las reintegraciones con teselas. Este mosaico está recogido en el *Corpus de Mosaicos Romanos de España, Mosaicos Romanos de Itálica (I)*, de Antonio Blanco Freijeiro. Aquí encontramos varias fotografías de cada una de las secciones originales, así como del conjunto antes de reintegrar, con las secciones en su posición.

Se llevó a cabo un examen con luz rasante para trazar el perímetro exacto de las secciones. Se pudo observar que había dos zonas claramente diferenciadas: una con la superficie muy pulida y sin apenas relieve, y otra con el relieve del manto teselar muy pronunciado. No obstante, este método de trabajo resultaba muy complicado y poco preciso.

Con el MDE del mosaico se ha podido trabajar cómodamente desde un ordenador. La calidad de la imagen, al igual que para el mosaico del Triunfo de Baco, permite grandes aumentos. Con el programa *Adobe Illustrator CS6* se delimitaron las zonas más pulidas con una línea. Finalizado este paso, se pudo comprobar que las zonas más pulidas coinciden casi con exactitud con la forma de las secciones originales de la fotografía del CMR de 1978.

Conclusiones

Junto al uso de técnicas topográficas y del escáner 3D, los MDE son una herramienta muy útil para el entendimiento del bien en su entorno.

Los MDE realizados sobre bienes con mucha variación en el relieve no aportan datos relevantes. En aquellos bienes en los que la diferencia de profundidad es escasa, se ha obtenido información de gran interés trabajando con una buena apreciación, lo que ha permitido establecer datos precisos sobre el estado de conservación, las antiguas intervenciones, los procedimientos y las técnicas de ejecución.

Las imágenes con mejor resultado se han obtenido ubicando dos flashes solidarios a 45°, a ambos lados de la cámara.

La inmediatez de la información generada y la accesibilidad en un único documento, son una gran ventaja complementaria a otros documentos obtenidos durante la intervención de conservación.

El uso de transparencias y el registro de capas de información que podemos insertar a través del *Photoshop*, facilitan el estudio de los bienes culturales, la comprensión de la problemática del objeto, y la toma de decisiones tanto en la redacción de los proyectos como en su posterior ejecución.

La fotogrametría y los MDE son por tanto valiosos recursos durante el proceso de documentación de ciertos espacios y bienes, que disminuyen los costes económicos y el tiempo de trabajo.

Bibliografía

- CANTOS MARTÍNEZ, O., LODEIRO PÉREZ, J. M. y LAGUNA RODRÍGUEZ, J. (2009): «La fotogrametría como apoyo gráfico en la restauración de retablos escultóricos en madera policromada». *Patrimonio cultural de España*, Vol. 1, pp. 237-251. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/000075335b69d61db02dc>. [Consulta 15 de diciembre de 2021].
- CRONEBORG, L., SAITO, K., MATERA, M., MCKEOWN, D., VAN AARDT, J. (2015): *Digital Elevation Models. A Guidance*. Washington: World Bank Group. International Bank for Reconstruction and Development. Disponible en: <https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/34445> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- CUARTERO SÁEZ, A. (2017): «Radiación y vuelta de horizonte». En *Guía Práctica de Topografía en Edificación*. Cáceres: Universidad de Extremadura, CVUEx, pp. 41-48. Disponible en: <https://mascvuex.unex.es/ebooks/sites/mascvuex.unex.es/mascvuex.ebooks/files/files/file/9788491270034.pdf>. [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- FLORINSKI, I. (2016): «Digital Elevation Models». En: *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Chapter 3. Londres: Elsevier Inc., pp. 77-108. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-804632-6.00003-1> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- GUTH, P. L., VAN NIEKERK, A., GROHMANN, C. H., MULLER, J. P. *et al.* (2021): «Digital Elevation Models: Terminology and Definitions». *Remote Sensing*, 13 (18), pp. 3581. <https://doi.org/10.3390/rs13183581> Disponible en: [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- GONZÁLEZ PASCUAL, M., LODEIRO PÉREZ, J. M., LAGUNA RODRÍGUEZ, J. (2009): «Una experiencia de rectificación fotográfica: modelo ideal de arquería hispano-musulmana de Sta. Fe de Toledo». *Topografía y cartografía*, vol. 26 (152), pp. 32-37. Disponible en: <https://www.coigt.com/publicaciones> [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- LODEIRO PÉREZ, J. M. (2010): «La rectificación fotográfica en el Instituto del Patrimonio Cultural de España». *Patrimonio cultural de España*, vol. 3, pp. 241-259. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/0000753350073786588d3>. [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- (2010): «La documentación geométrica del Patrimonio en el IPCE del Ministerio de Cultura». En: *La ciencia y el arte: ciencias experimentales y conservación del Patrimonio Histórico*, vol. 2., Ministerio de Cultura, pp. 18-31. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/00007533568c114003629>. [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- (2010): «Documentación gráfica del Patrimonio». En: *La documentación gráfica en el IPCE*. Ministerio de Cultura, pp. 8-17. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/0000753358b142b1c934c>. [Consulta: 15 de diciembre de 2021].

- (1995): *Aplicaciones de la topografía en la documentación arquitectónica y monumental*. Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Delegación Territorial de Madrid-Castilla-La Mancha.
- (1992): «La topografía en la documentación de monumentos». *Topografía y cartografía*, vol. 9 (51), pp. 13-29. Disponible en: <https://www.coigt.com/publicaciones>. [Consulta: 15 de diciembre de 2021].
- LODEIRO PÉREZ, J. M. y LAGUNA RODRÍGUEZ, J. (2014): «La maqueta digital». En *Modelos y maquetas: la vida a escala*. Ministerio de Cultura y Deporte, pp. 188-204. Disponible en: https://www.libreria.culturaydeporte.gob.es/libro/modelos-y-maquetas-la-vida-a-escala_1361/ [Consulta: 15 de diciembre de 2021].

Agradecimientos

Francisco Javier Laguna Rodríguez

Federico Luna Salazar. Departamento de Informática del IPCE

José Puy Moreno. Área de Documentación y Difusión del IPCE.

César Carnero Rodríguez, Monasterio de San Vicente do Pino, Monforte de Lemos.

Museo Nacional de Artes Decorativas, Madrid.

Museo Arqueológico de Sevilla.

Técnicas de imagen de luminiscencia fotoinducida

Photoinduced luminescence imaging techniques

Ana Rosa García Pérez

Instituto del Patrimonio Cultural de España. Ministerio de Cultura y Deporte
anarosa.garcia@cultura.gob.es

Resumen: Este artículo se centrará en las técnicas fotográficas de luminiscencia más extendidas en el ámbito del Patrimonio Cultural, como son la fluorescencia visible inducida por radiación ultravioleta (FUV) y la luminiscencia en el rango infrarrojo inducida por radiación visible (LIV).

El estudio de la documentación obtenida mediante el empleo de la técnica FUV permite diferenciar zonas de distinta naturaleza, detectar repintes, localizar alteraciones, valorar la extensión de los recubrimientos de barnices oxidados, etc. La aplicación de la técnica LIV es mucho más concreta y permite detectar la presencia del pigmento azul egipcio ($\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$), así como otros pigmentos de tipo oriental como el azul y el púrpura Han, o los compuestos por cadmio.

En el presente texto, se profundizará en la aplicación de la técnica bajo la radiación ultravioleta exponiendo diversos ejemplos, y se hará una aproximación a las posibilidades que puede ofrecer la técnica de luminiscencia en el rango infrarrojo.

Palabras clave: Azul egipcio, cadmio, infrarrojo, fluorescencia, ultravioleta.

Abstract: This article will focus on the most widespread luminescence photographic techniques in the field of Cultural Heritage, such as ultraviolet-induced visible fluorescence photography (UVF), and visible-induced infrared luminescence (VIL).

The study of the documentation obtained from UVF technique allows differentiating areas of different nature, exposing repaints, locating alterations, assessing the extent of oxidized varnish coatings, etc. The application of VIL technique is much more specific and permits the detection of the Egyptian blue pigment ($\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$), as well as other oriental pigments such as Han blue and purple, or those made of cadmium compounds.

This paper will show in deep the implementation of UVF photography, displaying various examples; and present the potentialities that VIL technique/photography can offer.

Keywords: Egyptian blue, cadmium, infrared, photoinduced fluorescence, ultraviolet.

El fenómeno de la luminiscencia

Las técnicas de fotografía de fluorescencia visible inducida por radiación ultravioleta (FUV) y la de luminiscencia en el rango infrarrojo inducida por radiación visible (LIV), comparten un fenómeno común que es la luminiscencia (Dyer, Verri, y Cupitt, 2013), de ahí que de forma genérica se engloben como técnicas de fotoluminiscencia o luminiscencia fotoinducida.

La luminiscencia fotoinducida es observable cuando, bajo determinadas radiaciones, los fotones son absorbidos por los átomos que componen la materia irradiada, provocando que sus electrones pasen de un estado fundamental a otro excitado, al ocupar orbitales de un nivel más alto de energía. Cuando los electrones espontáneamente, vuelven a su orbital de origen (situación estable) liberan el exceso de energía mediante una emisión que, generalmente, es de mayor longitud de onda y menor energía que la de la radiación excitante (Carcelén, Mozo, y de Documentación Técnica, 2005: 2).

De esta forma, en el caso de la técnica FUV, la fuente excitante es radiación ultravioleta y la emitida es visible, mientras que en la técnica LIV, la fuente excitante es visible y la emitida es radiación infrarroja (Figura 1) (Dyer, Verri, y Cupitt, 2013: 2-5).

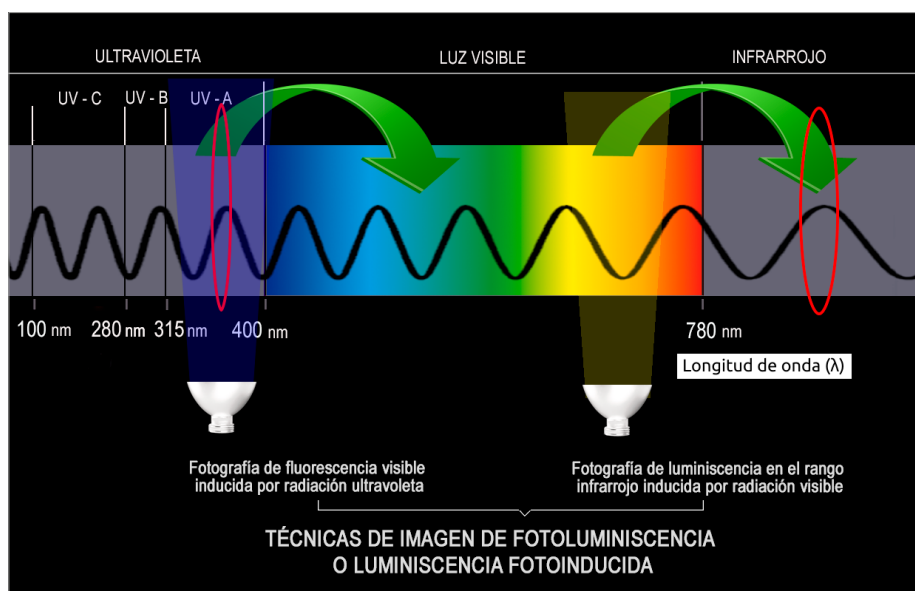


Figura 1. Esquema de ubicación de las técnicas de luminiscencia en los rangos del espectro electromagnético. Fuente: propia.

Respecto a la luminiscencia, es necesario concretar que existen diferentes tipos que dependen de la forma en la que se excita el electrón: la electroluminiscencia es producida por corrientes eléctricas; la sonoluminiscencia es originada por ondas sonoras; la termoluminiscencia es ocasionada por el calentamiento de la materia e independiente de la energía provocada por la incandescencia; o la quimiluminiscencia que es causada por reacciones químicas, entre otras. En el caso de la fotoluminiscencia, tal y como ya se ha señalado, el elemento excitador es la radiación electromagnética (Correcher, García-Guinea, 2015: 4). Dentro de este tipo de luminiscencia existen otros dos fenómenos: la fluorescencia y fosforescencia. La diferencia entre ambos está asociada a su persistencia en el tiempo. En el caso de la fluorescencia, su emisión cesa cuando la fuente de radiación se extingue, mientras que en el de la fosforescencia, el fenómeno persiste durante un tiempo, a pesar de haber cesado la radiación excitante (Bacci, 2019: 29-34).

Por último, hay que tener en cuenta que la luminiscencia emitida por un material depende de diversos factores: su naturaleza química, la cantidad de material, las mezclas, las impurezas, las alteraciones producidas por paso del tiempo e incluso la fluorescencia emitida por el material adyacente (Webb, 2019: 40).

Fotografía de fluorescencia visible inducida por radiación ultravioleta (FUV)

La fotografía de fluorescencia visible inducida por radiación ultravioleta en bienes culturales permite, principalmente y de forma general, diferenciar zonas de diferente naturaleza que no son discernibles mediante la observación directa.

Antes de adentrarnos en su aplicación es necesario destacar los hitos históricos fundamentales que han hecho posible su desarrollo.

El descubrimiento de la radiación ultravioleta se atribuye al físico alemán Johann Wilhelm Ritter, en 1801. Un año antes, los experimentos llevados a cabo por el astrónomo William Herschel habían posibilitado el hallazgo de los «rayos calóricos», o la radiación infrarroja como se denominó más tarde, mediante el empleo de un prisma de cristal. Por su parte, Ritter observó cómo, mediante el empleo también de un prisma y de un papel impregnado por cloruro de plata, éste último se ennegrecía al absorber la radiación invisible que se extendía más allá del violeta del espectro visible, a los que denominó como «rayos desoxidantes» (Berg, 2008: 99-103), que serán conocidos posteriormente como radiación ultravioleta.

La región ultravioleta del espectro electromagnético es invisible al ojo humano, y su rango de situación en el espectro electromagnético está comprendido entre los rayos X y la luz visible.

La división del espectro electromagnético no es exacta ya que se producen solapamientos entre los distintos rangos. Según la CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), el Comité Internacional de Iluminación¹, el rango de la radiación ultravioleta suele situarse entre los 100 y los 400 nm, distinguiéndose tres subdivisiones:

- De 315 nm a 400 nm: UV- A.
- De 280 nm a 315: UV – B.
- De 280 nm a 100 nm: UV-C.

Por otra parte, es preciso señalar que en la aplicación de la técnica para el estudio de los bienes culturales, se suelen utilizar lámparas de onda larga dentro del rango UV - A. Este tipo de lámparas, denominadas de Wood, deben su nombre al físico que las inventó en 1903, Robert Williams Wood (Sharma, y Sharma, 2016: 60–65). Su uso para los exámenes de obras de arte se remonta a la década de 1920, destacando las publicaciones realizadas por el Conservador del *Metropolitan Museum of Art*, James Rorimer (1929, 1931).

En cuanto al término *fluorescencia* fue acuñado en 1852 por Gabriel Stokes, para describir cómo varias sustancias, entre las que se incluyen el mineral fluorita (fluoruro de calcio), tras la absorción de radiación ultravioleta, emitían una radiación cuya longitud de onda era de menor energía y de longitud de onda más larga que la de la radiación excitante (Stokes, 1852: 479).

¹ Se define como una organización internacional sin ánimo de lucro, cuyos países miembros cooperan mediante el intercambio de información sobre aspectos relacionados con la ciencia y la tecnología, dentro del ámbito de la iluminación. Para más información consultar: <http://cie.co.at/about-cie>

Aplicación en los bienes culturales

Una de las publicaciones más recientes (Measday, 2017), bajo la iniciativa del equipo de Conservación del Museum Victoria (Melbourne, Victoria, Australia), recoge una tabla resumen de los resultados obtenidos de la aplicación de la FUV, recopilados de diversas fuentes, así como de las observaciones realizadas por los propios investigadores del museo.

Sin embargo, con el fin de poder tener una visión global de la versatilidad de la técnica, algunos de sus usos y posibilidades (Grant, 2000: 1-4; Webb, 2019: 38-43) en cada uno de los materiales se pueden resumir en: la visualización del barniz oxidado que, de forma habitual, presenta una apariencia poco homogénea o lechosa; facilita la realización del seguimiento de la eliminación de barnices en los procesos de restauración; o la detección de cera vertida o de resinas usadas en objetos artísticos como acabado final. También posibilita la identificación de repintes o añadidos antiguos, reintegraciones cromáticas o la observación del polvo y la suciedad acumulada. Facilita la diferenciación de materiales antiguos de otros modernos en el caso de tejidos o en marfil y hueso por ejemplo. En obras en papel, favorece la discriminación entre tintas de diferente naturaleza; la detección de la presencia de hongos o el fenómeno *foxing*; la intensificación de textos borrados; o la localización de reparaciones y añadidos antiguos. Permite la visualización de la presencia de adhesivos o de materiales de reintegración distintos del original. En material fotográfico ofrece la posibilidad de detectar alteraciones en daguerrotipos o de reconocer tratamientos previos. En los objetos de piedra permite la identificación de la pátina natural o de incrustaciones en piezas procedentes de yacimientos, entre otros.

Iluminación, filtros y curva eficiencia luminosa

En el departamento de Estudios Físicos del IPCE, para la aplicación de esta técnica se utiliza, de forma habitual, una cámara convencional y lámparas que tienen un pico máximo de emisión entre 365 nm y 368 nm.

El esquema de iluminación más general, consiste en situar las lámparas a 45 grados respecto al plano de la obra, alineadas de forma paralela entre sí, dirigiendo el haz de luz de forma directa al objeto procurando una iluminación uniforme. En este proceso es importante evitar la penetración de otro tipo de iluminación que pueda contaminar la emitida por las lámparas ultravioletas, por lo que la técnica se lleva a cabo en una sala desprovista de ventanas. Dado que existe posibilidad de dañar nuestra retina al trabajar con estas fuentes, siempre se usa como elemento fundamental las gafas de protección UV.

También se emplean dos tipos de filtros distintos para eliminar la radiación ultravioleta reflejada: el primero permite el paso del 99% de la radiación en la región del visible entre los 420 nm y los 680 nm, lo que proporciona una imagen caracterizada por una dominante azul, el segundo corta el 90 % de la radiación con longitudes de onda por debajo de los 520 nm, generando una imagen de tonalidad verdosa. Este último, al eliminar las longitudes de onda azules, favorece la observación de algunas fluorescencias debido a la existencia de una particularidad inherente a la visión humana, ya que según se determina en su curva espectral, existe una mayor sensibilidad en el rango de los verdes, estableciéndose el pico máximo a 555 nm (Pidre, y González, 2015: 20).

Sin embargo, la experiencia ha demostrado la necesidad de usar ambos filtros, ya que algunas fluorescencias que en la imagen con dominante azul se distinguen perfectamente, pasan desapercibidas en las imágenes que presentan tonalidades verdosas, y viceversa.

A modo de ejemplo, a continuación se citarán dos casos en los que se puede constatar cómo algunas diferencias no habrían sido identificadas, si sólo se hubiera empleado uno de los dos filtros.

En la tabla *Virgen con el Niño* (Figura 2) del Museo Lázaro Galdiano, se realizaron capturas con los dos filtros mencionados, ambos con el mismo tipo de iluminación. Las imágenes obtenidas aplicando radiación ultravioleta, ofrecen un mapa de alteraciones que no se distinguen en la imagen visible. Se detecta la superficie poco homogénea del barniz, y varias manchas oscuras relacionadas con diversos repintes. En un detalle ampliado, observando detenidamente la imagen con dominante azul, se aprecia una fluorescencia, que pasa desapercibida en la imagen verdosa, situada en la esclerótica del ojo de la Virgen. Esa fluorescencia presenta una tonalidad azulada en la fotografía en el rango visible, en lugar del color blanco que debería mostrar, ya que, posiblemente, sea resultado de una intervención.

La fluorescencia de esa zona del ojo detectada en la imagen azul, es similar a la zona de la vestimenta de la Virgen, en la parte del cuello. Tampoco ésta fluorescencia es distinguible en la imagen verdosa, ya que muestra una tonalidad semejante a las zonas circundantes.

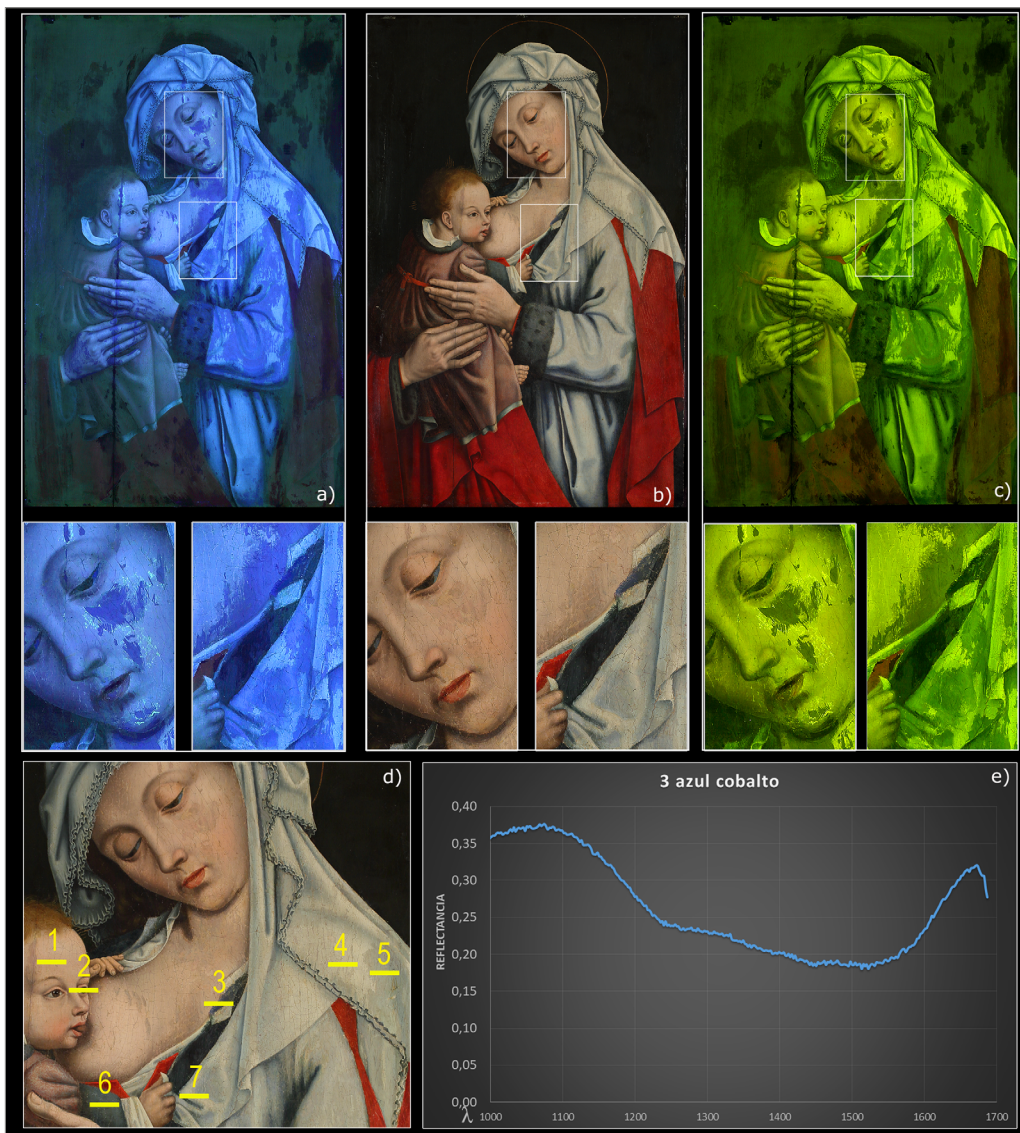


Figura 2. Taller del Maestro de Flémalle (escuela flamenca), *Virgen con el niño*, Ca. 1450. Museo Lázaro Galdiano, Madrid: a) FUV dominante azul y detalles del ojo de la Virgen y el cuello de la vestimenta; b) fotografía de referencia y detalles del ojo de la Virgen y el cuello de la vestimenta; c) FUV dominante verde y detalles del ojo de la Virgen y el cuello de la vestimenta; d) detalle de las muestras tomadas con la técnica de espectroscopía de imagen en el infrarrojo cercano; y e) curva espectral de reflectancia de la muestra nº 3 correspondiente al cuello. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

En el departamento contamos con una técnica, que está en fase experimental, con la que se pueden caracterizar algunos materiales (pigmentos y preparaciones). Se trata de la espectroscopía de imagen en el infrarrojo cercano. El área analizada en la zona del cuello de la vestimenta (Figura 2.d y 2.e) relacionada con la fluorescencia mencionada, presenta una curva espectral de reflectancia compatible con el pigmento azul cobalto (Donate *et al.*, 2021). Estos análisis fueron corroborados mediante la técnica de fluorescencia de rayos X del departamento de Análisis de Materiales (Montero, 2018), coincidiendo en la identificación de la presencia del mismo pigmento, dato que permitió confirmar que en ambos casos estaríamos ante una zona de repinte.

El siguiente ejemplo, mostrará que la imagen de tonalidad verdosa, ofrece determinados detalles que no se distinguen fácilmente en la imagen azulada. Se trata de un fragmento de pintura mural con grafitos (Figura 3), localizado en el yacimiento romano de Santa Criz de Eslava (Navarra). Tras la realización de ambas capturas, y observando en detalle una ampliación del mismo área, se pueden visualizar algunos materiales, cuya fluorescencia de tonalidad amarillenta destaca de manera notable en la figura 3.c. Estos materiales han sido identificados como granos de calcita (Navarro, 2019).

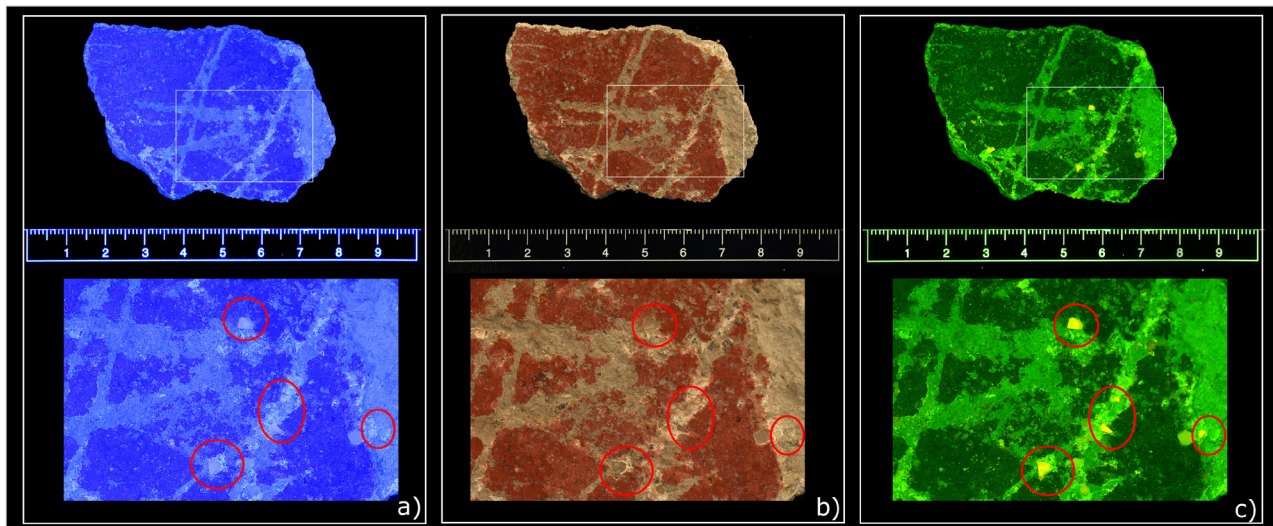


Figura 3. Anónimo, *Grafitos sobre pintura mural*, siglos I-V d.C. Yacimiento romano de Santa Criz de Eslava, Navarra: a) FUV dominante azul general y detalle; fotografía de referencia general y detalle; c) FUV dominante verde general y detalle. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

Casos de estudio

En este apartado se expondrán una serie de resultados obtenidos tras la aplicación de la técnica en diversos casos de estudio.

En un conjunto de figuras orientales del Museo Nacional de Artes Decorativas, la técnica puso de manifiesto un recubrimiento superficial poco homogéneo, que en muchos casos presentaba una tonalidad amarillenta debido a la oxidación.

En las figuras 4.b y 4.d se pueden observar dos momentos distintos del proceso de limpieza del recubrimiento en una cabeza exenta de una de las figuras. La figura 4.b muestra el momento inicial, antes de producirse la limpieza, y la figura 4.d presenta un momento del proceso de limpieza ya efectuado en la mitad del rostro.

En un Sagrario del Museo Diocesano de León (Figura 5) se observaron múltiples orificios producidos por un ataque de xilófagos. También se observaba un punteado fluorescente bajo la radiación ultravioleta.



Figura 4. Anónimo, figuras orientales, *diaokes* de piedra, finales siglo XVIII. Museo Nacional de Artes Decorativas, Madrid: a) fotografías de referencia y detalles FUV dominante azul de tres *diaokes*; b) FUV dominante azul antes de la limpieza del recubrimiento superficial de una cabeza exenta de *diaoke*; c) fotografía de referencia; y d) FUV dominante azul durante el proceso de limpieza. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

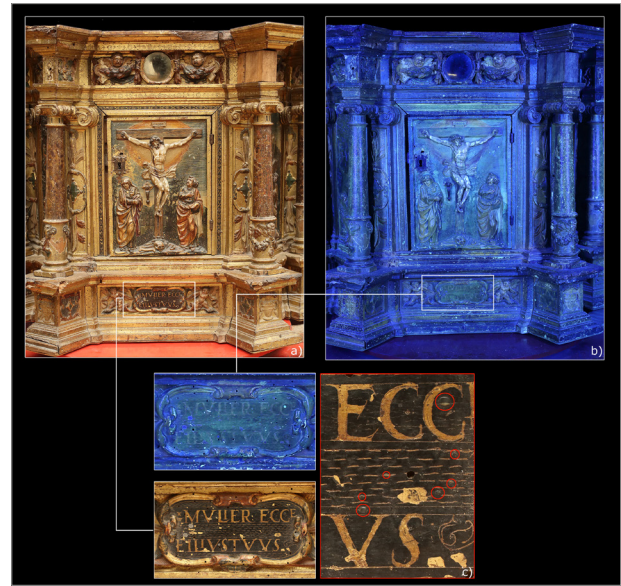


Figura 5. Escuela de Juan de Juni, Sagrario, siglo XVI. Actualmente se encuentra en el Museo Diocesano de León: a) Fotografía de referencia; b) FUV dominante azul, y c) fotografía macro de la cartela en la que se señalan las gotas de cera. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).



Figura 6. Anónimo, *Escultura oriental sedente*, 1644-1911 Dinastía Qing (China). Museo Nacional de Artes Decorativas, Madrid: a) fotografía de referencia; b) FUV dominante azul; c) detalle fotografía visible en la que se marca una laguna en amarillo; y d) detalle FUV dominante azul en la que señalan restos de una intervención anterior y fluorescencias en algunas zonas de laguna. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

En el detalle de la cartela, se pueden apreciar esos puntos de fluorescencia que, en apariencia, se podían relacionar con reparaciones realizadas en supuestos agujeros producidos por los xilófagos. Sin embargo la figura 5.c evidencia que se trata del vertido de gotas de cera.

La técnica, en muchas ocasiones, permite detectar restos de intervenciones anteriores, como es el caso de la escultura oriental de madera policromada que presenta la figura 6.

Las imágenes captadas bajo radiación ultravioleta en la zona central de la figura posibilitaron la localización de restos de tratamiento de fijación en el rostro del dragón, cuya presencia pasaba desapercibida en la fotografía en el rango visible (Figura 6.c). También se localizaron en el interior de las lagunas de la misma zona, algunas fluorescencias de apariencia amarillenta (Figura 6.d).

Siguiendo con la observación de las posibles intervenciones, mediante la aplicación de la técnica, podemos distinguir las uniones de los fragmentos que componen la reconstrucción de esta cratera de Figuras Rojas (Figura 7), perteneciente al Museo Arqueológico Nacional de Madrid.



Figura 7. Anónimo, *Crátera de Figuras Rojas*, siglo IV a. c. Museo Arqueológico Nacional, Madrid: a) fotografía de referencia vistas 1, 2, 3 y 4; y b) FUV dominante verde, vistas 1, 2, 3 y 4. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

El siguiente caso está representado por la copia Síndone o la Sábana Santa (Figura 8) de la Iglesia de San Juan Bautista, situada en Campillo de Aragón (Zaragoza). Se trata de una de las mejores copias de la Sábana Santa de Turín y sólo se muestra al público tres veces al año (Salguero, 2015).

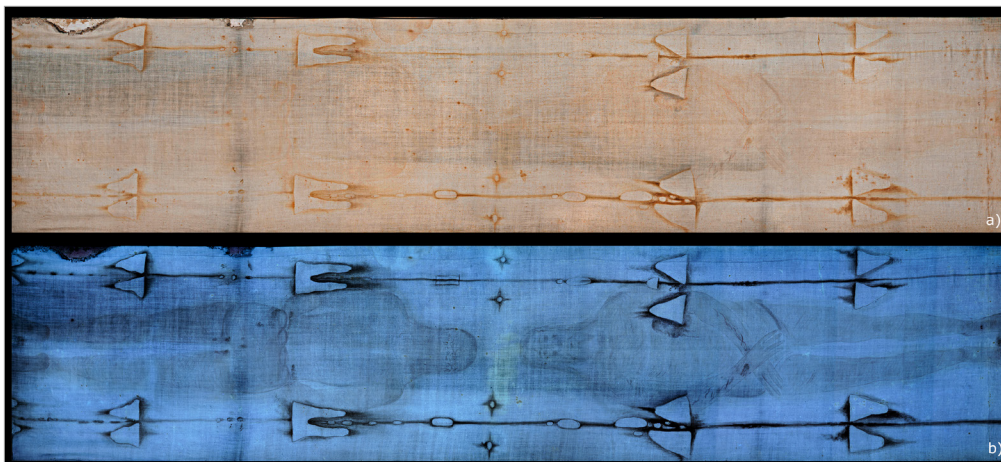


Figura 8. Anónimo, *Síndone o Sábana Santa (copia)*, siglo XVI, Iglesia de San Juan Bautista, Campillo de Aragón, Zaragoza: a) Fotografía de referencia; y b) FUV dominante azul. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

En la fotografía en el rango visible de la obra apenas se aprecian detalles desvanecidos de la figura de Cristo. Tras la aplicación de la técnica se consiguió acentuar la imagen consiguiendo una mejor visualización (Figura 8.b).

Otra de las posibilidades que nos ofrece este tipo de fotografía es distinguir las propiedades fluorescentes de algunos tintes usados en tejidos. Es el caso de este abanico conocido como *de las mil caras*. Se trata de un abanico oriental (Figura 9), realizado por materiales diversos, perteneciente al Museo Nacional de Artes Decorativas de Madrid. Destaca por su decoración en la parte del país², en el que se disponen una serie de personajes pintados que además incluyen aplicaciones de vestidos de seda y cabezas de marfil (Figura 9.b).

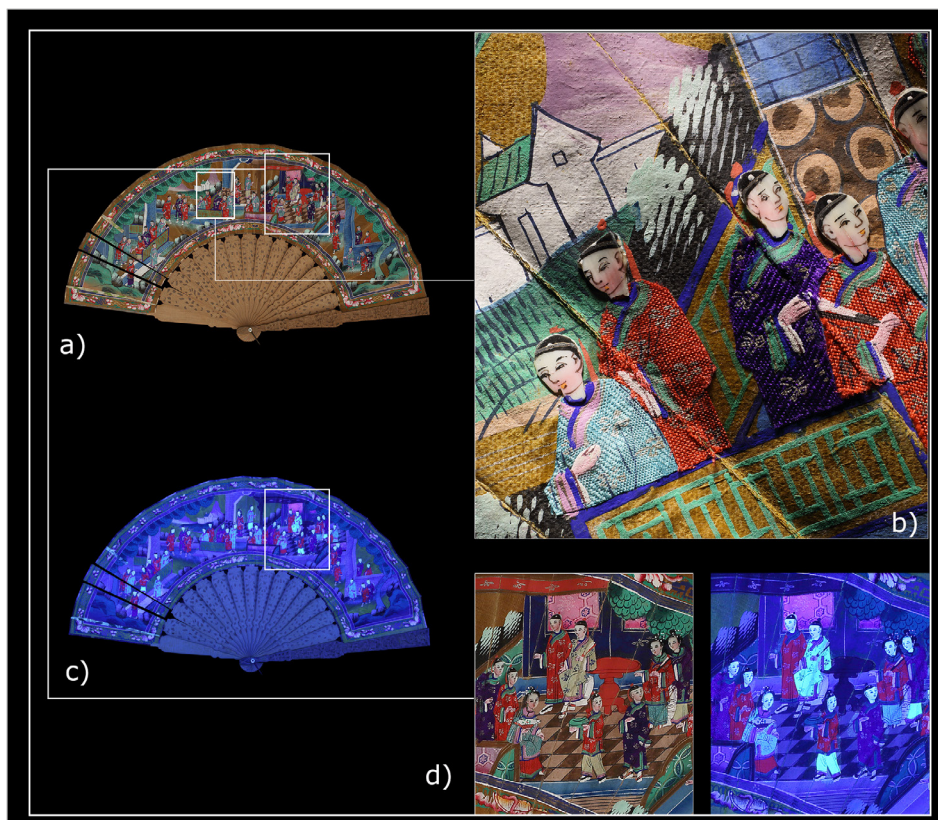


Figura 9. Anónimo, Abanico plegable de madera, 1880 [ca] – 1860 [ca], Dinastía Qing [1644 – 1911], Museo Nacional de Artes Decorativas, Madrid: a) fotografía de referencia; b) fotografía macro de la decoración del país; c) FUV dominante azul; y d) Detalle de los vestidos en la fotografía visible y en la FUV dominante azul. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

En las imágenes capturadas bajo la radiación ultravioleta destaca una fluorescencia brillante emitida por los vestidos de algunos personajes (Figura 9.c). En las imágenes de detalle (Figura 9.d) comparadas con las fotografías en el rango visible, esas vestimentas se corresponden con las tonalidades de tintes amarillos.

Otro ejemplo realizado en tejidos, es el Muestrario de Fortuny perteneciente a la Colección de Guillermo de Osma (Figura 10).

² País: parte del abanico, realizado habitualmente en tela o papel, que sirve de soporte a las varillas que configuran el esqueleto del abanico (Restauración, 2015).

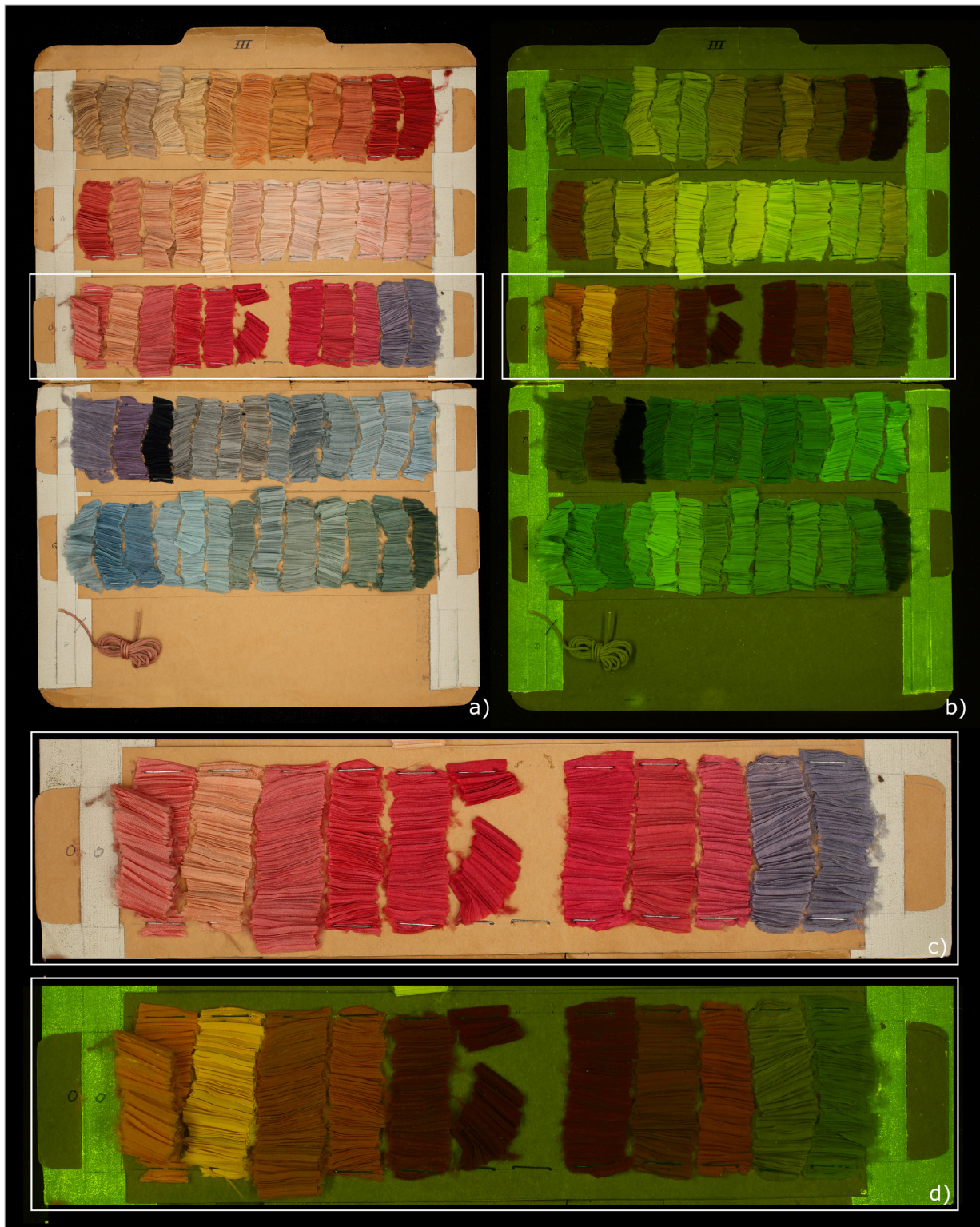


Figura 10. Fortuny, Muestrario Delphos, siglo XX. Colección de Guillermo de Osma: a) fotografía de referencia; b) FUV dominante verde; c) detalle fotografía de referencia; y d) detalle FUV dominante verde. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

La comparación de las imágenes obtenidas permite observar que, aunque las sedas con tonalidades verdes y azules no muestran variaciones significativas entre sí, existen diferencias destacadas en la gama de tonos rojos (Figura 10.c y 10.d).

Tal y como se ha señalado, una de las principales características de la técnica es su eficacia a la hora de poder distinguir diferentes materiales de similar apariencia en la fotografía en el rango visible. En la arqueta de hueso del Museo Nacional de Artes Decorativas, se detectaron piezas de distinta naturaleza tanto en la tapa como en la base ajedrezada (Figura 11).

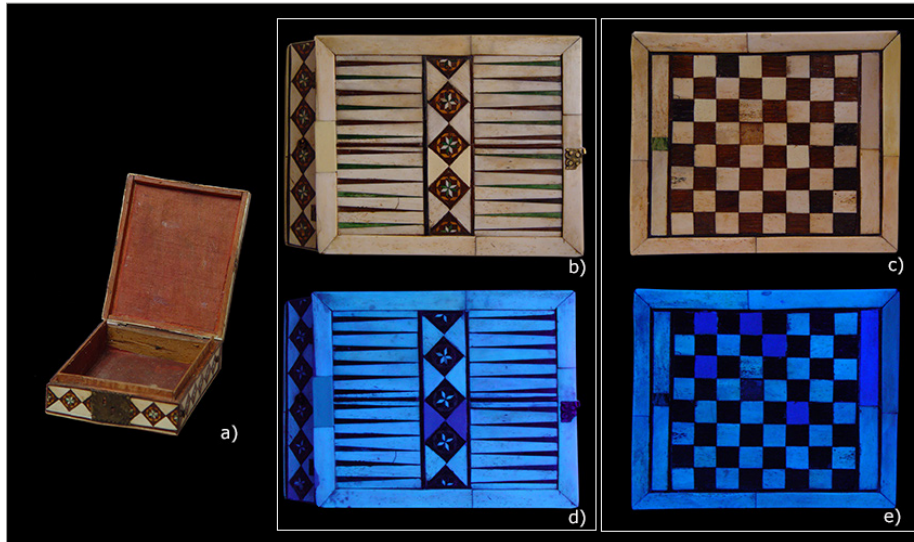


Figura 11. Anónimo, Arqueta hueso, 1501=1600. Museo Nacional de Artes Decorativas, Madrid: a) fotografía de referencia de la arqueta abierta; b) fotografía de referencia de la tapa; c) fotografía de referencia de la base; d) FUV dominante azul de la tapa; y e) FUV dominante azul de la base. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

A pesar de todas las aplicaciones descritas, en ocasiones, la imagen obtenida mediante esta técnica no pone de manifiesto lo que cabría esperar en cuanto a intervenciones o repintes. A continuación se especifica uno de estos ejemplos. La obra de la figura 12 forma parte de un estudio de retratos de tipo velazqueño. Se trata del retrato de Mariana de Austria perteneciente al Museo del Greco de Toledo.

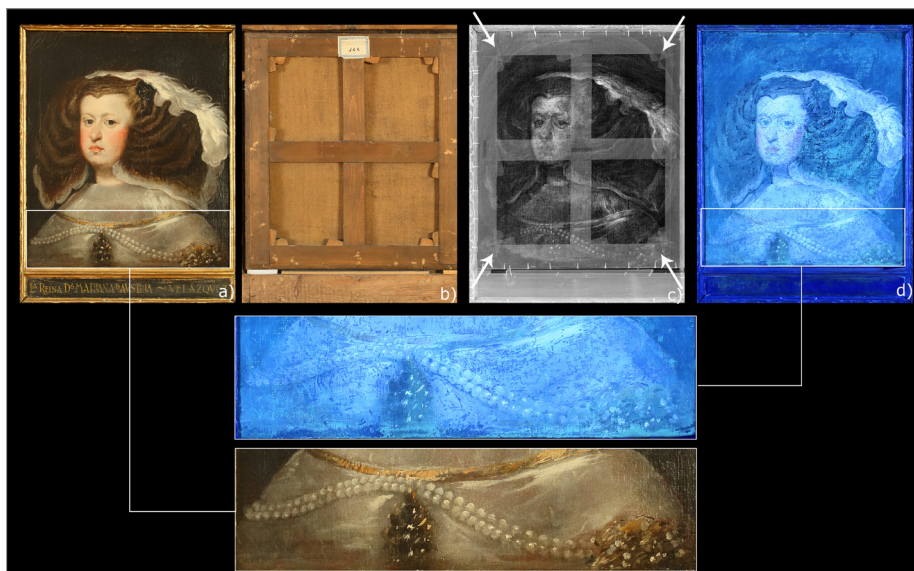


Figura 12. Taller de Velázquez, Doña Mariana de Austria, 1655, Museo del Greco. Toledo: a) fotografía de referencia del anverso y detalle del collar y la joya; b) fotografía de referencia del reverso; c) radiografía; d) FUV dominante azul y detalle zona del collar y la joya. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

La imagen realizada bajo radiación ultravioleta, pone de manifiesto algunas intervenciones en la obra que se describen a continuación. Por un lado, en la parte inferior del marco, se observa una zona añadida con una tonalidad más oscura (Figura 12.d). También se puede observar un mapa detallado de pequeños retoques muy sutiles.

En la imagen radiográfica (Figura 12.c), se detecta un espacio ovalado en el que se inscribía el retrato en origen. Esto significa que en algún momento de su historia se prolongó la pintura del retrato, añadiéndose el detalle de las flores y la zona inferior del pecho. Sin embargo, este añadido en pintura pasa desapercibido en la imagen FUV. Se podría valorar que, tal vez, los materiales empleados para esa ampliación fueran los mismos que los usados en el resto del retrato, o puede que no haya transcurrido mucho tiempo desde el origen de la obra hasta su transformación.

Por otra parte, observando la zona de la cadena dorada y la joya, apenas se detectan retoques bajo la radiación ultravioleta. En este caso, ambos elementos serían compatibles con un añadido posterior.

Sin duda, las múltiples aplicaciones de la técnica FUV, han quedado patentes a través de este variado recorrido representado por obras de diversos materiales. Es obvio comentar que la técnica por sí sola no permite caracterizar materiales, aunque sí ofrece zonas de interés para un posterior análisis mediante el empleo de otras técnicas.

A continuación se desarrollarán los aspectos más importantes relacionados con la técnica VII, así como sus principales utilidades y algunos casos de estudio.

Fotografía de luminiscencia en el rango infrarrojo inducida por radiación visible (VIL)

Se trata de una técnica utilizada para la captación de determinados pigmentos que emiten luminiscencia en el rango del infrarrojo bajo la luz visible. Tal y como se ha mencionado al inicio de este artículo, uno de los hitos que hicieron posible el desarrollo de esta técnica es el descubrimiento de la radiación infrarroja (de longitud de onda más larga y menos energética que la radiación visible) por William Herschel, en 1800.

Según la CIE³, su rango dentro del espectro electromagnético se sitúa entre los 780 nm y 1 mm. La subdivisión que plantea esta comisión es:

- De 780 nm a 1 400 nm: IR- A.
- De 1400 nm a 3000 nm: IR- B.
- De 3000 nm a 1 mm: IR-C.

Sin embargo, a lo largo de este texto se usarán las subdivisiones establecidas por la norma ISO 20473: 2007⁴, que especifica la división de la radiación para aplicaciones dentro del ámbito óptico y fotónico, de tal manera que el rango infrarrojo se divide:

- De 780 nm a 3000 nm: IR cercano.
- De 3000 nm a 50.000 nm: IR medio.
- De 50.000 a 1 mm: IR lejano.

³ Para más información consultar: <https://cie.co.at/eilvterm/17-21-004>

⁴ Para más información consultar: <https://www.iso.org/standard/39482.html>

Entre las técnicas más desarrolladas en el rango infrarrojo para el estudio de los bienes culturales, destacan la fotografía y reflectografía dentro del infrarrojo cercano.

Las referencias al uso de la fotografía infrarroja se remonta a los años 30 mediante el empleo de cámaras analógicas convencionales a las que se acoplaban filtros para eliminar la radiación visible, y películas sensibles a la radiación infrarroja, llegando a la longitud de onda máxima de 900 nm. En cuanto a la reflectografía infrarroja, su aplicación se inicia en torno a los años 50, recibiendo un gran impulso en 1969, gracias al desarrollo del sistema Vidicón realizado por Asperen De Boer (De Boer, 1969: 96–118).

Dentro de la tecnología digital actual, la principal diferencia entre ambas técnicas reside en el rango al que es sensible el detector de cada cámara. El departamento de Estudios Físicos cuenta con cámaras para la realización de fotografía infrarroja cuyos sensores abarcan desde los 400 nm hasta los 1100 nm, y desde los 900 nm hasta los 1700 nm para la realización de reflectografía infrarroja⁵.

Para la aplicación de estas técnicas es imprescindible el uso de fuentes incandescentes que emiten radiaciones infrarrojas además de visibles. Además, en el caso de la fotografía infrarroja, hoy en día, también resulta indispensable la utilización de un filtro que elimine la radiación en el rango visible.

Respecto a la aplicación de la técnica de luminiscencia en el rango infrarrojo, la diferencia fundamental respecto a las técnicas citadas que se desarrollan en el mismo rango estriba en el uso de iluminación con emisión en el visible exenta de radiación infrarroja. Los diversos estudios realizados por Giovanni Verri y su equipo desde el año 2009 (Accorsi, *et al.*, 2009: 3392-3394) han permitido su aplicación y perfeccionamiento en diverso objetos del patrimonio cultural.

Aplicaciones en bienes culturales

Las aplicaciones de esta técnica no son tan amplias como las de la fotografía de fluorescencia inducida por radiación ultravioleta. Su uso se ha extendido en los últimos tiempos para la detección de pigmentos como el azul egipcio (CaCuSi₄O₁₀), un pigmento artificial compuesto por silicato de calcio y cobre. Se trata de uno de los primeros pigmentos fabricados desde la Antigüedad, aunque también se encuentra en la naturaleza en forma de mineral, la cuprorivaíta, pero de forma muy escasa. Otros pigmentos que emiten luminiscencia en el infrarrojo bajo la iluminación visible, son de tipo oriental como el azul y el púrpura Han, o los que presentan cadmio en su composición (Verri, 2009: 1011-1021).

Sistemas de captación y filtros

Las experiencias llevadas a cabo en el departamento han planteado un esquema de iluminación homogéneo, ubicando dos lámparas tipo LED a 45° del plano de la obra.

En cuanto a filtros, se han utilizado, de forma habitual en bienes culturales, los que bloquean el paso de la radiación a 760 nm y a 850 nm. Sin embargo, también se ha optado por el

⁵ Debido a su mayor longitud de onda respecto a la radiación visible, la radiación infrarroja es capaz de penetrar en la materia permitiendo la visualización de las capas subyacentes que componen el estrato pictórico de una obra. La mayor o menor transparencia de los distintos estratos depende, fundamentalmente, de su naturaleza y espesor. El uso más extendido de la técnica se basa en la detección del dibujo subyacente, por lo que su visualización está determinada por la reflectancia de la radiación infrarroja producida en la capa de preparación, y el contraste derivado de la absorción de la radiación del material utilizado para la realización del dibujo. (Gabaldón, Antelo, Vega, y Bueso, 2004).

empleo de otros filtros que bloquean longitudes de onda inferiores a 680 nm, 720 nm y 950 nm en probetas que contienen distintos pigmentos. Su aplicación y resultados serán descritos en el siguiente apartado.

Casos de estudio

La aplicación de la técnica se ha llevado a cabo en tres piezas egipcias pertenecientes al Museo Arqueológico Nacional: una escultura que representa a Osiris y dos máscaras funerarias.

En la escultura Osiris, se puede visualizar el pigmento azul egipcio en la zona del tocado, tanto de frente como en la parte trasera, y en la barba, cuya extensión puede ser perfectamente delimitada con la técnica. Con el filtro que corta a 760 nm se intuye el pigmento, aunque la luminiscencia destaca con mayor intensidad con el empleo del filtro a 850 nm (Figura 13).

En la primera máscara se empleó el filtro a 760 nm, determinando que los restos del azul egipcio se concentraban en la zona superior del tocado (Figura 14.a). Sin embargo, el empleo de la técnica con el mismo filtro en la segunda máscara no permitió valorar la presencia de ningún indicio del pigmento visualizado en las otras dos esculturas (Figura 14.b).

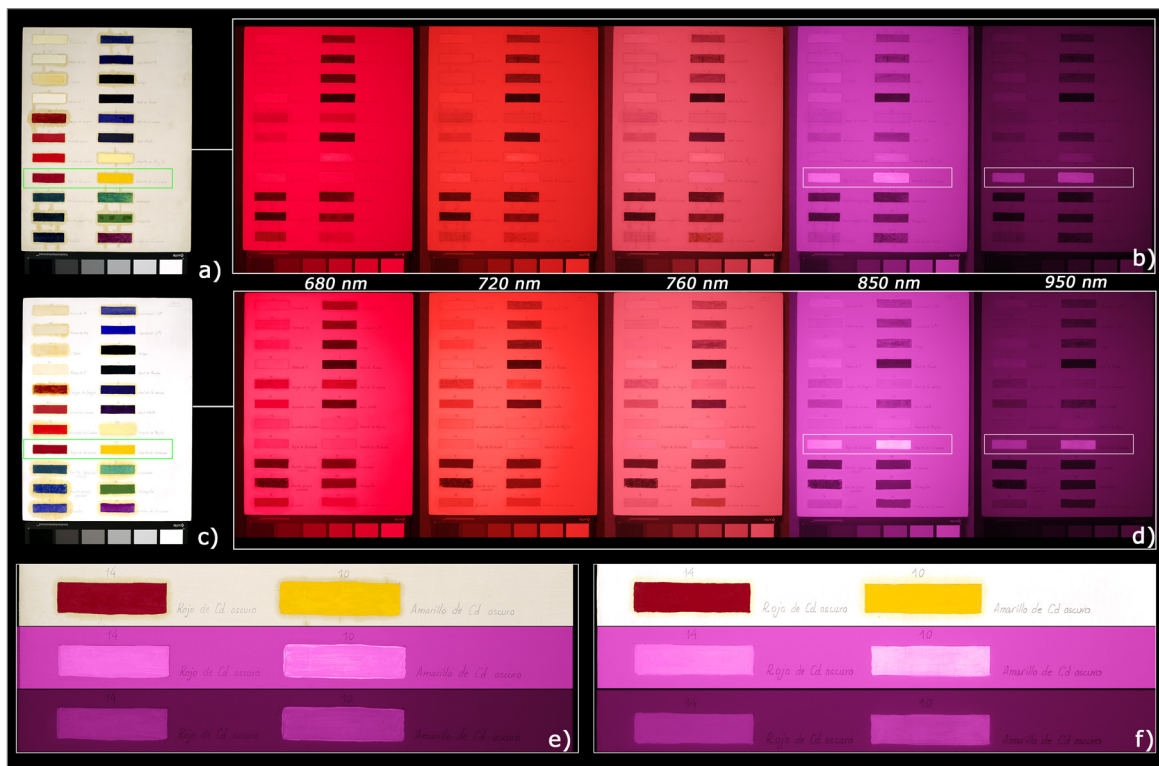


Figura 13. Anónimo, Estatuilla de Ptah-Sokaris-Osiris, Baja Época (cultura egipcia), Museo Arqueológico Nacional, Madrid: a) Fotografía de referencia frontal y lateral izquierdo (fotografía de CROAPE, Servicio de Conservación y Restauración de Obras de arte, Patrimonio arqueológico y Etnográfico); b) esquema de iluminación; Detalle frontal c) VIL con filtro a 760 nm, fotografía visible de referencia y VIL con filtro a 850 nm; y detalle de la parte trasera d) fotografía visible de referencia y VIL con filtro a 760 nm. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).



◀ **Figura 14.** Anónimo, Máscaras funerarias, tercer Periodo Intermedio (Cultura egipcia). Museo Arqueológico Nacional, Madrid: a) fotografía de referencia e imagen VIL con filtro a 760 nm; y b) fotografía de referencia e imagen VIL con filtro a 760 nm. Fotografía: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

▼ **Figura 15.** Dos probetas con distintas preparaciones y pigmentos de los siglos xv y xvi hasta la actualidad: a) probeta con preparación de sulfato de calcio (CaSO_4); b) imágenes VIL con filtros que cortan a: 680 nm, 720 nm, 760 nm, 850 nm, y 950 nm; c) probeta con preparación de carbonato de calcio (CaCO_3); d) imágenes VIL con filtros que cortan a: 680nm, 720 nm, 760 nm, 850 nm, y 950 nm; e) fotografía de referencia de detalle los pigmentos rojo y amarillo compuestos por cadmio en la probeta de sulfato de calcio, y su respuesta en la imágenes VIL con filtros a 850 nm y a 950 nm; y f) fotografía de referencia de detalle los pigmentos rojo y amarillo compuestos por cadmio en la probeta de carbonato de calcio, y su respuesta en la imágenes VIL con filtros a 850 nm y a 950 nm. Fuente: Departamento de Estudios Físicos. Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).



Para poder valorar la aplicación de la técnica en pigmentos de cadmio, se optó por su aplicación en dos probetas, con preparaciones de carbonato de calcio (CaCO_3) y sulfato de calcio (CaSO_4), que contienen los mismos tipos de pigmentos aglutinados con óleo, algunos de ellos empleados desde los siglos xv y xvi, y otros más modernos (Figura 15).

En ambas probetas se realizaron un total de cinco capturas con cada uno de los filtros especificados en la figura 15. En las imágenes de los filtros que cortan a 850 nm y 950 nm se puede observar la fluorescencia brillante emitida por dos pigmentos que se corresponden con el rojo oscuro y el amarillo oscuro de cadmio.

Conclusiones

Las técnicas de luminiscencia fotoinducida se han configurado como un procedimiento fundamental, que no sólo sirven de apoyo a la fase de restauración, sino que constituyen una herramienta imprescindible en el proceso de documentación de las obras de arte. La particularidad de estas técnicas es que no requieren de toma de muestra y, además, identifican puntos de interés para otras técnicas de análisis de materiales, permitiendo una elección cuidadosa y optimizada de la zona a examinar.

Sin duda, ahondar en sus múltiples posibilidades permitirá ampliar y profundizar en su estudio, pero se hace indispensable favorecer el camino hacia una metodología de captación que permita establecer patrones de correspondencia entre materiales y luminiscencias, para poder establecer comparativas con resultados estandarizados.

Agradecimientos

A mis compañeras Inmaculada Donate, Beatriz Mayans y Carmen Vega, por sus observaciones, sugerencias y comentarios en la realización de este texto.

A los que han dejado su huella en el departamento: Araceli Gabaldón, Tomás Antelo, Ángeles Anaya, Rocío Bruquetas, Miriam Bueso, Alfonso Domingo y Pilar Borrego.

Bibliografía

- ACCORSI, G., VERRI, G., BOLOGNESI, M., ARMAROLI, N., CLEMENTI, C., MILIANI, C. y ROMANI, A. (2009): «The exceptional near-infrared luminescence properties of cuprorivaite (Egyptian blue)». En *Chemical Communications*, (23), pp. 3392-3394. Disponible en: doi: 10.1039/b902563d [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- BACCI, M. (2019): «Aspectos clave en la teoría de los fenómenos luminiscentes». En *UV-Vis Luminescence imaging techniques/Técnicas de imagen de luminiscencia UV-Vis*. Colección *Conservation 360°*, (1), Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, pp. 29- 34. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/138517> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- BERTALAN, S. (2015): «Foxing and Reverse Foxing: Condition Problems in Modern Paper and the Role of Inorganic Additives». En *The Book and Paper Group Annual 34*, pp. 13-22. Disponible en: <https://cool.culturalheritage.org/coolaic/sg/bpg/annual/v34/bpga34-02.pdf> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- CARCELÉN, L. A. y MOZO, A. G. (2005): «Uso de la luz ultravioleta para el estudio del estado de conservación de la pintura de caballete». En *Actas del II Congreso del GEIIC. Investigación en Conservación y Restauración CD*, pp. 1-12. Disponible en: https://www.ge-iic.com/wp-content/uploads/2006/07/El_uso_de_la_luz_ultravioleta.pdf [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- BERG, H. (2008): «Johann Wilhelm Ritter-the founder of scientific Electrochemistry». *Review of Polarography*, 54 (2), pp. 99-103. Disponible en: <https://doi.org/10.5189/revpolarography.54.99> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- CORRECHER, V. y GARCIA-GUINEA, J. (2015): «Técnicas Luminiscentes». En *Análisis químico mediante técnicas espectroscópicas moleculares*. Madrid: Editorial Ciemat, pp. 1-46. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/V-Correcher/publication/284837661_Tecnicas_Luminiscentes/links/584561a108ae2d217567c4b7/Tecnicas-Luminiscentes.pdf [Consultado el 12 de diciembre de 2021].

- CIE (s.f.): *About the CIE (International Commission on Illumination / Commission internationale de l'Eclairage / Internationale Beleuchtungskommission)*. Disponible en: <http://cie.co.at/about-cie> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- DE BOER, J. V. A. (1969): «Reflectography of Paintings Using an Infrared Vidicon Television System». *Studies in Conservation*, 14 (3), pp. 96-118. Disponible en: doi: 10.2307/1505392 [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- DYER, J., VERRI, G. y CUPITT, J. (2013): «Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence Modes: A User Manual». Londres: European CHARISMA Project, British Museum. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Giovanni-Verri-2/publication/267266175_Multispectral_Imaging_in_Reflectance_and_Photo-induced_Luminescence_modes_A_User_Manual/links/5448e7560cf2d62c3052d2b7/Multispectral-Imaging-in-Reflectance-and-Photo-induced-Luminescence-modes-A-User-Manual.pdf [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- DONATE, I., GARCÍA, A. R., VEGA, C., MAYANS, B., MARTÍN, M. y BUESO, M. (2021): «An application of near-infrared reflectance imaging spectroscopy on historical studies: differentiation of painting ground layers from the 15th and 16th centuries». *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VIII*, vol. 11784, p. 117841E. Disponible en: <https://doi.org/10.1117/12.2593714> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- GABALDÓN, A., ANTELO, T., VEGA, C. y BUESO, M. (2004): «Un espacio para lo invisible». En *La Ciencia y el Arte 1*. Madrid: Secretaría General Técnica, Subdirección General de Publicaciones, Información y Documentación, pp. 25-37. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/00007533584c6b757a9fb> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- GRANT, M.S. (2000): «The use of ultraviolet induced visible fluorescence in the examination of museum objects», Part II. National Park Service. *Conserve O Gram*. N° 1/10. Disponible en: <https://www.nps.gov/museum/publications/consveogram/01-10.pdf> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- ISO (s.f.): *ISO 20473:2007*. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/39482.html> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- MONTERO, J. (2018): *Informe de Fluorescencia de Rayos X de la obra Virgen con el Niño. Copia de Robert Campin*. No publicado.
- MEASDAY, D. (2017): «A summary of ultra-violet fluorescent materials relevant to Conservation». *Australian Institute for the Conservation of Cultural Material, Museums Victoria*. Disponible en: <https://aiccm.org.au/network-news/summary-ultra-violet-fluorescent-materials-relevant-conservation/> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- NAVARRO, J. V. (2019): *Análisis de dos fragmentos de pintura mural romana con grafitos del yacimiento de Santa Criz (Eslava, Navarra)*. No publicado.
- PIDRE, J. C. y GONZÁLEZ, C. J. C. (2015): «Análisis del color RGB». En *Seminario técnico sobre iluminación. 2015 Año Internacional de la luz*. Vigo, 29 y 30 de Junio de 2015. Vigo: Universidad de Vigo, pp. 140 - 169. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5199484.pdf> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- RESTAURACIÓN, A. (2015): «Los abanicos de colección: sus patologías y su conservación». *Ge-conservación*, n° 8, pp. 107-121. <https://doi.org/10.37558/gec.v8i0.297> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- RORIMER, J. J. (1929): «Marble Sculpture and the Ultra-Violet Ray». *The Metropolitan Museum of Art Bulletin*, 24 (7), 185-186. Disponible en: doi: 10.2307/3255556 [Consultado el 12 de diciembre de 2021].

- RORIMER, J. J. (1931): *Ultra-violet rays and their use in the examination of works of art*. Nueva York: The Metropolitan Museum of Art.
- SALGUERO, M. (2015): «La Sábana Santa de Campillo de Aragón, entre las mejores». *Heraldo de Aragón*, 2 de abril. Disponible en: <https://www.heraldo.es/noticias/sociedad/2015/04/02/la-sabana-santa-de-campillo-de-aragon-entre-las-mejores-329458.html> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- SHARMA, S. y SHARMA, A. (2016): «Robert Williams Wood: pioneer of invisible light». *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, 32 (2), pp. 60-65. Disponible en: doi: 10.1111/phpp.12235 [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- STOKES, G. G. (1852): «On the change of refrangibility of light». *Philosophical transactions of the Royal Society of London* (142), pp. 463-562. Disponible en: doi: 10.1098/rspl.1850.0071 [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- VEGA, C. (2018): *Estudio técnico mediante reflectografía y espectroscopía de imagen por reflectancia difusa en el rango infrarrojo en bienes culturales en proceso de investigación y restauración en el IPCE, de la obra Virgen con Niño, Robert Campin (copia) del Museo Lázaro Galdiano*. Grupo de Aplicación de Telecomunicaciones Visuales - GATV Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. No publicado.
- VERRI, G. (2009): «The spatially resolved characterisation of Egyptian blue, Han blue and Han purple by photo-induced luminescence digital imaging». *Analytical and bioanalytical chemistry*, 394 (4), pp. 1011-1021. Disponible en: doi: 10.1007/s00216-009-2693-0 [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- WEBB, E. K. (2019): «Luminiscencia visible inducida por UV para la documentación en conservación». En *UV-Vis Luminescence imaging techniques/Técnicas de imagen de luminiscencia UV-Vis*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, p. 38-43. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/138517> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].

Macro-fotogrametría para la digitalización 3D de especímenes

Aleix Barberà Giné*

Conservador-restaurador de bienes culturales
Profesor asociado de la Universitat de Lleida
aleixbg@gmail.com

Sergi Gago Carrión

Myrmex. Serveis tècnics a les ciències naturals SL- MCNB
sgagoc@gmail.com

Eulàlia Garcia Franquesa

Museu de Ciències Naturals de Barcelona
egarciafr@bcn.cat

Resumen: Se describe la puesta a punto de una metodología para la obtención de modelos 3D de especímenes de tamaño muy pequeño. Disponer de ella permitirá al Museu de Ciències Naturals de Barcelona (MCNB) ampliar la creación de colecciones virtuales. Éstas aportan valor al patrimonio ya que amplían las posibilidades de estudio científico minucioso a distancia, disminuyen el riesgo de transportes de materiales frágiles y aumentan la visualización del patrimonio, entre otros. Así como hacen accesible el patrimonio no expuesto para proyectos educativos y de divulgación general.

Actualmente se están desarrollando equipos y procesos que permitan acometer este reto. En el proyecto se ha desarrollado una metodología para el uso de la macrofotografía con *focus stacking* para la obtención de imágenes que posteriormente permitan la obtención de modelos tridimensionales con fotogrametría.

Los equipos utilizados han sido una cámara Canon® EOS-5DS R con objetivo Canon® MP-E 65 mm montada en un controlador Cognisys® que permite automatizar todo el proceso de obtención de fotografías (el movimiento del carril micrométrico para desplazar la cámara y del plato giratorio donde rota el espécimen). Se han montado los *stacks* enfocados con Helicon® Focus y la creación del modelo tridimensional se ha procesado con programas fotogramétricos. Los resultados han permitido obtener modelos tridimensionales de calidad, de especímenes a partir de 2-3 mm de dimensión total, con la captura del detalle como patas o antenas. Se valoran las ventajas e inconvenientes de esta aproximación a la digitalización de muestras muy pequeñas.

Palabras clave: Fotogrametría, apilamiento de enfoque, 3D, especímenes, historia natural.

Abstract: The development of a methodology for obtaining 3D models of very small specimens is described. This technique will allow the Museu de Ciències Naturals de Barcelona (MCNB) to increase virtual collections. These add value to the heritage as they expand the possibilities of remote studying detailed scientific, reducing the risk of transporting fragile materials and increase the visualization of the heritage, among others. As well as making unexposed heritage accessible for educational and general dissemination projects.

Different equipment and processes are currently being developed to meet this challenge. The project has developed a methodology for the use of macro-photography with focus stacking to obtain images that subsequently allow obtaining three-dimensional models with photogrammetry.

The equipment used was a Canon® EOS-5DS R camera with a Canon® MP-E 65 mm lens mounted on a Cognisys® controller that automates the entire process of obtaining photographs (the movement of the micrometric rail to move the camera and the turntable where the specimen rotates). The stacks have been mounted focused with Helicon® Focus and the creation of the three-dimensional model has been processed with photogrammetric software. The results have allowed to obtain high quality three-dimensional models of specimens from 2-3 mm in total dimension with the capture of details such as legs or antennae. The advantages and disadvantages of this approach to the digitization of very small specimens are evaluated.

Keywords: Photogrammetry, focus stacking, 3D, specimens, natural history.

Introducción y antecedentes

El Museu de Ciències Naturals de Barcelona (MCNB) inaugurado en 1882, conserva una colección de más de dos millones doscientos mil especímenes de geología, paleontología y zoología. Las colecciones de minerales y rocas representan el 2,05% de la colección, las de fósiles el 7,43%, mientras que los ejemplares zoológicos suman el 90,52% del total de la colección. De éstos, 1.900.000 ejemplares (el 93,63% de la zoología) son artrópodos, la mayoría insectos. Así pues, la colección está compuesta por ejemplares de talla pequeña o muy pequeña. Además, como en la mayoría de museos de historia natural, la mayor parte de los ejemplares no están expuestos, sino conservados en la reservas. Los ejemplares se hacen accesibles a través de consultas, préstamos, bases de datos y portales en Internet.

En patrimonio natural es importante el concepto *extended specimen* (Webster, 2017), basado en el potencial de los ejemplares ornitológicos para la investigación clave sobre aspectos de las aves a nivel mundial. Los ejemplares, su información asociada, como por ejemplo las imágenes, la aplicación de diferentes técnicas de estudio o el análisis masivo de datos, permiten que las colecciones sean más accesibles y útiles para los investigadores y los proyectos educativos. Las imágenes de los ejemplares dan acceso a la verificación y validación de la identificación de las especies. Las nuevas técnicas de obtención y análisis (por ejemplo, escáner, tomografía computerizada, isótopos, Inteligencia Artificial) están desvelando nuevos datos y nueva información relativa a los ejemplares (Lendemer *et al.*, 2020:24).

Desde hace varios años el MCNB está realizando fotografías que acompañan la información de los ejemplares, por ejemplo para hacer públicos los Ejemplares TIPO¹. Además el MCNB tiene un Atlas osteológico 3D² elaborado a partir de la colección de esqueletos de animales vertebrados. Los modelos 3D de esta colección se obtuvieron con el escáner NextEngine, los modelos se editaron y trabajaron con Meshlab. La colección consta de más de 300 modelos de cráneos y mandíbulas de diferentes especies de vertebrados.

¹ Consulta en: <https://www.bioexplora.cat/WIKICOLLECTA/index.php/es/especimens-tipus/ficha-completa> [consulta 5 de diciembre de 2021].

² Consulta en: <https://www.bioexplora.cat/es/atlas-osteologico/> [consulta 5 de diciembre de 2021].

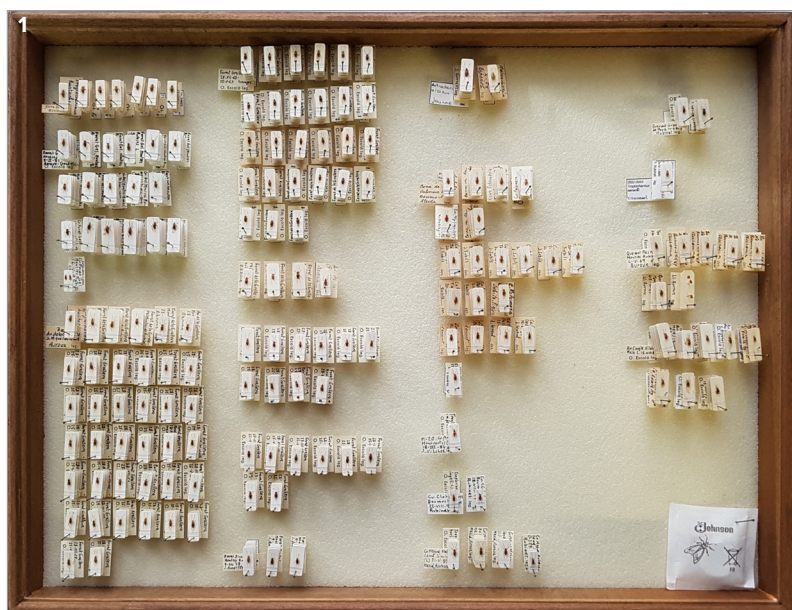


Figura 1. Caja entomológica de especímenes de la colección de Artrópodos Coleoptera Leioidae del MCNB. CC-BY. Fotografía: MCNB.



Figura 2. Lote de varios moluscos (MZB 78-0051 *Cochlodinella poeyana* d'Orbigny, 1841). CC-BY. Fotografía: MCNB-JDG.



Figura 3. Lote de fósiles (MGB 39769 *Alveolina oblonga* d'Orbigny, 1826). CC-BY. Fotografía: MCNB.

Uno de los modelos más pequeños es el cráneo de gorrión común (MZB 85-0163 *Passer domesticus*)³ y uno de los mayores el cráneo de hipopótamo (MZB 82-0410 *Hippopotamus amphibius*)⁴ que tiene un largo de 56 cm. Algunos modelos de gran tamaño han sido obtenidos por fotogrametría. Por ejemplo, el esqueleto montado de gorila (MZB 99-1309 *Gorilla gorilla*)⁵ y el cráneo de elefante africano (MZB 93-0002 *Loxodonta africana*)⁶.

Con la creación y publicación de imágenes de ejemplares, el MCNB se propone:

- Dar accesibilidad a elementos de la colección no expuestos.
- Evitar viajes y envíos innecesarios de investigadores e investigadoras, para realizar consultas presenciales o préstamos.
- Aumentar la utilización de los ejemplares con finalidad científica; estudio de la forma (morfometría geométrica), estudios de evolución y filogenia en especies zoológicas.
- Emplear las imágenes y modelos 3D para proyectos pedagógicos y, de difusión al público general, a través de los diferentes proyectos en la web.

La mayoría de los especímenes de la colección son de talla muy pequeña, desde pocos centímetros a pocos milímetros: insectos (Figura 1), moluscos (Figura 2) o fósiles (Figura 3), entre otros. El objetivo del presente trabajo es poner a punto una técnica de obtención de modelos 3D de especímenes pequeños.

Actualmente existen básicamente tres metodologías distintas para la digitalización 3D de objetos y especímenes del mundo real (Brecko y Mathys, 2020). En primer lugar se podría considerar

³ Consulta en: https://www.bioexplora.cat/es/atlas-osteologico/mzb_85-0163/491 [consulta 5 de diciembre de 2021].

⁴ Consulta en: https://www.bioexplora.cat/es/atlas-osteologico/mzb_82-0410/718 [consulta 5 de diciembre de 2021].

⁵ Consulta en: <https://sketchfab.com/3d-models/gorilla-gorilla-mounted-skeleton-dbd34e4b47d4823bd9d041cff6e296f> [consulta 5 de diciembre de 2021].

⁶ Consulta en: https://www.bioexplora.cat/es/atlas-osteologico/mzb_93-0002/714 [consulta 5 de diciembre de 2021].

el modelado 3D utilizando herramientas de esculpido digital para recrear la realidad. Esta metodología de trabajo tiene la problemática de que se basa en la interpretación del autor y sus habilidades técnicas, y puede no ser fiel con la exactitud suficiente para la digitalización de un espécimen concreto para su estudio científico.

En segundo lugar se puede valorar el uso de los escáneres 3D, de entre los que existen múltiples tecnologías y posibilidades (Daneshmand *et al.*, 2018). Basándonos en la experiencia previa en el MCNB para la digitalización de especímenes, son una herramienta versátil y útil para muchos casos de digitalización 3D de especímenes. Aun así, su precisión variable en torno las 10-100 micras (en función de los equipos) hace que no sea suficiente para capturar las complejas geometrías de especímenes de medidas inferiores al centímetro, donde el grueso de elementos como patas o antenas excede estos valores críticos en muchos casos.

De entre los distintos equipos de escaneo probablemente el único que sería capaz de capturar con el suficiente detalle geométrico los especímenes más pequeños sería la microtomografía computarizada (μ CT), pero tiene la limitación de ser un equipo muy específico, costoso y que no es capaz de capturar el color o textura de los modelos (Keklikoglou *et al.*, 2019).

Finalmente, se puede considerar la digitalización 3D con fotogrametría (Koutsoudis *et al.*, 2014), una técnica que se basa en el procesado de múltiples fotografías de un mismo objeto. Entre los muchos puntos fuertes de esta metodología de trabajo se encuentran sus bajos costes, la facilidad de uso, la calidad de las texturas y, en especial, la versatilidad de la técnica. Contamos con experiencias previas de su uso en el MCNB con especímenes de dimensiones distintas (a partir de 5-10 cm) y con referencias bibliográficas para la obtención de modelos 3D de insectos y especímenes de tamaño milimétrico combinando fotogrametría, fotografía macro y el apilamiento de enfoque (Ströbel *et al.*, 2018; Nguyen *et al.*, 2014; Clini *et al.*, 2016; Santella y Milner, 2017).

El objetivo del presente estudio se basó en ensayar esta combinación de varias herramientas para valorar los resultados que se podían conseguir y definir un proceso de digitalización 3D de especímenes de pequeño tamaño de la colección del MCNB.

Material y métodos

El proceso de digitalización 3D que presentamos se basó en fotogrametría con imágenes obtenidas mediante fotografía macro con *focus stacking* con cámara Canon® EOS 5DS R (sensor CMOS *full frame* de 36x24 mm y 50,6 megapíxeles) y óptica de 65 mm macro Canon® MP-E *f*2.8 con aumentos de 1-5x. La obtención de imágenes se automatizó con el equipo Cognisys® Stackshot 3X *virtual object creation kit*. El procesado del apilamiento de imágenes se realizó con el programa Helicon Focus® y la creación de los modelos fotogramétricos se procesó con dos programas distintos para comparar los resultados obtenidos: Agisoft® Metashape Standard 1.7 y RealityCapture® 1.0.3 de Capturing Reality.

Fotogrametría

A modo de introducción, podríamos decir que la fotogrametría es una técnica que permite otorgar validez métrica a las fotografías corrigiendo las distorsiones ópticas o de perspectiva. Su uso se inició en el siglo XIX, y fue fundamental para la cartografía tomando como base las fotografías analógicas aéreas (Cheli, 2012). A día de hoy, con el desarrollo de la fotografía digital, los algoritmos de *structure from motion* (Micheletti *et al.*, 2015) y el avance de los equipos informáticos, la fotogrametría nos permite también la creación de modelos 3D a partir de imágenes digitales de una manera bastante automatizada. De hecho, en los últimos años la técnica ha realizado un gran salto cualitativo y su uso se ha democratizado, siendo accesible a instituciones patrimoniales.

Con la ayuda de programas específicos de fotogrametría, se pueden crear modelos tridimensionales basándose en fotografías de un mismo objeto. La única condición necesaria es que todos los puntos de ese objeto queden registrados como mínimo en 3 o más fotografías. De esta manera, se deben tomar sets de fotografías de un objeto desde todos sus puntos de vista para crear un modelo 3D mediante fotogrametría (Barberà, 2015).

Evidentemente, la calidad del modelo tridimensional vendrá determinada por la calidad de los equipos, la metodología de trabajo y, en especial, de las fotografías. Considerando que las imágenes son la materia primera de esta técnica, que definirán su versatilidad y escalabilidad, vamos a desarrollar con precisión el proceso de captura de fotografías y la selección de los distintos parámetros empleados antes de definir las cuestiones de procesamiento fotogramétrico.

Fotografía macro

La fotografía digital con lentes convencionales puede ser suficiente para la captura de especímenes de tamaño superior a los 5-10 cm aproximadamente. Cuando se requiera capturar los detalles más delicados de especímenes más pequeños conviene recurrir a la fotografía macro.

La fotografía macro es la que reproduce una imagen en una relación de tamaño 1:1 o superior, es decir, que un centímetro en el mundo real se proyecta como un centímetro en el sensor o película fotográfica. (Jover, 2011: 3). Básicamente, es aquella que permite capturar con detalle pequeños objetos, porque la imagen que se representa en el sensor tiene, por lo menos, la misma dimensión que en la realidad. Para definir la fotografía macro es entonces fundamental conocer el «aumento» (m) que se define como la relación entre el tamaño del objeto real (o) a fotografiar y la imagen que se captura en el sensor (i), donde $m=i/o$ (Gómez, 2017).

Esto se explica fácilmente al fotografiar una regla. Teniendo en cuenta que el sensor de una cámara *full frame* mide 36x24 mm, si en una fotografía se leen exactamente los 36 mm de la regla en el ancho de toda la fotografía, nos encontraremos ante un aumento de 1; donde m equivale a 1 puesto que los 36 mm del tamaño del sensor (i) se dividen por los 36 mm de la realidad capturada (o). En cambio, si en otras condiciones conseguimos una fotografía donde se leen 12 mm, si dividimos los 36 mm del sensor por los 12 mm del objeto real nos encontramos ante un aumento de 3 (Figura 4).

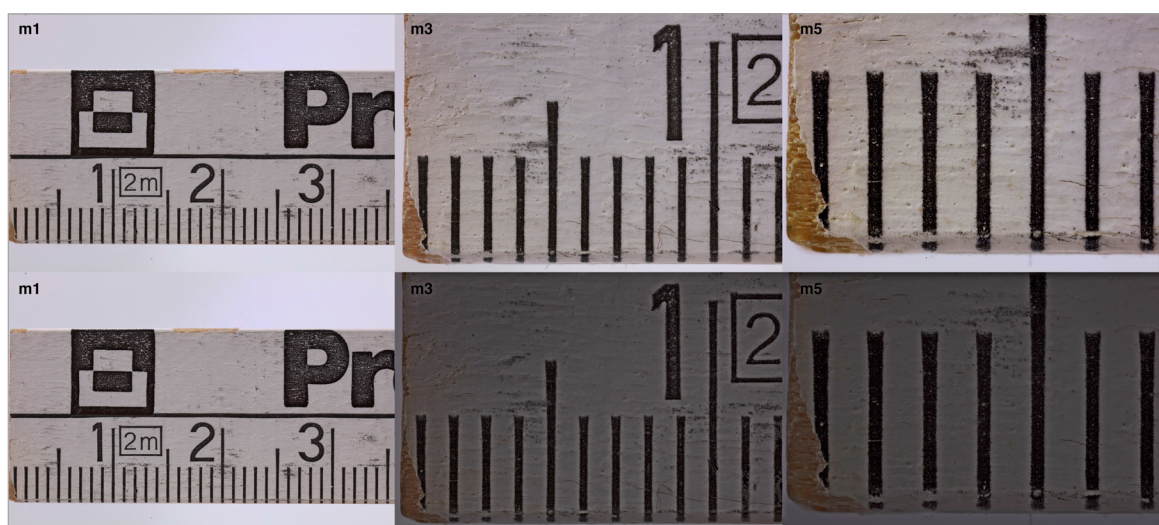


Figura 4. En la tira de imágenes superiores se ven tres fotografías macro con cámara *full frame* a 1 aumento (izquierda), 3 aumentos (centro) y 5 aumentos (derecha), compensando los valores de exposición. En la tira de fotografías inferiores se han mantenido constantes los parámetros de exposición 1/20s, diafragma $f/9$ e ISO100, de modo que se aprecia la reducción drástica de la luz en relación al aumento. Fotografía: Aleix Barberà Giné.

Es importante remarcar que esto debe ser conseguido con los objetivos que incorporemos a la cámara, u otros equipos como tubos de extensión y fuelles, puesto que el aumento tiene que ver con la dimensión de la realidad que se captura en el sensor o película fotográfica. No tiene que confundirse con ampliaciones que puedan conseguirse digitalmente *a posteriori*. Y también es importante remarcar que si no hay un aumento de 1 o superior no se trata de auténtica fotografía macro, sino que estaríamos hablando de fotografía de aproximación, donde hay menos limitaciones.

La fotografía macro conlleva diversos problemas que deberán resolverse. En primer lugar se trata de un tipo de fotografía extremadamente sensible a las vibraciones, con lo que es necesario trabajar en ambientes estables y sin vibraciones y con trípodes de alta calidad. De hecho, debido a esta gran sensibilidad puede incluso ser recomendable el uso de cámaras *mirrorless* para evitar el golpe del espejo que puede provocar vibraciones a estos aumentos en función de los parámetros de obturación.

Otra de las problemáticas que conlleva el macro es una pérdida de luz en relación al aumento. Conforme consigamos un mayor aumento en la fotografía, manteniendo constantes los parámetros de obturación, diafragma o ISO, vamos a ver disminuida drásticamente la luz que entra en el sensor. De este modo, a diferentes aumentos, necesitaremos modificar los parámetros para obtener una correcta exposición (Figura 4).

Esto se debe a que existe una distinción entre el número f del diafragma nominal, el que aparece en la lente, y el número f efectivo o real que se emplea (Fernández, 2021). El número f del diafragma nos indica la apertura relativa del diafragma y expresa la cantidad de luz que llega al sensor, de modo que si hay una distinción entre un número nominal y real afecta a la claridad de las fotografías que se obtienen.

El número f se calcula como la división entre la distancia focal de un objetivo por la apertura del diafragma enfocado a infinito. Pero en fotografía macro no se enfoca nunca a infinito, sino que el plano de enfoque se encuentra normalmente muy cercano al objetivo.

De esta manera se debe corregir este valor f , y la forma más sencilla de calcularlo es con la fórmula $f \text{ real} = f \text{ nominal} * (m+1)$ que indica que el valor real de f se consigue multiplicando el valor f nominal multiplicado por el aumento $+1$. Por lo tanto, en una fotografía macro con un aumento de 1, se multiplica por 2 el valor nominal de f ; con un aumento de 2 se multiplica por 3; con un aumento de 3 se multiplica por 4; y así sucesivamente.

Teniendo en cuenta estas limitaciones, lo más sencillo sería disparar con diafragmas muy abiertos, que permiten un mayor paso de luz y un menor tiempo de exposición, combinándolos con flash o iluminaciones continuas potentes.

Pero quizás una de las mayores limitaciones de la fotografía macro es su limitada profundidad de campo, en especial con los diafragmas más abiertos y luminosos. La profundidad de campo nos indica la distancia entre el punto más cercano y lejano en una imagen que aparecen correctamente enfocados.

Hay tres cuestiones principales que contribuyen a la profundidad de campo (Mellado, 2017: 33-36). Una de ellas es la distancia focal de la lente, donde a mayor distancia focal se consigue una menor profundidad de campo. En fotografía macro podemos considerar que esta relación implica que a mayor aumento la profundidad de campo se va reduciendo.

También afecta la distancia real entre el objeto y la cámara, siendo más limitada la profundidad de campo cuanto menor sea la distancia entre ambos. Esta circunstancia tiene una incidencia muy alta en fotografía macro, donde habitualmente la cámara se posiciona muy cercana al objeto a fotografiar.

Finalmente, y de más repercusión, la apertura del diafragma o número *f* real al que nos hemos referido con anterioridad. En diafragmas más cerrados se consigue mayor profundidad de campo que en diafragmas más abiertos (Figura 5).

Hay una fórmula para calcular exactamente la profundidad de campo (DOF) en la que se dispara una fotografía teniendo en cuenta básicamente el aumento (*m*) y la apertura nominal del diafragma (*N*). Añade además el parámetro del círculo de confusión (CoC), que es un valor estándar fijo en función de la dimensión del sensor. La fórmula Lefkowitz define que $DOF = 2 * CoC * N * [(m+1)/(m*m)]$ (Marziali y Dionisio, 2017: 300).

A efectos prácticos, el valor de profundidad de campo es constante en unas mismas condiciones de equipo para cada valor de aumento y de diafragma nominal. Resulta útil, entonces, calcular una tabla con las condiciones reales de trabajo que se consiguen (Tabla 1). Con una cámara *full frame* y un objetivo macro a un aumento de 1 se consiguen profundidades de campo al entorno de 2 mm con el diafragma más cerrado o escasos 0,3 mm con el diafragma más abierto. Conforme se incrementa el aumento, como se puede ver en la tabla, las profundidades de campo disminuyen drásticamente a fracciones de décimas de mm.

Finalmente otro inconveniente de la fotografía macro, donde por lo que se ha enumerado podría ser pertinente trabajar con diafragmas cerrados para conseguir una máxima profundidad de campo compensando la pérdida de luz con potentes



Figura 5. Distintas fotografías de una misma vista de una regla variando la apertura del diafragma donde se aprecia claramente su efecto en la profundidad de campo. Fotografía: Aleix Barberà Giné.

<i>N</i>	<i>m</i>	DOF	<i>m</i>	DOF	<i>m</i>	DOF	<i>m</i>	DOF	<i>m</i>	DOF
2,8	1	0,336	2	0,126	3	0,075	4	0,053	5	0,040
3,2	1	0,384	2	0,144	3	0,085	4	0,060	5	0,046
3,5	1	0,420	2	0,158	3	0,093	4	0,066	5	0,050
4	1	0,480	2	0,180	3	0,107	4	0,075	5	0,058
4,5	1	0,540	2	0,203	3	0,120	4	0,084	5	0,065
5	1	0,600	2	0,225	3	0,133	4	0,094	5	0,072
5,6	1	0,672	2	0,252	3	0,149	4	0,105	5	0,081
6,3	1	0,756	2	0,284	3	0,168	4	0,118	5	0,091
7,1	1	0,852	2	0,320	3	0,189	4	0,133	5	0,102
8	1	0,960	2	0,360	3	0,213	4	0,150	5	0,115
9	1	1,080	2	0,405	3	0,240	4	0,169	5	0,130
10	1	1,200	2	0,450	3	0,267	4	0,188	5	0,144
11	1	1,320	2	0,495	3	0,293	4	0,206	5	0,158
13	1	1,560	2	0,585	3	0,347	4	0,244	5	0,187
14	1	1,680	2	0,630	3	0,373	4	0,263	5	0,202
16	1	1,920	2	0,720	3	0,427	4	0,300	5	0,230

Tabla 1. Valores de profundidad de campo expresados en milímetros para el equipo utilizado: cámara Canon® EOS 5DS R con óptica de 65 mm macro Canon® MP-E f2.8. Se expresa para los posibles aumentos del equipo 1-5x (columnas *m*) y las distintas posibles aperturas nominales de diafragma (columna *N*), con valores calculados a partir de la fórmula Lefkowitz.

equipos de iluminación o flashes, es la aparición de los discos de Airy en estas condiciones (Langford, 1994: 57).

Con los diafragmas más cerrados se produce la difracción de la luz al atravesar un orificio más angosto que genera la pérdida de nitidez en la imagen (Figura 6). Es un fenómeno físico independiente de la calidad de los equipos que no hay manera de evitar. Por eso se necesita encontrar el «punto dulce» de la lente en función de la dimensión del sensor, y que suele establecerse entre dos y cuatro diafragmas por encima de la apertura máxima (Mellado, 2017: 37-39).

Para resolver todas estas circunstancias y limitaciones derivadas de la necesidad del uso de la fotografía macro, pero al mismo tiempo poder trabajar en los diafragmas óptimos sin perder profundidad de campo ni nitidez en la totalidad de la imagen se incorporó una técnica complementaria conocida como *focus stacking* o apilamiento de imágenes (Geiger, 2013).

El apilamiento de imágenes

Se trata de una técnica que consiste, básicamente, en tomar distintas fotografías de un mismo objeto y punto de vista donde va cambiando el punto de enfoque. Se puede llevar a cabo mediante dos métodos bastante similares: o bien desplazando la cámara unas micras o bien moviendo la anilla de enfoque y dejando la cámara fija. El objetivo, en ambos casos, es ir tomando fotografías donde la zona del objeto que aparece enfocada, según la profundidad de campo definida por el diafragma y aumento seleccionados, se vaya desplazando de atrás hacia adelante hasta registrar correctamente todo el espécimen (Brecko *et al.*, 2014).

En función del diafragma seleccionado obtendremos una mayor o menor profundidad de campo, con lo que tendremos que desplazar la cámara una distancia menor o mayor en cada paso teniendo en cuenta este parámetro y que, además, debe existir un cierto solape entre las zonas enfocadas de cada fotografía.

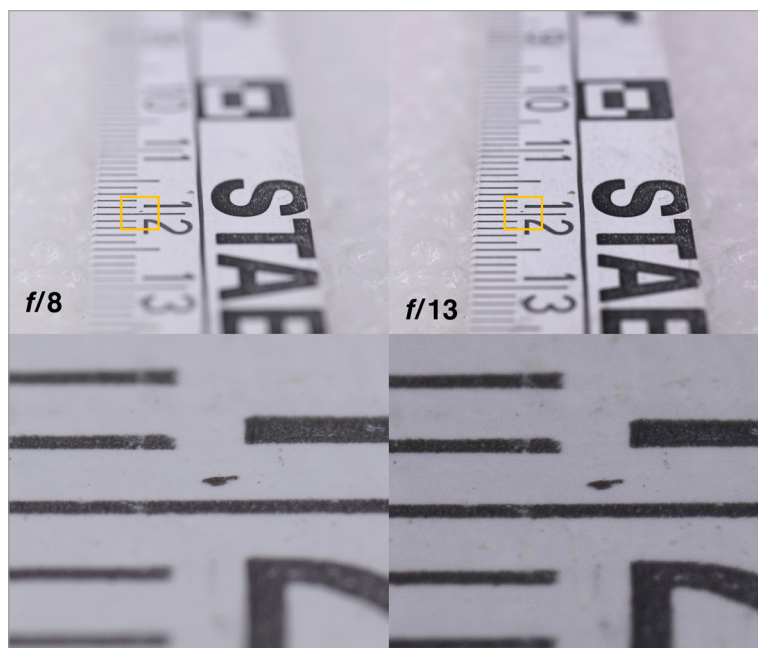


Figura 6. Aunque con un diafragma más cerrado se consiga una mayor área de enfoque, la imagen pierde nitidez cuando aparece la difracción de la luz. Mientras que en un diafragma más abierto la profundidad de campo es menor, la zona enfocada aparece más nítida. Fotografía: Aleix Barberà Giné.

Una vez se ha obtenido todo el set de imágenes para un mismo punto de vista, hay distintos programas de apilamiento de enfoque que permiten seleccionar las zonas enfocadas de cada imagen para combinarlas y crear una sola fotografía final donde todo el espécimen aparece nítido y enfocado, que se conoce como fotografía EDOF (*extended depth of field*) o fotografía con extensión de la profundidad de campo (Figura 7).

De entre los distintos programas disponibles, basándonos en la experiencia previa del MCNB, se empleó Helicon® Focus. De entre los tres métodos de apilamiento que ofrece el programa se han obtenido mejores resultados con los sistemas «Mapa de profundidad» y «Pirámide», con valores de suavizados bajos. El procesado de las imágenes se ha basado siempre en los archivos RAW originales y la exportación ha sido en el formato .DNG para poder hacer un revelado de imagen posterior y conservar la máxima calidad posible de detalle.

Es importante recalcar que en función de la profundidad de campo, esto es, del diafragma empleado, cada *stack* final requerirá de más o menos fotografías de paso, con el volumen de tiempo, trabajo y datos que esto puede conllevar. Si el objetivo es conseguir una única fotografía quizás no fuera este un tema de preocupación, pero conviene prever que se pueden requerir alrededor de unas 100 a 200 fotografías finales por espécimen para procesarlas con fotogrametría en función de su complejidad. Por consiguiente, se debe optimizar al máximo los parámetros de fotografía para minimizar los tiempos de trabajo y el volumen de datos a procesar.

Automatización del proceso de captura de imágenes

Una incorporación fundamental para el proceso de obtención de imágenes es el equipo Cognisys® 3X *virtual object creation kit*. Consta de un carril micrométrico para el desplazamiento controlado de la cámara, una rótula giratoria para el desplazamiento del espécimen y un controlador que une estos dispositivos con la cámara y permite automatizar todo el proceso de obtención de fotografías en un círculo de 360°.

El flujo de trabajo que proponemos sería el de montar la cámara con el objetivo macro en el carril micrométrico motorizado sobre un trípode estable y en un ambiente sin vibraciones. Se debe disponer el espécimen en el centro de la rótula giratoria. A tal fin pueden ser de ayuda espumas o

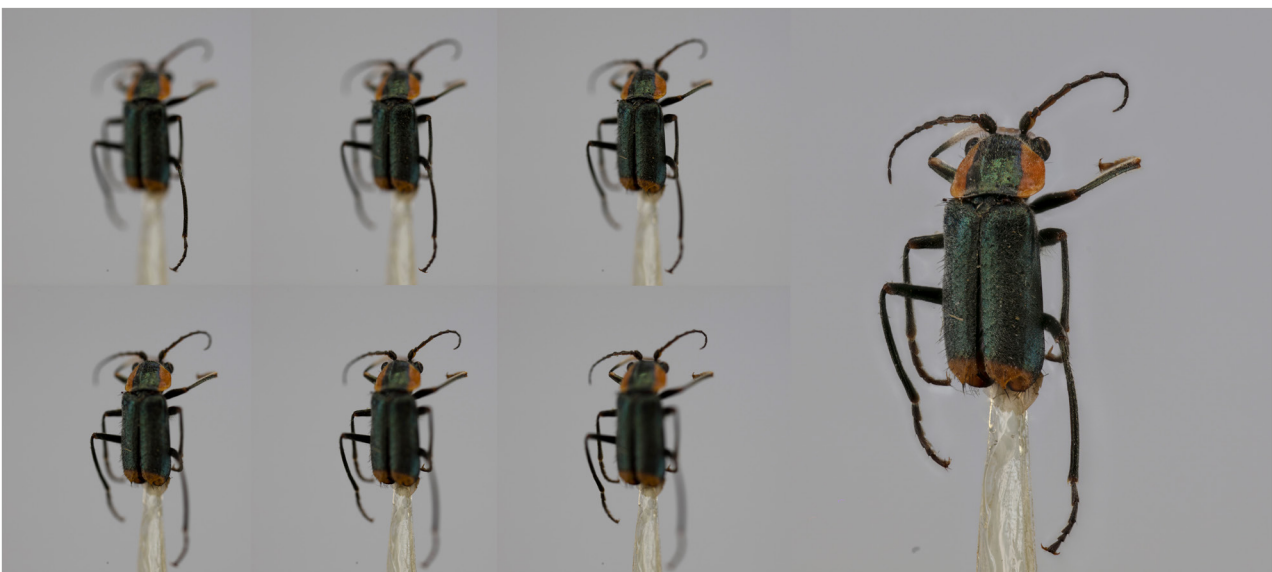


Figura 7. Muestra de algunas de las fotografías macro empleadas para crear la fotografía con apilamiento de enfoque de la derecha sumando las zonas más nítidas de cada imagen con el programa Helicon® Focus. Fotografía: Aleix Barberà Giné.



Figura 8. Muestra del montaje del equipo empleado: cámara Canon® EOS 5DS R con óptica de 65 mm macro Canon® MP-E f/2.8 montada sobre el carril micrométrico Cognisys® sobre un trípode estable. El espécimen se emplaza al centro del rotor Cognisys® dentro de una caja de luz. Fotografía: Aleix Barberà Giné.

incluso plastilina para mantener el objeto firme en el centro. Los diversos dispositivos se deben enlazar con la cámara y el controlador Cognisys®. Recomendamos colocar el espécimen en una caja de luz con iluminación potente o preferentemente con un flash anular. Sería recomendable que tanto la cámara como el equipo de iluminación se conecten directamente a la corriente, puesto que las baterías no suelen durar todo el proceso de captura de imágenes (Figura 8).

Recomendamos tener la cámara conectada al ordenador para agilizar la descarga de las imágenes y controlar minuciosamente el enfoque, que es uno de los aspectos críticos en fotografía macro. Primero se calculan los puntos inicial y final de enfoque, no solo para un punto de vista, sino para el giro completo en 360° del espécimen. Para esto, es importante prestar atención a la correcta colocación del espécimen en el centro exacto de la rótula giratoria. Seguidamente se indica la distancia de paso, definida por la profundidad de campo y diafragma (ver tabla 1) y a continuación la rotación de giro entre cada uno de los *stack*. En nuestro caso hemos considerado que tomar 30 *stacks* con una rotación de 12° entre ellos por cada giro puede ser suficiente para resolver los distintos casos que se han desarrollado.

Aunque el proceso sea lento, una vez programado el equipo Cognisys® cada rotación se realiza automáticamente. Solo necesitaremos ir modificando el ángulo de la cámara respecto al espécimen para capturarlo en su totalidad desde todos los puntos de vista. El tiempo total de captura de fotografías, en función del diafragma seleccionado y la complejidad del espécimen, puede ser desde unas 2 horas hasta algunos días.

A nivel de fotografía, recomendamos el uso de tiempos de obturación cortos (1/125 o inferiores), valores de ISO bajos en función de la sensibilidad del sensor y diafragmas relativamente cerrados

hasta el punto de evitar la aparición de la difracción de la luz. Aunque con diafragmas un poco más abiertos quizás se puedan conseguir resultados unitarios ligeramente mejores, el objetivo final para ser prácticos, debe ser el de minimizar la cantidad de fotografías individuales que van a componer cada *stack*.

Seguidamente deben ordenarse las imágenes en carpetas para cada uno de los apilamientos y después procesar cada imagen final. Con el programa Helicon® Focus se puede crear una acción y se consiguen de manera automatizada todas ellas.

Procesado de imágenes con software fotogramétrico

La obtención de fotografías macro completamente enfocadas en toda su profundidad de campo mediante el uso de *focus stacking* de una manera relativamente automatizada con controladores como el equipo Cognisys® es una cuestión actualmente resuelta y que aporta resultados satisfactorios si se tienen las precauciones necesarias sobre fotografía que se han ido comentando.

También podemos considerar que el uso de la fotogrametría está ampliamente instaurado para la consecución de modelos 3D de especímenes fotografiados con lentes convencionales. El problema radica en la combinación de ambas técnicas, puesto que el apilamiento de enfoque a nivel teórico no es compatible con el proceso fotogramétrico, ya que la imagen que se introduce para los cálculos de *structure from motion* es el resultado de una combinación de distintas imágenes y parámetros de disparo que no existe en la realidad (Clini *et al.*, 2016).

De hecho, muchas veces los resultados no son buenos y la mayoría de programas de fotogrametría hasta la fecha pueden fallar a la hora de orientar las imágenes y calcular los modelos. Puede deberse al hecho de que la mayoría de programas de apilamiento de enfoque, entre ellos Helicon® Focus, tienen fallos a la hora de crear una imagen con extensión de la profundidad de campo coherente con la perspectiva del modelo de cámara (Brecko y Mathys, 2020).

Pero a efectos prácticos, los apilamientos con pocas imágenes (la combinación de hasta 20-30 fotografías) no nos han dado problemas de alineación de cámaras, con lo que si se consigue estar dentro de estos parámetros no habría ningún problema. Las dificultades reales empiezan a partir de estos valores, cuando se requieren 60 o más fotografías y que son precisamente necesarios para los casos de estudio presentados. Esto se vio solucionado con el algoritmo de *stacking* del equipo DISC3D a través de MATLAB, con el que actualmente encontramos los mejores resultados de combinación de fotogrametría y fotografía macro con *focus stacking* (Ströbel *et al.*, 2018).

Pero hasta la fecha el equipo DISC3D no está disponible para comercialización y montar un equipo equivalente o aplicar su algoritmo de *stacking* es complejo. Más allá de que se debe contar con conocimientos de programación, se tienen que repetir con exactitud los mismos movimientos de la cámara en todo el proceso para confrontar un patrón con los especímenes a digitalizar. Pero se puede añadir, además, que DISC3D permite evitar el dificultoso paso de alineación de imágenes con fotogrametría porque, al repetir exactamente las mismas posiciones de fotografías puede cargar patrones de alineaciones conseguidas con modelos más sencillos (Ströbel *et al.*, 2018: 9-12).

La solución más accesible y realista para el patrimonio natural y cultural, por el momento, pasa por crear *stacks* con el mínimo de fotografías posibles, para evitar un excesivo procesamiento digital de las imágenes que los programas de fotogrametría consigan interpretar y alinear correctamente. Pero también existe la posibilidad de complementar esta opción con el uso de distintos programas de fotogrametría. En la totalidad de los casos consultados en bibliografía donde se combinaba fotografía (macro o convencional) con *focus stacking* y fotogrametría (Ströbel *et al.*, 2018; Nguyen *et al.*, 2014; Clini *et al.*, 2016; Brecko y Mathys, 2020; Santella y Milner, 2017;

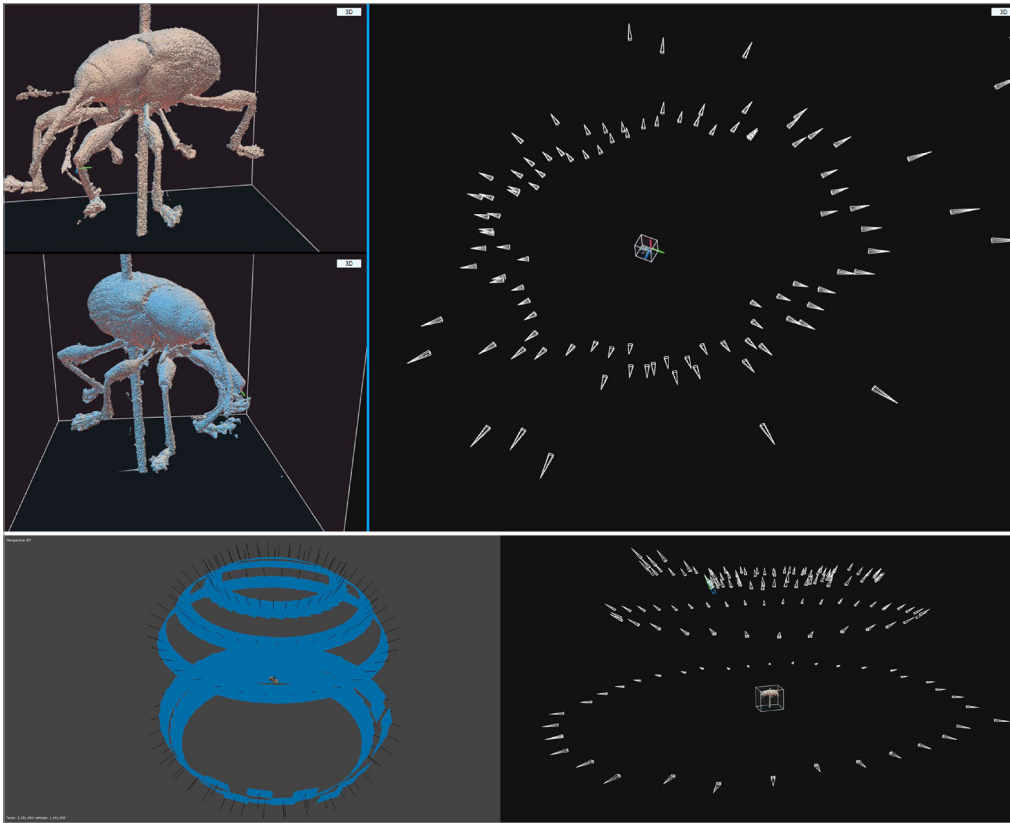


Figura 9. Arriba una captura de pantalla de RealityCapture® con la visión del modelo 3D del Coleoptera Curculionidae. Se observa a la derecha que la orientación de cámaras no es perfecta, puesto que deberían aparecer en forma de círculos concéntricos. Abajo, la captura de pantalla de Agisoft® Metashape (izquierda) y RealityCapture® (derecha) con la orientación de cámaras del modelo del Coleoptera Elateridae. Se observa claramente como en el primer caso el resultado ha sido satisfactorio en comparación con el segundo. Fotografía: Aleix Barberà Giné.

Koutsoudis *et al.*, 2014; Kontogianni *et al.*, 2017) se habían utilizado distintas versiones de Agisfot® Photoscan y Metashape.

En nuestra experiencia, el programa Agisoft® Metashape ha sido capaz de alinear correctamente las fotografías con apilamiento de enfoque en muy pocos casos, en los que se trataba de imágenes con menores aumentos, o bien en casos con *stacks* de pocas imágenes (30-50). Los parámetros de alineación de imágenes han sido diversos, utilizando sensibilidades distintas e incluso máscaras. Por otro lado, el programa RealityCapture® sí que ha sido capaz de orientar las cámaras en todos los casos estudiados. No conocemos los distintos algoritmos y variaciones que puedan existir entre los dos programas a la hora de alinear las fotografías, pero hemos constatado que para el trabajo con fotografías con extensión de la profundidad de campo RealityCapture® pueda ser una elección mejor, aunque tampoco todavía perfecta en algunos casos (Figura 9).

Una vez alineadas las imágenes, la creación de la malla se ha generado siempre en los parámetros máximos que permitía cada uno de los programas, y las texturas en ambos casos se han procesado en base a una sola imagen de 8192 x 8192 píxeles.

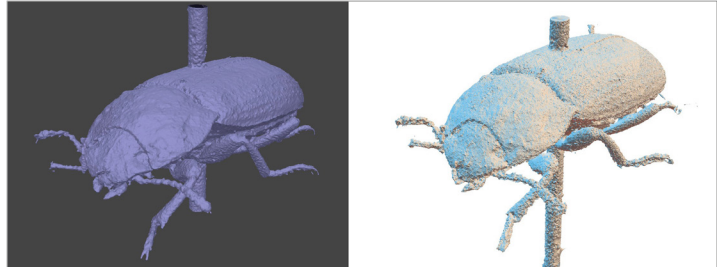
Casos de estudio y resultados

Para esta fase de estudio se han seleccionado cinco muestras de especímenes distintos: *Coleoptera Anobiidae* de 3 mm; *Coleoptera Melyridae* de 6,2 mm; *Coleoptera Curculionidae* de 9,7 mm; *Coleoptera*



◀ **Figura 10.** Fotografías con apilamiento de enfoque de los cuatro coleópteros que se han utilizado en fotogrametría para este proyecto. Fotografía: Aleix Barberà Giné.

▼ **Figura 11.** A nivel de geometría, la calidad de los modelos 3D obtenidos con los parámetros de generación a máxima resolución con distintos programas es bastante diferente. A la izquierda el modelo obtenido con Agisoft® Metashape y a la derecha el modelo, con más ruido, generado con RealityCapture®. Fotografía: Aleix Barberà Giné.



Elateridae de 8 mm y el molusco *Abida secale* (Draparnaud, 1801) de 10,5 mm, entendiendo las dimensiones en el eje mayor de cada uno de los especímenes (Figura 10).

Todos ellos han sido fotografiados a distintos aumentos en función de la dimensión de cada espécimen para ocupar el máximo de espacio en el sensor con rangos de 2 a 5 aumentos. En todos los casos ha sido necesario realizar fotografía macro con *focus stacking* para conseguir imágenes finales con extensión de la profundidad de campo. El número de fotografías por cada *stack* ha variado de 30 a 150, y en todos los casos se han generado un total de 30 imágenes por circunferencia, priorizando diafragmas relativamente cerrados. Lo que ha variado ha sido el número de posiciones de altura de cámara en relación a la complejidad del modelo: de 3 posiciones distintas para *Abida secale* (Draparnaud, 1801) a las 6-8 para los coleópteros.

Como ya se ha apuntado, en el primer paso del procesado fotogramétrico para la alineación de imágenes se ha constatado que cuantas menos imágenes formen un apilamiento, los resultados tienden a ser mejores. Todos los especímenes se han podido digitalizar en 3D con fotogrametría con el programa RealityCapture® con más o menos dificultades de alineación, mientras que tan solo en uno de ellos se ha conseguido la alineación con el programa Agisoft® Metashape.

Aunque vistos estos resultados se podría priorizar el uso de RealityCapture®, cuando se ha conseguido la alineación de cámaras con Agisoft® Metashape el modelo resultante ha sido claramente superior a nivel de geometría, generando menos ruido y siendo más fiel en la reproducción de los elementos más finos y detallados del espécimen (Figura 11).

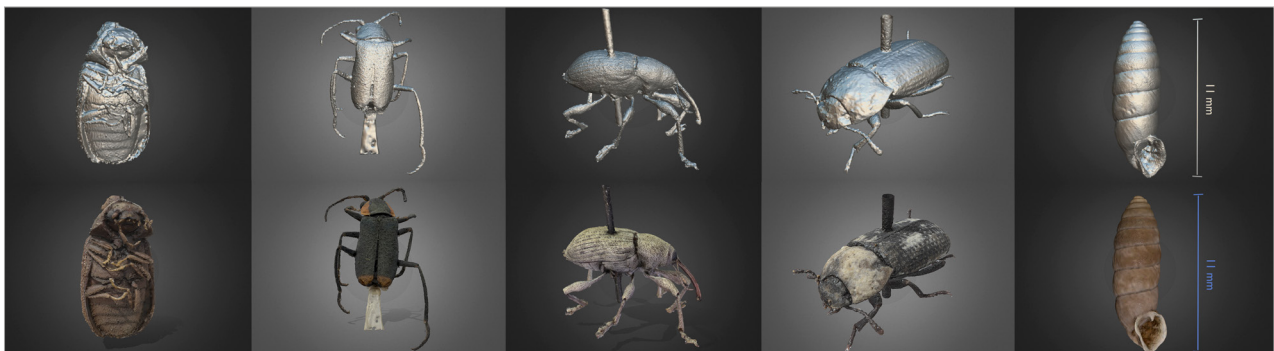


Figura 12. Vista de los modelos 3D de cada uno de los especímenes con renderización en Sketchfab en visión de sólido (arriba) y de textura (abajo). De izquierda a derecha: Coleoptera Anobiidae de 3mm; Coleoptera Melyridae de 6,2 mm; Coleoptera Curculionidae de 9,7mm; Coleoptera Elateridae de 8 mm y gasterópodo *Abida secale* (Draparnaud, 1801) de 10,5 mm. Fotografía: Aleix Barberà Giné.

Los resultados generales (Figura 12) es que se ha conseguido registrar la geometría general de los especímenes hasta niveles de antenas, patas y otras unidades complejas. Pero a nivel científico la calidad de la digitalización 3D en algunos casos, como *Abida secale* (Draparnaud, 1801), no se han capturado todos los detalles necesarios para su caracterización taxonómica.

A nivel visual, la calidad de las texturas generadas y la apariencia general es muy buena en la reproducción del color y detalles como los ojos y el pelo de recubrimiento del cuerpo, aunque estas características no se reproduzcan con precisión geométrica. Se considera válido su uso para divulgación, difusión y estudio científico con ciertas limitaciones.

Conclusiones

Los resultados obtenidos han permitido obtener modelos 3D de especímenes de menos de 1 cm con calidad, tanto en su apariencia a nivel de textura como de geometría, aunque con ciertas limitaciones en este caso. El proceso de obtención de fotografías para la creación de los modelos 3D se ha automatizado y optimizado con la incorporación del equipo Cognisys® y ciertas apreciaciones de metodología, simplificando al máximo posible los pasos necesarios teniendo en cuenta la disposición de equipos actuales y accesibles.

Aunque existe una limitación en la orientación de las imágenes con los programas de fotogrametría y, se deberían conseguir algunas mejoras relativas a la obtención de algunos detalles morfológicos, que deberían presentar mejor resolución en los ejemplares más pequeños para su estudio científico, la técnica se muestra aplicable a las colecciones del MCNB para distintos usos.

Teniendo en cuenta los resultados del proyecto actual podemos extraer ciertas recomendaciones a nivel de equipos y procesos para la fotografía macro con *focus stacking* para su posterior procesado con fotogrametría:

- Uso de equipos (lentes, cámara y controladores) de calidad.
- Trabajo en ambiente sin vibraciones con trípodes y soportes altamente estables.
- Iluminación artificial potente o flashes conectados a la corriente, sin baterías.
- Trabajo directo desde el ordenador para agilizar la descarga de imágenes y facilitar el control de enfoque.
- Prioridad por el disparo con diafragmas cerrados al límite de la aparición de la difracción, o incluso asumiendo cierta pérdida de nitidez.
- Prioridad por *stacks* constituidos por la combinación mínima necesaria de fotografías posible.
- Uso de nuevos programas de fotogrametría con las últimas actualizaciones o versiones.

La metodología de trabajo tiene aplicabilidad tanto para especímenes de colecciones de ciencias naturales como a otros elementos de muy pequeña dimensión del patrimonio cultural (monedas, elementos arqueológicos, etc.) y es previsible que con la rápida evolución de los programas de fotogrametría, el uso de fotografías macro con extensión de la profundidad de campo con *focus stacking* rápidamente adquieran mejores resultados.

Bibliografía

- BARBERÀ GINÉ, A. (2015): «Fotogrametría per a la conservació-restauració de béns cultural». *Unicum*, 17, pp. 57-76.
- BRECKO, J., MATHYS, A., DEKONINCK, W. *et al.* (2014): «Focus stacking: comparing commercial top-end set-ups with a semi-automatic low budget approach. A possible solution for mass digitization of type specimens». *ZooKeys*, 464, pp. 1-23.
- BRECKO, J. y MATHYS, A. (2020): «Handbook of best practice and standards for 2D+ and 3D imaging of natural history collections». *European Journal of Taxonomy*, 623, pp. 1-115. Disponible en: <https://doi.org/10.3897/zookeys.464.8615> [Consulta: 5 de diciembre de 2021].
- CHELI, A. E. (2012): *Introducción a la fotogrametría y su evolución*. Buenos Aires: Ediciones Hespérides.
- CLINI, P., FRAPICCINI, N., MENGONI, M. *et al.* (2016): «SFM technique and focus stacking for digital documentation of archaeological artifacts». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, pp. 229-236.
- DANESHMAND, M., HELMI, A., AVOTS, E. *et al.* (2018): «3D scanning: a comprehensive survey». Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1801.08863> [Consulta: 5 de diciembre de 2021].
- FERNÁNDEZ PERERA, F. (2021): *Apertura, diafragma y el número f*. Disponible en: <https://aprendiendofotografia.com/el-diafragma-y-el-numero-f> [Consulta: 5 de diciembre de 2021].
- GEIGER, D. L. (2013): «Considerations and Limits of Z-Stacking in macrophotography». *Photo technique S/O*, pp. 1-3.
- GÓMEZ, S. (2017): *¿Qué es el aumento en fotografía?* Disponible en: <https://miniminim.com/el-aumento-en-fotografia> [Consulta: 5 de diciembre de 2021].
- JOVER, J. C. (2011): *Introducción a la fotografía macro*, Autoeditado. Disponible en: <https://guao.org/sites/default/files/biblioteca/Introducci%C3%B3n%20a%20la%20fotograf%C3%ADa%20macro.pdf> [Consulta: 5 de diciembre de 2021].
- KEKLIKOGLOU, K.; FAULWETTER, S.; CHATZINIKOLAOU, E.; *et al.* (2019): «Micro-computed tomography for natural history specimens: a handbook of best practice protocols». *European Journal of Taxonomy*, 522. Consulta en: <https://doi.org/10.5852/ejt.2019.522> [Consulta: 5 de diciembre de 2021].
- KONTOGIANNI, R., CHLIVEROU, R., KOUTSOUDIS, A. *et al.* (2017): «Enhancing close-up image based 3D digitisation with focus stacking». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W5.
- KOUTSOUDIS, A., VIDMAR, B., IOANNAKIS, G. *et al.* (2014): «Multi-image 3D reconstruction data evaluation». *Journal of cultural heritage*, 15, pp. 73-79.
- LANGFORD, M. J. (1994): *Tratado de fotografía. Un texto avanzado para profesionales*, 6a edición. Barcelona: Ediciones Omega.
- LENDEMER, J., THIERS, B., MONFILS, A. *et al.* (2020): «The Extended Specimen Network: A Strategy to Enhance US Biodiversity Collections, Promote Research and Education». *BioScience*, 70 (1), pp. 23-30. Consulta en: <https://doi.org/10.1093/biosci/biz140> [Consulta: 5 de diciembre de 2021].
- MARZIALI, S. y DIONISIO, G. (2017): «Photogrammetry and Macro Photography. The Experience of the MUSINT II Project in the 3D Digitization of Small Archaeological Artifacts». *Studies in Digital Heritage*, 1 (2), pp. 298-309. Consulta en: <https://doi.org/10.1093/biosci/biz140> [Consulta: 5 de diciembre de 2021].

- MELLADO, J. M. (2017): *Los fundamentos de la fotografía*. Madrid: Ediciones Anaya Multimedia.
- MICHELETTI, N., CHANDLER, J. H., LANE, S. N. (2015): «Structure from Motion (SfM) Photogrammetry». *British Society for Geomorphology. Geomorphological techniques*. Cap. 2, sec. 2.2, pp. 1-12.
- NGUYEN, C. V., LOVELL, D. R., ADCOCK, M. y LA SALLE, J. (2014): «Capturing natural-colour 3D models of insects for species discovery and diagnostics». *PloS one*, 9 (4), pp. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094346> [Consulta: 5 de diciembre de 2021].
- SANTELLA, M. y MILNER, A.R.C. (2017): «Coupling focus stacking with photogrammetry to illustrate small fossil teeth». *Journal of Paleontological Techniques*, 18, pp. 1–17.
- STRÖBEL, B., SCHMELZLE, S., BLÜTHGEN N., HEETHOFF, M. (2018): «An automated device for the digitization and 3D modelling of insects, combining extended-depth-of-field and all-side multi-view imaging». *ZooKeys*, 759, pp. 1–27. Disponible en: [doi:10.3897/zookeys.759.24584](https://doi.org/10.3897/zookeys.759.24584) [Consulta: 5 de diciembre de 2021].
- WEBSTER, M. S. (Ed.). (2017): *The Extended Specimen: Emerging Frontiers in Collections-based Ornithological Research*. Nueva York: CRC Press. Disponible en: <https://doi.org/10.1201/9781315120454> [Consulta: 5 de diciembre de 2021].

Tecnología al servicio de la conservación del patrimonio cinematográfico

Technology devoted to film heritage conservation

Javier Rellán

Centro de Conservación y Restauración de Filmoteca Española
javier.rellan@cultura.gob.es

Resumen: La salvaguarda de las colecciones fílmicas tiene metodologías particulares asociadas al carácter efímero de su naturaleza material, al uso imprescindible de máquinas para la transmisión del mensaje y al peso sustancial de la imagen y del sonido en el significado cultural de estas colecciones. Dentro del proyecto de preservación del Centro de Conservación y Restauración de Filmoteca Española está incluida la digitalización de materiales en soporte fotoquímico por diversos motivos. Por un lado, para capturar las imágenes presentes en sus fotogramas y salvarlas así de la degradación que, con el transcurso del tiempo, inevitablemente sufren. Por otro lado, y no menos importante, para poder acceder al contenido de dichos materiales sin necesidad de manipularlos, y permitir así alargar su vida al no someterlos a ningún tipo de acción que no sea estrictamente necesaria, manteniéndolos en condiciones óptimas de temperatura, humedad, ambiente y estabilidad. Y, en último lugar, para permitir su difusión. En muchas ocasiones, la fragilidad de los materiales impide su proyección, por lo que las películas quedan durmientes e inalcanzables en el propio material. Gracias a la digitalización pueden exhibirse obras que de otro modo habrían quedado en la oscuridad del archivo o habrían sufrido destrozos irreparables al intentar proyectarlas.

Este artículo tratará sobre cómo la tecnología digital puede contribuir a la conservación y restauración de materiales audiovisuales en soporte fotoquímico, describiendo previamente las características y peculiaridades que presentan los documentos audiovisuales en soporte fotoquímico a diferencia de otras manifestaciones artísticas y cómo influyen estas características en su conservación. Se introducirán algunos tipos de herramientas tanto *hardware* como *software* utilizadas para la digitalización de audio e imagen así como para el tratamiento de los archivos digitales resultantes de la misma y las posibilidades que ofrecen para la restauración, ilustrándolo con muestras de algunos proyectos llevados ya a cabo por Filmoteca Española.

Palabras clave: Patrimonio audiovisual, preservación, tecnología digital, restauración digital, difusión.

Abstract: The safeguarding of film collections has particular methodologies associated with the ephemeral nature of its elements, with the indispensable use of machines for the transmission of the message and the substantial weight of image and sound in the cultural significance of these collections. The preservation project of the Centro de Conservación y Restauración de Filmoteca Española includes the digitisation of photochemical materials for several reasons. Firstly, to capture the images appearing in their frames and thus save them from the degradation that, over time, they

inevitably suffer. Secondly, and no less important, to be able to access the content of these materials without the need to manipulate them, and thus extend their life by not subjecting them to any type of action that is not strictly necessary, keeping them in their optimum conditions of temperature, humidity, environment and stability. And lastly, to enable their dissemination. In many cases, the fragility of the materials prevents them from being screened, so that the films remain dormant and unreachable in its physical carrier. Thanks to digitisation, works can be exhibited that would otherwise have remained in the obscurity of the archive or would have been irreparably damaged by attempts to project them.

This article will discuss how digital technology can contribute to the conservation and restoration of film materials on photochemical media, first describing the characteristics and peculiarities of audiovisual documents on photochemical media in contrast to other artistic manifestations and how these characteristics affect their conservation. Some types of hardware and software tools used for the digitisation of audio and image as well as for the treatment of the resulting digital files and the possibilities they offer for restoration will be introduced, illustrated with samples of some projects already carried out by Filmoteca Española.

Keywords: Audiovisual heritage, preservation, digitisation technology, digital restoration, dissemination.

Introducción

El ser humano cumplió su deseo de capturar lo que era capaz de contemplar con sus ojos, congelando un momento en el tiempo con el nacimiento de la fotografía en la primera mitad del siglo XIX. Pocos lustros después, en diciembre de 1895, los hermanos Lumière asombraron al mundo con la primera proyección pública de imágenes en movimiento que podían ser contempladas por varias personas simultáneamente.

Antes de esta proyección pública, el 22 de marzo de 1895, el cinematógrafo Lumière fue presentado a profesionales de la industria fotográfica. Una pequeña comitiva de la productora francesa Gamout, la que anteriormente era la Compañía General de Fotografía, asistió al evento. Entre ellos estaba su fundador León Gamout, y con él su secretaria de 21 años Alice Guy. Y fue la mirada de esta mujer la que marcó el comienzo de una nueva forma de arte. En sus memorias narra cómo en esa demostración, mientras Gamout y Lumière estaban tratando de resolver los problemas mecánicos del aparato, considerándolo simplemente como una cámara más que ofrecer a los clientes, la joven Alice vio claramente el potencial que tenía el invento como herramienta educativa y de entretenimiento. Así que se ofreció para escribir una o dos escenas y que unos amigos las interpretaran, en lugar de rodar meras películas de demostración anodinas. Gamout accedió a la petición de Alice Guy con la condición de que debía seguir atendiendo sus obligaciones como secretaria. Su primera película fue *La Fée Aux Choux* en 1896. Y nació el cine. Pronto se convirtió en un entretenimiento barato y popular, proliferando como espectáculo de barraca en las ferias y siendo despreciado por los intelectuales, que tardaron décadas en llegar a considerarlo como arte. Y estas múltiples facetas de la cinematografía, entre lo meramente tecnológico, lo comercial y lo artístico, presentes ya desde sus albores, son las responsables de que una de las formas de arte más jóvenes resulte ser, paradójicamente, una de las más afectadas por el paso del tiempo.

Dos características fundamentales relativas a la conservación de obras cinematográficas

Una obra cinematográfica aguarda en un soporte el momento de cobrar vida mediante el acto mecánico de la proyección hasta la aparición del cine digital en la década de los 80. El acto puramente mecánico de la reproducción fue sustituido entonces por medios electrónicos, pero hay algo que permaneció inalterable: una obra cinematográfica sólo puede ser percibida mediante la intermediación de procesos tecnológicos complejos. Esto diferencia las obras cinematográficas de muchas otras manifestaciones artísticas y complica extremadamente su conservación, ya que el mero hecho de conservar únicamente los materiales que componen la obra es condición necesaria, pero no suficiente para acceder a la obra. Conservar únicamente los materiales soporte es como tener libros cuyas cubiertas no pueden abrirse o cuyas páginas no pudiesen pasarse para ser leídas. Se precisa la tecnología adecuada para que dichas imágenes y sonidos, si los hubiere, puedan reproducirse de nuevo.

Entender esta dependencia tecnológica extrema es de suma importancia para comprender los retos que supone su conservación. El cine nace casi coincidiendo con el comienzo del siglo XX, en el que se produce una revolución tecnológica sin precedentes y es, precisamente, uno de los frutos de dicha revolución. Durante el siglo XX la evolución tecnológica condiciona los distintos formatos que van a ir aplicándose en la industria cinematográfica, desde la aparición de los diversos sistemas de color a la inclusión de audio. Pese a su variedad, durante la mayor parte del siglo XX, el número de variantes tecnológicas es, por así decirlo, manejable. Pero las últimas décadas del siglo XX y todo el siglo XXI son los momentos en la historia de la humanidad de mayor creación de tecnologías, disparando exponencialmente el desarrollo tecnológico en especial en lo relativo a la información, y el cine no es sino información audiovisual. El número de formatos audiovisuales existentes no hace sino crecer y, además, cada vez quedan obsoletos con mayor rapidez. A esto hay que sumar que están almacenados en soportes cuya vida útil, comparada con la de los materiales fotoquímicos, es efímera. El reto de conservar el cine en formato digital, como el de conservar la información digital en general, es mayúsculo.

La otra característica peculiar que hay que considerar para comprender la dificultad de conservar obras cinematográficas es el carácter comercial de la cinematografía desde su origen.

El cine se desarrolló como industria de entretenimiento masivo, no con intención de perdurar en el tiempo, como otro tipo de manifestaciones culturales. Las tecnologías involucradas, por tanto, no se diseñaron o escogieron con la intención de mantenerse inalterables en el tiempo. Su única finalidad era perdurar el tiempo necesario que permitiese seguir explotando la obra comercialmente. Afortunadamente las tecnologías empleadas, en condiciones ideales, permiten que los materiales duren, en óptimas condiciones ambientales, entre 100 y 500 años, dependiendo de la fuente consultada. Ahora bien, en términos históricos no es mucho tiempo, máxime teniendo en cuenta que dichas condiciones ideales se han empezado a tener en cuenta tan sólo recientemente y, desgraciadamente, tan sólo en determinados archivos.

Para ilustrar esta falta de preocupación sobre su preservación en el tiempo tomemos como ejemplo el soporte nitrato empleado en la era más temprana del cine. Dicho soporte es sumamente inflamable y con la particularidad de extraer el oxígeno de su propia composición, por lo que resulta literalmente imposible frenar su combustión una vez iniciada, combustión que de hecho puede producirse de manera espontánea a temperaturas elevadas. A consecuencia de esto se han producido algunos incendios devastadores en lugares donde se almacenaban las películas. Tan peligroso era su almacenamiento que en algunos países, por ley, debían destruirse de manera controlada una vez terminada su vida comercial. Estas circunstancias han provocado que apenas se conserve un bajísimo porcentaje de todo el cine que se produjo en esas primeras décadas.

Y si hablamos del presente, el cine digital, como toda la información digital de manera general, resulta también extremadamente frágil al paso del tiempo. Tanto es así, que incluso se ha acuñado el término edad oscura digital, refiriéndose al riesgo de que toda la información generada en una etapa de la historia resulte inaccesible en el futuro por la propia evolución de la tecnología.

Por dicho carácter comercial la intención del cine es su difusión, objetivo cuya consecución implicaba:

- Crear copias y distribuirlas.

Desde los negativos de cámara, hasta internegativos y copiones necesarios para su creación, pasando por todas las copias y sus generaciones, las distintas versiones creadas posibles (distintos idiomas, créditos, versiones del director, con o sin subtítulos, doblada...), los distintos soportes (35 mm, 16 mm, Betacam HD, Umatic, VHS, DVD, BluRay...), etc. ¿Cuál es «la película»?

¿Y en el caso de las obras creadas directamente para plataformas digitales? ¿Y aquellas que los cines descargan directamente de un servidor remoto para su proyección?

- Reproducir las copias.

Hasta la aparición de la TV y de las tecnologías digitales, la reproducción de una obra cinematográfica para una audiencia sólo era posible transportando la copia al lugar de exhibición y sometiénola a procesos mecánicos al ser proyectada, actos que implican riesgo de producir daños en la copia. Las condiciones ambientales y su estabilidad son también determinantes para el estado de conservación de los materiales, y la distribución física de las copias no hacen sino alterar dicha estabilidad.

Como vemos, existen muchas circunstancias que hacen que las obras cinematográficas, pese a ser una de las manifestaciones artísticas y culturales de más reciente aparición, sean también una de las que se encuentran en mayor peligro de desaparecer con el transcurso del tiempo.

¿Qué es conservar el cine?

«Conservar: Mantener o cuidar de la permanencia o integridad de algo o de alguien» (RAE).

Conservar el cine consiste, por tanto, en tomar las medidas necesarias para garantizar que la obra cinematográfica pueda ser contemplada tal y como fue creada, independientemente del tiempo transcurrido.

Si damos por válida la anterior premisa, surgen dos posibilidades estratégicas para su conservación:

- Conservar los materiales que soportan la obra cinematográfica así como los medios de reproducción de dichos materiales en condiciones tales de estado y funcionamiento que permitan acceder al contenido, garantizando la integridad de materiales y medios de reproducción a lo largo del tiempo.
- Transferir la obra cinematográfica con la máxima fidelidad a nuevos elementos de reproducción que permitan su contemplación con características idénticas a las que tenía en el momento de exhibirse por primera vez.

Sea cual sea la estrategia adoptada, siempre es imprescindible conservar, sin alteraciones siempre que sea posible, los materiales físicos en el caso del cine fotoquímico y la información en el caso del cine digital.

Hay que distinguir así, en la vertiente puramente tecnológica de la cinematografía, dos grandes grupos bien diferenciados: el cine con tecnología fotoquímica y el cine con tecnología digital.

En el caso fotoquímico, ha sido práctica habitual la obtención de copias, también fotoquímicas, para procurar la conservación de los materiales originales. En dichos procesos se produce, inevitablemente, una merma en la calidad de las imágenes, cuyos efectos negativos aumentan con el número de copias sucesivas. Actualmente existe también la opción de digitalizar dichos materiales mediante el empleo de escáneres.

En el caso digital, la opción es realizar copias de los archivos pertinentes, copias que resultan idénticas a la original, si bien presentan otros problemas específicos muy graves para su conservación, como se verá en el siguiente apartado.

¿Cómo afecta el paso del tiempo a las obras cinematográficas?

En resumen, las obras cinematográficas tanto pasadas como presentes y futuras están seriamente amenazadas por el paso del tiempo, y su conservación y/o preservación sólo será posible mediante acciones tecnológicas complejas y costosas, para lo cual es indispensable en primer lugar una toma de conciencia por parte de las instituciones responsables de su conservación de la gravedad del problema para así poder adoptar las medidas necesarias.

Tecnología fotoquímica

Con esta tecnología las imágenes que componen la secuencia en movimiento son impresiones fotográficas sobre elementos químicos fotosensibles depositados en una o varias capas sobre un soporte físico que por medios mecánicos es reproducido a cierta velocidad al ser atravesados por un haz de luz y proyectados sobre una superficie lisa. En el caso de tener sonido, éste también se encuentra impreso en el margen y es accedido por medio de transductores electro ópticos.

La conservación de dichos elementos consiste en mantenerlos en condiciones tales que impidan su degradación y deterioro físico y químico, tanto del material que sirve como soporte, que debe mantener sus propiedades mecánicas y físicas, como de los compuestos que forman la emulsión, que deben mantener sus propiedades químicas.

Dependiendo de la naturaleza de la emulsión y del soporte, dichas condiciones varían, pero siempre implican controlar diversos factores:

- Temperatura.
- Humedad.
- Composición del aire.
- Estabilidad del entorno.
- Estabilidad mecánica.

Los soportes plásticos que componen la película varían dependiendo de la época, habiéndose utilizado plásticos artificiales derivados de la celulosa en los que se sustituyen los grupos hidróxilos (OH) presentes en sus anillos moleculares por nitrato en sus inicios y acetato después, y también plásticos sintéticos como el poliéster, el PVC y el policarbonato.

Todos los materiales plásticos empleados comparten unas propiedades comunes que los hacen aptos para su uso en cinematografía:



Imagen 1. Deformaciones y contracción por pérdida de plastificante. Fotografía: Filmoteca Española.

Estabilidad dimensional

Se buscan materiales con gran estabilidad dimensional tanto en su grosor como en su anchura y longitud. La variación de estas dimensiones cuando los plásticos se degradan puede, por ejemplo, variar la distancia entre perforaciones cuando su dimensión longitudinal se ve afectada, fenómeno muy habitual conocido como contracción debida a la pérdida de plastificante, que pueden hacer inviable el paso de la película por los dispositivos mecánicos para su reproducción, copiado o escaneado. La alteración de las dimensiones puede, en definitiva, hacer que una película quede inutilizable por abarquillamiento y deformación. (Figura 1)

Resistencia a la tracción

Las películas, en los procesos diversos a los que se ven sometidas, deben tener una resistencia a la tracción alta, superior a los 600 kg por cm² de sección. A veces el material puede sufrir tensiones mayores por atasco, mala manipulación u otras causas que lleven a su rotura. En ocasiones hay que realizar empalmes, que pueden ser origen de otro tipo de deterioro.

Flexibilidad y rigidez

La rigidez debe ser suficiente para, entre otras cosas, permitir el arrastre mediante ruedas dentadas que encajan en las perforaciones y soportar, en las copias de proyección, el golpe térmico del haz de luz al proyectarse, y la flexibilidad debe permitir su enrollamiento y paso por los diferentes rodillos (Figura 2).

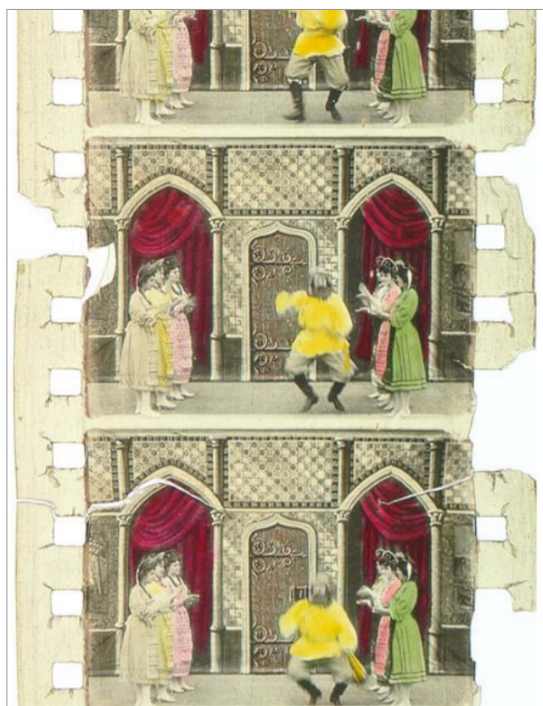


Figura 2. Alteraciones de perforaciones. Fotografía: Filmoteca Española.



Figura 3. Degradación del color. Fotografía Filmoteca Española.

Figura 4. Alteración biológica. Fotografía: Filmoteca Española.



Transparencia

La transparencia y una pigmentación despreciable en condiciones normales son características indispensables que deben tener estos plásticos por razones obvias. Estos plásticos sirven de soporte para las capas sensibles. De composición variable, es en estas capas donde se produce tanto la imagen como el color, si es el caso, así como las capas protectoras y elementos fijadores. También existen algunos materiales cinematográficos en los que para conferir color, se añaden sustancias para teñir la imagen, bien en su totalidad, bien en parte (Figura 3).

Los daños mecánicos y los procesos de descomposición, así como la aparición de partículas biológicas, alteran dichas propiedades, lo que se traduce en problemas para la reproducción, copia o escaneado y alteraciones en la calidad de la imagen hasta la pérdida total de la misma.

Mediante un adecuado control de los parámetros anteriormente mencionados se puede minimizar el desarrollo de esos deterioros y ralentizarlo, pero es inevitable que se produzcan, por lo que la producción de nuevas copias a partir de materiales originales sigue siendo una parte fundamental en la estrategia de los archivos para preservar las obras cinematográficas. (Figura 4)

Ya se comentó que en materiales fotoquímicos su reproducción implica una pérdida de calidad. Creando nuevos materiales de acceso se consigue que el material original sufra las menores alteraciones posibles una vez realizada la copia, ya que así se evitan más manipulaciones y puede conservarse en las condiciones ambientales idóneas. Del mismo modo, hay un hecho que no puede obviarse: la tecnología fotoquímica es una tecnología obsoleta en cinematografía. Apenas se rueda con película y los proyectores digitales han copado las salas de exhibición, siendo muy escaso el



Figura 5. Degradación nítrica extrema. Fotografía: Filmoteca Española.

número de proyectores analógicos en funcionamiento. La distribución de contenidos en plataformas digitales es masiva, los laboratorios fotoquímicos han ido cerrando por inactividad, los técnicos con conocimientos necesarios escasean, e incluso los fabricantes de película han ido desapareciendo también. La tecnología fotoquímica, hoy por hoy, parece condenada a desaparecer o mantenerse en el pequeño mundo de los archivos sin poder exhibirse o a ser reproducida en filmotecas exclusivamente para un público minoritario.

Parece inevitable entonces que, de una manera u otra, sean las tecnologías de digitalización esenciales en la preservación y/o conservación del patrimonio cinematográfico, así como en su difusión. Otra ventaja de la tecnología digital es que, mediante el uso de herramientas de tratamiento digital de la imagen, algunas de las alteraciones o daños pueden ser minimizados o eliminados para obtener una imagen equivalente sin la presencia de dichos daños o defectos, como veremos posteriormente. Ahora bien, los objetos digitales presentan, a su vez, serios problemas de preservación. (Figura 5).

Tecnología digital

Entendiendo por tecnología digital aquella empleada para representar con información binaria en formato electrónico obras audiovisuales, podemos distinguir dos casos fundamentalmente:

- Obras nacidas digitales, esto es, obras de naturaleza electrónica en origen.
- Digitalizaciones de materiales fotoquímicos ya existentes.

En ambos casos los problemas de preservación de los objetos digitales son idénticos. Hasta hace relativamente poco tiempo la conservación del cine era la conservación de sus materiales. Esta

premisa resulta falsa en los formatos digitales. Como se explica a continuación, conservar inalterado el material o materiales digitales que contienen la obra resulta insuficiente para garantizar el acceso a la misma en el futuro.

El primer problema del paso del tiempo es la esperanza de vida de los soportes en los que se encuentran almacenados los objetos digitales a preservar, cuya esperanza de vida sin fallos es bastante corta. Aunque las estimaciones pueden variar según la fuente, para sistemas de almacenamiento de uso común, como CDs, DVDs, Blu-Ray, discos duros magnéticos, memoria de estado sólido o cintas magnéticas, estamos hablando de un par de decenios en los casos más optimistas, lo que nos condena a ir migrando de soporte continuamente si queremos garantizar la integridad de los datos.

Además, los dispositivos que permiten el acceso a dichos datos también se ven afectados por una temprana obsolescencia. Intente acceder a un fichero de texto almacenado en un *floppy disk*, por ejemplo. En menos tiempo del que uno espera será difícil reproducir un DVD, de uso tan común y extendido hasta hace unos pocos años.

Se han buscado formas de almacenamiento alternativas que prolonguen dicha esperanza de vida, de modo que quede garantizada la integridad de los datos por periodos de tiempos mucho más extensos.

Algunas de dichas opciones son:

- Almacenamiento de información digital binaria en soporte fotoquímico de poliéster (100 a 500 años).
- En láser sobre acero (1000 años).
- En cristales de cuarzo 5D *superman memory* (para siempre, salvo rotura).
- En ADN artificial (2000 años a 10°C hasta 10000000 años a -18°C). En 2016 Technicolor, en cooperación con la universidad de Harvard, que ya había logrado almacenar 5.5 petabytes de información en 1 gr de ADN sintético, consiguieron almacenar un millón de copias de *Viaje a la luna* de 1902 en un pequeño vial con unas gotas de agua. En experiencias posteriores se ha podido codificar información audiovisual en ADN biológico.

Supongamos, pues, que el problema de almacenamiento de datos a perpetuidad está resuelto o en vías de serlo. Pero almacenar y conservar, no es preservar. Obsérvese que se ha hablado de datos, no de información. Estos pueden permanecer íntegros, y aun así no poder acceder a la información que representan. Tómese como ejemplo los jeroglíficos egipcios. Aunque algunos de ellos estaban perfectamente conservados, el mensaje subyacente permanecía oculto hasta que la aparición de la piedra Rosetta, con sus textos en varios idiomas y jeroglíficos, dio las claves para desenrañar el misterio de los enigmáticos símbolos. Pues bien, con los objetos digitales pasa algo similar. No son sino un conjunto de ceros y unos almacenados, hasta que el formato les da sentido y convierten esa sucesión de datos en información. Es el formato el que permite que una cantidad ingente de ceros y unos sea interpretada y accedida como una obra cinematográfica. Pero los formatos también van cambiando a medida que la tecnología y la industria avanzan.

Y, por si fuera poco, los medios *software* y *hardware* necesarios para reproducir dichos formatos también cambian a un ritmo vertiginoso, por lo que resulta imprescindible la transcodificación de un tipo de formato en riesgo de quedar inaccesible a uno nuevo que permita su fácil reproducción. Así que el concepto de preservación digital conlleva la migración y transcodificación de los objetos digitales y dejar constancia a través de la generación de metadatos apropiados de cómo se han obtenido dichos objetos digitales, cuáles son sus características técnicas, cómo se ha comprobado su integridad, cómo se ha realizado la transcodificación y, en resumen, toda la información necesaria para asegurar que el objeto digital accedido en el futuro representa exactamente

la misma información que aquel que fue introducido en el sistema y, si se ha visto alterado, conocer de manera exacta cómo ha sido transformado y poder reconstruir la información original. Y dichos sistemas no harán sino crecer, ya que nunca debe borrarse ningún objeto.

A fecha de hoy, no existe ningún estándar universal de preservación digital, si bien es cierto que existe un modelo abierto que define conceptualmente qué características debe tener un sistema de preservación digital para poder cumplir con su función, el conocido como modelo OAIS (*Open Archival Information System*). Los esfuerzos que se están haciendo para implementar dichos sistemas de preservación lo toman como modelo mayoritariamente. Actualmente en Europa se está desarrollando un estándar de preservación digital de obras cinematográficas que permita dar concreción al modelo OAIS para las obras que nos conciernen, tomando como base estándares ya establecidos como EbuCore, PREMIS o METS cuando es posible y desarrollando el resto cuando estos no son aplicables. El objetivo es establecer el tipo de paquete que debe ingestarse en un sistema de preservación digital para obras cinematográficas de manera estandarizada que permita recuperar la obra en tiempos futuros y que pueda servir como elemento de intercambio entre archivos, independientemente del sistema de preservación digital concreto implementado siempre y cuando adopte el estándar.

La digitalización como herramienta al servicio de la preservación de las obras cinematográficas. Ejemplos.

Como ya hemos visto, las dos grandes tecnologías, analógica y digital, presentan ventajas e inconvenientes. No es poco habitual en determinados foros que se presenten acérrimos defensores de una frente a la otra. Sin embargo, no son tecnologías antagonistas, sino complementarias y necesarias ambas de cara a la restauración y preservación de obras cinematográficas. En esta sección prescindiremos de las obras nacidas digitales, centrándonos en aquellas de origen fotoquímico, proponiendo una línea de trabajo para procurar su preservación.

Paso 1: inspección y restauración física de los materiales

Tras seleccionar el material fotoquímico a preservar, éste debe pasar necesariamente por una revisión exhaustiva y registro de su estado, evaluando la condición física del mismo para poder así determinar la estrategia de digitalización pertinente y, si es el caso, llevar a cabo las acciones necesarias que permitan la digitalización.

Si bien tradicionalmente esta inspección previa se realiza manualmente, se han desarrollado equipos que pueden asistir en dicha función, como el *QUADRIGA FILM examiner*, un equipo con su pertinente *software* que permite analizar de manera separada las imperfecciones de la superficie y el soporte, y generar informes precisos sobre arañazos, condición de los empalmes, perfil de contracción, medidas de suciedad, daños en la emulsión, daños en las perforaciones, inestabilidad, densidad óptica de la emulsión...

Una vez determinada la condición del material, se realizarán las intervenciones sobre el mismo que permitan su digitalización.

De nada sirve la tecnología digital si no se conservan los materiales originales. Resulta pues insoslayable el llevar a cabo todas las acciones posibles para conservar dichos materiales en las mejores condiciones posibles durante el mayor tiempo posible. Incluso materiales que hoy por hoy no pueden ser recuperables podrían serlo en el futuro. En algunos archivos, con el fin de frenar la degradación que, una vez iniciada, es imparable, se congelan los materiales para poder intervenir sobre ellos cuando el desarrollo tecnológico nos dote de nuevas herramientas.

Paso 2: digitalización del material

En función de la condición física del material, hay que decidir cómo llevar a cabo la digitalización.



Imagen 6. Fotogramas teñidos. Fotografía: Filmoteca Española.

En materiales muy deteriorados y con lesiones que impiden su transporte, como la desaparición masiva de perforaciones o una fragilidad extrema por pérdida de flexibilidad, la captura de los fotogramas puede tener que ser llevada a cabo manualmente, posicionando fotograma a fotograma con la menor manipulación posible del material y realizando la captura. Si consideramos que un segundo de metraje supone de 17 a 24 fotogramas por segundo, dependiendo de la longitud del título puede ser un proceso muy laborioso.

En materiales con contracción pero en relativamente buen estado, el arrastre del material puede llevarse a cabo mediante rodillos no dentados, sometiendo la película a mayor tensión, por lo que es un método poco recomendado en secciones en las que hubiera empalmes delicados.

Si el material está en buenas condiciones mecánicas el posicionamiento de los fotogramas para su captura puede realizarse mediante ruedas dentadas.

Desde el mismo momento de la captura se pueden realizar acciones de cara a minimizar o eliminar algunos tipos de lesiones. Por ejemplo, mediante el uso de una ventanilla húmeda, el film se sumerge en un líquido con el mismo índice de refracción del film, de manera que rellena rayas y otras imperfecciones de modo que, al ser capturadas, desaparecen o, al menos, se mitigan. Otra contribución posible es realizar un escaneado de la imagen con luz infrarroja, además de RGB. En las emulsiones a color, las capas de color son muy poco sensibles a la luz infrarroja, dejándola pasar en su práctica totalidad. Sin embargo, las partículas de polvo, arañazos y otro tipo de manchas obstruyen el paso de dicha luz, lo que permite al escáner trazar un mapa detallado para cada fotograma, de las imperfecciones detectadas que queda reflejado en un canal *alfa* de la imagen. Posteriormente, un *software* de restauración digital puede hacer uso de dicha información para hacer las correcciones pertinentes sin tener que hacer procesos de detección de dichas imperfecciones, procesos que por otra parte no son perfectos. Lamentablemente, las partículas de plata responsables de bloquear la luz en las películas blanco y negro también impiden el paso de la luz infrarroja, por lo que no es posible el uso de esta herramienta para este tipo de películas (Figura 6).

Los escáneres, en general, emplean luz RGB, de manera que la respuesta a cada una de las componentes de color de la película es registrada por el captador correspondiente. Esta manera de proceder funciona muy bien en las películas con emulsión para color. Sin embargo, en los archivos filmicos existen obras precisamente de las épocas más tempranas en las que el color se añade mediante teñidos totales o parciales o incluso pintando a mano fotograma a fotogramas. En este caso, y dependiendo del color y del escáner, las tonalidades capturadas pueden ser distintas a las realmente presentes. Si consideramos que esta fase de digitalización tiene como propósito la fiel representación de todas las características de las imágenes presentes en el material original, dichas desviaciones deben ser corregidas. Hay proyectos de desarrollo de escáneres multispectrales para lograr este propósito, aunque teniendo en cuenta la escasa demanda no es probable que se desarrollen comercialmente o, al menos, no a un coste razonable.

Una estrategia distinta para abordar el problema es la que se quiere implementar en el Centro de Conservación y Restauración de Filmoteca Española, si bien es cierto que se encuentra en su fase inicial. El objetivo es que, durante la inspección del material, y con criterios y metodología científica, se caractericen de manera cuantificable y unívoca las características fundamentales de la imagen en lo relativo a color y densidad, de manera que, disponiendo de dicha información objetiva, seamos capaces tras la digitalización, de compensar las desviaciones producidas durante la captura. El concepto básico es que la digitalización sirva, en esta fase, no tanto para representar las imágenes que se obtendrían en proyección, sino para que dichas capturas documenten de la manera más fiel posible toda la colección de imágenes que compone la obra. Además, dicha caracterización densitométrica y espectral permite saber de manera concreta qué es lo que no se ha podido reflejar en el archivo de imagen. Por ejemplo, algunos colores de tintes no tienen cabida en los sistemas de color utilizados en la actualidad para representar gráficamente los colores. Con esa información podríamos hacer la mejor aproximación posible al color y, cuando la tecnología lo permita, recrear el color en cuestión de manera exacta. Otra posible aplicación es la restauración del color en materiales en los que estos se haya degradado. Si logramos caracterizar científicamente los colores de los tintes que se empleaban con el propósito de teñir películas y conocer su composición química, un análisis del material podría determinar cómo debería ser ese color, y poder recrearlo digitalmente sin depender del buen ojo del colorista, la calibración de los monitores o las desviaciones introducidas en la captura de las imágenes.

Este enfoque permitiría establecer una metodología científica y unos procedimientos acordes con la finalidad de una institución que vela por conservar el patrimonio cultural con sus características primigenias, frente al enfoque mucho menos riguroso de la industria, orientada a la difusión y rentabilización económica de las obras cinematográficas. Las inmensas posibilidades de alteración de la imagen digital, si bien ponen a nuestra disposición una herramienta potentísima para los fines descritos, también posibilitan recrear las imágenes al gusto del consumidor, literalmente. Y es misión de las filmotecas preservar las obras como fueron creadas.

Así la fase de digitalización debe generar la información necesaria para documentar exhaustivamente los materiales originales, y esta información es la que debe pasar al sistema de preservación digital. Una vez obtenida esta información, se eliminan del material todos aquellos añadidos que han hecho posible su digitalización y se devuelven a sus condiciones óptimas de conservación. Con los materiales ya digitalizados se pueden crear materiales que permitan su difusión sin tener que manipular más el material original.

Como ya hemos comentado, los procesos de obtención de copias por medios fotoquímicos implican una disminución de la calidad de la imagen de origen. Con el equipo y los conocimientos adecuados, se pueden obtener imágenes digitales que sean una mejor representación del original que su equivalente fotoquímico.



Figura 7. Fotograma obtenido por digitalización de la copia acetato. Fotografía: Filmoteca Española.



Figura 8. Mismo fotograma obtenido por digitalización del negativo nitrato. Fotografía: Filmoteca Española.

Una vez digitalizado el material puede realizarse la generación de materiales de acceso a la obra, como DCPs para su proyección digital u otros formatos de consulta, difusión u otros, tras los pertinentes procesos de tratamiento de imagen. No olvidemos que la intención de esta digitalización no era la exhibición de la obra, sino la documentación más rigurosa posible de las características del material en lo que a las imágenes que la componen se refiere, por lo que es necesario llevar a cabo ciertos procesos como eliminación de las perforaciones y banda de sonido si la hubiere, incluir el sonido si lo hubiere, ajustar el contraste, estabilización si fuese necesaria, etc. De este modo se podrá ver la obra en el estado en el que estaba al ser digitalizada (Figuras 7 y 8).

Paso 3: restauración digital

Si resulta procedente, las imágenes obtenidas durante el escaneado pueden ser utilizadas para restaurar la imagen, siendo el objetivo de la restauración eliminar los efectos producidos sobre la imagen por el paso del tiempo y las condiciones a que han sido sometidos los materiales originales.

Las herramientas de tratamiento de imagen digital orientadas a la restauración proporcionan recursos extremadamente útiles para eliminar manchas, arañazos, partículas de polvo, deformaciones de la imagen, inestabilidad, parpadeos, fotogramas desaparecidos, roturas, herramientas de corrección de color...

En definitiva, permiten posibilidades que con tecnología fotoquímica resulta o bien difícil, o costoso o, directamente imposible. A continuación veremos algunos ejemplos obtenidos con el *software* DIAMANT y DavinciResolve.

Recreación del color

Ejemplo 1: *Frivolinas*

Partiendo de un negativo nitrato blanco y negro, se recreó el color de la película *Frivolinas* (Arturo Caballero, 1926), primero en 1999 por procedimientos fotoquímicos por el método de desmetcolor para conseguir el color en fotogramas con teñidos más virados. En 2019, y bajo la supervisión de Luciano Berriatúa, responsable de la restauración de 1999, se recreó el color con técnicas digitales tras la digitalización del mismo negativo nitrato blanco y negro (Figuras 9 y 10).



Figura 9. Recreación del color por procedimientos fotoquímicos. Fotografía: Filmoteca Española.

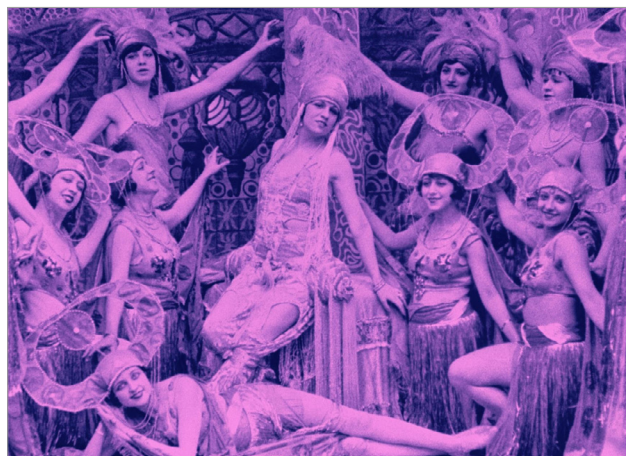


Figura 10. Recreación del color por medios digitales. Fotografía: Filmoteca Española.

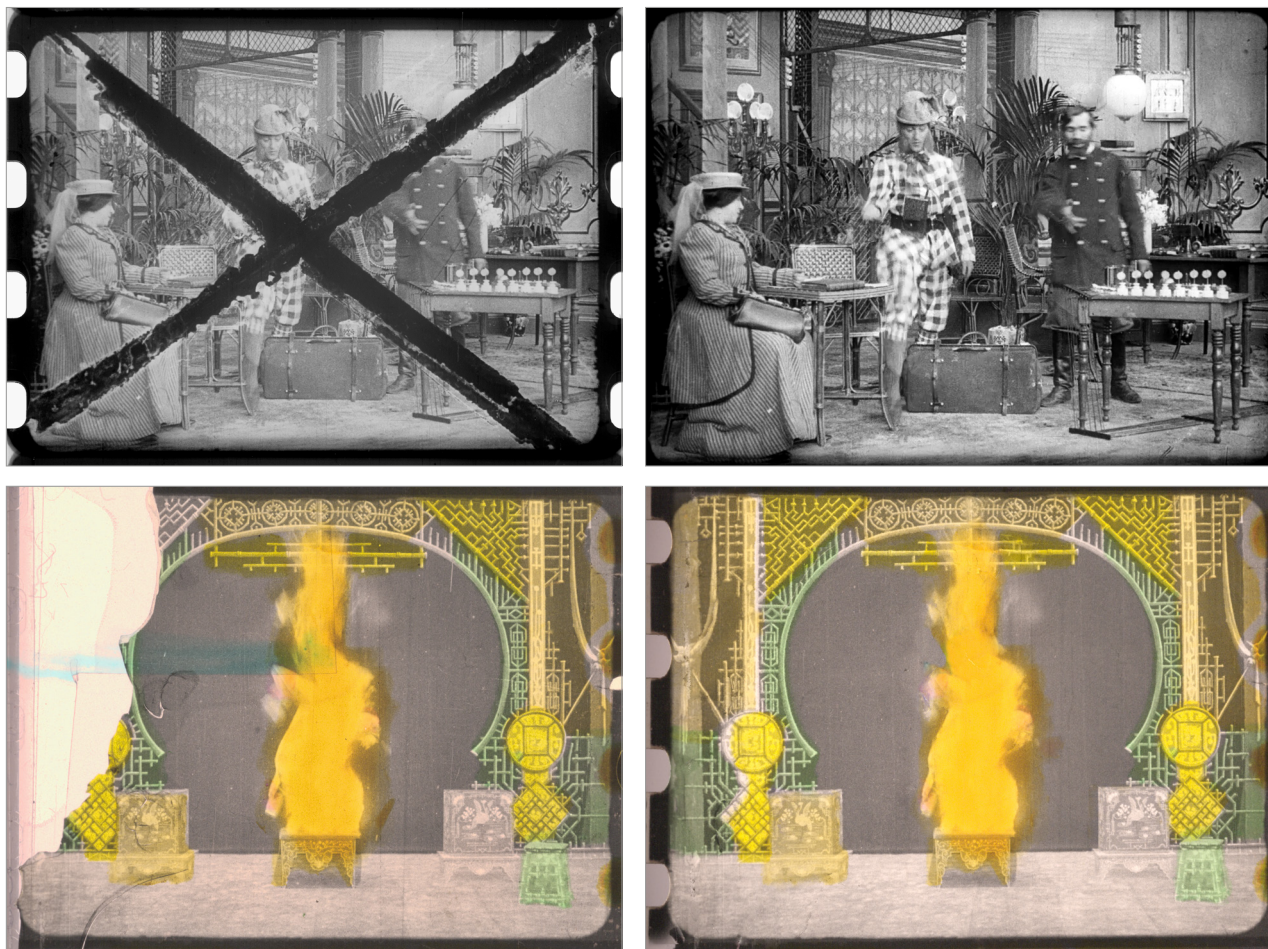
Ejemplo 2: *Pontevedra, cuna de Colón.*

Esta obra de Enrique Barreiro de 1927 es sumamente peculiar. El cineasta experimentó en los años 20 con sistemas fotográficos diversos para obtener imágenes en color, al parecer con éxito según las crónicas. En la Filmoteca Española estaban depositados materiales del fondo del cineasta provenientes de la Filmoteca de Galicia, muchos de ellos aún por investigar. Uno de dichos sistemas de invención propia era el Cinecromo, en el que mediante un filtro rotatorio fundamentalmente bicolor se impresionaba en negativo la respuesta de la luz al pasar por el filtro, obteniéndose en imágenes sucesivas la componente de color pertinente. Posteriormente se teñían alternativamente los fotogramas, ora verde azulado, ora rojo magenta.

La idea era que la persistencia retiniana actuara a modo de mezclador de dichas componentes obteniendo imagen al color si dicha dupla de imágenes se reproducía a la velocidad pertinente. Tras digitalizar los materiales, al reproducirlos no se producía el efecto policromo. Gracias a herramientas digitales se restituyó el color, ya degradado en el material, en especial los magenta que aparecían prácticamente en blanco y negro, se separaron los fotogramas de cada color y se superpusieron a modo de capas. Finalmente se alineaban pertinentemente los fotogramas obteniendo así imágenes policromáticas, sin duda próximas a las que se exhibieron el día de su estreno. Tras esos procesos el resultado es el que se ve en la siguiente imagen (Figura 11).



Figura 11. Reconstrucción digital de color partiendo de dos fotogramas con sistema de color Cinecromo. Fotografía: Filmoteca Española.



Imágenes 12-15. Dos ejemplos de reparaciones digitales de daños mayores, mostrando la imagen original a la izquierda y la restaurada a la derecha. Fotografías: Filmoteca Española.

Limpieza y reparación

A continuación se muestran dos ejemplos de reparaciones digitales de daños mayores, mostrando la imagen original a la izquierda y la restaurada a la derecha (Figura 12, 13, 14 y 15).

Paso 4: creación de materiales de difusión

Una vez terminada la fase de restauración, se almacenarán los archivos resultantes en el sistema de preservación digital con sus metadatos pertinentes si se estima oportuna su conservación a largo plazo.

No olvidemos que son un producto derivado de los materiales originales digitalizados, que se ingestaron en el sistema de preservación digital tras su digitalización y sus correcciones si las hubiere, por lo que la preservación a largo plazo de los materiales restaurados digitalmente es opcional.

Después se crearán los materiales de acceso que permitan reproducir la obra completa restaurada, como DCPs, másteres en Quicktime, o los formatos que se estimen oportunos.

Paso 5: Obtención de una copia en film

Los materiales digitales ya se encuentran en el sistema de preservación digital. Idealmente, y como mecanismo extra de seguridad, existen equipos como el Cinevator Five que permiten, a

partir de los materiales digitales, restaurados o no, la obtención directa mediante impresión láser sobre película de 35 mm.

Conclusión

La tecnología permitió la aparición de una nueva forma de arte y testimonio de épocas pretéritas, capaz de hacer viajar desde el pasado hasta nuestros días escenas cotidianas de otro tiempo, acontecimientos históricos, o relatos surgidos de la imaginación del ser humano con una viveza como no era posible antes. Y es precisamente la evolución tecnológica la que puede borrar ese documento irrecuperable del pasado y de nuestro presente para generaciones venideras.

En una especie de triple salto mortal, es también la tecnología la única que nos permitirá evitar que esas imágenes y sonidos desaparezcan para siempre, como si nunca hubiesen existido. El inexorable paso del tiempo amenaza tanto las creaciones primeras como la ingente producción de obras cinematográficas que se producen a día de hoy. Ciencia y tecnología, de la mano, pueden hacer posible que esa riqueza, patrimonio de toda la humanidad, sea registrada y preservada de manera fiel al momento de su concepción desarrollando el conocimiento, los métodos y las herramientas necesarias para ello. Pero ciencia y tecnología no son nada sin la firme voluntad y propósito de llevar a cabo las acciones necesarias para preservar este tesoro de incalculable valor.

Bibliografía

- ACADEMY OF MOTION PICTURE ARTS AND SCIENCES (2007): *The Digital Dilemma: Strategic Issues in Archiving and Accessing Digital Motion Picture Materials*. Beverly Hills, California: Academy of Motion Picture Arts and Sciences.
- DEL AMO, A. (2006): *Clasificar para preservar*. Madrid: Cineteca Nacional/ Filmoteca Española.
- ISO (junio de 2012): «ISO 14721:2012. Space data and information transfer systems -- Open archival information system (OAIS) -- Reference model».

Aplicación de SIG al estudio científico y la difusión de resultados. La Predela del Centenar de la Ploma

Application of GIS to scientific study and dissemination of results. The Predella del Centenar de la Ploma

David Juanes Barber

Institut Valencià de Conservació, Restauració i Investigació
david.juanes@ivcri.gva.es

Resumen: Los estudios científicos aplicados a la conservación del patrimonio generan una gran cantidad de información que en la mayoría de los casos es difícil de gestionar y tratar de un modo eficaz. En general, es necesario realizar el proceso de comparación e integración de distintos grupos de datos y resultados procedentes de distintas técnicas de análisis lo que provoca que la obtención de resultados sea una tarea compleja. Es por ello por lo que se ha realizado una prueba piloto basado en la tecnología SIG con los estudios previos realizados a la Predela del Retablo del Centenar de la Ploma, empleando un *software* libre y de código abierto QGIS® para gestionar y optimizar el tratamiento de la información derivada de los estudios científicos con dos objetivos fundamentales: ayudar a planificar los estudios científicos y proporcionar una forma de acceso sencilla e intuitiva a los conservadores, restauradores e investigadores, implementando además la difusión *on-line* de los resultados mediante web.

Palabras clave: SIG, estudios previos, planificación, acceso, difusión.

Abstract: Scientific studies applied to heritage conservation generate a large amount of information that in most cases is difficult to manage and treat in an efficient way. In general, it is necessary to carry out the process of comparing and integrating different groups of data and results from different analysis techniques, which makes obtaining results a complex task. For this reason, a pilot test based on GIS technology has been carried out with the previous studies made on the Predela del Retablo del Centenar de la Ploma, using free and open source QGIS software to manage and optimize the processing of information derived from scientific studies with two fundamental objectives: to help in planning scientific studies and to provide a simple and intuitive form of access for conservators, restorers and researchers, also implementing the on-line dissemination of the results on the web.

Keywords: GIS, preliminary studies, planning, access, dissemination.

Introducción

Actualmente, los estudios científicos focalizados a la caracterización de materiales y al diagnóstico del estado de conservación de los bienes culturales representan unas herramientas indispensables en las intervenciones de conservación o en la documentación de las obras de interés artístico e histórico.

Desde el punto de vista analítico, la obra de arte tiene una naturaleza físico-química indisoluble a su valor histórico, artístico y cultural que la hace única e irrepetible. Esta naturaleza físico-química es la que permite desvelar su estructura constitutiva a partir de los análisis de los materiales. La interpretación de estos resultados permite obtener información acerca de su método de elaboración, reutilizaciones, arrepentimientos, intervenciones y el comportamiento de la obra a lo largo del tiempo hasta ofrecer la imagen que se muestra en la actualidad. Todos estos datos facilitan la comprensión y el entendimiento de la obra, además de enriquecer su contemplación y desvelar la multiplicidad de su significado.

El Institut Valencià de Conservació, Restauració i Investigació (IVCR+i) sigue un protocolo de análisis que se inicia en primer lugar con los estudios globales con técnicas no destructivas sin toma de muestra, que agrupa a todas aquellas técnicas basadas en la obtención de una imagen a través de la interacción de la materia con radiación electromagnética de distintas longitudes de onda, desde las más sencillas como la fotografía visible (con luz reflejada o transmitida, con iluminación rasant, etc.) y la fotografía mediante fluorescencia ultravioleta; o más complejas como la reflectografía infrarroja, la radiografía y la tomografía computarizada (TC).

Los resultados de los análisis globales sirven de punto de partida para los análisis puntuales no destructivos y sin toma de muestras mediante distintas técnicas espectroscópicas como la fluorescencia de rayos X (EDXRF). El desarrollo de técnicas portátiles permite, además, realizar grandes barridos a las obras sin que éstas sufran daños de ningún tipo, por lo que se pueden realizar estudios de aquellas zonas en las que no es posible la toma de muestra, ya sea porque afecta a la lectura de la obra o porque implicaría una pérdida irreparable desde el punto de vista material e histórico.

A partir de los resultados proporcionados por los estudios previos anteriormente descritos, y en caso de que queden determinadas cuestiones sin respuesta, se planifica la toma de micromuestras de tamaño no superior a 1 mm³. Este paso tiene como base todos los resultados de los análisis anteriores, por lo que es un proceso optimizado, que minimiza su número. Las áreas de interés para la toma de micromuestras suelen ser, en la medida de lo posible, zonas no visibles y zonas con diferentes alteraciones como pérdidas de materiales, fracturas, etc. y que pueden aportar la máxima información requerida (Ferrazza *et al.*, 2019).

Dentro del amplio abanico de las técnicas analíticas aplicadas al estudio de las micromuestras, el análisis de las secciones transversales en pintura de caballete es la que más información aporta, ya que es la única que permite establecer, de manera exacta y precisa, la secuencia de los estratos que constituyen la capa pictórica (Del Egido, Juanes y Bueso, 2013).

Todo este conjunto de técnicas de análisis genera una gran cantidad de información que tiene que ser gestionada y analizada de un modo exhaustivo y eficaz para que sea útil. El uso de diferentes técnicas de análisis conlleva el uso de distintos *softwares* específicos que gestionan y proporcionan los resultados de manera distinta, por lo que el acceso y la comparación de la información requieren un trabajo tedioso de análisis y comparación. Es por ello que se empleó la tecnología GIS para ir volcando la información y los resultados que iban aportando los estudios científicos en cada fase en un proyecto único.

La tecnología GIS aplicada a la conservación y restauración de las obras pictóricas se centró inicialmente en la evaluación del estado de conservación de la obra pictórica cuantificando el grado de deterioro de la superficie (Fuentes-Porto, 2011; Henriques y Gonçalves, 2013; Marco *et al.*, 2018), o la evolución del estado de conservación de la pintura mediante escaneado láser, e implementando y comparando los resultados usando un sistema GIS (Pires *et al.*, 2007; Baratin *et al.*, 2016). Sin embargo, la capacidad de georreferenciar información sobre la obra en distintas capas, permite implementar un sistema de documentación basado en GIS en el que se encuentren integrados tanto los resultados de los estudios previos, el estado de conservación y los procesos de intervención (Henriques *et al.*, 2016; Cardeira *et al.*, 2017).

En este trabajo se muestra la utilidad de implementar un sistema GIS con los estudios científicos previos a la intervención de los bienes culturales para la gestión y difusión de los estudios científicos, tomando como ejemplo de aplicación, los estudios científicos de la *Predela del Retablo del Centenar de la Ploma*. Se creó un proyecto empleado QGIS® en el cual se volcó y georreferenció la información de cada análisis sobre la obra en distintas capas, vinculando los resultados asociados en forma de base de datos, lo que permitió de forma sencilla evaluar, comparar y analizar resultados, y planificar de modo más sencillo y eficaz el diseño de la metodología de análisis en cada una de las fases del estudio científico.

Por último, con el objetivo de difundir los resultados de la investigación, se realizó un volcado *on-line* de la información incluida en el proyecto.

Caso de estudio

La predela del Retablo de San Jorge del Centenar de la Ploma datada en el siglo xv, llegó al IVCR+i en el mes de abril de 2019 procedente del Victoria and Albert Museum de Londres con el objetivo principal de realizar un profundo estudio histórico-artístico, material y técnico, y llevar a cabo un proceso de conservación y restauración acorde con las características materiales e inmateriales de la obra.

La predela, en la que se representan diez escenas de la Pasión de Cristo, a falta de una parte central desaparecida, ha sido sometida a un profundo estudio previo al proceso de intervención como parte de una investigación multidisciplinar que comprende tres aspectos: la historia del objeto y el estudio histórico estilístico, llevado a cabo por historiadores, y el estudio material y de técnica de ejecución que involucró a restauradores y científicos.

El Retablo del Centenar de la Ploma, atribuido a Miquel Alcanyis y Marçal de Sax, y probablemente a otros pintores afincados en Valencia, y pintado a inicios del siglo xv, estaba situado en la desaparecida iglesia de Sant Jordi de Valencia. Este retablo es un referente fundamental del gótico internacional valenciano y representa en una de sus escenas principales la batalla de El Puig, que abrió las puertas a la conquista de Valencia en 1238.

Metodología

Sistema GIS

Dentro de las posibilidades de *software* SIG, se escogió QGIS® V.3.14.1 y V.3.6 para el desarrollo de este trabajo ya que es un programa gratuito de código abierto bastante extendido, de fácil uso, con recursos y tutoriales *on-line*, una amplia variedad de complementos y disponibilidad en los distintos sistemas operativos más extendidos (*QGIS. A Free and Open Source Geographic Information System*, 2020).

El *software* QGIS® permite trabajar con múltiples capas simultáneamente de tipo espacial o matricial, y vectorial a las que se le puede asociar una tabla de atributos que hace las funciones de una base de datos. Esta capacidad es de gran utilidad a la hora de gestionar la información derivada de los estudios científicos previos. En este caso, se diseñó una tabla de atributos específica para cada tipo de análisis que recogiera la información más relevante obtenida con esa técnica.

Las imágenes visibles, ultravioleta, infrarroja, radiográfica y TC, se incluyen en formato matricial, mientras que las zonas de microscopía portátil, análisis EDXRF y toma de muestras se incluyen como distintas capas vectoriales, que pueden superponerse a las capas matriciales, y que pueden llevar asociada una tabla de datos con distintos campos de texto y enlaces hiperenlace, que permite un tratamiento similar a las bases de datos en los que se refiere a búsquedas y filtros.

Para la difusión de los datos mediante web, se empleó el complemento QGIS2WEB (Chadwin *et al.*, 2020)

Estudios previos

Como se ha mencionado anteriormente, el protocolo que se sigue en el IVCR+i para realizar los estudios científicos consta de tres fases. Se inicia, en primer lugar, con los estudios globales con técnicas no destructivas sin toma de muestra que agrupan a todas aquellas técnicas basadas en la obtención de una imagen a través de la interacción de la materia con radiación electromagnética de distintas longitudes de onda, los análisis puntuales no destructivos y sin toma de muestras mediante distintas técnicas espectroscópicas y finalmente la toma planificada y optimizada de micromuestras.

Fotografía visible, infrarroja y ultravioleta

Se realizó un registro fotográfico llevado a cabo por Miriam Fernández Osca con luz ultravioleta empleando cámara Canon EOS 5D Mark III con objetivos Canon EF 70-200mm 1:2,8L IS II USM Canon, Canon EF 24-70mm f/4L IS USM, Canon EF 40mm f/2.8 STM, AF-S DX NIKKOR 18-105mm f/3.5-5.6G ED VR, e iluminación con lámpara incandescente, tubos UV e interponiendo filtros UV para el caso de la imagen de fluorescencia ultravioleta.

Para la imagen de reflexión infrarroja se empleó una cámara Canon EOS 5D Mark III sin filtro interno e interponiendo un filtro de 720 nm.

Radiografía

La aplicación de la radiografía al campo de la investigación, conservación y restauración de bienes culturales, es una técnica de análisis basada en imagen totalmente consolidada y presente en los centros de conservación y restauración y museos más relevantes. De hecho, la radiografía convencional ha sido empleada desde el siglo XIX, para corroborar el estado de conservación, el proceso de manufactura y las partes en las que una obra de arte estaba elaborada (Madrid García, 2000, 2012; Middleton y Lang, 2005; Cabal Rodríguez *et al.*, 2012).

Los estudios radiográficos son uno de los estudios previos básicos que se realizan a las obras de arte y permiten evaluar, de forma no invasiva, el estado de conservación de la obra a partir de la detección de deterioros ocultos (grietas, faltantes, elementos metálicos, etc.), la técnica de ejecución y la presencia de intervenciones anteriores (detección y localización de restauraciones anteriores, reutilizaciones, etc.). Toda esta información es de gran importancia a la hora de establecer una metodología de conservación y restauración, y de estudiar desde el punto de vista histórico-artístico una obra.

El estudio radiográfico fue llevado a cabo por el Dr. José Antonio Madrid García del Laboratorio de Inspección Radiológica, del Instituto Universitario para la Restauración del Patrimonio, en la

Universitat Politècnica de València, empleando TRANSPORTIX 50 de General Electric® con un voltaje máximo de 100 KVp y una intensidad fija de 15 mA, un chasis radiográfico CR MDT4.0T (Agfa), en sistema digital (35 × 45 cm.) y un digitalizador CR 30-X (Agfa)¹. Se fijaron unas condiciones de trabajo de 56 kV, 15 mA y 4 s de tiempo de exposición para el panel izquierdo y de 51 kV, 16 mA y 4 s de tiempo de exposición para el panel derecho, siendo necesarias 16 y 14 placas respectivamente, para la obtención del mosaico que fue tratado posteriormente para obtener la composición final.

Análisis mediante tomografía computarizada de uso médico

La tomografía computarizada de uso médico (TC) es un método de diagnóstico global no invasivo basada en el análisis mediante imágenes digitales de espesor milimétrico en distintos planos del interior de cualquier objeto que pueda ser atravesado por un haz de rayos X. Estas imágenes poseen un alto contraste que permite distinguir entre materiales con una diferencia de densidad menor al 1%. Dicha técnica proporciona una valiosísima información a la hora de estudiar la estructura interna y la técnica de ejecución, analizar las condiciones de conservación y planificar los procesos de restauración. Generalmente, esta técnica de análisis se aplica a objetos tridimensionales (escultura, arqueología, etc.) pero también es aplicable a pintura de caballete e incluso textil (Morigi *et al.*, 2007; Ferrazza, Juanes Barber y Ohiriuel Ferrándiz, 2012; Juanes Barber y Ferrazza, 2012, 2014; Re *et al.*, 2014; Allegra *et al.*, 2016; Sarrió Martín, 2016).

El estudio mediante tomografía computarizada de uso médico (TC), se realizó en el Servicio radiodiagnóstico del Hospital Clínico Universitario de Valencia empleando un equipo Toshiba Aquilon /LB trabajando a 135 kV con un protocolo de preprocesado Hueso 1.0, obteniendo reconstrucciones axiales cada 1 mm.

La longitud de los dos paneles de la predela impedía realizar un único escaneo de cada uno de ellos, por lo que se realizaron dos escáneres continuados de cada uno de los paneles.

Para el postprocesado de la información y las reconstrucciones axiales, coronales, sagitales y 3D se empleó el *software* HOROS™ («HOROS PROJECT», 2020).

Análisis mediante microscopía óptica portátil

La observación y análisis de la predela mediante microscopía óptica portátil se realizó *in situ* con un microscopio DinoLite modelo AM4000.



Figura 1. Áreas analizadas mediante microscopía portátil del panel izquierdo. Fotografía: IVCR+i.

¹ José Antonio Madrid García. Informe RX 831 y 842. Laboratorio de Inspección Radiológica, del Instituto Universitario para la Restauración del Patrimonio, en la *Universitat Politècnica de València*.

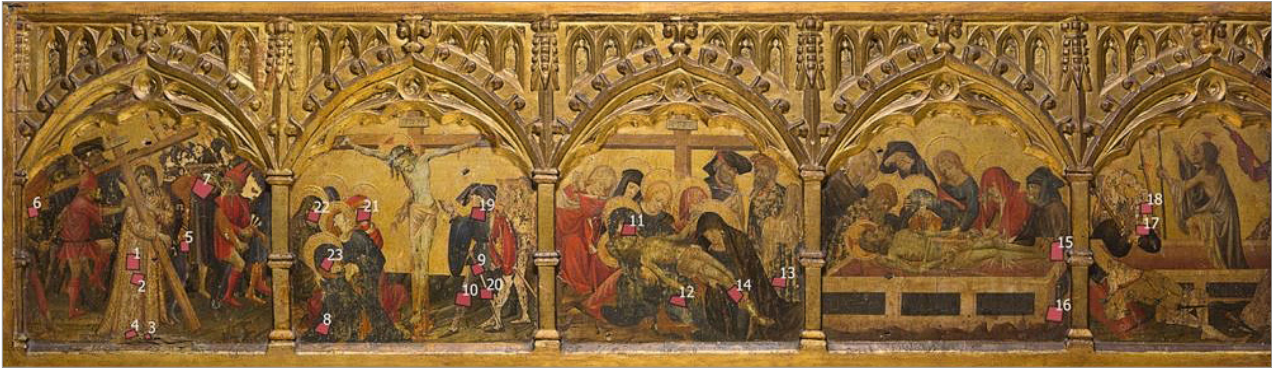


Figura 2. Áreas analizadas mediante microscopía portátil del panel derecho. Fotografía: IVCR+i.

Se adquirieron un total de 42 áreas, 19 corresponden al panel izquierdo (Figura 1) y 23 al panel derecho (Figura 2).

La observación con detalle mediante la microscopía portátil permitió obtener una valoración inicial de la técnica de ejecución y el estado de conservación de los dos paneles.

Análisis por EDXRF de la pintura

El análisis EDXRF empleando equipos portátiles se ha extendido mucho durante los últimos años. Esta técnica permite realizar un amplio barrido puntual de la obra portando información químico elemental sin toma de muestra y de forma no destructiva. Sin embargo, los equipos EDXRF portátiles, que realizan los estudios *in situ* y sin condiciones atmosféricas especiales, tienen dificultades en el análisis de elementos ligeros por debajo del silicio, por lo que su uso se restringe al análisis de compuestos inorgánicos (Juanes Barber, 2002, 2011; Roldán *et al.*, 2011).

El estudio mediante EDXRF fue realizado empleando un equipo EDXRF portátil ELIO de Bruker fijando unas condiciones de trabajo de 40 kV, 50 microA y 60 segundos de adquisición. El diámetro de la zona de análisis fue de 1 mm.

Se realizó un amplio barrido de la obra con un total de 183 análisis EDXRF, 95 puntos en el panel izquierdo y 88 en el panel derecho (Figura 3 y Figura 4).

Análisis con toma de micromuestras

Como se ha dicho al principio, los análisis con toma de micromuestras están basados en todos los resultados de los análisis anteriores, por lo que es un proceso representativo y optimizado que

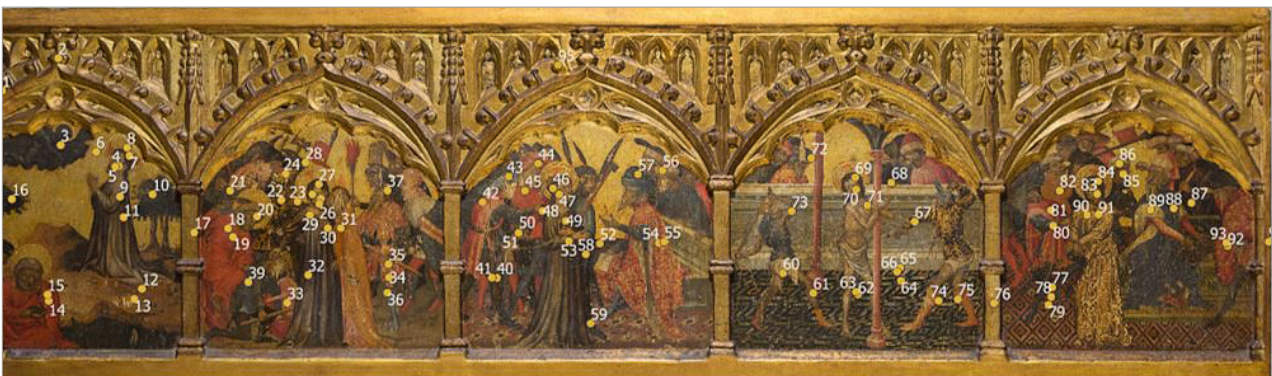


Figura 3. Puntos de análisis EDXRF del panel izquierdo. Fotografía: IVCR+i.

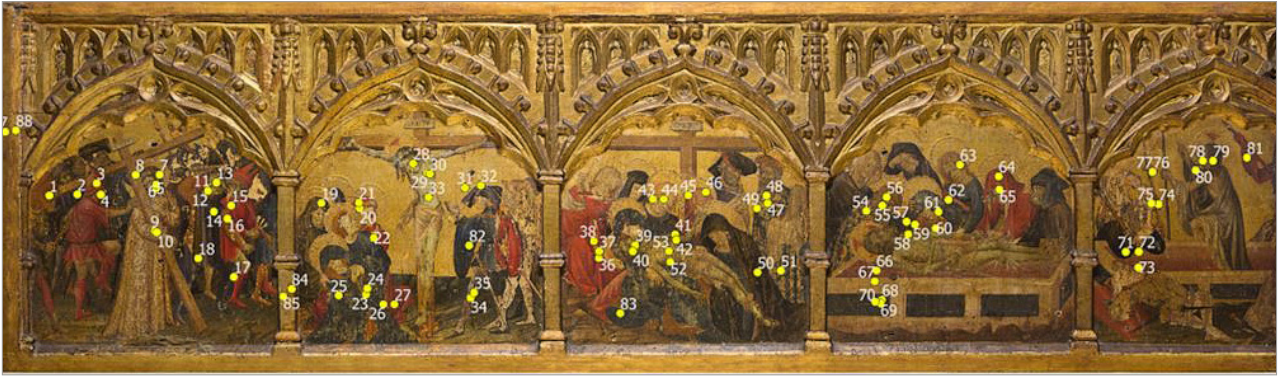


Figura 4. Puntos de análisis EDXRF del panel derecho. Fotografía: IVCR+i.

minimiza su número. Las áreas de interés para la toma de micromuestras suelen ser, en la medida de lo posible, zonas que no afecten a la lectura de la obra y que puedan aportar la máxima información requerida (Juanes Barber y Ferrazza, 2015).

Se tomaron un total de 29 micromuestras que incluían zonas de pintura original y zonas de intervención. En su análisis se incluyeron los estudios estratigráficos que se realizan sobre superficies pulidas de las micromuestras incluidas en resina poliéster o epoxídica. Estos análisis permiten la caracterización de los pigmentos en forma, dimensión y propiedades ópticas, el estudio de la técnica pictórica, detectar la presencia de intervenciones posteriores, etc.

— Metodología

En los análisis de las micromuestras se siguió la siguiente metodología:

- Observación y estudio previo de las micromuestras. Se empleó un microscopio estereoscópico Nikon SMZ1000 con el que se realizaron microfotografías de las micromuestras con una cámara digital Nikon DS-2Mv acoplada al microscopio. Mediante este estudio se realizó un examen general de la muestra y se empleó para la selección de fragmentos representativos para su posterior estudio estratigráfico, espectroscópico, etc.
- Estudio morfológico. Las micromuestras se incluyeron en una resina incolora y transparente, a continuación, se cortó y lijó hasta obtener una sección transversal bien definida. Las secciones estratigráficas transversales pulimentadas se estudiaron con un microscopio óptico Nikon modelo ECLIPSE 80i con cámara Nikon DS-Fi1, provisto de luz incandescente reflejada y polarizada e iluminación UV.
- Identificación de los componentes inorgánicos. Se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido-microanálisis por dispersión de energías de rayos X (SEM-EDX), empleando un equipo Bruker-Quantax X Flash, acoplado a un microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3400N.
- Determinación del recubrimiento superficial. Se efectuó con un espectrómetro de infrarrojos mediante transformada de Fourier (FTIR) Bruker-Tensor II acoplado a un microscopio Hyperion 2000 de Bruker. El análisis se realizó a pequeños fragmentos de recubrimiento sobre una pastilla de KBr, obteniendo el análisis microftir por transmisión empleando un objetivo IR 15X.
- Determinación de la presencia de materiales grasos, resinosos o cerosos mediante cromatografía de gases empleando un equipo Agilent Technologies GC-6890N-MS 5973, con una columna capilar HP-5MS y con un flujo de 1 ml/min de helio como gas portador ².

² Análisis realizado por Arte-Lab, S.L. Ref.:12A_2019

Resultados

Imagen visible y de fluorescencia ultravioleta

Se obtuvieron dos imágenes en formato TIFF, una visible para cada uno de los lados de la predela de 11466 píxeles x 3340 píxeles, que fueron georreferenciadas introduciendo las dimensiones reales de la obra. De este modo, se puede obtener posiciones reales de objetos, áreas de interés y posicionar las distintas capas vectoriales. Sobre este objeto ráster³, se fueron añadiendo las distintas capas de información.

En primer lugar, se añadió una capa ráster correspondiente a la imagen de fluorescencia ultravioleta. La utilidad de transparencia permite variar con gran facilidad el grado de transparencia de la capa, lo que facilita el análisis, que mostró que había una capa de barniz bastante extensa, las gotas de cera y algunas zonas de intervención anterior principalmente en las molduras doradas (Figura 5).

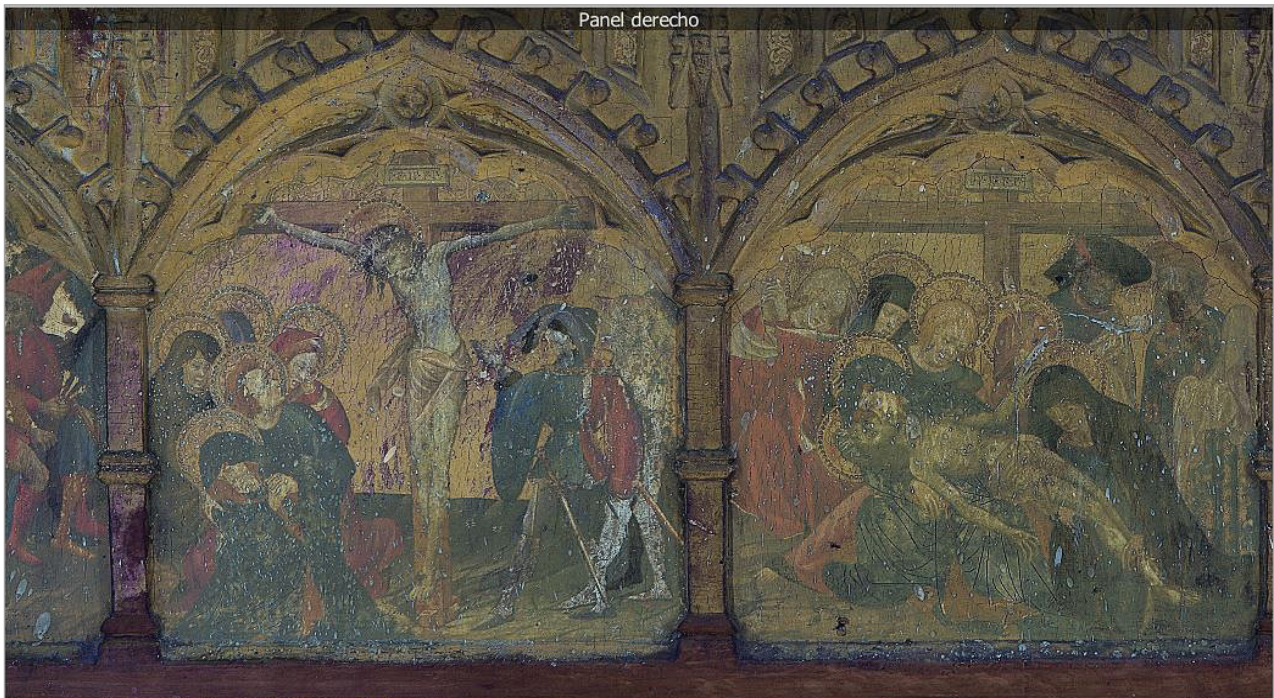


Figura 5. Detalle de la superposición de la visible y la imagen de fluorescencia ultravioleta del lado derecho de la predela. Fotografía: IVCR+i.

Estudio radiográfico

El estudio radiográfico fue tratado como una capa ráster. La georreferenciación de la radiografía y la superposición de la imagen radiográfica y visible facilitaron la localización de exacta de los elementos de interés, principalmente elementos metálicos antiguos, recientes y ocultos, zonas de mayor concentración de pintura, detección de dibujo inciso, etc.

³ Los ráster se componen de una matriz de píxeles (también llamadas celdas), cada uno con un valor que representa las condiciones de la zona cubierta por dicha celda. Los datos ráster se pueden obtener de varias formas. Dos de las formas más comunes son la fotografía aérea e imagen de satélite. (https://docs.qgis.org/2.14/es/docs/gentle_gis_introduction/raster_data.html visitado el 11/09/2020).



Figura 6. Detalle de la superposición de la imagen visible y la radiográfica del lado derecho de la predela. Fotografía: IVCR+i.

Estudio TC médica

Los estudios TC han permitido contabilizar, ubicar y clasificar los distintos elementos metálicos que hay visibles y ocultos en la predela. A diferencia del estudio radiográfico, las dimensiones que proporcionan la TC son reales ya que no sufren deformación por efecto de la focal del tubo de rayos X.

El propio *software* de gestión de las imágenes de la TC proporciona mucha información sobre dimensiones y ubicaciones de zonas de interés, así como distintas reconstrucciones 2D y 3D de la predela, por lo que se optó por incluir una única imagen ráster de la sección longitudinal de la tabla que recoge a modo de resumen los cinco generales elementos de interés que se han identificado mediante la TC: elementos metálicos (antiguos y nuevos), grietas, ataque de xilófagos, material de relleno y material añadido (Figura 7). Estos elementos introdujeron en una capa vectorial con un hipervínculo al informe TC.



Figura 7. Detalle de la superposición de la imagen visible y la TC del lado derecho de la predela. Fotografía: IVCR+i.

Análisis mediante microscopía óptica portátil

Se adquirieron un total de 42 áreas, 19 corresponden al panel izquierdo y 23 al panel derecho. Se diseñó una capa vectorial para representar cada una de las zonas analizadas mediante microscopía portátil. En esta capa se incluyó una tabla de atributos con cuatro campos que describen la identificación del punto, la descripción, un breve resultado de la observación y un hipervínculo a la imagen adquirida (Figura 1 y Figura 8).

Figura 8. Captura de pantalla de la tabla de atributos asociada a la capa vectorial de la microscopía portátil.

En este caso se describe la zona 6 de la tabla izquierda de la predela, que corresponde a una zona de la vestimenta, en la que se puede observar la presencia de arañazos en la superficie, pérdidas de capa pictórica, así como constatar la delgadez de la pintura. En diferentes zonas con pérdidas de capa pictórica, era posible observar la capa de preparación blanca compuesta al menos de dos estratos.

Análisis mediante EDXRF

La elección de los puntos de análisis se basó en los resultados de los estudios anteriores, por lo que tener toda esta información volcada en QGIS® facilitó enormemente el proceso de selección de puntos de análisis EDXRF de las dos partes de la predela. En el proceso de análisis EDXRF se tuvo en cuenta la presencia de zonas de intervención anterior y de elementos metálicos ocultos. Así mismo, la constatación de que la capa pictórica es delgada aplicada sobre una preparación blanca ayudó a interpretar los espectros EDXRF obtenidos.

Se realizó un amplio barrido de la obra con un total de 183 análisis EDXRF, 95 puntos en el panel izquierdo y 88 en el panel derecho (Figura 3 y Figura 4).

Se diseñó una capa vectorial para representar cada una de las zonas analizadas mediante EDXRF. En esta capa se incluyó una tabla de atributos con cinco campos que describen la identificación del punto, la descripción, las líneas de fluorescencia de rayos X más intensas y menos intensas en el espectro más significativas desde el punto de vista de análisis de pintura, un breve

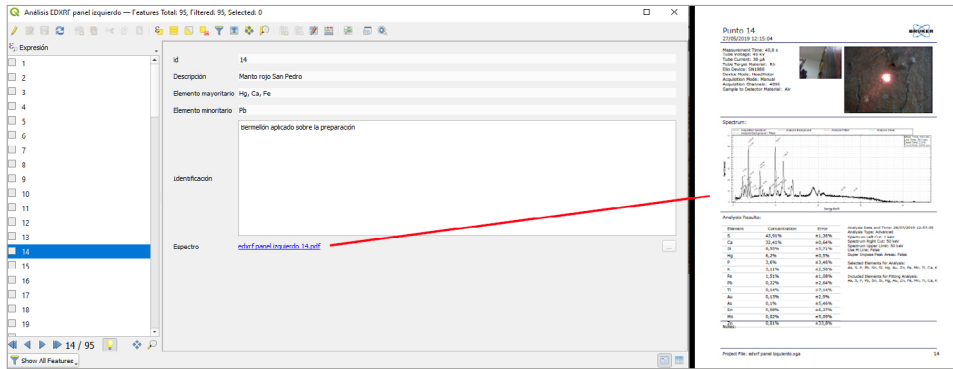


Figura 9. Captura de pantalla de la tabla de atributos asociada a la capa vectorial de la EDXRF.

resultado de la observación y un hiperenlace al resultado generado por el *software* de análisis EDXRF de ese punto (Figura 9).

En este caso se describe el punto 27 de la tabla izquierda de la predela, que corresponde al pelo marrón de Cristo, en la que se detectó principalmente (por orden de intensidad de líneas de fluorescencia de rayos X en el espectro) Pb, Ca, Fe y Cu, siendo el Zn un elemento minoritario significativo. El resultado inicial del estudio indicó que se usó blanco de plomo, pigmento tierra basado en óxidos y/o hidróxidos de hierro y un verde basado en cobre. La presencia de zinc sugiere que la zona fue intervenida anteriormente de forma puntual.

La tabla de atributos asociada a la capa vectorial facilitó enormemente la gestión de los 183 puntos de análisis, ahorrando tiempo en la comparación de resultados analizados, ya que permite el filtrado de los datos por color, descripción, presencia de elementos químicos, etc. Lo que ayuda en la obtención de comparativas y resultados.

El estudio EDXRF se realizó comparando tonalidades de ambas tablas. Un ejemplo de ello fue la comparación de las carnaciones analizadas en los dos lados de la predela. Para ello se realizó una búsqueda de los espectros EDXRF de las carnaciones de los dos lados de la predela, obteniendo dos tablas fácilmente comparables (Figura 10 y Figura 11).

El estudio de las encarnaciones de la pintura de la predela ha puesto de manifiesto que existe una diferencia entre los dos paneles. Las encarnaciones del panel izquierdo se caracterizan por

id	Descripción	Elemento mayoritario	Elemento minoritario	Identificación	Espectro
1	4 Carnación de Cristo	Pb, Ca, Cu	Fe	Blanco de plomo, verde de cobre y tierras. Se empleó verdacho para la ca...	EDXRF/espectr...
2	5 Carnación rosada	Pb, Ca, Cu, Fe	Hg	Carnación similar al punto 4 pero con bermellon para dar el tono sonrosa...	EDXRF/espectr...
3	20 Carnación. Frente del santo	Pb, Cu, Ca, Fe, Hg	NULL	Blanco de plomo, tierras, verde cobre y bermellón. Se emplea el verdacho	EDXRF/espectr...
4	25 Carnación. Mejilla de Cristo	Pb, Ca, Cu, Fe, Hg	NULL	Blanco de plomo, verde de cobre, bermellón y tierras. Se emplea verdacho	EDXRF/espectr...
5	30 Carnación. Mano de Judas	Cu, Pb, Ca, Fe	NULL	Verde cobre, blanco de plomo y tierras	EDXRF/espectr...
6	47 Carnación mejilla de Cristo	Pb, Ca, Cu, Fe	NULL	Blanco de plomo, pigmento tierra y verde de cobre.	EDXRF/espectr...
7	48 Carnación Mano	Pb, Ca, Cu, Fe	NULL	Idem Punto 47	EDXRF/espectr...
8	61 Carnación pierna	Cu, Pb, Ca, Fe, Hg	NULL	Blanco de plomo, verde de cobre, tierras y bermellon	EDXRF/espectr...
9	70 Carnación Mejilla de Cristo	Pb, Cu, Ca, Hg, Fe	NULL	Blanco de plomo, tierras, verde cobre y bermellón	EDXRF/espectr...
10	71 Carnación Mano de Cristo	Pb, Ca, Cu, Ca, Fe	Hg	Idem Punto 72, aunque con menos bermellon	EDXRF/espectr...
11	73 Carnación Brazo del personaje	Cu, Pb, Ca, Fe, Hg	Mn	Verde de cobre, blanco de plomo, tierras, bermellon. Se detecta Mn lo qu...	EDXRF/espectr...
12	83 Carnación Mejilla de Cristo	Pb, Cu, Ca, Fe	Hg	Blanco de plomo, tierras, verde cobre y bermellón	EDXRF/espectr...
13	85 Carnación Mejilla del personaje	Pb, Cu, Ca, Fe, Hg	NULL	Blanco, tierras, verde cobre, bermellón	EDXRF/espectr...

Figura 10. Captura de pantalla de los resultados de las encarnaciones de panel izquierdo de la predela.

id	Descripción	mentos mayoritar	Elementos minoritarios	Identificación de pigmentos	
4	Carnación personaje	Pb, Fe, Ca	Cu	Blanco de plomo y tierras. No se detecta verdacho	NULL
5	Carnación	Pb, Ca, Fe	Cu	Blanco de plomo y tierras	NULL
6	Carnación de cristo	Pb, Ca, Fe, Hg	Cu	Blanco de plomo, tierras y pequeñas cantidades de merc...	NULL
28	Mejilla de Cristo. Carnación	Pb, Ca, Fe	NULL	Blanco de plomo, tierras	NULL
29	Carnación de Cristo	Pb, Ca, Fe	NULL	Blanco de plomo, tierras	NULL
30	Laguna en carnación	Pb, Ca, Fe	NULL	Blanco de plomo. Imprimación? sobre yeso	NULL
33	Carnación de Crto	Pb, Ca, Fe	Ti	Blanco de plomo, tierras	NULL
42	Carnación Brazo de Cristo	Pb, Ca, Fe	Cu	Blanco de plomo, tierras. No se detecta verdacho	NULL
44	Frente. carnación	Pb, Ca, Fe	NULL	Blanco de plomo y pequeñas cantidades de tierra	NULL
53	Carnación de Cristo	Pb, Ca, Fe	NULL	Blanco de plomo, tierras	NULL
55	Marrón de la barba y carnación	Pb, Ca, Fe, Hg	NULL	Blanco de plomo, tierras y bermellon	NULL
58	Carnación. Pecho de Cristo	Pb, Ca, Fe	NULL	Blanco de plomo, tierras	NULL
65	Carnación Mejilla	Pb, Ca, Fe, Hg	NULL	Blanco de plomo, tierras y bermellon	NULL

Figura 11. Captura de pantalla de los resultados de las encarnaciones de panel derecho de la predela.

la presencia de cobre junto con plomo y hierro, lo que sugiere que las encarnaciones se elaboraron con blanco de plomo, pigmento tierras y un pigmento verde basado en cobre, lo que es compatible con el uso del verdacho en la técnica de ejecución de las encarnaciones. En el caso del panel derecho no se detecta la presencia de cobre en ninguna de las encarnaciones analizadas se elaboraron con blanco de plomo, pigmento tierra ocre y probablemente pigmento tierra verde para dar esa tonalidad a la carnación (Figura 12).

Para dar un tono más rojizo a la encarnación, se añadieron pequeñas cantidades de bermellón en ambos paneles.

Análisis con toma de micromuestras

La toma de micromuestras se basó en los resultados de todos los estudios anteriores, por lo que fue un proceso razonado y optimizado. El uso de QGIS permitió posicionar y registrar de forma exacta el punto de extracción de cada una de las micromuestras y su tipología (micromuestra o hisopo).

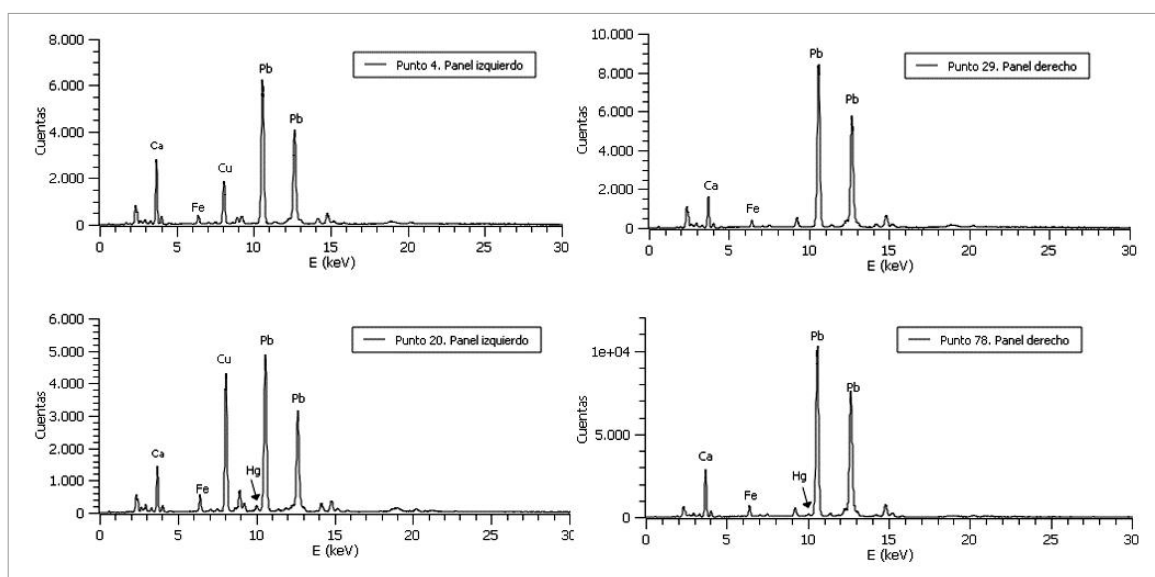


Figura 12. Espectros EDXRF de encarnaciones. Los espectros de las encarnaciones del panel izquierdo se caracterizan por la presencia de cobre. Fuente: IVCR+i.

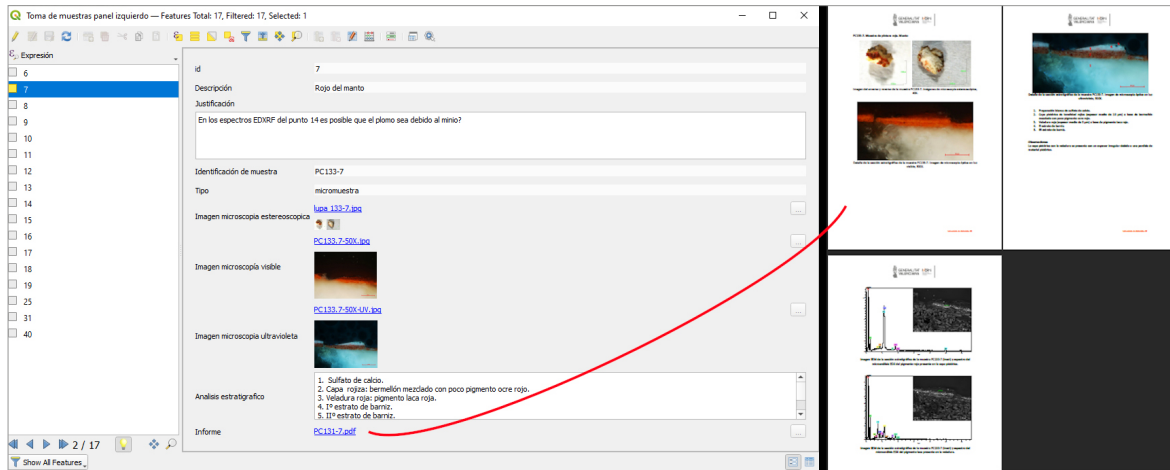


Figura 13. Tabla de atributos asociada a la capa vectorial de la toma de micromuestras.

Se tomaron un total de 39 micromuestras de los dos paneles. Se creó una capa vectorial asociada al análisis con micromuestras con una tabla de atributos formada por diez campos que describen la identificación del punto, la descripción, la justificación de la toma de muestra, la referencia de la muestra, las imágenes de microscopía estereoscópica, de las secciones transversales visible y ultravioleta, y un resumen del análisis estratigráfico. Dado que el campo de texto está limitado a 255 caracteres el resumen estratigráfico puede ser en ocasiones insuficiente, por lo que se incluyó un hiperenlace al análisis completo de la micromuestra.

De este modo, se tiene recogida toda la información obtenida del análisis de una forma concisa y breve, con la opción de ampliarla en caso necesario.

El estudio de las micromuestras ha aportado información sobre los materiales y técnica de ejecución de la obra, diferenciando la técnica de ejecución de la pintura original de la técnica y materiales de las intervenciones posteriores⁴.

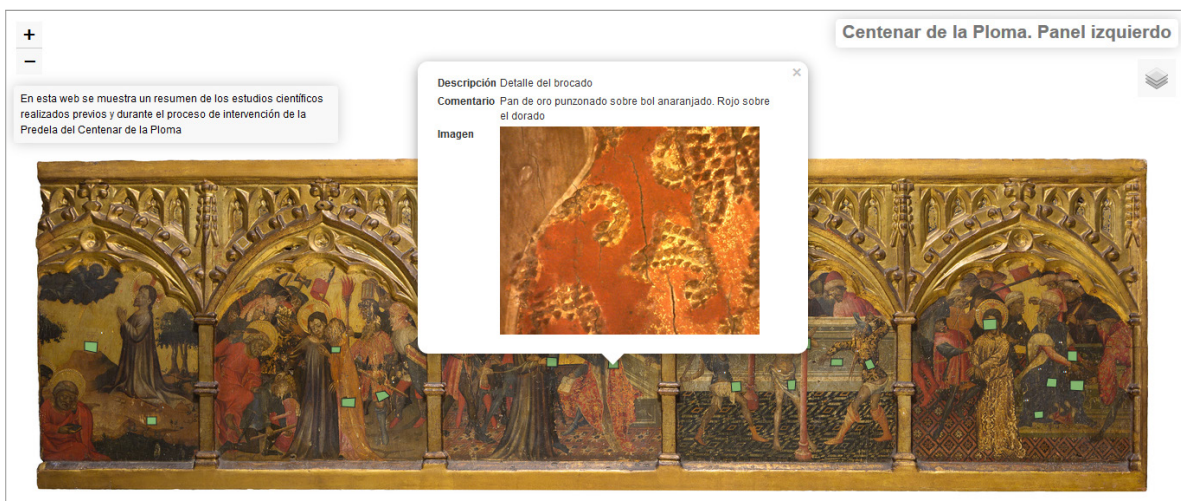


Figura 14. Captura de pantalla del formato web generado mostrando la capa de estudio con microscopía portátil.

⁴ David Juanes Barber, Livio Ferraza. Reports PC133. *Institut Valencià de Conservació, Restauració i Investigació de Bens Culturals*, 2019-2020

Publicación web

QGIS dispone de un complemento QGIS2WEB que permite la exportación de las capas y las tablas de atributos vinculadas a ellas a formato web para su difusión. El complemento genera un mapa del proyecto QGIS que replica muchos de los aspectos del proyecto incluyendo capas y estilos, y no es necesario un *software* específico para su publicación (Figura 14).

Conclusiones

Esta experiencia de aplicación de la tecnología SIG en la gestión de la información derivada de los estudios científicos ha permitido constatar que es viable crear un entorno de trabajo que permite la organización, clasificación de los resultados y su accesibilidad, lo que conlleva una mayor facilidad en la planificación de los estudios científicos. Además, se ha puesto de manifiesto que los estudios científicos son más accesibles y útiles a los restauradores a la hora de diseñar el protocolo de intervención. Por último, la capacidad de compartir la información a través de un entorno web abre nuevas puertas a colaboración y hace más accesible los resultados de los estudios científicos a profesionales y público en general.

Bibliografía

- ALLEGRA, D. *et al.* (2016): «X-ray computed tomography for virtually unrolling damaged papyri». *Applied Physics A*, 122 (3), pp. 1–7. doi:10.1007/s00339-016-9796-1.
- BARATIN, L. *et al.* (2016): «GIS applications for a new approach to the analysis of panel paintings». *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10058 LNCS, pp. 711–723. doi:10.1007/978-3-319-48496-9_57.
- CABAL RODRÍGUEZ, A. *et al.* (2012): «Possibilities of energy-resolved X-ray radiography for the investigation of paintings». *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402 (4), pp. 1471–1480. doi:10.1007/s00216-011-5230-x.
- CARDEIRA, L. *et al.* (2017): *Implementação de um sistema de documentação para o estudo técnico de pinturas académicas de Adriano de Sousa Lopes da Faculdade de Belas-Artes da Universidade de Lisboa (FBAUL)*.
- CHADWIN, T. *et al.* (2020): «qgis2web».
- DEL EGIDO, M., JUANES, D. y BUESO, M. (2013): «Consideraciones en torno a los estudios científicos aplicados a la conservación del patrimonio histórico». En *La Ciencia y el Arte IV. Las ciencias experimentales y conservación del patrimonio*. Madrid: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, pp. 7–23.
- FERRAZZA, L. *et al.* (2019): «Multidisciplinary Approach Applied to the Diagnosis of the Facade of the Arciprestal Church of Santa María de Morella (Castellón, Spain)». *Scanning*, 2019, pp. 1–14. doi:10.1155/2019/2852804.
- FERRAZZA, L., JUANES BARBER, D. y OHIRIUEL FERRÁNDIZ, M. (2012): «A case study on wooden polychromed sculpture: the Virgin of the Inmaculada Concepción». En Seymour, K. (ed.): *ICOM-CC. Polychrome Sculpture: Artistic Traditions and Construction Techniques Symposium*. Glasgow, pp. 113–119.

- FUENTES-PORTO, A. (2011): «La tecnología SIG al servicio de la cuantificación numérica del deterioro en superficies pictóricas. Un paso más hacia la objetivización de los diagnósticos patológicos». En *V Congreso GEIIC. Patrimonio Cultural, criterios de calidad en intervenciones*, pp. 1–6.
- HENRIQUES, F. *et al.* (2016): *Processos de documentação digital 2D e 3D em obras académicas de Adriano de Sousa Lopes do acervo da Faculdade de Belas Artes da Universidade de Lisboa*. doi:10.13140/RG.2.2.24757.58080.
- HENRIQUES, F. y GONÇALVES, A. (2013): «Identification of lacunae in a wood painting: comparative analysis of classification methods in GIS-based spatial analysis». *Estudos de Conservação e Restauro*, 1. doi:10.7559/ecr.2.3156.
- «HOROS PROJECT» (2020).
- JUANES BARBER, D. (2002): *Diseño de sistemas de EDXRF para el análisis de bienes del patrimonio histórico-artístico*. Universitat de València.
- JUANES BARBER, D. (2011): «Técnicas sin toma de muestra: la fluorescencia de rayos x aplicada al estudio de obras de arte». En AIDICO (ed.): *V Jornada-Reunión del Grupo de Trabajo de Ensayos No Destructivos Aplicados a la Evaluación de los Bienes de Interés Cultural*. Valencia: AIDICO.
- JUANES BARBER, D. y FERRAZZA, L. (2012): «Estudios de objetos del patrimonio histórico mediante tomografía axial computarizada». En: *Congreso Internacional AR&PA 2012. Innovación en el Patrimonio*. Valladolid: Junta de Castilla y León. Consejería de Cultura y Turismo, pp. 150–162.
- JUANES BARBER, D. y FERRAZZA, L. (2014): «Computed tomography study applied on the intervention process of La Virgen del Llosar». En: *Art'14. 11th International Conference on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage*. Madrid: Spanish Society for NDT and Italian Society for NDT, p. IND 36.
- JUANES BARBER, D. y FERRAZZA, L. (2015): «Study and identification of pigments and artistic techniques based on the analysis of microscopic samples». En: Bancaja, F. (ed.) *Sorolla íntimo. Bocetos de la Visión de España*. Valencia: Fundación Bancaja, pp. 163–173.
- MADRID GARCÍA, J. (2000): «Aplicación de la técnica radiográfica digital en el estudio de Bienes Culturales. Caso de estudio de un desollado». *Asociación Española de Ensayos No destructivos*, 61, pp. 10–17.
- MADRID GARCÍA, J. (2012): «Aplicación de la técnica radiográfica digital en el estudio de Bienes Culturales. Caso de estudio de un desollado». *Asociación Española de Ensayos No destructivos*, 61, pp. 1–8.
- MARCO, A. *et al.* (2018): *Virtualização 3D e Sistemas de Documentação para Caracterização de Alterações Cromáticas em Pintura Mural*. doi:10.13140/RG.2.2.22636.00647.
- MIDDLETON, A. y LANG, J. (2005): *Radiography of cultural material*. 2nd. ed. Oxford: Elsevier.
- MORIGI, M. P. *et al.* (2007): «CT investigation of two paintings on wood tables by Gentile da Fabriano». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 580 (1), pp. 735–738.
- PIRES, H. *et al.* (2007): *Towards a multispectral GIS integrating laser scanning data or how can geometric improve C&R documentation practices: a first approach using two XVIIth century wood paintings of "Convento de Cristo" in Tomar*.
- QGIS (2020): A Free and Open Source Geographic Information System. Disponible en: <https://www.qgis.org/en/site/> [Consultado el 3 de septiembre de 2020].

- RE, A. *et al.* (2014): «X-ray tomography of large wooden artworks: the case study of Doppio corpo by Pietro Piffetti». *Heritage Science*, 2 (1), pp. 1–9. doi:10.1186/s40494-014-0019-9.
- ROLDÁN, C. *et al.* (2011): «Joaquin Sorolla's pigment characterisation of the paintings 'Vision of Spain' by means of EDXRF portable system». *X-Ray Spectrometry*, 40 (4), pp. 289–296.
- SARRIÓ MARTÍN, M. F. (2016): «Aplicación de la tomografía computarizada médica para el análisis y estudio en escultura policromada en madera». Universitat Politècnica de València.

Conservación de la escultura contemporánea en acero patinable en el exterior: empleo de recubrimientos protectores.

Conservation of contemporary outdoor sculpture in weathering steel: use of protective coatings.

Sara de Miguel Moreno*

Conservadora-Restauradora de bienes culturales
smigue03@ucm.es

Blanca Ramírez Barat

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
blanca.ramirez@csic.es

Ana Crespo Ibáñez

Instituto de Estructura de la Materia, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
a.crespo.i@csic.es

Iván Díaz Ocaña

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
ivan.diaz@csic.es

Emilio Cano Díaz

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
ecano@cenim.csic.es

Resumen: A través de este artículo presentamos los resultados obtenidos en los trabajos preliminares de la tesis doctoral «Sistemas de protección para la escultura contemporánea en acero COR-TEN», que actualmente se encuentra en fase de desarrollo.

Palabras clave: Acero patinable, corrosión, escultura, espectroscopia de impedancia electroquímica.

Abstract: Through this article we present the results obtained in the preliminary studies of the PhD thesis «Protection systems for contemporary sculpture in cor-ten steel», which is currently in the development phase.

Key words: Weathering steel, corrosion, sculpture, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS).

Introducción

Los aceros patinables son ampliamente utilizados en industria e ingeniería desde principios del siglo xx. Su empleo en las prácticas artísticas es algo más reciente, siendo a partir de la década de 1960 cuando los artistas comienzan a incorporar este material en la creación de la escultura contemporánea, sobre todo de carácter monumental. El atractivo del acero patinable reside, principalmente, en su elevada resistencia a la corrosión atmosférica así como en las cualidades estéticas de la herrumbre. La denominación más común para este tipo de aceros es el acero COR-TEN, patentado y comercializado por la empresa norteamericana US Steel en 1933, cuyo nombre viene dado por sus principales propiedades respecto al acero al carbono: resistencia a la corrosión atmosférica (*corrosion*) y superiores prestaciones mecánicas (*tensile*) (Iván Díaz, 2012).

Artistas como Naum Gabo (1890-1977), Barnett Newman (1905-1970) y los principales representantes de la Escuela Vasca, Jorge Oteiza (1980-2003) y Eduardo Chillida (1924-2002) fueron pioneros en la experimentación con este material, en el que vieron un aliado resistente al paso del tiempo que cumplía las expectativas de perdurabilidad y perpetuidad, y que se adapta también a sus necesidades y exigencias estéticas.

Habitualmente para usos artísticos se recurre al empleo de aceros patinables COR-TEN B, en cuya composición se incluyen diferentes elementos aleantes en proporciones variables conforme a la Norma ASTM A588, predominando cromo, cobre y níquel. Este tipo de aceros tienen la particularidad de desarrollar una pátina de herrumbre con ciertas características «autoprotectoras», en la que los productos de corrosión actúan como sistema de protección frente a los factores atmosféricos, siempre y cuando se den una serie de condiciones muy específicas para su formación.

Por lo tanto, la eficacia protectora de la pátina no es un factor inherente al material, a pesar de que persiste esta idea de forma generalizada, sino que depende directamente además del diseño de la obra y de las características ambientales que la rodean. Para que la pátina posea características protectoras es necesario que se den ciertas condiciones esenciales:

- Ciclos alternados de humectación y secado.
- Exposición en atmósferas con baja concentración de ciertos contaminantes (Ej: prácticamente ausencia de cloruros).
- El propio paso del tiempo.

Por tanto, la continua exposición a determinados ambientes y agentes atmosféricos, y principalmente la presencia de cloruros, constituye una gran amenaza para los objetos artísticos fabricados en este material (Figura 1). Además, existen otros factores adicionales propios del arte escultórico que también pueden comprometer el carácter protector de la pátina, como es específicamente el diseño de la obra concebido por el artista o los procesos de patinado artificial. Con el objetivo de acelerar la aparición de la pátina y optimizar el trabajo artístico, los escultores recurren a la aplicación de ácidos o sales que dan lugar a la aparición de una pátina artificial o prepatinado, sobre el que se activará el proceso de corrosión natural una vez expuesta la pieza. En todos estos casos, la pátina no adquiere la

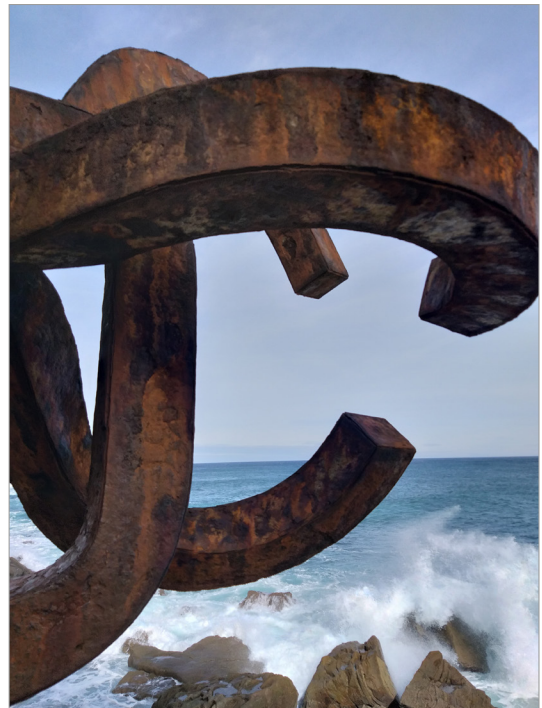


Figura 1. El peine del viento, de Eduardo Chillida (1977). Fotografía: Sara de Miguel Moreno.

condición autoprotectora y se pone en compromiso la conservación de la obra, por lo que resulta necesario utilizar sistemas de protección suplementarios.

Dada esta problemática, el objetivo principal de este proyecto de tesis doctoral es estudiar la eficacia de diferentes sistemas de protección para conservar la escultura exterior en acero patinable frente a estos factores de riesgo. Esta investigación viene motivada por la ausencia de estudios específicos que aborden esta problemática desde el punto de vista de la conservación y la restauración del patrimonio artístico y por el desconocimiento generalizado que existe acerca de este material como medio para la creación artística.

Se trata de un proyecto complejo teniendo en cuenta las particularidades estéticas de la superficie: herrumbre anaranjada rugosa y mate, que se puede ver alterada con facilidad ante la aplicación de recubrimientos protectores. Estas especificidades condicionarán la selección y los métodos de aplicación de los sistemas de protección propuestos.

Metodología

Durante los trabajos preliminares a la ejecución de la tesis doctoral se diseñó una metodología basada en la realización de una serie de probetas sobre las que se aplicaron y estudiaron diferentes sistemas de protección. Los resultados obtenidos, que se presentan aquí, han servido para validar y refinar la metodología de cara a la tesis que se está desarrollando.

Fase 1: Creación y acondicionamiento de probetas.

Las probetas se diseñaron sobre planchas de acero patinable tipo B con unas dimensiones de 5 x 5 cm y un espesor de 2 mm. Todas ellas fueron tratadas mediante chorreado con corindón y limpiadas en baños consecutivos de ultrasonidos con agua destilada, etanol y acetona para eliminar los pequeños restos de óxido y suciedad, producto de la fabricación y manipulación del material, y así obtener una superficie uniforme en un estado A Sa ½ según la norma sueca SIS 05 5900: metal semi blanco (Figura 2). A continuación se pesaron todas las probetas en una balanza de precisión para posteriormente registrar el aumento de masa que proporciona la aparición de la pátina.



Figura 2. Probeta de acero patinable. Fotografía: Sara de Miguel Moreno.

Dado que el estudio de este material se enfoca desde su uso en prácticas artísticas, una vez acondicionadas las probetas, se llevó a cabo un patinado de la superficie de forma artificial, siguiendo la metodología que habitualmente realizan los escultores. Entre las numerosas opciones de ácidos y sales para llevar a cabo este procedimiento, se seleccionó H_2SO_4 disuelto en agua destilada al 10%, basándose en los estudios de la tesis doctoral de Ana Crespo Ibáñez (Ana Crespo, 2020) los cuales mostraron que es una solución que no resulta demasiado agresiva para el metal y proporciona una buena adherencia de la pátina, permitiendo una adecuada aplicación de los recubrimientos protectores.

La aplicación del ácido se ha realizado con brocha de forma bidireccional para cubrir correctamente toda la superficie de la probeta. Tras 24 horas de oreo se ha aplicado por aspersion agua destilada



Figura 3. Probetas de acero patinable durante el proceso de patinado artificial. Fotografía: Sara de Miguel Moreno.

y se han dejado secar las probetas durante 24 horas. Este proceso se ha repetido un total de ocho veces, hasta que se ha apreciado que la corrosión se ha distribuido de forma uniforme por la superficie de las probetas (Figura 3).

La aplicación del ácido y los ciclos de humectación y secado aceleran la formación de la herrumbre por medio de la disolución del metal base y la precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro. El proceso de corrosión húmeda que ocurre necesita de ciertos elementos: el ánodo que es donde se produce la oxidación del metal, el cátodo donde se produce la reducción, generalmente del oxígeno, un medio conductor de electrones (que puede ser el propio metal) y un medio conductor de iones, que es el electrolito acuoso.

La pátina obtenida (Figura 3, derecha) es una pátina incipiente, con buena adherencia pero lejos de ser considerada una pátina similar a la que podemos encontrar en esculturas tras décadas de exposición. Para el desarrollo de estos trabajos iniciales hemos contado con un factor tiempo limitado, aunque suficiente para poder aproximarnos al estudio del comportamiento de los sistemas de protección propuestos. De cara a los ensayos y desarrollo de la tesis se propone, además de acelerar la pátina, exponerlas bajo condiciones ambientales durante un periodo más prolongado de tiempo de, al menos, seis meses.

Concluido este proceso de creación artificial de la pátina, las probetas están listas para recibir la aplicación de los recubrimientos seleccionados para este estudio. No obstante, antes de proceder a la siguiente fase se han tomado cuatro parámetros de referencia para evaluar de forma metódica los cambios que experimentan las muestras: en masa, color y espesor de la pátina, y resistencia a la corrosión.

Para registrar la ganancia de masa tras la formación de la herrumbre se ha empleado una balanza de precisión, comparando estos resultados con los obtenidos en el primer pesado. Con el objetivo de caracterizar el cromatismo del material se ha procedido a la medición del color mediante un espectrofotómetro, modelo Konica Minolta CM-700d, con una máscara de 8 mm, e iluminante estándar D65/10°, con el que obtenemos los valores en el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$, donde L^* mide la luminosidad y las coordenadas a^* y b^* la cromaticidad. Mediante este procedimiento, tras la aplicación de los recubrimientos, podremos valorar los cambios estéticos que estos puedan aportar al material original. También se ha medido el espesor tras la formación de la pátina, empleando para ello un medidor de espesor Elcometer® modelo 456, con el objetivo de estudiar la variabilidad de este parámetro una vez se apliquen los recubrimientos.

Por último, para determinar la velocidad de corrosión del acero, y la capacidad protectora de los recubrimientos que aplicaremos en la siguiente fase, hemos realizado espectroscopia de impedancia electroquímica, *EIS* por sus siglas en inglés (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*). Se trata de una

técnica no destructiva con la que obtenemos el valor de impedancia, es decir, la oposición que ofrece una superficie al paso de una corriente alterna. Este valor viene determinado por la relación entre el voltaje alterno aplicado y la intensidad de corriente registrada. Para obtener un espectro de EIS, se registra la impedancia para distintos valores de frecuencia en un rango entre 100 kHz y 10 mHz.

Para ello se ha empleado un sistema de medida portátil, diseñado por el grupo CAPAC del CENIM, que permite una total adaptabilidad a la superficie de estudio. La celda, que se coloca en contacto con la superficie a analizar (electrodo de trabajo), contiene un electrolito gelificado con el electrodo de referencia y el contraelectrodo (Emilio Cano *et al.*, 2014), (Blanca Ramírez *et al.*, 2015, 2018) y está conectada a un potencióstato que controla la aplicación de la corriente.

Fase 2: Aplicación de los recubrimientos y exposición.

Para estos estudios preliminares se han seleccionado tres sistemas de protección, empleados de forma habitual en tratamientos de conservación-restauración de bienes culturales:

- Paraloid B 72: Resina sintética acrílica a base de etil metacrilato y metil metacrilato. Recubrimiento de alto rendimiento en condiciones ambientales controladas.
- Cosmolloid H80: cera microcristalina, constituida por una mezcla de hidrocarburos saturados con cadenas lineales y ramificadas, obtenida de la refinación de petróleo. Destaca su capacidad de penetración en el poro, factor tenido en cuenta dada la rugosidad de la superficie de las probetas.
- Incralac: Producto a base de resina acrílica y benzotriazol. Su eficacia sobre superficies metálicas está ampliamente demostrada.

Todos ellos han sido preparados en disoluciones (Tabla 1) y aplicados mediante impregnación con paletina de pelo sintético. Las resinas se han estudiado en aplicación de una y dos capas de producto, mientras que la cera microcristalina únicamente se ha estudiado con aplicación de una sola capa dada su capacidad de penetración entre los poros y grietas de la herrumbre. El aspecto de las probetas tras la aplicación del recubrimiento se muestra en la figura 4.

Tabla 1. Sistemas de protección empleados sobre las probetas. Sara de Miguel Moreno.

RECUBRIMIENTO	DISOLVENTE	CONCENTRACIÓN
Cosmolloid H80	White Spirit	20%
Paraloid B72	Disolvente nitrocelulósico	5%
Incralac	—	—

Tabla 1. Sistemas de protección empleados sobre las probetas. Sara de Miguel Moreno.

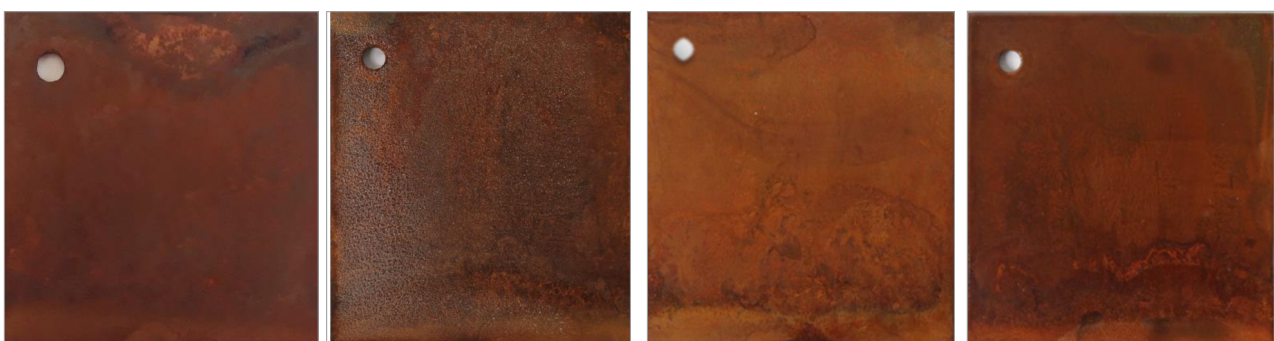


Figura 4. Probetas de acero patinable sin exposición. Fotografía: Sara de Miguel Moreno.

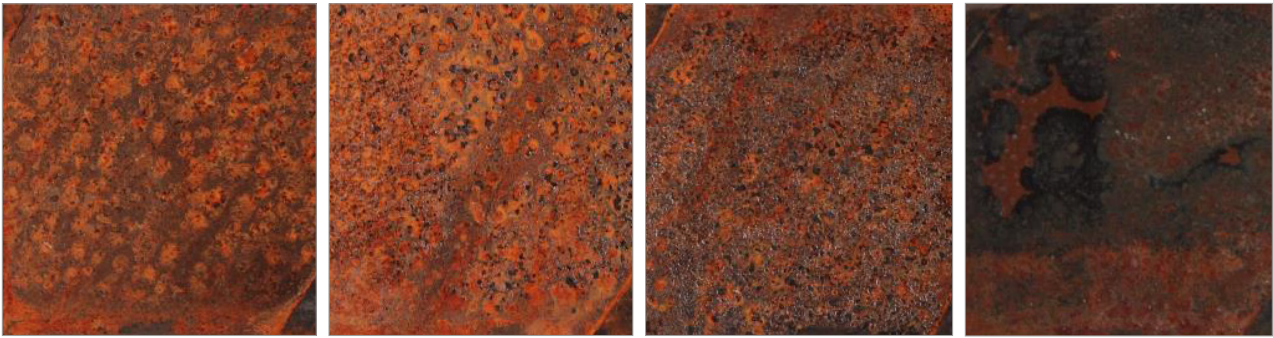


Figura 5. Probetas después de exposición en la estación del CENIM. Fotografía: Sara de Miguel Moreno.

Una vez aplicados sobre las probetas, se ha procedido a la realización de nuevas mediciones con el fin de registrar los cambios aportados por estos recubrimientos sobre la superficie del material.

Cada una de las probetas se ha realizado en duplicado para una exposición en el exterior y, por otro lado, en la cámara de corrosión acelerada. Los ensayos de exposición natural se han realizado en la estación de exposición atmosférica del CENIM, sujetas a la climatología de Madrid. Se trata de un proceso lento bajo condiciones no controladas que, sin embargo, aporta resultados muy próximos a la corrosión que presentaría una obra expuesta durante un periodo más prolongado. La figura 5 muestra el aspecto de las probetas tras la exposición natural de 6 meses.

Para los ensayos de corrosión acelerada se ha empleado una cámara de corrosión atmosférica modelo QUV/se de Q-Panel, que permite la exposición controlada a la radiación mediante lámparas UVB-313 y a ciclos de condensación de humedad. A lo largo de una semana (siete días - 168 horas), se han llevado a cabo ciclos alternados de 4 horas de duración de condensación a 50 °C y radiación ultravioleta a 60 °C. Se trata de un proceso que ofrece resultados de forma rápida aunque han de interpretarse con cautela dado que son más agresivos que un proceso de envejecimiento y exposición natural. En la figura 6 se muestran las probetas tras el ensayo acelerado en la cámara.

Finalizados los procesos de exposición, de nuevo se han realizado las mediciones de ganancia de masa, color, espesor y EIS para poder analizar los resultados obtenidos a partir del comportamiento de los recubrimientos y del propio metal bajo estas condiciones de exposición.

Para la evaluación de la idoneidad de los recubrimientos protectores empleados hemos elaborado un estudio en función de la evolución y los cambios experimentados en los parámetros de determinación de la masa, color, espesor e impedancia electroquímica tras la exposición de las probetas tanto a la atmósfera de Madrid como en la cámara de corrosión atmosférica. Por otro lado,

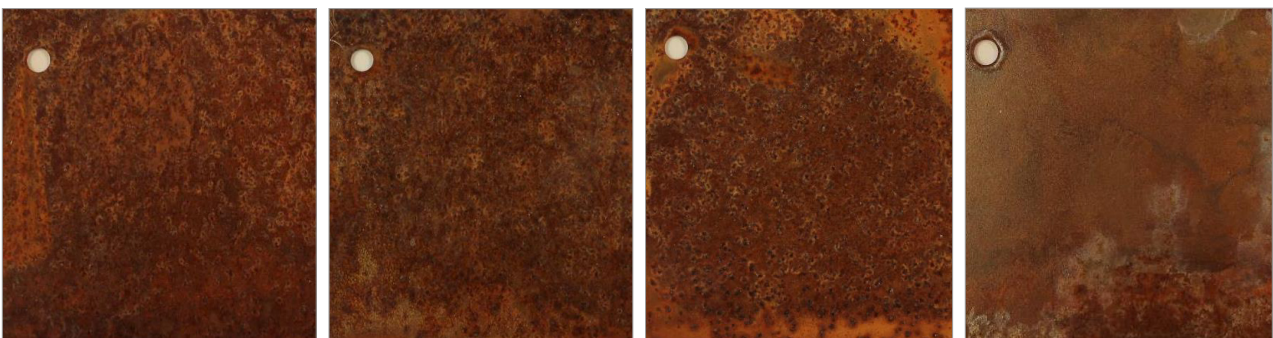


Figura 6. Probetas después de la exposición en cámara de corrosión acelerada. Fotografía: Sara de Miguel Moreno.

también se han realizado estudios comparativos entre las probetas sin recubrimiento y aquellas que han recibido la aplicación de los sistemas de protección, es decir, entre aquellas que han tenido un envejecimiento «natural» y aquellas que están condicionadas por un tratamiento de conservación.

Teniendo esto en cuenta, para considerar óptima la aplicación de un recubrimiento como medida de conservación del patrimonio escultórico en exposición al exterior se valorará:

- La variación mínima de sus características físicas, evaluando los cambios colorimétricos, gravimétricos y de espesor.
- El aumento de la resistencia a la corrosión, que será analizado recurriendo a la espectroscopia de impedancia electroquímica.
- Un buen comportamiento ante el paso del tiempo y la acción de los factores de degradación ambientales, que vendrá determinado por el comportamiento ante la exposición atmosférica y en los ensayos acelerados de corrosión.

Resultados

A continuación, presentamos los resultados obtenidos en las probetas expuestas en la estación atmosférica del CENIM-CSIC durante seis meses para los estudios de cromaticidad, masa y espesor; como ejemplo de los resultados de EIS presentamos los obtenidos en las probetas sometidas al ensayo acelerado de la corrosión, ya que estos parámetros se aprecian de forma más clara en estas muestras. A partir de estos resultados hemos realizado una valoración parcial sobre el empleo de estos recubrimientos en acero patinable que se desarrollará ampliamente en el trabajo de tesis doctoral.

Estudios de cromaticidad:

Para desarrollar estos análisis ha sido necesario determinar los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* de una probeta modelo sin recubrimiento. Estos valores han sido empleados para obtener la diferencia cromática (ΔE^*) entre ésta y las que han sido tratadas con recubrimientos, según la fórmula:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Siendo:

ΔE^* = Diferencia cromática entre las dos superficies.

ΔL^* = La diferencia del valor de L^* entre las dos superficies a comparar.

Δa^* = La diferencia del valor de a^* entre las dos superficies a comparar.

Δb^* = La diferencia del valor de b^* entre las dos superficies a comparar.

Para su interpretación, las fuentes bibliográficas establecen en valores de 2-3 los cambios perceptibles al ojo humano, aunque para aplicaciones de reproducción de color, y estudios como este al que nos enfrentamos, otras fuentes establecen en 5 el valor límite inaceptable.

En la figura 7 se muestran los valores de ΔE^* entre probetas sin exposición y aquellas expuestas a la atmósfera. Los resultados obtenidos, incluso en las que no presentan un sistema de protección, muestran un valor superior a 5 puntos, es decir, presentan cambios perceptibles por el ojo humano tal y como se aprecia en las imágenes (Figura 5). Dentro de estos cambios producidos en la superficie, son las probetas aplicadas con Paraloid B72 las que menos experimentan una diferencia cromática, seguidas de la cera Cosmolloid H80. Por otro lado, las probetas tratadas con Inralac son las que sufren mayores cambios estéticos.

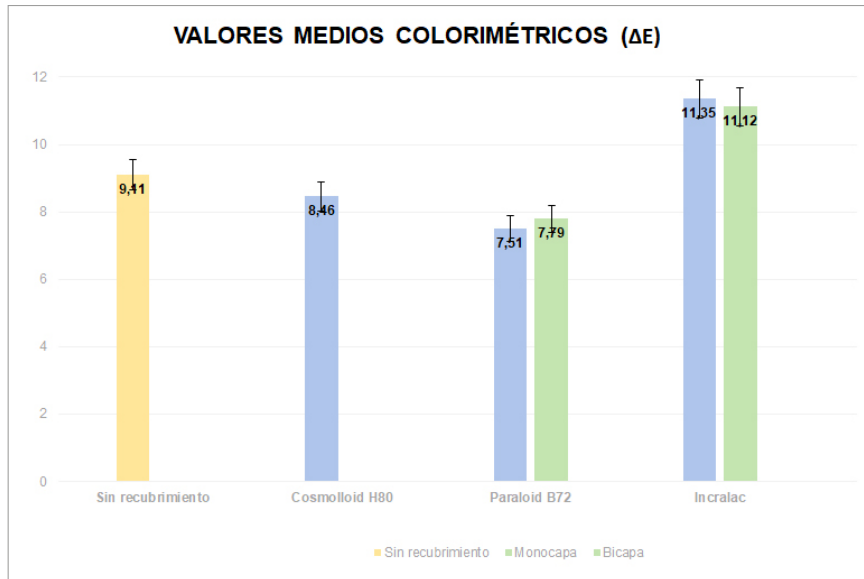


Figura 7. Diferencia cromática entre superficies expuestas en estación atmosférica. Fuente: Sara de Miguel Moreno.

En términos generales, todas las probetas presentan una estética y una cromaticidad similar a la que experimenta el metal con corrosión desarrollada de forma natural, a excepción de las aplicadas con Incralac cuya diferencia es más significativa. A la hora de valorar un sistema de protección se deberá tener en cuenta la similitud estética y el valor cromático aproximado a una superficie de metal sin tratar que ha desarrollado una pátina estable de forma natural.

Estudios de gravimetría:

Tras la aplicación de los recubrimientos se registraron los aumentos de masa experimentados en las probetas, con el objetivo de caracterizar el espesor de la capa aplicada, siendo el Incralac el que aportaba una mayor ganancia de masa. Tras la exposición durante estos seis meses (Figura 8) ad-

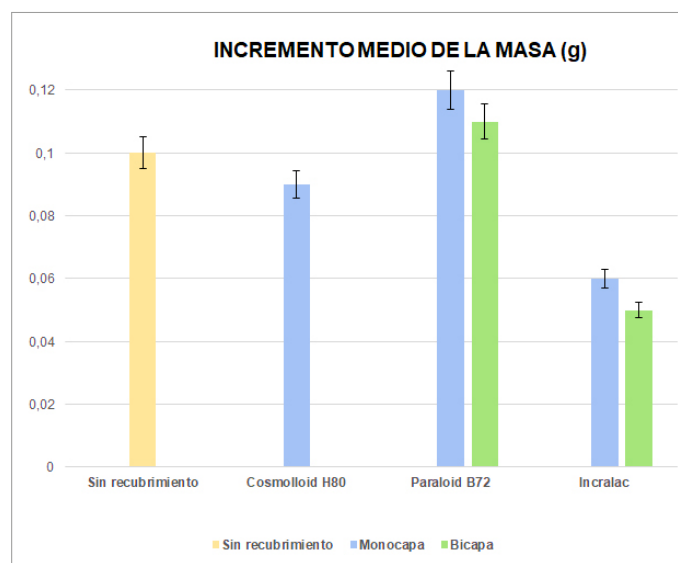


Figura 8. Aumento de la masa experimentado en las probetas tras la exposición en estación atmosférica. Fuente: Sara de Miguel Moreno.

vertimos que todas las probetas han seguido experimentando un aumento de la masa, siendo especialmente mayor en las probetas sin recubrimiento y en las tratadas con Paraloid B72.

Este resultado lo interpretamos como una pérdida de protección del recubrimiento, desprendiéndose incluso parcialmente, lo que ha dado lugar a que la pátina se siga desarrollando de forma natural. Es decir, el recubrimiento no está protegiendo adecuadamente al sustrato metálico de acero patinable.

Los resultados extraídos a partir de las medidas de espesor de la capa pátina + recubrimiento de las probetas tras su exposición al ambiente (Figura 9) se corresponden de forma paralela con los mostrados en el estudio del aumento de masa, siendo las probetas tratadas con Paraloid B72 las que presentan un mayor aumento del espesor, superando incluso al que presentan las probetas sin recubrimiento. Este dato puede estar relacionado con el aumento de espesor de la capa de herrumbre y con el hinchamiento de las partículas de recubrimiento que aún se conservan en la superficie. Por otro lado, las probetas en las que se ha aplicado Inctalac han experimentado el menor aumento de espesor, a consecuencia de la capacidad protectora y aislante que impide o retrasa el desarrollo de la pátina.

Estudios de EIS:

Siguiendo la misma metodología, en primer lugar se han realizado análisis de EIS en las probetas sin recubrimiento, obteniendo así los parámetros de resistencia a la corrosión de la pátina. Para este estudio, se han tomado los valores del módulo de la impedancia a bajas frecuencias (10 mHz) como indicadores de la resistencia global al proceso corrosivo.

A partir de esta referencia hemos podido comprobar la habilidad protectora que presentan los recubrimientos aplicados, antes y después de ser expuestos a los factores de degradación en la cámara de corrosión atmosférica. Como hemos señalado anteriormente, en las probetas expuestas en la cámara se veía de forma más clara los resultados de impedancia que en el caso de las probetas expuestas, ya que en un periodo tan corto de exposición el desarrollo de la pátina ha sido mínimo.

La capacidad de protección del Paraloid B72 es prácticamente nula, proporcionando valores incluso por debajo de los que ofrece una muestra sin recubrimiento, es decir, condiciona la aparición

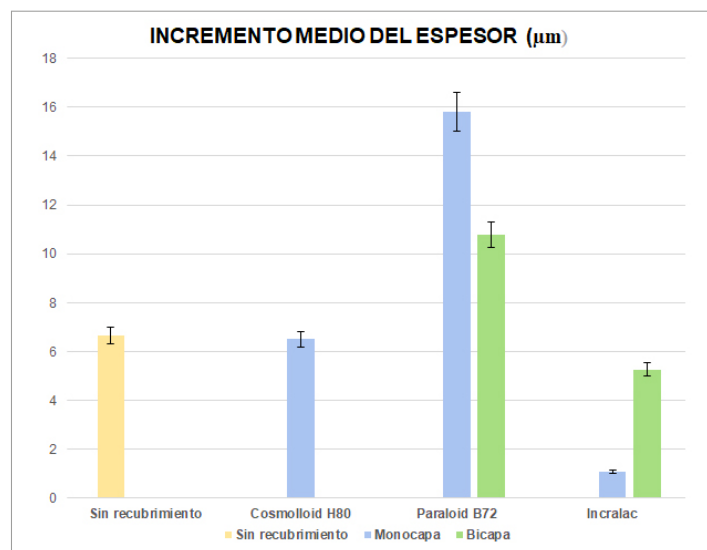


Figura 9. Aumento del espesor experimentando en las probetas tras la exposición en estación atmosférica. Fuente: Sara de Miguel Moreno.

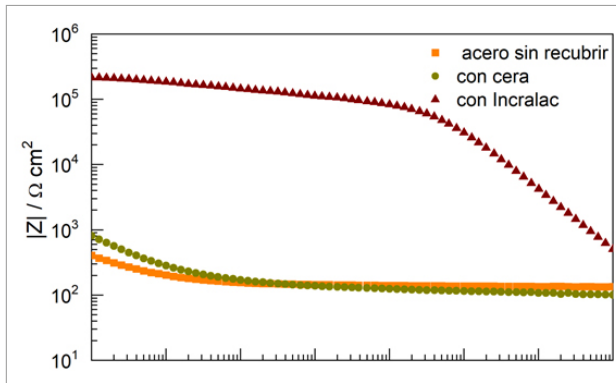


Figura 10. Entrada a la *spe* Figura 10. Módulo de impedancia antes de la exposición en cámara de corrosión atmosférica en probeta con cera Cosmolloid H80 (monocapa) y probeta con Inctalac (monocapa). Fuente: Blanca Ramírez Barat.

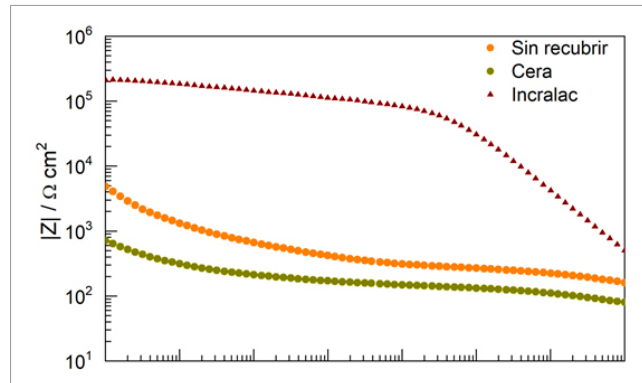


Figura 11. Módulo de impedancia tras el ensayo acelerado en cámara de corrosión atmosférica para probeta sin recubrimiento, probeta aplicada con cera Cosmolloid H80 (monocapa) y probeta con Inctalac (monocapa). Fuente: Blanca Ramírez Barat.

de la pátina del acero y no aporta protección. De ahí, que no se muestre el recubrimiento Paraloid B72 en los resultados de impedancia de las figuras 10 y 11.

La probeta que no presenta recubrimiento nos muestra los resultados de impedancia proporcionados por la propia pátina del metal. En las mediciones realizadas antes de la exposición, vemos (Figura 10) que esta resistencia es muy similar a la que presenta la probeta que ha sido tratada con cera microcristalina Cosmolloid H80, aunque ésta presenta mayor impedancia a frecuencias bajas. Destaca por encima de todas el comportamiento de la probeta sobre la que se ha aplicado Inctalac, ofreciendo unos valores de impedancia más elevados.

Tras la exposición en la cámara de corrosión (Figura 11), la probeta sin recubrimiento presenta aumento de la capacidad protectora de la pátina propiciado por los ciclos de humectación y secado. Advertimos, sin embargo, que la capacidad protectora de la cera microcristalina ha disminuido; los agentes de corrosión han provocado su desestabilización y la desaparición parcial del producto. La probeta tratada con Inctalac es la que, de nuevo, ofrece una elevada impedancia al paso de la corriente alterna, demostrando su eficacia como sistema de protección al registrar los resultados más bajos de desarrollo de la capa de corrosión, lo que implica que ha actuado como elemento aislante entre la probeta y los agentes atmosféricos.

Conclusiones

Estos estudios preliminares han sido fundamentales para poder realizar una primera aproximación al comportamiento de los recubrimientos como sistemas de protección y su posible aplicación en patrimonio escultórico en acero patinable, así como refinar la metodología para la realización de un estudio más sistemático, con más recubrimientos y tiempos de exposición más largos

En vista a estos resultados, hemos comprobado que el Paraloid B72, ha demostrado una gran inestabilidad ante los agentes de deterioro. Será necesario investigar más para esclarecer si se debe a problemas en la aplicación o a la naturaleza del material, lo que lo descartaría para esta aplicación. Por otro lado, el empleo del Inctalac y la cera microcristalina Cosmolloid H80 han mostrado resultados prometedores que esperamos, al mejorar la metodología y aplicación, sean un aliado eficaz en la conservación de este tipo de esculturas.

Gracias a los resultados obtenidos hemos podido advertir las carencias y el potencial de los sistemas de protección escogidos. Para el posterior desarrollo de la tesis doctoral nos planteamos

otras formas de aplicación de los recubrimientos con el objetivo de mejorar la estética del metal protegido. También proponemos aplicar otros métodos de protección (inhibición, otras ceras y resinas) así como de análisis, además de los que se vienen realizando, como Raman y FTIR que nos permitirán caracterizar los productos de corrosión y analizar el comportamiento estructural de los sistemas de protección. Por último, planteamos la exposición en localizaciones más agresivas, con presencia de cloruros, para comparar la capacidad protectora de los recubrimientos en ambientes como la atmósfera de Madrid y las zonas costeras con atmósferas más agresivas.

Confiamos que al concluir con este proyecto obtengamos un sistema de protección aplicable en un futuro, que reduzca la corrosión y prolongue la vida de estos bienes culturales.

Bibliografía

- CANO, E. *et al.* (2014): «A novel gel polymer electrolyte cell for in-situ application of corrosion electrochemical techniques». *Electrochemistry Communications*, 41, pp.16-19
- CRESPO, A. (2020): *Estudio de herrumbres aceleradas en escultura contemporánea de acero patinable*. Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid.
- DÍAZ, I. (2012): *Corrosión atmosférica de aceros patinables de nueva generación*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- RAMÍREZ, B. y CANO, E. (2015): «Evaluación in situ de recubrimientos protectores para patrimonio cultural metálico mediante espectroscopía de impedancia electroquímica». *Ge – Conservación*, nº 8, pp. 6-13.
- RAMÍREZ, B., CANO, E. y 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, pp. 572-580.
- RUIZ DE ARCAUTE, E. (2014): «El Peine del Viento de Eduardo Chillida. Una revisión crítica de los estudios realizados para su conservación». En *9ª Jornada de Conservación de Arte Contemporáneo*. Madrid: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, pp. 17-27.

Estudio de las transformaciones de pigmentos en las pinturas murales del Parque Arqueológico de Pompeya

Study of pigment transformations on the mural paintings from the Archaeological Park of Pompeii

Silvia Pérez-Diez*

Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU
silvia.perezd@ehu.eus

Iker Marcaida Ormazábal

Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU
iker.mark@gmail.com

Juan Manuel Madariaga Mota

Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU
juanmanuel.madariaga@ehu.eus

Maite Maguregui Hernando

Departamento de Química Analítica, Facultad de Farmacia, Universidad del País Vasco UPV/EHU
maite.maguregui@ehu.eus

Resumen: El objeto de este estudio es presentar los avances del proyecto APUV (*Analytica Pompeiana Universitatis Vasconicae*) en las investigaciones acerca de las transformaciones de los pigmentos empleados en las pinturas murales del Parque Arqueológico de Pompeya (Italia). En concreto, se exponen los resultados concernientes al ennegrecimiento del ocre rojo y del rojo cinabrio, así como a la discriminación *in situ* entre ocre rojo original y ocre amarillo deshidratado por el efecto térmico de la erupción del volcán Vesubio en el 79 d.C. y su grado de transformación según la temperatura de impacto.

Palabras clave: Análisis *in situ*, pigmentos, pintura mural, Pompeya, degradación.

Abstract: The aim of this article is to present the latest research outcomes of the APUV project (*Analytica Pompeiana Universitatis Vasconicae*) regarding the transformation of pigments employed on mural paintings of the Archaeological Park of Pompeii (Italy). More concretely, the results concerning red ochre and red cinnabar darkening and the *in situ* discrimination between original red ochre and dehydrated yellow ochre due to the thermal effect of the 79 AD Mount Vesuvius eruption and its transformation extent according to the specific temperature impact are addressed.

Keywords: *In situ* analysis, pigments, mural painting, Pompeii, degradation.

Introducción

Desde 2010 el grupo de investigación IBeA de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) ha llevado a cabo análisis *in situ* en el Parque Arqueológico de Pompeya en el marco del proyecto APUV (*Analytica Pompeiana Universitatis Vasconicae*) y bajo diversos convenios de colaboración firmados entre ambas instituciones. A lo largo de estos años se han desarrollado diversas metodologías con instrumentación portátil/de mano basadas en técnicas espectroscópicas elementales y moleculares no invasivas. En aquellos casos en los que ha sido necesario confirmar o ampliar los resultados obtenidos en campo, se ha procedido a la toma de muestra y posterior estudio en el laboratorio.

Se ha trabajado en tres casas del Parque Arqueológico de Pompeya: la Casa de Marcus Lucretius (Regio IX, 3, 5/24), la Casa de Ariadna (Regio VII, 4, 31/51) y la Casa de Amorini Dorati (Regio VI, 16, 7). Esta última se encuentra abierta al público, por lo que durante las campañas se realiza de forma paralela una labor de divulgación acerca de la ciencia aplicada al estudio del patrimonio cultural.

Los objetivos del proyecto APUV comprenden desde la caracterización de los pigmentos y morteros empleados en las pinturas murales hasta la evaluación de su estado de conservación y el estudio de sus procesos de transformación y degradación (Maguregui *et al.*, 2010; Maguregui *et al.*, 2012; Madariaga *et al.*, 2014; Madariaga *et al.*, 2016; Marcaida *et al.*, 2016; Marcaida *et al.*, 2018; Pérez-Diez, Pitarch Martí, *et al.*, 2021).

Los pigmentos investigados en profundidad hasta el momento han sido el ocre rojo, el ocre amarillo y el rojo cinabrio. El ocre rojo y el ocre amarillo se preparaban a partir de suelos arcillosos ricos en hierro, mayoritariamente Fe_2O_3 (hematita) en el caso del ocre rojo y FeOOH (goethita) en el caso del amarillo. Los análisis de los pigmentos recuperados en sus recipientes originales en las excavaciones han permitido determinar la presencia de fases de origen volcánico, como langita ($\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), atacamita ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) o jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$). Estas evidencias experimentales apuntan al origen local de los ocre empleados (Marcaida *et al.*, 2019). Por otro lado, el cinabrio era un pigmento muy costoso, por lo que se usaba solo en aquellas *domus* cuyos dueños poseían un mayor poder adquisitivo. Su elevado coste se debía a que el mineral a partir del que se obtenía era importado, probablemente de las minas de Almadén o Sisapo (Zarzalejos *et al.*, 2020).

Entre las transformaciones que afectan a su naturaleza química y que se han descrito tradicionalmente en la literatura se encuentra la deshidratación de goethita a hematita, que induce un cambio de color de amarillo a rojo a alta temperatura y la obtención de un producto con una estructura cristalina desordenada, al contrario que la hematita natural (Siddall, 2018). Por su parte, un proceso de degradación conocido de la hematita es la formación de maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, tonalidad rojo oscura o marrón) por la presencia de materia orgánica (Gialanella *et al.*, 2011). Sin embargo, hasta la publicación de algunos de los primeros trabajos del proyecto APUV (Maguregui *et al.*, 2011; Maguregui *et al.*, 2014), no existían referencias sobre el ennegrecimiento de la hematita en pintura mural por ataque del SO_2 atmosférico y formación de magnetita negra (Fe_3O_4), yeso y sulfatos de hierro (III) nonahidratados (paracoquimbita/coquimbita).

En cuanto al rojo cinabrio, tanto Plinio como Vitruvio advertían ya de que resultaba perniciosa su exposición a la luz del sol y a la luna y aconsejaban su protección con cera púnica (Bostock y Riley, 1855; Gwilt, 1826). La hipótesis tradicional (Feller, 1967; Liberti, 1950, 1951) atribuía el ennegrecimiento del pigmento a la conversión de $\alpha\text{-HgS}$ rojo en $\beta\text{-HgS}$, metacinabrio negro, a una temperatura de $345\text{ }^\circ\text{C}$ (Dickson y Tunnel, 1959). Sin embargo, son escasos los ejemplos en los que se ha detectado esta fase en zonas ennegrecidas (Istudor *et al.*, 2007; Yu, Warren, y Fischer, 2019) y resultan abundantes las referencias recientes que apuntan a una fotodegradación asistida por clo-

ruros (Keune y Boon, 2005; McCormack, 2000; Radepont *et al.*, 2015; Spring y Grout, 2002) o a la presencia de un coloide de mercurio metálico superficial (Dreyer, 1939), detectado en probetas sintéticas de témpera envejecidas (Elert y Cardell, 2019). En un trabajo sobre las pinturas murales romanas de la Villa Sora del área vesubiana se incide en la sulfatación del carbonato de calcio como factor que contribuye al ennegrecimiento de la capa pictórica (Cotte *et al.*, 2006), debido al material particulado atrapado en la estructura porosa del yeso.

Instrumentación

En las campañas de análisis *in situ* y en los trabajos realizados en el laboratorio se han utilizado: espectrómetros Raman portátiles (láseres de 785 y 532 nm), espectrómetro de mano de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (HH-EDXRF), microscopía Raman confocal (láseres de 785, 633 y 532 nm), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (XRD), espectrometría de masas de iones secundarios por tiempo de vuelo (TOF-SIMS) y micro-fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (μ -EDXRF), entre otras técnicas.

La simulación del impacto del SO₂ atmosférico sobre fragmentos de pintura mural pompeyana con ocre rojo se llevó a cabo en una celda de simulación del Instituto de Ciencia y Tecnología en el Arte de la Academia de Bellas Artes de Viena (Austria).

Los detalles de la instrumentación pueden encontrarse en las publicaciones del proyecto APUV (Maguregui *et al.*, 2011; Maguregui *et al.*, 2014; Marcaida *et al.*, 2017; Marcaida, Maguregui, Morillas, Pérez-Diez, *et al.*, 2019; Pérez-Diez, Pitarch Martí, *et al.*, 2021).

Resultados y discusión

Ennegrecimiento del ocre rojo

Para el estudio del ennegrecimiento del ocre rojo se seleccionaron dos zonas de la Casa de Marcus Lucretius: las *fauces* (corredor de entrada de la *domus*) y el *triclinium* (comedor) (Maguregui *et al.*, 2011). Las *fauces* de la casa, parcialmente cubiertas por un tejado, destacan por el empleo de azul egipcio en el registro medio, mientras que el zócalo presenta un ennegrecimiento del ocre rojo (Figura 1a). En el *triclinium*, protegido por un tejado y abierto en su lado oeste, se ha constatado el empleo de ocre rojo, ocre amarillo y cinabrio, así como una transformación parcial del ocre amarillo en ocre rojo y áreas con ennegrecimiento del ocre rojo (Figura 1b).

Los análisis Raman se realizaron tanto *in situ* como en micromuestras en el laboratorio. En las *fauces* se detectó *in situ* la presencia de yeso (CaSO₄·2H₂O, banda a 1008 cm⁻¹) y magnetita (Fe₃O₄, banda alrededor de 660 cm⁻¹), mientras que los análisis de las micromuestras permitieron identificar un gran número de sulfatos, con bandas a 992 cm⁻¹, como thenardita (Na₂SO₄) o mirabilita (Na₂SO₄·10H₂O) y a 986 cm⁻¹, como epsomi-



Figura 1. a) *Fauces* (zócalo con ocre rojo ennegrecido) y b) *triclinium* (transformación de ocre amarillo en ocre rojo y ennegrecimiento de ocre rojo) de la Casa de Marcus Lucretius. Fotografías: Miembros proyecto APUV.

ta ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) o hexahidrita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), indicativos de un proceso de sulfatación del mortero (Figura 2). En las micromuestras del *triclinium* se detectó sulfato de hierro (III) noahidratado ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, paracoquimbita/coquimbita) en zonas de color rojo blanquecino gracias a la banda a 1025 cm^{-1} (Ling y Wang, 2010).

Para investigar las condiciones de formación de estos compuestos se realizó un modelado de posibles reacciones químicas (modelado termodinámico) mediante el *software* MEDUSA (Maguregui *et al.*, 2011). Según este modelado, tanto el yeso como la magnetita pueden formarse en la capa pictórica a concentraciones de SO_2 muy bajas. Además, si ya existe yeso en el sistema por una sulfatación previa, su presencia puede provocar la saturación y precipitación de otros sulfatos metálicos, como el sulfato de hierro (III) noahidratado detectado en el *triclinium*. Sin embargo, si el ataque de SO_2 se produce sin que haya yeso previamente, se forman a la vez yeso y magnetita, como en el caso de las *fauces*.

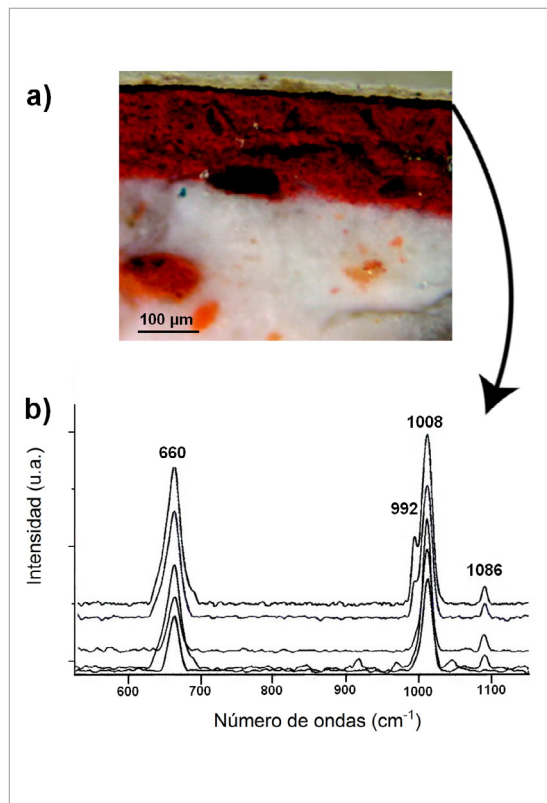


Figura 2. a) Estratigrafía de una micromuestra de pintura mural de las *fauces*: estrato ennegrecido sobre la capa pictórica de ocre rojo. b) Espectros Raman adquiridos en la capa ennegrecida que denotan la presencia de magnetita (660 cm^{-1}), thenardita o mirabilita (992 cm^{-1}) y yeso (1008 cm^{-1}), además de calcita (1086 cm^{-1}). Modificada a partir de Maguregui *et al.*, 2011. Fuente: Miembros del proyecto APUV.

Aunque la contaminación ha descendido en el área de Nápoles en las últimas décadas (de $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o 50 ppb en los años 80 a $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o 25 ppb en 2010)¹, este factor todavía constituye un elemento a tener en cuenta. Además, hay que considerar la carga de SO_2 introducida durante la erupción volcánica del 79 d.C. y otros fenómenos volcánicos secundarios, como la *mofête*, consistente en la emisión de CO_2 , H_2 y azufre gas, que podrían contribuir al ataque ácido a las pinturas (Amadori *et al.*, 2015).

Por tanto, el ennegrecimiento de la hematita del ocre rojo se puede deber a una deposición de SO_2 y consecuente formación de yeso y magnetita negra. Esta sulfatación podría tener lugar de tres maneras: por deposición seca de SO_2 en ausencia de lluvia, por deposición húmeda del H_2SO_4 disuelto en agua de lluvia o por deposición de partículas de yeso previamente formadas en la atmósfera.

Los resultados del modelo químico fueron contrastados con el envejecimiento acelerado de muestras reales de pintura mural con capa pictórica de ocre rojo excavadas en la Casa de Marcus Lucretius (Maguregui *et al.*, 2014). Los experimentos de envejecimiento acelerado se diseñaron considerando el periodo de exposición

de los murales a la atmósfera moderna (alrededor de 166 años) y la máxima concentración de SO_2 en Nápoles en los últimos 40 años (50 ppb).

Después de cada ciclo de envejecimiento, los fragmentos se caracterizaron mediante espectroscopía Raman y FTIR. Únicamente se identificaron nuevas fases minerales tras un ciclo de 48 horas con 400 ppm de SO_2 (8000 veces la concentración más elevada), 90-95 % RH y con una capa fina de agua Milli-Q en el fondo de la caja de vidrio cerrada herméticamente para replicar una deposición

¹ <https://www.arpa.veneto.it/>

húmeda de SO_2 . En ese caso se detectaron yeso en el *arriccio* y el *intonaco*, magnetita en zonas negro-grisáceas y sulfato de hierro (III) noahidratado en cristales blanco-rojizos (Figura 3a).

La detección de una banda Raman a 962 cm^{-1} (Figura 3b) y de una vibración a 948 cm^{-1} (Figura 3c) en ciertos espectros FTIR puede atribuirse a la presencia minoritaria de sulfitos (Verma, 1985), probablemente no detectados en los análisis *in situ* debido a su rápida oxidación a sulfatos. Por otro lado, otra banda Raman minoritaria a 989 cm^{-1} (Figura 3b) podría deberse a thaumasita [$\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$], 989 cm^{-1}) (Cultrone *et al.*, 2008), habitual en cemento Portland pero no en morteros tradicionales, o bien a sulfatos de hierro (II) como rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 991 cm^{-1}) o szomolnokita ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 989 cm^{-1}) (Castro *et al.*, 2003).

Así, los envejecimientos acelerados permitieron confirmar el mecanismo de ennegrecimiento de la hematita del ocre rojo mediante las siguientes reacciones químicas:

1. Oxidación de SO_2 a SO_3 , hidratación y deposición húmeda como H_2SO_4 .
2. Reducción de hematita a magnetita.
3. Transformación de calcita en yeso: ataque ácido en la interfase gas-líquido-sólido (Böke *et al.*, 1999) o bien en la capa de humedad superficial (Syed, 2006).
4. Sulfatación de la hematita por altas concentraciones de SO_2 a paracoquimbita/coquimbita.

Transformación del ocre amarillo en ocre rojo

En el Parque Arqueológico de Pompeya se aprecian transformaciones de los pigmentos debidas no solo al efecto de gases ácidos, sino también al impacto a alta temperatura de los materiales piroclásticos y los gases emitidos durante la erupción volcánica. Es el caso de la transformación del ocre amarillo en ocre rojo por efecto de la temperatura, que provoca que hoy en día se perciban erróneamente en torno a 246 paredes como murales de fondo rojo y únicamente 57 como amarillo (Higgins, 2011).

La dinámica de la erupción permitió la protección del registro inferior de las paredes en muchos casos, ya que la caída de *lapilli* y piedra pómez durante las primeras horas provocó el colapso de los tejados y la acumulación de escombros evitó que los flujos piroclásticos a alta temperatura afectaran a la parte baja de los murales (Gurioli *et al.*, 2005).

La temperatura estimada para los flujos piroclásticos que alcanzaron Herculano, a 6 kilómetros del Vesubio, y Pompeya, a 10 kilómetros del volcán, es de 400 y $240\text{--}340\text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente (Cioni *et al.*, 2004). Según algunos autores, la transformación del color por deshidratación

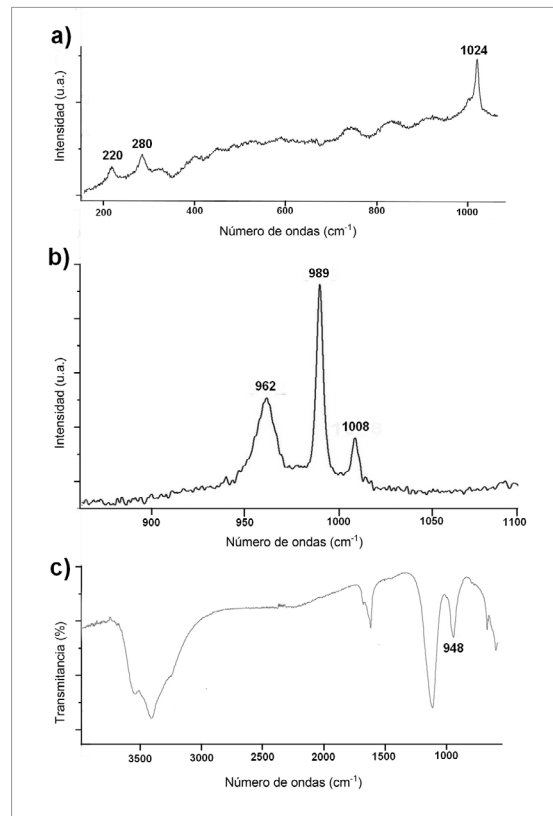


Figura 3. a) Espectro Raman de los cristales blanco-rojizos de coquimbita formados durante el envejecimiento acelerado. b) Espectro Raman correspondiente a las bandas a 962 y 989 cm^{-1} , encontradas en solo 2 de los 150 espectros tomados en los fragmentos expuestos, junto a la habitual banda del yeso a 1008 cm^{-1} . c) Espectro infrarrojo de un fragmento envejecido que muestra las bandas características del yeso, además de la de un sulfito a 948 cm^{-1} . Modificada a partir de Maguregui *et al.*, 2014. Fuente: Miembros proyecto APUV.

de la goethita del ocre amarillo en hematita se da a una temperatura de 230-280 °C durante una hora y, por encima de 300 °C, la práctica totalidad de las partículas ya está deshidratada (Siddall, 2018).

El primer objetivo de la investigación fue el desarrollo de un método HH-EDXRF para la diferenciación del ocre rojo original del amarillo transformado mediante análisis *in situ* (Marcaida *et al.*, 2017). Para ello, se realizaron medidas en la habitación I de la Casa de Marcus Lucretius (Figura 4a) y la habitación I de la Casa de Amorini Dorati (Figura 4b). En la primera de ellas se observa un zócalo de ocre rojo original, un sector medio de ocre amarillo protegido y un área de ocre amarillo deshidratado en el registro superior. En las jambas de la puerta de la habitación I de Amorini Dorati, originalmente pintadas con ocre amarillo, se aprecia la deshidratación también en la parte superior. Las paredes del interior de la habitación se decoran con murales del cuarto estilo con un patrón de «papel de pared» en el que los dibujos geométricos se perfilan en ocre rojo sobre el fondo amarillo (Figura 4c), por lo que estos motivos se tomaron como ocre rojo original para la comparación. Posteriormente, se crearon modelos de clasificación mediante PCA (*Principal Component Analysis*) para cada pintura mural. Asimismo, también se analizaron pigmentos recuperados en sus recipientes de terracota originales (ocre rojo y ocre amarillo) mediante μ -EDXRF.

Una de las diferencias entre el ocre rojo original y el transformado resultó ser la ausencia de As en el ocre amarillo y su producto deshidratado (Figura 5a). Debido a la contaminación con plomo de los materiales del Parque Arqueológico de Pompeya por la ruptura de las tuberías durante la erupción (Marcaida *et al.*, 2016) se consideraron respectivamente la línea K_{β} de As (11.7 keV) y la L_{β} de Pb (12.5 keV) para evitar la interferencia de la línea L_{α} de Pb con la línea K_{α} de As.

Para discriminar la contribución de As en la línea K_{α} interferida por la L_{α} de Pb se estudió el ratio L_{α}/L_{β} para Pb puro y en los espectros *in situ*. La relación resultó ser 1.35 para Pb puro, 1.48-1.64 para el ocre amarillo (transformado y original) y 4.8-9.8 para el ocre rojo original. Según estos valores, se demuestra claramente que existe una contribución de arsénico en el ocre rojo original, aunque la línea K_{α} esté interferida por la presencia de plomo.

El ocre rojo original también presenta una mayor contribución de Sr que el ocre amarillo (original y transformado), pero el As sirve como marcador inequívoco mediante HH-EDXRF.

Los modelos obtenidos mediante PCA empleando la matriz de datos adquiridos por HH-EDXRF en la Casa de Marcus Lucretius (Figura 5b) y la Casa de Amorini Dorati (Figura 5c) permitieron observar tres grupos diferenciados: ocre amarillo original (OY), ocre amarillo transformado (TY) y ocre rojo original (OR), este último determinado por la presencia de As y una mayor proporción de Sr. En el caso del modelo de la Casa de Marcus Lucretius, el grupo correspondiente al ocre amarillo original se caracteriza por elementos como S y K. Sin embargo, esto no se debe a la capa pictórica en sí misma, sino a que



Figura 4. Transformación de ocre amarillo en ocre rojo en a) habitación I de la Casa de Marcus Lucretius y b) jamba de la habitación I de la Casa de Amorini Dorati. c) Decoración del cuarto estilo en la habitación I de la Casa de Amorini Dorati, protegida de la transformación. Fotografías: Miembros proyecto APUV.

esa área de la pintura mural está afectada por eflorescencias (sales cristalizadas en superficie). En los análisis Raman se detectaron yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y nitro (KNO_3), lo que explica la elevada proporción de S y K.

Tras el establecimiento de un método *in situ* para la diferenciación entre áreas con ocre rojo original y transformado, se abordó el desarrollo de una evaluación cuantitativa de la transformación térmica en el yacimiento mediante imagen Raman y un posterior tratamiento de los datos mediante el método de estimación de *Direct Classical Least Squares* (DCLS). De esta manera se obtuvo una relación entre el porcentaje de transformación y la temperatura de impacto en cada pared afectada (Marcaida, Maguregui, Morillas, Pérez-Diez, *et al.*, 2019).

Para validar el método, se utilizaron fragmentos originales de pintura mural hallados en las excavaciones de la Casa de Marcus Lucretius pintadas con ocre amarillo (Figura 6), sometidos a diferentes temperaturas, y estándares de goethita y hematita sintética prensados en las siguientes proporciones: 25/75, 50/50 y 75/25 %.

Las imágenes de distribución molecular mediante Raman se representaron atendiendo a la relación señal-línea de base en las bandas de 397 (goethita), 411 (hematita) y 1086 cm^{-1} (calcita). El análisis cuantitativo se realizó mediante el algoritmo DCLS, basado en la comparación de cada espectro del mapa con los espectros de goethita y hematita (pigmentos recuperados de los boles de Pompeya, envejecido térmicamente a 350 °C) adquiridos en las mismas condiciones.

Los porcentajes de transformación de los fragmentos de pintura mural a diferentes temperaturas, obtenidos por primera vez en esta investigación, fueron los siguientes:

- a) 200 °C: 0.5 ± 0.4 %.
- b) 225 °C: 26.9 ± 2.8 %.
- c) 250 °C: 46.7 ± 1.7 %.
- d) 275 °C: 101.1 ± 1.2 %.

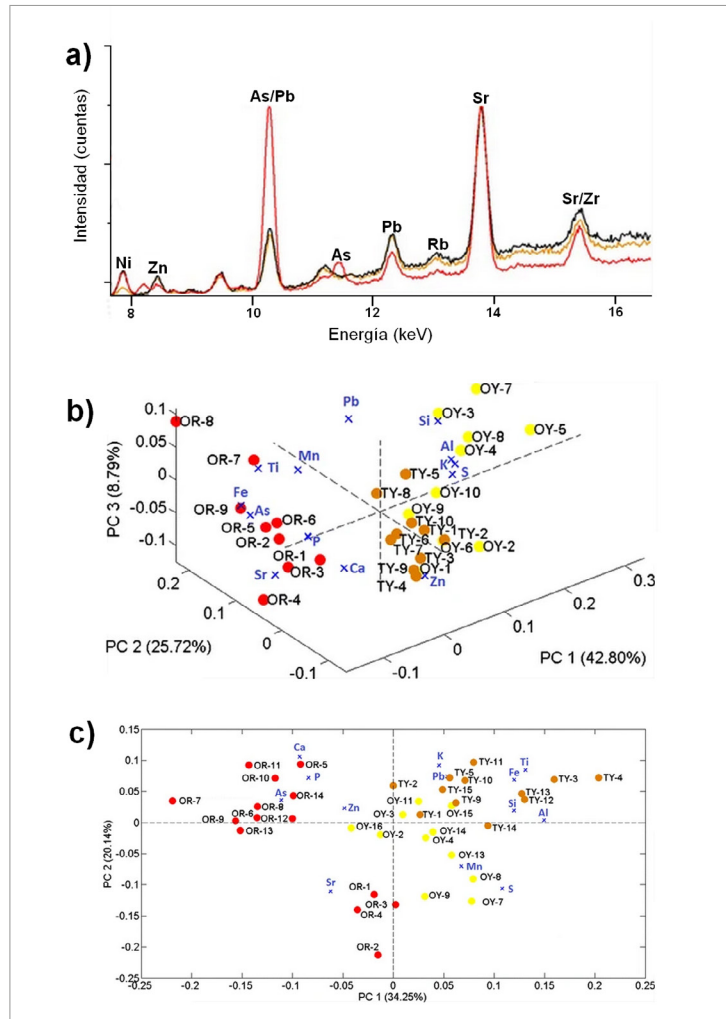


Figura 5. a) Espectros HH-EDXRF del ocre rojo original (en rojo), ocre amarillo original (en amarillo) y ocre amarillo transformado (en negro). b) Representación tridimensional de *scores* y *loadings* de las componentes principales PC1, PC2 y PC3, obtenida por medio de un análisis de componentes principales de los espectros HH-EDXRF tomados en zonas con ocre rojo original (OR), ocre amarillo original (OY) y ocre amarillo transformado (TY) en la Casa de Marcus Lucretius. c) Proyección de los *scores* y *loadings* (biplot) de PC1 y PC2 obtenida tras el análisis de componentes principales de los espectros HH-EDXRF tomados en zonas con ocre rojo original (OR), ocre amarillo original (OY) y ocre amarillo transformado (TY) en la Casa de Amorini Dorati. Modificada a partir de Marcaida *et al.*, 2017. Fuente: Miembros del proyecto APUV.

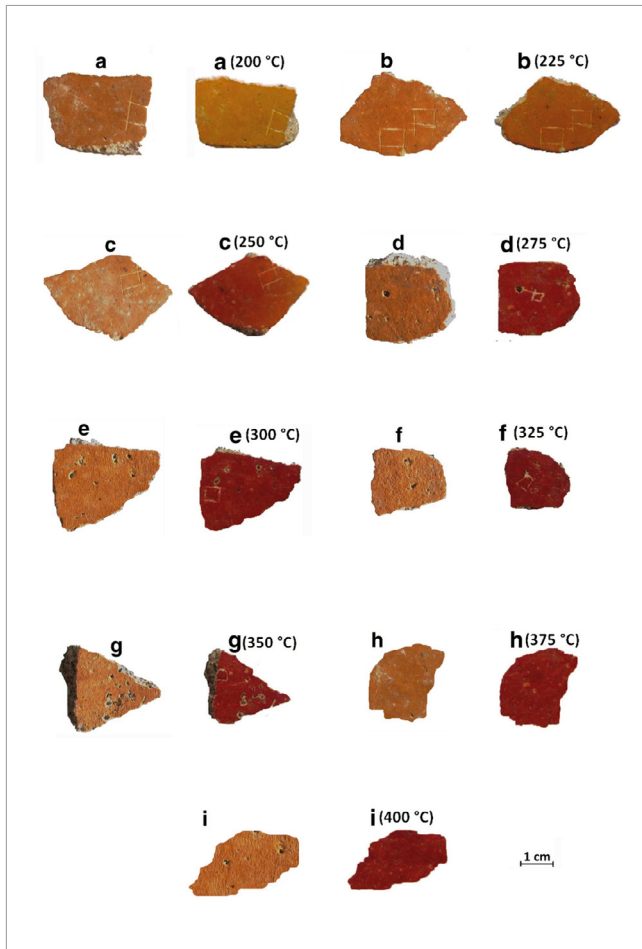


Figura 6. Comparación de la apariencia de los fragmentos de pintura mural con capa pictórica de ocre amarillo a-i, recuperados en la Casa de Marcus Lucretius y sometidos a temperaturas de entre 200 y 400 °C. Modificada a partir de Marcaida, Maguregui, Morillas, Pérez-Diez, *et al.*, 2019. Fuente: Miembros del proyecto APUV.

- e) 300 °C: $101.2 \pm 1.9 \%$.
- f) 325 °C: $99.2 \pm 1.9 \%$.
- g) 350 °C: $99.3 \pm 4.4 \%$.
- h) 375 °C: $99.4 \pm 0.6 \%$.
- i) 400 °C: $99.6 \pm 0.8 \%$.

Resultó de vital importancia el empleo de pigmentos ocre originales en polvo recuperado en las excavaciones de Pompeya, ya que los resultados obtenidos empleando pigmentos comerciales son levemente diferentes a partir de 250 °C. En este segundo caso, el porcentaje de transformación entre 275 y 400 °C es solo del 70 %. Esto puede deberse a la presencia de otras fases moleculares minoritarias como cuarzo, caolinita o illita en el pigmento de Pompeya, que pueden interferir en el fondo espectral.

Ennegrecimiento del rojo cinabrio

El ennegrecimiento del rojo cinabrio es un proceso conocido desde la Antigüedad y que no se restringe únicamente al campo de la pintura mural. Gracias a los trabajos en el Parque Arqueológico de Pompeya durante el s. XIX existen testimonios que apuntan a la degradación de murales de cinabrio, perfectamente conservados en el momento de su excavación, tras su exposición al aire libre (Helbig, 1868). Más recientemente, en las excavaciones de la Villa Sora en Torre del Greco (1988-1992), se ha apreciado ennegrecimiento de pinturas que inicialmente conservaban su color rojo vívido (Cotte *et al.*, 2006).

La investigación del proyecto APUV sobre el ennegrecimiento de este pigmento se basa en análisis *in situ* y sobre micromuestras del *triclinium* de la Casa de Marcus Lucretius (Figura 1), las habitaciones 7 y 17 de la Casa de Ariadna (Figuras 7a y 7b) y la habitación G de la Casa de Amorini Dorati (Figura 7c), que constituye el caso más acusado de ennegrecimiento (Pérez-Diez *et al.*, 2020) en Pompeya en base al conocimiento de los autores que firman este trabajo. En los extractos de los *Giornale di Scavo* de Antonio Sogliano, que corresponden a la excavación de la Casa de Amorini Dorati entre 1903 y 1905, se alude a la decoración de las paredes de la habitación G *prevolvemente* con rojo cinabrio o rojo vivo, halladas el 18 de junio de 1903, pero no se cita ningún tipo de transformación particular.

Las medidas *in situ* mediante espectroscopía Raman han permitido la identificación de calomel (Hg_2Cl_2 , 167 cm^{-1}) y yeso (1006 cm^{-1}) en las zonas ennegrecidas (Figura 8), corroborada a través de la detección de Hg, S y Cl a través HH-EDXRF (Pérez-Diez, Pitarch Martí, *et al.*, 2021). Estos resultados apuntan hacia la transformación del cinabrio en presencia de cloruros, cuyo origen se ha atribuido tradicionalmente a la cercanía del mar. Sin embargo, un estudio reciente del proyecto APUV ha probado que los materiales piroclásticos emitidos en la erupción



Figura 7. Ennegrecimiento del cinabrio en a) habitación 7 y b) habitación 17 de la Casa de Ariadna, c) habitación G de la Casa de Amorini Dorati. Fotografías: Miembros del proyecto APUV.

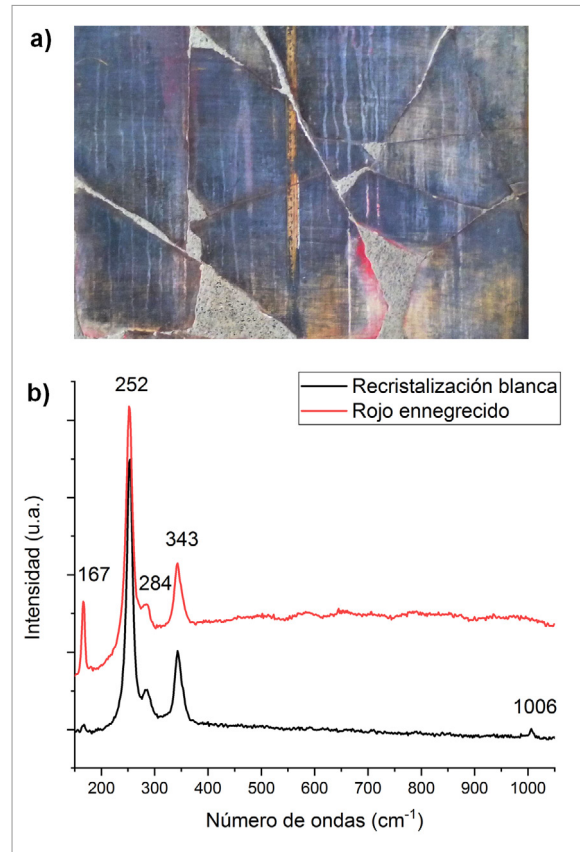


Figura 8. a) Detalle de la apariencia de la pintura mural con cinabrio ennegrecido de la habitación G de la Casa de Amorini Dorati, con recrystalización de sales por percolación de agua. b) Espectros Raman correspondientes a una recrystalización y a una zona ennegrecida, con señales correspondientes a calomel, cinabrio y yeso. Modificada a partir de Pérez-Diez, Pitarch Martí, *et al.*, 2021. Fuente: Miembros del proyecto APUV.

del 79 d.C. y su lixiviación pueden suponer otra fuente de cloruros y otros haluros como los fluoruros (Pérez-Diez *et al.*, 2021; Pérez-Diez, Fernández-Menéndez, *et al.*, 2021), cuyo papel en el ennegrecimiento del cinabrio ya ha sido evaluado con anterioridad (Davidson y Willsher, 1981). Además, también se ha identificado una carga considerable de cloruros en las aguas subterráneas de Pompeya (Pérez-Diez, Fernández-Menéndez, *et al.*, 2021). En los análisis de las micromuestras en el laboratorio se detectó nitrato (NaNO_3 , banda a 1063 cm^{-1}), además de yeso y calomel.

En una muestra de pintura mural con cinabrio de la Casa de Marcus Lucretius, adscrita al segundo estilo y enterrada en el *viridarium* antes de la erupción del 79 d.C., se realizaron mapas por μ -EDXRF (Figura 9a) y análisis TOF-SIMS (Figura 9b) para evaluar la presencia de mercurio metálico u otras especies que indicaran un proceso de degradación del pigmento (Pérez-Diez, Pitarch Martí, *et al.*, 2021). Estos estudios permitieron proponer una segunda vía de ennegrecimiento de la capa pictórica en muestras enterradas y protegidas de la erupción volcánica. En este caso se detectaron óxidos de manganeso en los puntos más oscuros y, en menor medida, óxido de hierro. La formación de estos óxidos, que oscurecen superficialmente la decoración en cinabrio, se asocia al fenómeno denominado «barniz desértico». El manganeso y el hierro pueden provenir del suelo en el que los fragmentos se encontraban enterrados. La precipitación pudo tener lugar de manera abiótica o asistida por microorganismos en el

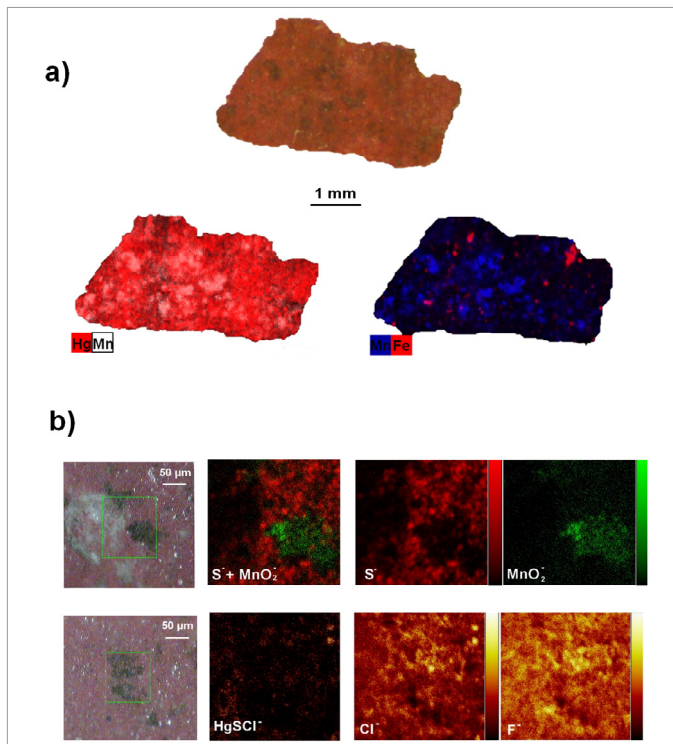


Figura 9. a) Mapas μ -EDXRF correspondientes a la distribución de Hg (rojo) y Mn (blanco) y Mn (azul) y Fe (rojo) en la muestra Red A y b) mapas TOF-SIMS de iones negativos (S^- , MnO_2^- , $HgSCI^-$, Cl^- , F^-) adquiridos en la muestra 3T, ambas recuperadas de las excavaciones del *viridarium* de la Casa de Marcus Lucretius. Modificada a partir de Pérez-Díez, Pitarch Martí, *et al.*, 2021. Fuente: Miembros proyecto APUV.

enterramiento (Uchida, Watanabe, y Osawa, 2016).

Si bien algunos modos de vibración de la unidad Mn-O (660 cm^{-1}) son activos en Raman (Sepúlveda *et al.*, 2015), resultan difíciles de diferenciar de la banda de la magnetita, común en capas pictóricas de ocre rojo sometidas al ataque de SO_2 . Por esta razón, la espectroscopía Raman no fue útil para determinar la presencia de estos óxidos de manganeso. Por otro lado, la detección de la especie $HgSCI^-$ por TOF-SIMS (Figura 9b) en áreas rojas y oscuras de la muestra podría indicar que la presencia de cloruros no conlleva en todos los casos el ennegrecimiento de la capa pictórica ni una fotosensibilización del pigmento, como ya propusieron otros autores (Elert y Cardell, 2019).

Conclusiones

Gracias a la información obtenida en las campañas *in situ* y los trabajos en el laboratorio se han podido evaluar las transformaciones de varios pigmentos de las pinturas murales de Pompeya debido a su exposición a la atmósfera desde su descubrimiento hace más de 100 años y al impacto que su-

puso la erupción del 79 d.C.: transformación del ocre rojo (Fe_2O_3) a magnetita negra (Fe_3O_4) y paracoquimbita/coquimbita ($Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$) por la influencia del SO_2 , ocre amarillo a ocre rojo por deshidratación de la goethita ($FeOOH$) a hematita (Fe_2O_3), así como el estudio del ennegrecimiento del cinabrio α - HgS y la generación de costras de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) por la sulfatación de la calcita presente en las pinturas murales. Además, también se ha podido constatar el oscurecimiento del cinabrio por la precipitación de nuevas fases minerales como óxidos de manganeso y de hierro.

El empleo de simulaciones de reacciones químicas y de envejecimientos acelerados ha resultado de interés para alcanzar una mejor comprensión de los procesos de degradación que tienen lugar.

Estos datos presentan una gran importancia para apoyar los procesos de conservación y restauración en el Parque Arqueológico de Pompeya, así como para enriquecer la experiencia de los visitantes a través de la correcta transmisión de los colores pompeyanos originales.

Agradecimientos

La investigación que ha dado lugar a estos resultados ha sido impulsada por la Fundación «la Caixa» (Silvia Pérez-Díez, ID 100010434, código de beca LCF/BQ/ES18/11670017) y se ha llevado a cabo gracias a diversos proyectos financiados por la Agencia Estatal de Investigación (MINECO), fondos FEDER/UE y financiaciones concedidas en diversas convocatorias del Gobierno Vasco para apoyar las actividades de Grupos de Investigación del Sistema Universitario Vasco. Los autores agradecen al Parque Arqueológico de Pompeya por su colaboración, al igual que al resto de investigadores

que han participado en diferentes momentos en el proyecto APUV. Los autores desean asimismo dar las gracias al grupo *Expeditio Pompeiana Universitatis Helsingiensis* (EPUH) y a Livio Ferrazza y Gemma María Contreras Zamorano, del Institut Valencià de Conservació, Restauració i Investigació (IVCR+i) por la cesión de las muestras de pintura mural mencionadas en este trabajo; así como a Jessica Powers por el acceso a su transcripción de los *Giornale degli Scavi* 1899-1904.

Bibliografía

- AMADORI, M. L. *et al.* (2015): «Invasive and non-invasive analyses for knowledge and conservation of Roman wall paintings of the Villa of the Papyri in Herculaneum». *Microchemical Journal*, 118, pp. 183–192.
- BÖKE, H. *et al.* (1999): «Effect of airborne particle on SO₂–calcite reaction». *Applied Surface Science*, 140 (1), pp. 70–82.
- CASTRO, K. *et al.* (2003): «Peer Reviewed: FTIR Spectra Database of Inorganic Art Materials». *Analytical Chemistry*, 75 (9), pp. 214 A-221 A.
- CIONI, R. *et al.* (2004): «Temperatures of the A.D. 79 pyroclastic density current deposits (Vesuvius, Italy)». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109, B02207.
- COTTE, M. *et al.* (2006): «Blackening of Pompeian cinnabar paintings: X-ray microspectroscopy analysis». *Analytical Chemistry*, 78 (21), pp. 7484–7492.
- CULTRONE, G. *et al.* (2008): «Sulfation of calcitic and dolomitic lime mortars in the presence of diesel particulate matter». *Environmental Geology*, 56 (3), pp. 741–752.
- DAVIDSON, R. S. y WILLSHER, C. J. (1981): «The light-induced blackening of red mercury (II) sulphide». *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, (3), pp. 833–835.
- DICKSON, F. W. y TUNNEL, G. (1959): «The stability reactions of cinnabar and metacinnabar». *American Mineralogist*, 44, pp. 471–487.
- DREYER, R. M. (1939): «Darkening of cinnabar in sunlight». *Am. Mineral.*, 24, pp. 457–460.
- ELERT, K. y CARDELL, C. (2019): «Weathering behavior of cinnabar-based tempera paints upon natural and accelerated aging». *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 216, pp. 236–248.
- FELLER, R. L. (1967): «Studies on the Darkening of Vermilion by Light». *Report and Studies in the History of Art*, 1, pp. 99–111.
- GIALANELLA, S. *et al.* (2011): «Artificial or Natural Origin of Hematite-Based Red Pigments in Archaeological Contexts: The Case of Riparo Dalmeri (Trento, Italy)». *Archaeometry*, 53 (5), pp. 950–962.
- GURIOLI, L. *et al.* (2005): «Interaction of pyroclastic density currents with human settlements: Evidence from ancient Pompeii». *Geology*, 33 (6), pp. 441–444.
- HELBIG, W. (1868): *Wandgemälde der vom Vesuv verschütteten Städte Campaniens*. Leipzig, Breitkopf und Härtel.
- HIGGINS, C. (2011): «Pompeii shows its true colours». *The Guardian*, 22 de septiembre. Disponible en: <http://www.theguardian.com/science/2011/sep/22/pompeii-red-yellow> [Consulta: 8 de enero de 2021]
- ISTUDOR, I. *et al.* (2007): «An alteration phenomenon of cinnabar red pigment in mural paintings from Sucevita». *e_conservation*, 2, pp. 24–33.

- KEUNE, K. y BOON, J. J. (2005): «Analytical imaging studies clarifying the process of the darkening of vermilion in paintings». *Analytical Chemistry*, 77 (15), pp. 4742–4750.
- LIBERTI, S. (1950): «Ricerche sulla natura e sulla origine delle alterazioni del cinabro». *Bollettino dell' Istituto Centrale del Restauro*, 3–4, pp. 45–64.
- (1951): «Ricerche sulle alterazioni del cinabro (II)». *Bollettino dell' Istituto Centrale del Restauro*, 5–6, pp. 57–60.
- LING, Z. C. y WANG, A. (2010): «A systematic spectroscopic study of eight hydrous ferric sulfates relevant to Mars». *Icarus*, 209 (2), pp. 422–433.
- MADARIAGA, J. M. *et al.* (2014): «In situ analysis with portable Raman and ED-XRF spectrometers for the diagnosis of the formation of efflorescence on walls and wall paintings of the Insula IX 3 (Pompeii, Italy)». *Journal of Raman Spectroscopy*, 45(11–12), pp. 1059–1067.
- MADARIAGA, J. M. *et al.* (2016): «Portable Raman, DRIFTS, and XRF Analysis to Diagnose the Conservation State of Two Wall Painting Panels from Pompeii Deposited in the Naples National Archaeological Museum (Italy)». *Applied Spectroscopy*, 70 (1), pp. 137–146.
- MAGUREGUI, M. *et al.* (2012): «Field Raman analysis to diagnose the conservation state of excavated walls and wall paintings in the archaeological site of Pompeii (Italy)». *Journal of Raman Spectroscopy*, 43 (11), pp. 1747–1753.
- MAGUREGUI, M. *et al.* (2014): «Multianalytical approach to explain the darkening process of hematite pigment in paintings from ancient Pompeii after accelerated weathering experiments». *Analytical Methods*, 6, pp. 372–378.
- MAGUREGUI, M. *et al.* (2010): «Raman spectroscopy as a tool to diagnose the impact and conservation state of Pompeian second and fourth style wall paintings exposed to diverse environments (House of Marcus Lucretius)». *Journal of Raman Spectroscopy*, 41 (11), pp. 1400–1409.
- MAGUREGUI, M. *et al.* (2011): «Thermodynamic and spectroscopic speciation to explain the blackening process of hematite formed by atmospheric SO₂ impact: The case of Marcus Lucretius House (Pompeii)». *Analytical Chemistry*, 83 (9), pp. 3319–3326.
- MARCAIDA, I. *et al.* (2018): «In situ non-invasive characterization of the composition of Pompeian pigments preserved in their original bowls». *Microchemical Journal*, 139, pp. 458–466.
- MARCAIDA, I. *et al.* (2017): «In situ X-ray fluorescence-based method to differentiate among red ochre pigments and yellow ochre pigments thermally transformed to red pigments of wall paintings from Pompeii». *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 409 (15), pp. 3853–3860.
- MARCAIDA, I. *et al.* (2016): «Multispectroscopic and Isotopic Ratio Analysis To Characterize the Inorganic Binder Used on Pompeian Pink and Purple Lake Pigments». *Analytical Chemistry*, 88 (12), pp. 6395–6402.
- MARCAIDA, I., MAGUREGUI, M., MORILLAS, H., PÉREZ-DIEZ, S., *et al.* (2019): «Raman imaging to quantify the thermal transformation degree of Pompeian yellow ochre caused by the 79 AD Mount Vesuvius eruption». *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 411 (28), pp. 7585–7593.
- MARCAIDA, I., MAGUREGUI, M., MORILLAS, H., VENERANDA, M., *et al.* (2019): «Raman microscopy as a tool to discriminate mineral phases of volcanic origin and contaminations on red and yellow ochre raw pigments from Pompeii». *Journal of Raman Spectroscopy*, 50 (2), pp. 143–149.
- MCCORMACK, J. K. (2000): «The darkening of cinnabar in sunlight». *Mineralium Deposita*, 35 (8), pp. 796–798.
- PÉREZ-DIEZ, S., FERNÁNDEZ-MENÉNDEZ, L. J. *et al.* (2021): «Chemometrics and elemental mapping by portable LIBS to identify the impact of volcanogenic and non-volcanogenic degradation sources on the mural paintings of Pompeii». *Analytica Chimica Acta*, 1168, p. 338565.

- PÉREZ-DIEZ, S. *et al.* (2021): «Elucidation of the Chemical Role of the Pyroclastic Materials on the State of Conservation of Mural Paintings from Pompeii». *Angewandte Chemie International Edition*, 60 (6), pp. 3028–3036.
- PÉREZ-DIEZ, S. *et al.* (2020): «Raman study of the darkening of Pompeian cinnabar». En: *14th International GeoRaman conferences*. GeoRaman 2020. Bilbao.
- PÉREZ-DIEZ, S., PITARCH MARTÍ, A. *et al.* (2021): «When Red Turns Black: Influence of the 79 AD Volcanic Eruption and Burial Environment on the Blackening/Darkening of Pompeian Cinnabar». *Analytical Chemistry*, 93 (48), pp. 15870–15877.
- RADEPONT, M. *et al.* (2015): «Thermodynamic and experimental study of the degradation of the red pigment mercury sulfide». *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 30 (3), pp. 599–612.
- SEPÚLVEDA, M. *et al.* (2015): «Micro-Raman spectral identification of manganese oxides black pigments in an archaeological context in Northern Chile». *Heritage Science; London*, 3 (1), pp. 1–6.
- SIDDALL, R. (2018): «Mineral Pigments in Archaeology: Their Analysis and the Range of Available Materials». *Minerals*, 8 (5), p. 201.
- SPRING, M. y GROUT, R. (2002): «The Blackening of Vermilion: An Analytical Study of the Process in Paintings». *National Gallery Technical Bulletin*, 23, pp. 50–61.
- SYED, S. (2006): «Atmospheric corrosion of materials». *Emirates Journal for Engineering Research*, 11, pp. 1–24.
- The Architecture Of Marcus Vitruvius Pollio, In Ten Books* (1826). London: Priestley and Weale.
- The Natural History of Pliny* (1855). London: H. G. Bohn.
- UCHIDA, E., WATANABE, R. y OSAWA, S. (2016): «Precipitation of manganese oxides on the surface of construction materials in the Khmer temples, Cambodia». *Heritage Science*, 4 (1), p. 16.
- VERMA, V. P. (1985): «Review of thermoanalytical, IR, Raman and X-ray studies of solid metal sulphites». *Thermochimica Acta*, 89, pp. 363–382.
- YU, J., WARREN, W.S. y FISCHER, M.C. (2019): «Visualization of vermilion degradation using pump-probe microscopy». *Science Advances*, 5 (6), p. eaaw3136.
- ZARZALEJOS, M. *et al.* (2020): «Celeberrimo Sisaponensi regione in Baetica miniario metallo... Vías de investigación sobre el cinabro hispano en época romana». *Anejos a Cuadernos de Prehistoria y Arqueología*, (4), pp. 307–316.

Evaluación de tratamientos de limpieza para la eliminación de depósitos calcáreos en cerámicas arqueológicas

Cleaning treatments' assessment for the removal of calcareous deposits in archaeological ceramics

Águeda Sáenz-Martínez*

Facultad de Bellas Artes. Universidad Complutense de Madrid
agsaenz@ucm.es

Margarita San Andrés Moya

Facultad de Bellas Artes. Universidad Complutense de Madrid
msam@ucm.es

Mónica Álvarez de Buergo

Instituto de Geociencias. Centro Superior de Investigaciones Científicas y Universidad Complutense de Madrid
monica.alvarez@igeo.ucm-csic.es.

Marta Pérez-Estébanez

Facultad de Bellas Artes. Universidad Complutense de Madrid
mperezes@ucm.es

Resumen: La eliminación de depósitos calcáreos de cerámicas arqueológicas constituye una de las intervenciones más comunes en conservación-restauración. No obstante, los tratamientos actuales no distan demasiado de los utilizados desde los años 70, a pesar de que estos puedan implicar transformaciones en las piezas cerámicas. En el marco de este proyecto de investigación se han diseñado tratamientos basados en criterios actuales, comparando métodos de aplicación directos e indirectos con agentes de limpieza tradicionales, como los ácidos y agentes quelantes. Además, se ha revisado su eficacia, así como su seguridad gracias al diseño de una metodología científica de análisis que ha permitido establecer las variaciones ocurridas en probetas cerámicas realizadas *ad hoc* y en fragmentos cerámicos originales procedentes del yacimiento arqueológico de Guarrazar (Toledo). Para ello, se ha estudiado antes y después de los tratamientos de limpieza, por un lado, la composición química y mineralógica de las muestras, y por otro, sus propiedades físicas, petrográficas e hídras tales como el color, la micro-rugosidad superficial y la porosidad abierta. Entre las técnicas seleccionadas destacan las no destructivas (TND), ya que pueden usarse en piezas originales sin dañarlas. Los resultados permitirán establecer los mejores tratamientos en cuanto a la eficacia de limpieza, pero también en lo que respecta a la estabilidad de las piezas cerámicas, a corto y medio plazo.

Palabras clave: Conservación-restauración; cerámica; arqueometría; técnicas no destructivas (TND).

Abstract: The removal of calcareous deposits is one of the most common interventions in conservation-restoration. However, current treatments are similar to the ones developed from the 70s onwards, even though they can imply transformations in ceramic pieces. Within this project, treatments based on current criteria have been designed, comparing direct and indirect application methods of traditional cleaning products, as acids and chelating agents. Besides, their efficacy and safety have been checked thanks to a scientific analysis methodology which allowed to determine the changes occurred in ceramic specimens made *ad hoc*, as well as in original archaeological ceramics, from the archaeological site of Guarrazar (Toledo). With this purpose, their chemical and mineralogical composition have been studied. On the other hand, their physical, petrographic and hydric properties have been established, as colour, micro-roughness and open porosity. The selected techniques include non-destructive ones (NDT), as they can also be used in original pieces without damaging them. The results obtained will allow to determine the best treatments regarding both cleaning efficacy and ceramic pieces' stability, in the short and mid-term.

Key-words: Conservation-restoration; ceramic; archaeometry; non-destructive techniques (NDT).

Introducción

Las cerámicas arqueológicas constituyen una gran parte del patrimonio cultural de origen arqueológico, en gran medida gracias a su resistencia físico-química que garantiza su conservación, a pesar de soportar condiciones de enterramiento y subacuáticas, durante largos periodos de tiempo (Carrascosa Moliner, 2009). Esto permite que la valiosa información que las cerámicas portan pueda llegar hasta nuestros días. Dicha información incluye la naturaleza de los materiales usados para su elaboración, los procedimientos utilizados en su fabricación, su temperatura y atmósfera de cocción, su cronología, usos, incluso si se produjeron intercambios con otros grupos y poblaciones. Así, los valores artísticos e históricos de los materiales cerámicos ayudan a la interpretación y reconstrucción del pasado (Orton, Tyers y Vince, 1997). No obstante, a pesar de la previamente nombrada estabilidad físico-química que presentan, las cerámicas arqueológicas también pueden sufrir alteraciones que degradan en mayor o menor medida los materiales originales, su legibilidad y, por ende, la información que contienen. Dichas alteraciones incluyen la pérdida de cohesión o arenización, aparición de abrasiones, sales solubles e insolubles, grietas y pérdida de material original, bien de las pastas cerámicas o de su decoración (pintada o vidriados).

Esta investigación se centra en la eliminación de los depósitos de sales insolubles que aparecen en las superficies cerámicas, al tratarse de una de las principales causas de alteración que impide la correcta lectura e interpretación de las piezas (Cronyn y Robinson, 1990). De acuerdo a las actuales corrientes en conservación-restauración, que abogan por acciones menos intervencionistas, estos depósitos podrían no eliminarse si las piezas se encuentran en condiciones ambientales estables, dada la estabilidad del carbonato de calcio (Caple, 2000). Aunque las piezas puedan ser analizadas con técnicas como la radiografía por rayos X (Alejandra López, Valeria Caramés y Judith Acevedo, 2010; Madrid García y Ramírez Angulo, 2011), su uso está limitado, por lo que la eliminación de los depósitos se convierte en la mayoría de los casos en la única manera de apreciar y estudiar tanto decoraciones, marcas superficiales como pastas cerámicas. Por otro lado, si las piezas van a ser expuestas, esta intervención será igualmente necesaria, ya

que de otro modo los valores artísticos de los objetos cerámicos no podrán ser apreciados por el público.

Por todo ello, desde los años 70, en el ámbito de la conservación-restauración se han desarrollado diversos tratamientos para su eliminación, comúnmente basados en el uso de distintos productos químicos seleccionados para reblandecer, e incluso eliminar, los depósitos calcáreos. Estas intervenciones incluían también una acción mecánica de retirada de los restos de los depósitos, con escalpelo, bisturí o herramientas más agresivas como el vibroincisor. Los agentes de limpieza comprendían tanto disoluciones ácidas (ácido acético, nítrico, clorhídrico, sulfúrico), como básicas (hexametáfosfato de sodio, sales sódicas del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA)) (Cronyn y Robinson, 1990; Orton, Tyers y Vince, 1997). Estos productos eran aplicados de forma directa, mediante inmersión, o indirecta, mediante apósitos de pulpa de celulosa u otros agentes absorbentes, como la sepiolita (Pearson, 1987; Berducou, 1990; Buys y Oakley, 1993; Fernández y Seva, 2003). No obstante, algunos estudios han probado que los productos químicos utilizados pueden afectar a la composición original de las cerámicas, además de que los medios mecánicos pueden alcanzar las superficies originales, dejando marcas (Johnson, Ericsson y Iceland, 1995; Casaletto *et al.*, 2008; Coladonato, Di Odoardo y Prunas, 2013). De forma paralela, a partir de los años 80, se han desarrollado nuevos métodos de aplicación basados en agentes espesantes poliméricos tanto de origen natural (agar, goma xantano), como sintéticos (carbopol), que dan lugar a geles físicos, formados por enlaces no covalentes (puentes de hidrógeno, dipolo-dipolo, fuerzas de Van der Waals). Aunque estas formulaciones permiten un mayor control de los tratamientos y disminuyen el grado de evaporación de los disolventes espesados, pueden dejar restos sobre las superficies intervenidas, lo que contribuiría a la degradación gradual de las mismas (Lang, 1999; Stulik y Dorge, 2004). Por otro lado, a partir del año 2010, se desarrollan los geles químicos, formados por enlaces covalentes de polímeros, obteniendo una resistencia mecánica y una capacidad retentiva mucho mayores que los geles físicos. Además, los fuertes enlaces que los mantienen unidos, generan una red que no deja residuos tras su uso, eliminando los posibles efectos secundarios de estos métodos de aplicación indirectos (Domingues *et al.*, 2013; Baglioni *et al.*, 2018).

En resumen, los métodos indirectos garantizan un mayor control de los tratamientos y, por ende, pueden limitar los efectos de los mismos sobre los materiales intervenidos, siendo una alternativa a los métodos directos. No obstante, su uso en el ámbito de la conservación del patrimonio arqueológico es más limitado en comparación con superficies policromadas como pintura sobre lienzo, tabla o escultura.

El problema que se plantea desde la conservación de la cerámica arqueológica es averiguar cómo los tratamientos que se utilizan alteran estos materiales, así como estudiar la viabilidad de posibles métodos de aplicación alternativos a los más tradicionales, como la inmersión y los apósitos o papetas. Teniendo todo lo anterior en cuenta, surge este proyecto de investigación con el objetivo de determinar en qué medida afectan estos tratamientos a las cerámicas arqueológicas, tanto a la composición –química y mineralógica–, como a distintas propiedades que incluyen el color, la micro-rugosidad y la porosidad abierta. Así se podrán usar de forma segura, garantizando tanto una limpieza eficaz como la conservación de las piezas, a corto y medio plazo.

Objetivos

El objetivo principal del proyecto de investigación es establecer la eficacia y la seguridad de los tratamientos diseñados para la eliminación de concreciones calcáreas de cerámica arqueológica, avaladas por la aplicación de una metodología científica basada en diversas técnicas y ensayos.

Objetivos específicos

1. Diseñar varios tratamientos eficaces para la eliminación de sales insolubles en cerámicas arqueológicas basados en métodos de aplicación tradicionales y otros más novedosos.
2. Determinar las variaciones ocurridas en las piezas cerámicas tras los tratamientos a través de la caracterización química, mineralógica y petrofísica con técnicas y ensayos complementarios entre sí.
3. Establecer qué tratamientos además de ser eficaces, garantizan la conservación de las cerámicas arqueológicas a corto y medio plazo.
4. Difundir los resultados en el ámbito de la conservación-restauración del patrimonio arqueológico.

Materiales y metodología

1) Revisión bibliográfica

En primer lugar y con el objetivo de conocer el estado de la cuestión al inicio del proyecto, se llevó a cabo una amplia revisión bibliográfica incluyendo libros y manuales sobre el estudio y la conservación de material arqueológico, así como artículos de investigación más recientes tanto de conservación como del uso de técnicas analíticas para el estudio de material cerámico de origen arqueológico.

2) Diseño del cuestionario

No obstante, dada la falta de publicaciones recientes al respecto de la eliminación de concreciones calcáreas en cerámica arqueológica, se diseñó un cuestionario para ampliar la perspectiva y conocer qué productos, concentraciones y métodos de aplicación se utilizan actualmente en las instituciones españolas encargadas de la conservación de los materiales arqueológicos. De esta manera, los resultados tendrán una aplicación actual, vinculada directamente al ámbito en cuestión, con la intención de mejorar y establecer tratamientos eficaces y sin riesgos, tanto para las piezas como para los profesionales. En la tabla 1 se recoge la información resumida referida al cuestionario.

Tabla 1. Detalles del cuestionario diseñado para conocer el estado actual de la eliminación de concreciones calcáreas en cerámica arqueológica

<p>Título del cuestionario</p> <p>Eliminación de sales insolubles en cerámica arqueológica</p>
<p>Preguntas de investigación</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Qué tratamientos aplican los museos españoles? (incluyendo productos, concentraciones y métodos de aplicación). • ¿Se realiza una posterior eliminación de los posibles residuos? • ¿Se llevan a cabo estudios para determinar la eficacia y los efectos de los tratamientos efectuados? • ¿Existe conciencia sobre los riesgos de aplicar estos tratamientos?
<p>Objetivos</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Establecer principales tratamientos actuales en conservación-restauración para la eliminación de sales insolubles. Conocer los productos y concentraciones. 2. Determinar si se realizan estudios de las piezas antes y después de las intervenciones y, en caso de ser así, qué tipo de estudios. 3. Conocer los tratamientos de eliminación de residuos, si se aplican.

Tabla 1. Detalles del cuestionario diseñado para conocer el estado actual de la eliminación de concreciones calcáreas en cerámica arqueológica (continuación)

Contactados: 35	Tasa de respuesta: 31,4%	Respuestas: 54
Preguntas		
1. Dirección de correo electrónico	10. Tipo de tratamiento	19. Frecuencia de los tratamientos
2. Situación laboral	11. Concentración disoluciones ácidas	20. Seguridad de los tratamientos
3. Departamento y puesto	12. Concentración agentes secuestrantes	21. Eficacia de los tratamientos
4. Formación	13. Concentración resinas intercambio iónico	22. Recomendación a profesionales
5. Experiencia en Conservación- Restauración	14. Concentración otras	23. Recomendación a estudiantes
6. Especialista en la C-R de material arqueológico	15. Métodos aplicación	24. Estudios posteriores
7. Frecuencia de sales insolubles	16. Aumento de la temperatura	25. Tipo de estudios posteriores
8. Ensayo previo	17. Eliminación posterior	26. Sexo
9. Tipo de ensayo	18. Tipo de eliminación posterior	27. Edad

3) Elaboración de probetas cerámicas

Dada la gran variabilidad existente en los materiales cerámicos, se elaboraron probetas cerámicas utilizando una arcilla roja comercial Sio-2® ARGILA (Ceramica Collet S.A.) en un rango de temperaturas de cocción que abarca las propias de las cerámicas arqueológicas: 650, 800, 1000 y 1100°C (Orton, Tyers y Vince, 1997). Se realizaron piezas prismáticas de unas dimensiones aproximadas de 5×5×1 cm, que se dejaron secar en una cámara climática (Vötsch Industrietechnik VCL 4010) durante un total de 77 horas a 20°C y 50% de humedad relativa (H.R.). La cocción de las piezas se llevó a cabo a una velocidad de 2°C/ min y 3 horas de mantenimiento de la temperatura final en una mufla (SNOL 30/1300 L), primero hasta 120°C y después hasta alcanzar cada una de las temperaturas de cocción (Figura 1). Finalmente, para atemperar las probetas, estas se introdujeron de nuevo en la cámara climática a 20°C y 50% H.R. durante 24 horas.

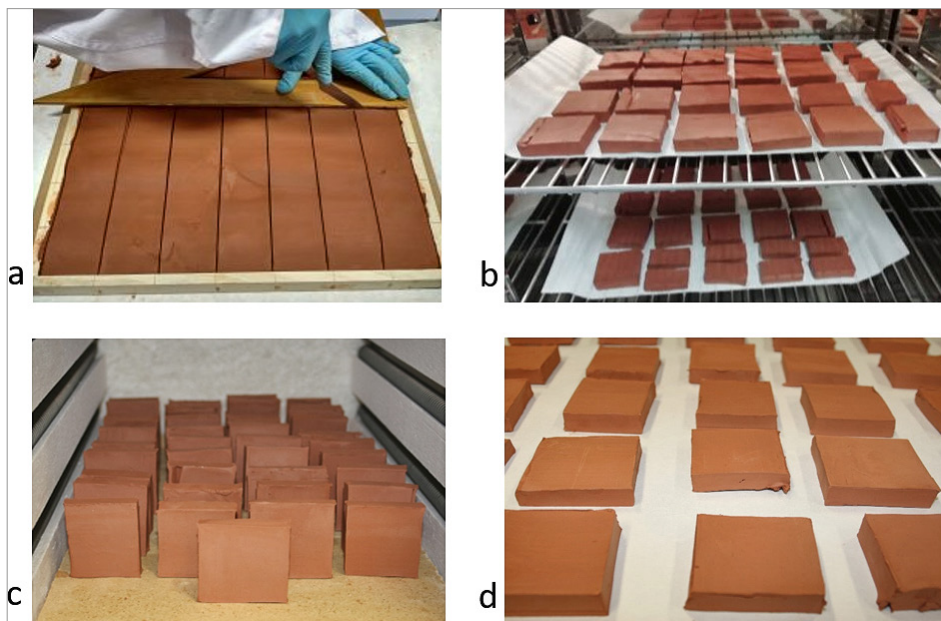


Figura 1. Proceso de elaboración de las probetas cerámicas. a) Corte de la arcilla comercial; b) secado en cámara climática; c) cocción en mufla; d) probetas cerámicas cocidas a 650°C. Fotografías: Águeda Sáenz-Martínez.

4) Crecimiento de los depósitos de sales insolubles

Teniendo en cuenta que estas probetas no presentaban concreciones calcáreas sobre las cuales probar los tratamientos de limpieza, se generó sobre una de las superficies de dichas probetas un depósito calcáreo artificial, simulando las concreciones que aparecen sobre las cerámicas arqueológicas originales. Para ello, se utilizó una mezcla de cal en pasta con un árido previamente secado y cribado (3:1) (250 μm - 63 μm). Dicha mezcla se aplicó directamente con una espátula sobre las superficies cerámicas previamente humectadas por inmersión, dando como resultado unos depósitos de aproximadamente 2-3 mm de grosor. Finalmente, se introdujeron las probetas en una cámara climática (Dycometal CCK -25/81) con flujo constante de 1600 ppm de CO_2 durante 10 días, a 20°C y 60% H.R. Pasado este tiempo, se obtuvieron concreciones calcáreas de dureza similar a las que aparecen sobre las superficies de las cerámicas (Figura 2).

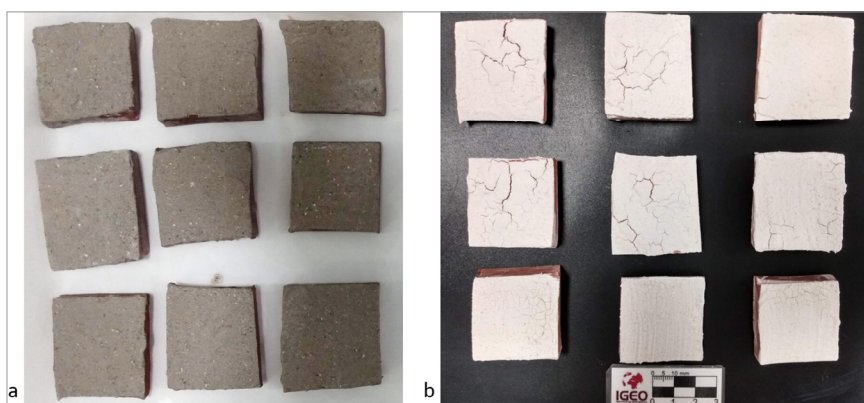


Figura 2. Proceso de crecimiento de los depósitos calcáreos sobre las probetas cerámicas. a) Mezcla de cal y árido aplicado sobre una de las superficies de las probetas cerámicas; b) depósitos obtenidos tras la carbonatación en cámara climática con flujo de CO_2 . Fotografías: Águeda Sáenz-Martínez.

5) Selección de cerámicas arqueológicas

Además de las probetas cerámicas, se seleccionaron fragmentos procedentes del yacimiento de Guarrazar (Toledo). Estos incluyen dos grupos de fragmentos de cerámica de almacenamiento, uno con la superficie bruñida y otro con la superficie acanalada, y un grupo de cerámica de cocina (Figura 3). Los tratamientos probados en las probetas cerámicas serán también aplicados en los fragmentos arqueológicos, que serán analizados usando las mismas técnicas, para así estudiar la viabilidad de dichas intervenciones en piezas originales.



Figura 3. Fragmentos cerámicos del yacimiento arqueológico de Guarrazar (Toledo). De izquierda a derecha, grupo cerámico de almacenamiento bruñido, con acanaladuras y, a la derecha, fragmentos de cerámica de cocina. Fotografías: Águeda Sáenz-Martínez.

6) Diseño de los tratamientos de limpieza

Basándose en la bibliografía y en los resultados de la encuesta realizada, se seleccionaron dos agentes de limpieza ácidos (ácido acético y ácido nítrico) y un agente quelante básico (sal tetrasódica del ácido EDTA). En cuanto a los métodos de aplicación, se seleccionó la inmersión como método indirecto y la goma xantano como agente espesante y, por tanto, método indirecto. Por otro lado, como alternativa a los métodos tradicionales indirectos, se seleccionaron también varios geles químicos comercializados como *Nanorestore gels*[®], así como dispersiones de alta densidad no comercializadas (Guaragnone *et al.*, 2020). Con el objetivo de diseñar unos tratamientos eficaces pero seguros, se establecieron dos criterios básicos: mínima concentración del producto y de la duración de los tratamientos (AENOR, 2009). Los tratamientos químicos se complementaron con una acción mecánica con palitos de madera, al ser un instrumento menos agresivo, en comparación con otros como el escalpelo, el bisturí o el micro-motor. Para finalizar los tratamientos, era necesario llevar a cabo un proceso de desalación o eliminación de las sales solubles producto de las reacciones ocurridas entre los depósitos calcáreos y los agentes de limpieza utilizados. De este modo, dependiendo del método de aplicación de los tratamientos, la desalación se realizó por inmersión, enjuague o mediante geles químicos, siempre con agua desionizada. Para establecer el final de los tratamientos, se realizaron medidas de la conductividad usando la variable *knorm*, que tiene en cuenta la variación en la conductividad, dependiendo del volumen de agua utilizada, el tiempo transcurrido y la masa de las probetas (Unruh, 2001; White, Pool y Carroll, 2010). Finalmente, las probetas se introducían en cámara climática a 40°C durante 24 horas para su total secado.

7) Caracterización de las probetas

La caracterización de las probetas, antes y después del proceso de carbonatación y tras los tratamientos de limpieza, ha incluido su composición química y mineralógica, así como distintas propiedades físicas e hídricas como el color, la micro-rugosidad y la porosidad abierta. De este modo, se han utilizado una gran variedad de técnicas y ensayos complementarios entre sí, que han permitido obtener una idea global de los procesos que estaban sucediendo. Dichas técnicas incluyen:

- Espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR). Esta técnica semicuantitativa y mínimamente destructiva (mg) ha permitido identificar los grupos funcionales presentes en las muestras molidas, siendo especialmente útil para las sales solubles.
- Difracción de rayos X en polvo (DRXP). A través del fenómeno de la difracción de rayos X se identifican de forma semicuantitativa las fases cristalinas existentes en una pequeña muestra en polvo (mg).
- Fluorescencia de rayos X (FRX). Esta técnica aporta el análisis elemental de una muestra. Aunque se trata también de una técnica semicuantitativa, en este caso se considera destructiva, ya que se necesita una mayor cantidad de muestra (g).
- Termogravimetría (TG) y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Los análisis térmicos basados en la variación de masa de una muestra cuando se somete a una temperatura controlada, han permitido la caracterización de las muestras a partir de la descomposición de sus componentes. Además, gracias a la DSC se ha obtenido una medida cuantitativa de los cambios de entalpía ocurridos en función de la temperatura. Estas técnicas se consideran mínimamente destructivas puesto que solo necesitan una pequeña cantidad de muestra (mg).
- Microsonda electrónica. Gracias a esta técnica se han realizado mapas de distribución de los elementos que componen las muestras. Se trata de una técnica semicuantitativa y destructiva, al tener que preparar muestras de aproximadamente 7×3,5 mm de superficie.
- Microscopía electrónica de barrido (MEB) con análisis de energía dispersiva por rayos X (EDS). Esta técnica produce imágenes de alta resolución de una muestra además de aportar

información sobre la composición elemental de la misma. Se trata de una técnica cualitativa, semicuantitativa y destructiva, pues necesita de toma de muestra.

- Color. Para analizar el color de las muestras en el espacio de color CIELAB (CIE 1976 L*a*b*), se ha utilizado un espectrofotómetro portátil, sin necesidad de toma de muestra, por lo que se trata de una técnica no destructiva (TND) y cuantitativa.
- Micro-rugosidad óptica. Esta propiedad física fue analizada con un perfilómetro óptico portátil, que da como resultado una imagen de la topografía 3D de una superficie, así como analiza los parámetros de rugosidad, por lo que se trata de una técnica cuantitativa. Además, al no ser necesaria la toma de muestra se considera una TND.
- Determinación de la densidad real y aparente, y de la porosidad abierta y total. Este ensayo regido por la norma UNE-EN 1936:2007 (AENOR, 2007), determina la densidad aparente y la porosidad abierta por el método de absorción de agua al vacío y pesada en balanza hidrostática de las probetas. Se trata de un ensayo cuantitativo y no destructivo, ya que no necesita de toma de muestra.

Conclusiones

La metodología desarrollada está permitiendo alcanzar los objetivos expuestos ya que, gracias a las técnicas seleccionadas, los tratamientos diseñados están siendo evaluados, en cuanto a su eficacia y en lo que respecta a los cambios que provocan en las cerámicas, tanto en las probetas como en los fragmentos arqueológicos. Los resultados obtenidos establecerán la idoneidad de los tratamientos para la eliminación de concreciones calcáreas en cerámicas, dependiendo de sus características: composición, temperatura de cocción, rugosidad superficial, porosidad y color. Las similitudes en las características estudiadas entre los fragmentos reales y las probetas cerámicas, permitirán hacer una extrapolación de los resultados obtenidos en las probetas, lo que determinará la viabilidad de estos tratamientos en los hallazgos cerámicos de origen arqueológico.

Agradecimientos

Los autores agradecen al programa de investigación *Top-Heritage-CM* (S2018/NMT-4372) y a las plataformas temáticas interdisciplinares PTI-PAIS (CSIC). También a los Centros de Apoyo a la Investigación de Técnicas Geológicas (UCM), difracción de rayos X (UCM), fluorescencia de rayos X (UCM y UGR), a la fundación Palarq (PR2004_19/02) y al grupo de investigación de Documentación, Conservación y Restauración del Patrimonio cultural (UCM-930420). Agradecen también a la Universidad Complutense de Madrid y el Banco Santander por el contrato predoctoral de Águeda Sáenz Martínez (CT17/17-CT18/17), y el contrato postdoctoral de Marta Pérez Estébanez (CT39/17), así como al Ministerio de Ciencia e Innovación por la beca para estudiantes de postgrado en La Residencia de Estudiantes (2020-2021).

Bibliografía

- AENOR (2007): *UNE-EN 1936:2007 Métodos de ensayo para piedra natural Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.*
- AENOR (2009): *UNE 41806-2 IN Conservación de edificios Limpieza de elementos constructivos. Parte 2: Técnicas de limpieza con agua.*
- ALEJANDRA LÓPEZ, M., VALERIA CARAMÉS, L. y JUDITH ACEVEDO, V. (2010): «El uso de rayos X en la conservación de cerámica arqueológica. Casos de estudio en Quebrada de Humahuaca, República Argentina». *Ge-conservación*, 1, pp. 221–234.

- BAGLIONI, P. *et al.* (2018): «Smart Soft Nanomaterials for Cleaning». En: *Nanotechnologies and Nanomaterials for Diagnostic, Conservation and Restoration of Cultural Heritage*. Elsevier, pp. 171–204. doi: 10.1016/B978-0-12-813910-3.00009-4.
- BERDUCOU, M. C. (ed.) (1990): *La Conservation en archéologie: méthodes et pratique de la conservation-restauration des vestiges archéologiques*. Paris: Masson.
- BUYS, S. y OAKLEY, V. (1993): *The conservation and restoration of ceramics*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- CAPLE, C. (2000): *Conservation skills : judgement, method and decision making*. Londres; Nueva York: Routledge.
- CARRASCOSA MOLINER, B. (2009): *La conservación y restauración de objetos cerámicos arqueológicos*. España: Tecnos.
- CASALETTO, M. P. *et al.* (2008): «Chemical cleaning of encrustations on archaeological ceramic artefacts found in different Italian sites». *Applied Physics A*, 92 (1), pp. 35–42. doi: 10.1007/s00339-008-4519-x.
- COLADONATO, M., DI ODOARDO, B. y PRUNAS, E. (2013): «Removal of Calcareous Concretions from Natural and Manufactured Stone Archaeological Artefacts through the Use of CO₂ Water Solutions». *Procedia Chemistry*, 8, pp. 65–71. doi: 10.1016/j.proche.2013.03.009.
- CRONYN, J. M. y ROBINSON, W. S. (1990): *The elements of archaeological conservation*. Londres: Routledge.
- DOMINGUES, J. A. L. *et al.* (2013): «Innovative Hydrogels Based on Semi-Interpenetrating p(HEMA)/PVP Networks for the Cleaning of Water-Sensitive Cultural Heritage Artifacts», *Langmuir*, 29 (8), pp. 2746–2755. doi: 10.1021/la3048664.
- FERNÁNDEZ, C. y SEVA, R. (2003): «Avance al análisis de un modelo de limpieza a base de álcalis para la cerámica arqueológica». *Sautuola: Sautuola: Revista del Instituto de Prehistoria y Arqueología*, 9, pp. 471–482.
- GUARAGNONE, T. *et al.* (2020): «PVA-based peelable films loaded with tetraethylenepentamine for the removal of corrosion products from bronze». *Applied Materials Today*, 19, p. 100549. doi: 10.1016/j.apmt.2019.100549.
- JOHNSON, J. S., ERICKSON, H. M. y ICELAND, H. (1995): «Identification of Chemical and Physical Change During acid Cleaning of Ceramics». *MRS Proceedings*. Cambridge University Press, 352, p. 831. doi: 10.1557/PROC-352-831.
- LANG, S. (1999): «Not So New Methods of Cleaning - Victoria y Albert Museum», *V&A Conservation Journal*, 32, pp. 15–16. Disponible en: <http://www.vam.ac.uk/content/journals/conservation-journal/issue-32/not-so-new-methods-of-cleaning/> [Consultado el 16 de octubre de 2018].
- MADRID GARCÍA, J. A. y RAMÍREZ ANGULO, A. M. (2011): «Radiografía digital en el estudio de piezas cerámicas. Estudio e interpretación de cerámica medieval procedente del Museo Arqueológico Municipal de Burriana». En Melchor Montserrat, J. M.; Benedito Nuez, J.; y Pasíes Oviedo, T. (eds): *La arqueología de la Buriyyana islámica a la Borriana cristiana*. Museo Arqueológico Municipal-Ajuntament de Burriana, pp. 153–172.
- ORTON, C., TYERS, P. y VINCE, A. G. (1997): *La cerámica en arqueología*. Barcelona: Crítica.
- PEARSON, C. (1987): *Conservation of marine archaeological objects*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- STULIK, D. y DORGE, V. (2004): *Solvent gels for the cleaning of works of art: the residue question*. Los Angeles: Getty Conservation Institute.

- UNRUH, J. (2001): «A Revised Endpoint for Ceramics Desalination at the Archaeological Site of Gordion». *Studies in Conservation*, 46 (2), pp. 81–92. doi: 10.2307/1506839.
- WHITE, C., POOL, M. y CARROLL, N. (2010): «Short Communication: A Revised Method to Calculate Desalination Rates and Improve Data Resolution», *Journal of the American Institute for Conservation*. Routledge, 49 (1), pp. 45–52. doi: 10.1179/019713610804500564.

Enfoque multidisciplinar para la intervención de conservación y restauración de la cripta rupestre de San Biagio (San Vito dei Normanni, Brindisi, Italia): un caso de estudio

Multidisciplinary approach to the intervention of conservation and restoration of the cave crypt of San Biagio (San Vito dei Normanni, Brindisi, Italy): a case study

Maria Rosaria Cipparrone

Arquitecta (Mesagne, Italia)
architettocipparrone@libero.it

Mario Cotrino

Ingeniero (Brindisi, Italia)
ingcotrino@gmail.com

Giovanni Leucci

Geofísico, CNR-ISPC (Lecce, Italia)
giovanni.leucci@cnr.it

Davide Melica*

Geólogo, *Conservation Scientist* (Copertino, Italia)
dmelica@diagnosticarestauro.it

Gianpaolo Vacca

Arquitecto, Robometrics srl (Lecce, Italia)
studiovharchitetto@gmail.com

RESUMEN: La Cripta de San Biagio, propiedad del municipio de San Vito dei Normanni (Brindisi, Italia), forma parte de uno de los principales asentamientos rocosos de la Puglia, que conserva un ciclo pictórico intacto desde principios del siglo XIII. Las pinturas murales que adornan las paredes y la bóveda están inspiradas en modelos bizantinos y representan un palimpsesto pictórico extremadamente interesante.

Sin embargo, las pinturas murales se vieron afectadas por fisuras, desplazados y desprendimientos de los estucos; por pátinas biológicas, eflorescencias salinas y velos carbonáticos que alteraron su legibilidad. Además, las condiciones microclimáticas del vano hipogeo, caracterizadas por frecuentes fenómenos de condensación superficial, eran inadecuadas para la conservación del palimpsesto pictórico.

El trabajo de restauración, iniciado en el 2017, implicó una detallada campaña de diagnóstico preliminar; cuyos objetivos estaban vinculados no solo a los problemas de conservación y el uso futuro del lugar, sino también con un conocimiento más profundo del edificio, los factores de riesgo y sus correlaciones con el cambio climático actual. Específicamente, se realizó un monitoreo microclimático, levantamientos termográficos, geofísicos y 3D por escáner láser, análisis y pruebas en la calcarenita del banco rocoso y en los enlucidos policromos. Se definió así la geometría exacta de la cámara del hipogeo y la orientación espacial de las fracturas en la bóveda; se monitorearon las condiciones microclimáticas para luego poder adaptarlas a través de un sistema de aire acondicionado; se determinaron las propiedades mecánicas de la calcarenita, necesarias para la consolidación estructural de la bóveda y finalmente se caracterizaron los estucos y las capas pictóricas para identificar las técnicas ejecutivas.

Este proyecto, ejemplo de sinergia entre organismos públicos y empresas privadas, se ha caracterizado desde su fase de diseño, por un enfoque interdisciplinario indispensable para la protección de cualquier monumento.

Palabras clave: Estudio multidisciplinar, pintura mural, cripta, San Biagio, diagnóstico.

Abstract: The Crypt of San Biagio, owned by the municipality of San Vito dei Normanni (Brindisi, Italy), is part of one of the main rocky settlements in Puglia, which preserves an intact pictorial series from the beginning of the 13th century. The wall paintings that adorn the walls and the vault are inspired by Byzantine models and represent an extremely interesting pictorial palimpsest.

However, the wall paintings were affected by fissures, displacement and detachment of the plaster; by biological patina, saline efflorescence and carbonaceous veils that altered its legibility. Furthermore, the microclimatic conditions of the hypogeal span, characterized by frequent surface condensation phenomena, were inadequate for the preservation of the pictorial palimpsest.

The restoration work, started in 2017, involved a detailed preliminary diagnostic campaign; whose objectives were linked not only to the conservation issues and the future use of the site, but also to a deeper understanding of the building, the risk factors and their correlations with current climate change. Specifically, microclimatic monitoring, thermographic, geophysical and 3D laser scanning surveys, analysis and tests were carried out on the calcarenite of the rocky bank and on the polychrome plasters. The exact geometry of the hypogeal chamber and the spatial orientation of the fractures in the vault were thus defined. The microclimatic conditions were monitored and then adapted by means an air conditioning system. The mechanical properties of the calcarenite, necessary for the structural consolidation of the vault, were determined; and finally the plasters and pictorial layers were characterized in order to identify techniques used.

This project, an example of synergy between public organizations and private companies, has been characterized from its design phase by an interdisciplinary approach that is essential for the protection of any monument.

Keywords: Multidisciplinary study, mural painting, crypt, San Biagio, diagnosis.

Introducción

La Cripta de San Biagio se encuentra ubicada en el municipio de San Vito dei Normanni (Brindisi, Italia) siendo la Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per le province di Brindisi e Lecce el organismo oficial responsable de la tutela de este monumento.

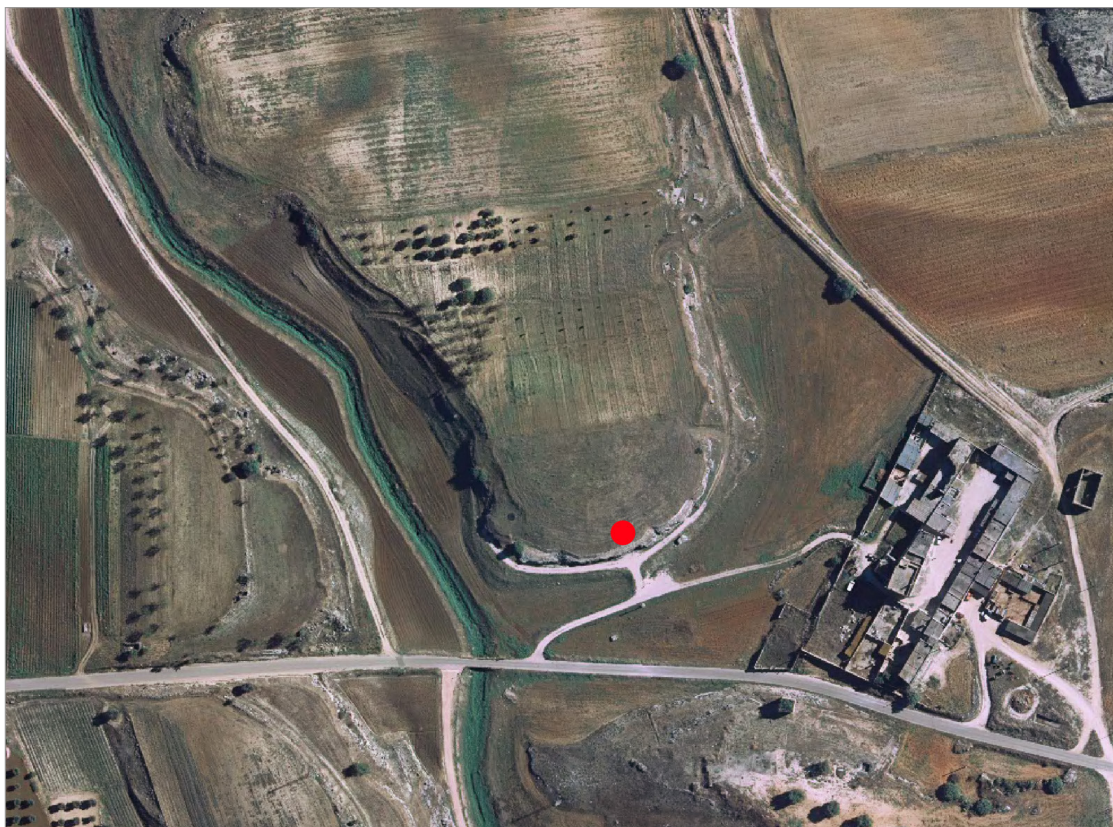


Figura 1. Fotografía aérea del asentamiento rocoso (n. d.). Disponible en: <http://google.com/maps/place> [Consulta: 15 de junio 2018].

El monumento forma parte de un pequeño asentamiento excavado a lo largo de las paredes rocosas del valle creado por el lecho del Canale Reale, uno de los pocos cursos de agua presentes en la zona, siendo además una vía de comunicación secundaria durante la Alta Edad Media (Figura 1). Ya en este periodo se documenta el asentamiento de comunidades religiosas que, junto con habitantes del rural excavaban y ampliaban algunas grutas situadas a lo largo del canal, transformándolas en espacios habitables y lugares de culto (Semeraro, 1982: 70).

Algunos estudios precedentes ponen de manifiesto que entre las razones que llevaron al hombre medieval a ocupar un espacio rupestre para convertirlo en un lugar de culto estaban el ahorro de medios, materiales y de mano de obra, frente a la construcción de paramentos (Mestó, 2003).

Estos mismos autores exponen la importancia otorgada a estos santuarios y a su influencia en el desarrollo de la difusión del cristianismo en el ámbito rural de Italia central y meridional (Piazza, 2006: 13).

El conjunto rupestre está compuesto por distintas grutas excavadas en un banco de piedra caliza que data del período Pleistoceno, dentro de las cuales se instaló en el siglo XII, una comunidad monacal italo-bizantina cuya ocupación se prolongó hasta principios del siglo XV.

La cripta, definida en este caso como el espacio subterráneo destinado al culto, se encuentra situada en el centro de la pared rocosa, flanqueada a un lado por una gran gruta circular cuyo uso fuera probablemente el de refectorio, dormitorio común o espacio de reunión de los monjes (*cenobio*), mientras que por el otro se localiza una pequeña gruta rectangular cuyo uso se atribuye al dormitorio individual, quizás la celda del *Igumeno*.



Figura 2. Pinturas murales de la *naos* antes de la restauración. Fotografía: Davide Melica.

La mayor parte de los estudios realizados se llevaron a cabo en la cripta dedicada a San Biagio, que representa la parte principal del asentamiento. El santuario se estructura a partir de un espacio casi rectangular de doce metros de largo y ancho variable entre los cuatro y los cinco metros, cubierto con un techo plano de dos metros y cuarenta centímetros de altura de media. El hipogeo se subdivide en dos ámbitos: la *naos* donde se celebraba el rito griego y la *bema* reservada al pueblo. La división de los dos ambientes se lleva a cabo a partir de la contraposición decorativa de los muros, siendo la *naos* el espacio que presenta un complejo conjunto pictórico que adorna las paredes y la bóveda (Figura 2), mientras que la *bema* presenta los sobrios muros monocromos uniformemente encalados.

El conjunto de pinturas murales que adornan las paredes y bóveda de la *naos* son atribuibles a los siglos XII o XIII y atestiguan el uso de la cripta para el rito católico, que había reemplazado al primitivo rito greco-ortodoxo. Las escenas están inspiradas en modelos bizantinos y se caracterizan por ser uno de los pocos en los que se conservan representaciones de episodios extraídos de los Evangelios Apócrifos, en iglesias rupestres. La bóveda se divide en cinco secciones la lectura de las cuales se lleva a cabo en sentido antihorario. En ella pueden observarse las escenas del Padre Eterno (Figura 3a), la Anunciación, La Fuga de Egipto, la Presentación en el Templo y la Llegada de Jesús a Jerusalén. Iconográficamente, el ciclo cristológico se completa sobre la pared lateral sur con la representación de la Natividad (Figura 3b) y sigue en el resto de muros laterales con la representación de San Giovanni, Santa Andrea, San Biagio, San Nicola, San Demetrio y San Giorgio, San Silevestro, San Stefano y finalmente entre ellos la figura del comitente cuyo nombre aparece como Matteo. Las figuras de santos y escenas sacras están encerradas en marcos lineales y pintados en rojo, definidas en la base por la roca viva modelada como un escalón. Un asiento corre completamente en el lado sur, ensanchándose en forma semielíptica, formando un nicho en la pared, quizás el asiento del *Igumeno*.

A la altura de la entrada, la bóveda presenta una inscripción en griego en la que deja constancia de la autoría y la cronología, siendo el 8 de octubre de 1196 la probable fecha de consagración



Figura 3. Detalle del Padre Eterno (a) y la Natividad (b) antes de la restauración. Fotografía: Davide Melica.

del templo; y sus autores Daniele (arquitecto y constructor de la iglesia) y Martino (probablemente pintor)¹.

En origen la cripta tenía dos puertas la primera de las cuales servía para acceder a la *naos* y la segunda usada por los feligreses, actualmente cerrada. La presencia de estos dos ingresos y de restos del arranque de un arco en el inicio de la parte policromada, han puesto de manifiesto la posibilidad de que hubiera existido un iconostasio que dividía el espacio de la cripta en dos ambientes físicamente diferenciados. Algunas fuentes apuntan a que dicho iconostasio debió ser eliminado hacia el '700, momento en que se trasladó el altar al fondo del muro este.

La fase proyectual de la reciente restauración ha previsto la recopilación de datos relacionados con intervenciones anteriores. Se constató así una primera intervención de saneamiento y restauración entre los años 1997-2001. Sucesivamente en el año 2007 se llevó a cabo una primera evaluación del estado de conservación que puso de manifiesto el avanzado estado de deterioro del conjunto pictórico.



Figura 4. Detalle de la condensación superficial. Fotografía: Maria Rosaria Cipparrone.

¹ Traducción citada por Lavermicocca N., 2001: *I sentieri delle grotte dipinte*, Editori Laterza, Roma-Bari.

En él se apreciaban deterioros en forma de lagunas, grietas, descohesión y desprendimiento de los estratos pictóricos; así como pátinas biológicas, eflorescencias salinas y velos carbonatados que alteraban su legibilidad.

Esta fase de estudio preliminar también puso en evidencia que las condiciones microclimáticas se caracterizaban por fenómenos de condensación superficial (Figura 4), inadecuadas para la conservación del monumento.

En consecuencia, se inició una campaña de diagnóstico basada en estudios científicos fundamentales para la obtención de un conocimiento más profundo del conjunto, los factores de riesgo y la correspondencia con el cambio climático actual, en relación con las problemáticas de conservación y el uso futuro del lugar.

El estudio diagnóstico se realizó en dos fases: la primera fase consistió en la documentación e investigación no invasiva (levantamiento de escáner láser 3D, georradar, termografía infrarroja, monitoreo microclimático) y la segunda fase consistió en diferentes análisis y ensayos de laboratorio sobre muestras.

Estudios multidisciplinarios

Investigaciones *in situ*

Los estudios no invasivos han tenido por objeto la obtención de la representación geométrica precisa del espacio y sus superficies, el monitoreo de los parámetros climáticos internos y externos, evaluar el espesor del banco rocoso que constituye el techo de la cripta así como determinar la orientación de las fracturas transversales y finalmente la distribución de las infiltraciones de agua. Para ello se llevó a cabo la representación tridimensional y el estudio geofísico, termográfico y microclimático de la cripta.

La representación tridimensional (Figura 5) ha sido elaborada mediante escáner láser 3D utilizando el instrumento modelo FARO FOCUS 120 3D. Esta técnica permite la obtención de una nube de puntos totalmente medible. El procesado de los datos admite la extracción de dibujos CAD de



Figura 5. Restitución 3D de la cripta. Fotografía: Gianpaolo Vacca.



Figura 6. Investigación georradar. Fotografía: Davide Melica.

extrema precisión (ortofotografías, secciones especulares, planos y secciones) esenciales para la documentación y referenciación en las fases de análisis y diseño del proyecto.

El estudio geofísico ha sido realizado mediante georradar (GPR) modelo Hi Mod de IDS, dotado con antenas de 200 y 600 MHz (Figura 6) con el objetivo de obtener información sobre la estructura física del banco rocoso que configura el techo de la cripta. Una antena de transmisión desplazada sobre el terreno genera impulsos electromagnéticos a elevada frecuencia que se transmiten al subsuelo; la señal que se propaga en el medio sufre reflejos cuando encuentra una discontinuidad de los parámetros electromagnéticos. La onda reflejada que regresa a la superficie es registrada por una antena receptora y se transmite a la unidad de control que la amplifica y la graba en formato digital (Leucci, 2015: 368). Esta técnica ha permitido determinar con precisión el espesor de la cubierta del espacio subterráneo, que varía entre 1 m y 1,2 m, y que se encuentra bajo una solera de hormigón superpuesta, igual a 0,1-0,2 m. Dentro del cuerpo rocoso se ha identificado un nivel superficial degradado, de 0,3-0,4 m de espesor. La parte interna aparecía homogénea, desprovista de huecos significativos, pero afectada por cuatro fisuras pasantes. También han sido observadas pequeñas fisuras subverticales o subhorizontales, más frecuentes en el lado norte, cerca del muro vertical. A partir de una evaluación del número de fisuras por metro lineal, han sido estimados los valores medios de densidad y resistencia mecánica a la compresión de la roca (De Giorgi, 2006), que varían respectivamente entre 1800-2050 Kg/m³ y 42-74 Kg/cm².

El análisis termográfico (IRT) ha sido llevado a cabo en verano mediante una termocámara Fluke Ti400 en modalidad pasiva, sin recurrir a una irradiación térmica previa de las superficies (UNI 9252, UNI 10824-1); han tenido como objetivo verificar contenidos de humedad anormales debidos al remonte capilar, la condensación o la infiltración de agua en las paredes de la cripta, del *cenobio* y de la celda del *Igumen*. Los resultados han puesto de manifiesto la presencia de humedad en el área basal de los extremos oeste y sur de la cripta donde, en correspondencia con la roca aflorante, se registraban los valores más bajos de temperatura.

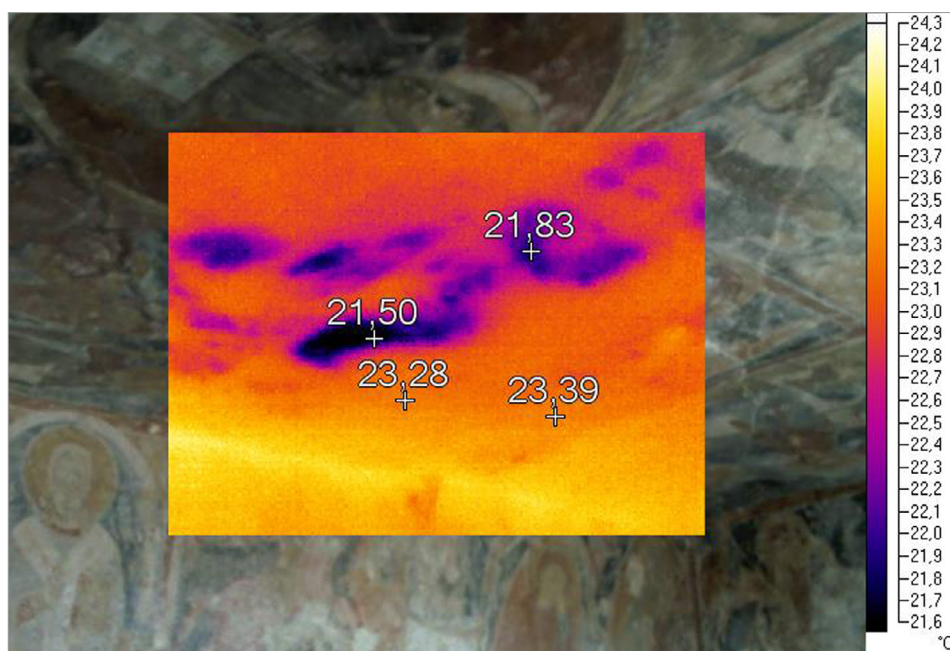


Figura 7. Fotografía con panel termográfico. Fotografía: Davide Melica.

A diferencia del soporte pétreo, las pinturas murales devolvían valores de temperatura superficial más alta y uniforme, no obstante algunas pequeñas variaciones fueron relacionadas con la presencia de un consolidante a base de silicatos que disminuyendo la porosidad de la superficie, también reducía su capacidad para absorber y liberar humedad. La presencia de este consolidante, probablemente aplicado durante la intervención del 2001, también ha sido confirmada por los análisis de laboratorio.

Algunas anomalías térmicas en la bóveda (Figura 7) con valores bajos de temperatura fueron interpretadas como zonas desprovistas de dicho tratamiento siendo, por tanto, más absorbentes a la humedad ambiental o a la derivada de infiltraciones de la cubierta. En otras áreas, las anomalías térmicas se localizaron en cambio, en correspondencia con las lagunas de las policromías, donde emergía el soporte pétreo.

Los resultados recabados en la celda del *Igumeno*, permitieron establecer que las humedades correspondían a las de remonte capilar en correspondencia con la esquina izquierda de la pared del fondo; mientras que en el *Cenobio* no se detectaron anomalías térmicas significativas.

El estudio microclimático se llevó a cabo en el interior y en el exterior de la cripta con la duración de un ciclo anual, con el fin de valorar la idoneidad de los parámetros ambientales de cara a la conservación de las policromías y a su posible apertura al público. Los instrumentales utilizados para el monitoreo ambiental interno y externo se han compuesto por un multiadquiridor *datalogger* Delta Ohm DO9847 y *dataloggers* Delta Ohm mod. HD 226-1 programados para la medida con intervalo de 15 minutos. El sensor usado para la toma de datos de temperatura y humedad relativa del aire interno del vano, ha sido una sonda combinada mod. HP 472 AC. El sensor para la medida de la temperatura superficial ha sido una sonda termométrica a contacto mod. TP 878 PT100 1/2 DIN y finalmente los parámetros climáticos externos han sido recogidos mediante un *datalogger* Delta Ohm mod. HD 226-1.

Todo ello ha permitido registrar los valores de la Temperatura y Humedad Relativa del aire y la Temperatura superficial (Figura 8a), con el objeto de verificar la frecuencia de los fenómenos de condensación. También se midió la velocidad del aire para determinar la presencia de corrientes

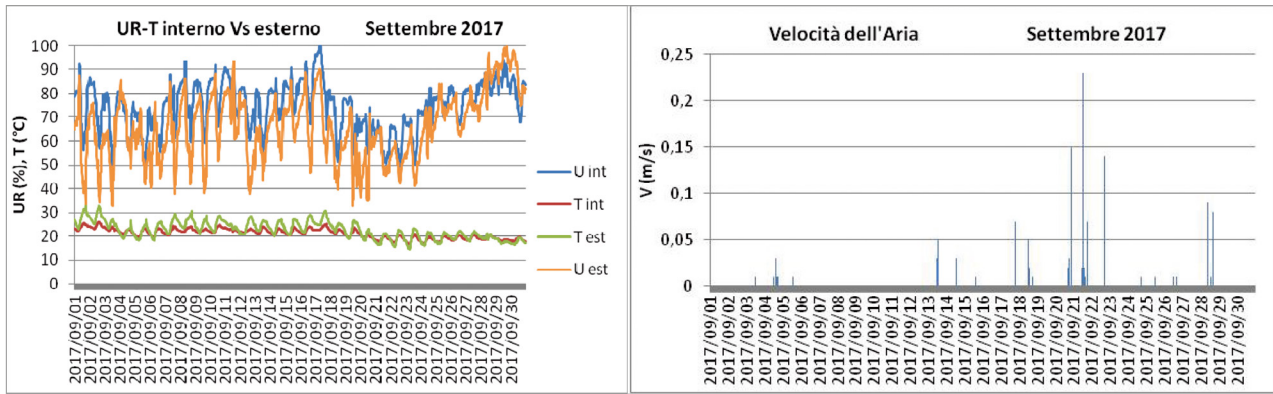


Figura 8. Gráfico de parámetros microclimáticos (a) y de velocidad del aire (b). Fotografía: Davide Melica.

(Figura 8b). Como resultado, también ha sido determinado que los parámetros exteriores afectaban a las variaciones diarias y mensuales del interior del compartimento.

Los valores óptimos aconsejados por la norma UNI 10829 y de la DM 10/05/01 para la conservación de pintura mural son de intervalos de Temperatura entre 10 y 24°C, valores dentro de los que normalmente se encuentra el conjunto a excepción de los meses de agosto (26°C), enero y febrero (9°C). En cuanto a la humedad relativa, la misma norma expone un intervalo óptimo entre 55 y 65%, mientras que los datos obtenidos indican que la cripta se ha mantenido la mayor parte del año muy por encima del 65%, llegando a menudo al 95%.

Las bajas temperaturas de las superficies policromas asociadas a los altos valores de humedad ocasionaron, una vez alcanzado el Punto de Rocío (Dp), fenómenos conspicuos de condensación. La reapertura de los pequeños vanos preexistentes sobre las paredes, no resultó suficiente para evitar estos fenómenos de condensación, aunque si se aumentó la ventilación natural favoreciendo una ligera mejoría. Donde, por el contrario, la superficie era porosa y absorbente, la tensión superficial favorecía la formación de condensación en los microporos, incluso a temperaturas superiores al Dp; en estos casos se formaban manchas que correspondían a un aumento de la saturación del color de la superficie.

Análisis microinvasivos de laboratorio

Algunas pruebas han sido llevadas a cabo con el fin de determinar la resistencia mecánica (resistencia a la compresión y resistencia a la tracción) de la calcarenita constituyente del banco rocoso. La ejecución de estos estudios era indispensable para afrontar la consolidación estructural de la cubierta.

Para ello, seis testigos cilíndricos han sido extraídos mediante taladro eléctrico de 110 mm de diámetro, desde zonas periféricas (Figura 9). Los resultados obtenidos en relación con la resistencia a la compresión eran de 3,5 N/mm² de media, compatible con los valores medios reportados en la literatura para los litotipos de calcarenita locales (Elter; Marroni; Pandolfi, 1969:201 y Cherubini; Reina; Bruno, 2007: 37-47) y los de resistencia a tracción indirecta eran de 0.37 N/mm² de media.

La identificación de la técnica pictórica así como de los productos de alteración, se realizó a partir de un diagnóstico poli metodológico sobre pequeños fragmentos de preparación y de película pictórica extraídos de las pinturas murales.

Este estudio ha tenido por objeto la definición de las características composicionales, texturales y microestructurales de los enlucidos que componen el aparato decorativo, evaluando también la composición de las películas pictóricas, su secuencia estratigráfica y técnica ejecutiva; además han



Figura 9. Perforación del banco rocoso. Fotografía: Davide Melica.

sido identificados los materiales superpuestos así como los productos de alteración. Para ello, han sido tomadas 10 muestras, que fueron analizadas mediante las siguientes técnicas instrumentales:

- microscopía óptica estereoscópica mediante un estereomicroscopio binocular *Zetaline* de aumento máximo en 60X; con el fin de verificar la representatividad y describir la morfología superficial de las muestras;
- microscopía óptica con luz transmitida polarizada en una lámina delgada, mediante el uso del equipo *Olympus BX51*; destinado a definir las características composicionales, texturales y microestructurales de las preparaciones;
- microscopía óptica con luz reflejada en sección estratigráfica destinada a identificar las capas pictóricas, medir su espesor y verificar su secuencia (Normal 14/83); mediante un microscopio *Olympus BX51*;
- microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) y microanálisis químico mediante microscopio marca *Philips XL30*, modo de bajo vacío (70 Pa), acoplado a un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X (EDS), tensión 30KV, corriente de filamento W 100 μ A, cuyo objetivo era verificar la composición elemental de las películas pictóricas, capas de neoformación y posibles consolidantes;
- espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR): esta técnica analítica permitió identificar compuestos orgánicos naturales o sintéticos y compuestos inorgánicos referibles a los materiales constituyentes o de degradación. Los espectros se adquirieron con un instrumento Perkin Elmer *Spectrum Two*, equipado con un cristal de diamante y un accesorio UATR (*Universal Attenuated Total Reflection*), en el rango 4000-400 cm^{-1} ;

- cromatografía iónica (CI), por un equipo marca *Dionex ICS-3000*, dirigida a la dosificación y análisis de especies salinas hidrosolubles —aniones y cationes – UNI 11087;
- difracción de Rayos X (XRD), empleando un difractómetro marca *Philips PW1840*, con anticatodo de cobre (radiación $\text{CuK}\alpha$); los análisis se realizaron en el rango $5^\circ < 2\theta < 70^\circ$, en condiciones de voltaje y corriente de 40 kV y 20 mA. Los fenómenos de difracción de rayos X inducidos por la retícula cristalina de las especies mineralógicas presentes en la muestra, permiten su identificación de forma cualitativa y semicuantitativa.

Los resultados han permitido poner en evidencia la existencia de tres fases decorativas superpuestas con rasgos característicos bien definidos que presentan similitudes.

El estudio petrográfico de las preparaciones pertenecientes a los tres ciclos pictóricos y la comparación de sus características microscópicas, han permitido establecer que han sido realizados con cal aérea ligeramente magnésica, probablemente también de leve carácter hidráulico; también se utilizaron dos tipos diferentes de áridos, ambos disponible localmente, una arena caliza y una sílicea.

Los resultados han permitido hipotizar que el ciclo pictórico más reciente, así como el intermedio, fueron originarios de un arco temporal reducido; además puso de manifiesto que los agregados utilizados en ambos casos para la preparación eran los mismos, siendo estos de tipo terroso rico en cuarzo y feldespato (Figura 10a).

La presencia de algunos fragmentos pictóricos dispersos dentro de la preparación del ciclo intermedio atestigua que en el momento de la ejecución de la decoración mural preexistente ya estaba afectada por pequeños levantamientos y desprendimientos.

El enlucido de la fase más antigua, en cambio, contiene arena obtenida de la desintegración de calcarenita local; a diferencia de los otros había poco agregado y una densa red de microfisuras de contracción (Figura 10b).

Como resultado del proceso de toma de muestra, se obtuvo representatividad de las zonas pictóricas rojas, negras y amarillo (Figura 11a y b). Las capas pictóricas pertenecientes a las tres fases decorativas de la cripta se aplicaron directamente sobre el enlucido de preparación.

Los pigmentos utilizados son típicos de la pintura mural tradicional y están representados por tierras naturales (ocre rojo, ocre amarillo) y negro vegetal (negro vid). El negro de vid es un pigmento obtenido de la carbonización de los sarmientos de vid con la capacidad para impartir un tono azulado a las superficies pictóricas (Bevilacqua, 2010).

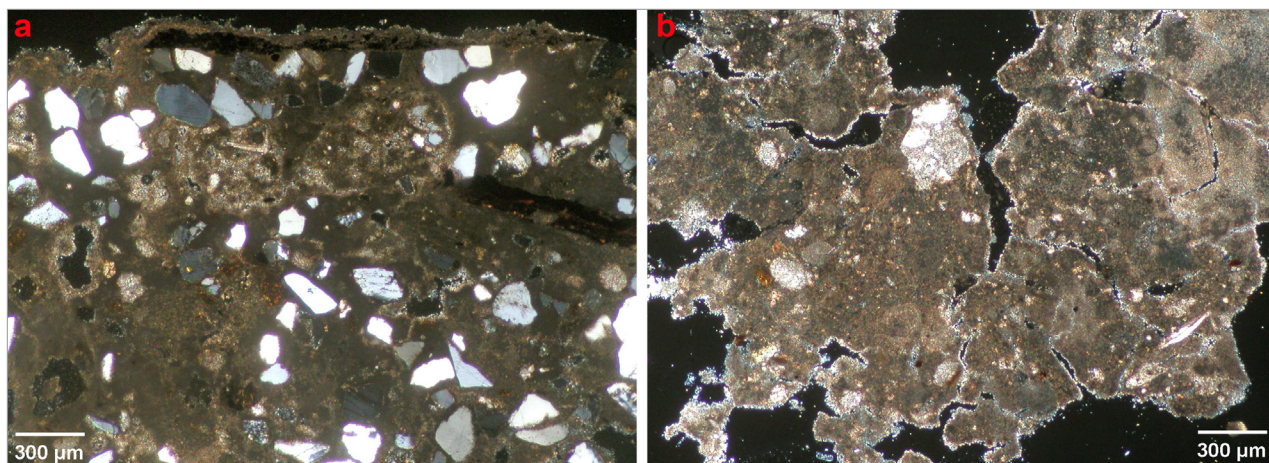


Figura 10. Microfotografías de la sección delgada del enlucido con arena sílicea (a) y con arena calcárea (b). Fotografía: Davide Melica

La reducida paleta cromática usada en las policromías, es habitual en otros ejemplos de la Alta y Baja Edad Media en Italia meridional².

El aglutinante utilizado para realizar las películas pictóricas es a base de cal hidratada, por lo que la técnica de ejecución parece ser la de la pintura a la cal, también conocida como *mezzo fresco*. Esta técnica requiere que los pigmentos se diluyan en agua de cal y se apliquen sobre el enlucido cuando este alcanza un estado avanzado de secado y carbonatación superficial; la preparación también podía ser humectada al aplicar el color para favorecer su adherencia. La caracterización del aglutinante fue complementado a la observación de microfisuras de contracción en el enlucido de soporte y en el aspecto microscópico de la interfaz entre este y las capas pictóricas que ha sido siempre clara, desprovista de la típica interpenetración de la técnica del fresco. De hecho, al incorporar el color, la capa de carbonatación que se obtiene se diferencia del enlucido subyacente.

En comparación con la técnica al fresco, el *mezzo fresco* permite trabajar en áreas más grandes ahorrando material, manteniendo la misma belleza característica pero con un brillo de color más tenue. Esta técnica ha sido también identificada en muchos de los ejemplos anteriormente citados (Quarta y Melica, 2013; Quarta *et al.*, 2016).

Los productos de degradación presentes en las superficies pictóricas estaban representados principalmente por yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y calcita de reprecipitación. El yeso está contenido dentro del banco rocoso y, aunque no es muy soluble en agua (0,23 mg/100 ml a 20°C), puede ser movilizado por infiltraciones meteóricas. Su presencia también podía estar relacionada con el uso de fertilizantes en prácticas agrícolas que en el pasado afectaron la parcela de tierra sobre el espacio hipogeo. La concentración de estos elementos por encima y por debajo de la película pictórica puede, en cambio, estar estrictamente relacionada con los fenómenos de condensación superficial. El agua de condensación, al no ser normalmente suficiente para fluir en la superficie, puede evaporarse dependiendo de las condiciones microclimáticas del compartimiento subterráneo, depositando

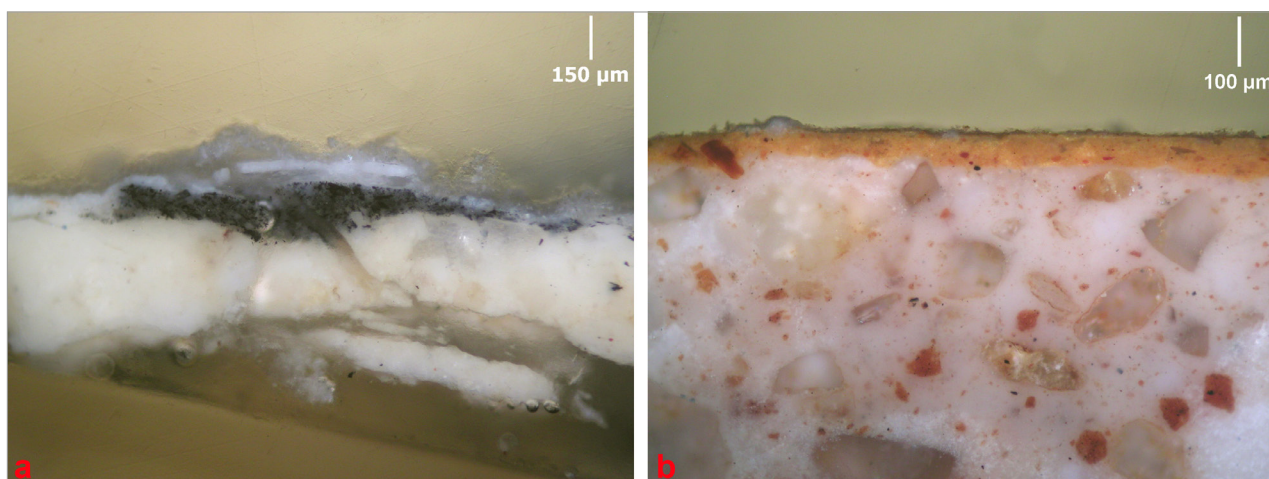


Figura 11. Microfotografías de las secciones estratigráficas de un estrato pictórico negro (a) y amarillo (b). Fotografía: Davide Melica.

² Algunos ejemplos son: las iglesias hipogeas de *Lama d'Antico* (Cavallo; Van Der Werf, 2001), *Santa Vigilia* (Calia, 2007) y el Templete de *Seppannibale* en Fasano; la Cripta del *Crocifisso* en Ugento, la Abadía de San Mauro en Sannicola (Quarta; Giannotta; Melica; 2007 y Quarta; Melica, 2012), la Iglesia de *Santa Maria della Croce* en Casarano (Quarta; Giannotta; Melica, 2007) y la Cripta de la *Madonna delle Croci* en Matera (Calia; Matera; Sileo, 2010). Esta estrecha gama de pigmentos se amplía con azules de diversa índole y con minio en las pinturas murales del santuario rupestre de *San Marzano*, en la iglesia hipogea de *San Giovanni* en Fasano, en la pequeña iglesia de *Santo Stefano*, en Soletto (Quarta; Melica; Masieri, 2015), en la Cripta del *Peccato Originale* en Matera, en el Hipogeo de *San Matteo all'Arena* en Monopoli (Capitanio *et al.*, 2005) y finalmente en la Abadía de *Santa Maria di Cerrate* cerca de Squinzano (Quarta; Giannotta; Melica, 2007).

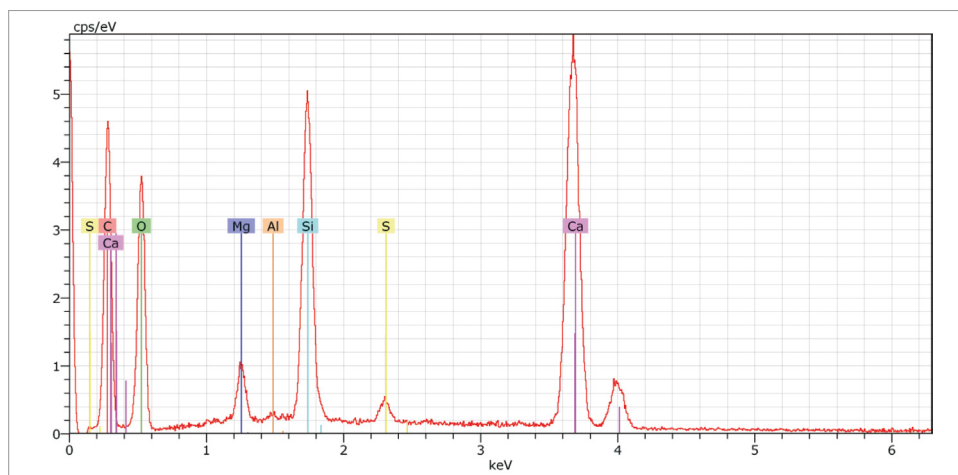


Figura 12. Espectro EDS de un estrato pictórico negro rico en silicio. Fotografía: Davide Melica.

los compuestos en solución. Este proceso se identificó como el causante de descamación y desintegración de los materiales en los que posteriormente cristalizan. Tales procesos degenerativos pueden haber sido amplificados por el tratamiento de consolidación a base de silicio aplicado en el pasado sobre la superficie pictórica e identificado con los análisis SEM-EDS (Figura 12).

Actuaciones

Además de la necesidad de restaurar las pinturas murales, la evaluación de todos los datos adquiridos llevó a la decisión de realizar una consolidación estructural de la cubierta plana de la cripta y una climatización controlada.

La consolidación estructural tuvo lugar a partir de la superficie del extradós, sin afectar en absoluto a las pinturas del interior, mediante la siguiente metodología:

- inyecciones de baja presión de una lechada a base de cal hidráulica para consolidar la capa superficial de roca parcialmente disgregada;
- inserción en la roca de barras de fibra de carbono con un mortero puzolánico específico de alta resistencia;
- una capa de mortero estructural, consolidante y premezclado, a base de aglomerante puzolánico y fibras de alcohol polivinílico;
- una malla cuadrada de fibra de carbono empotrada en una capa de mortero puzolánico estabilizado;
- conexiones transversales, en fibras de carbono y mortero puzolánico, entre la roca y los sistemas de consolidación antes mencionados.

Los resultados de los estudios microclimáticos, así como la identificación de los factores de alteración del conjunto pictórico, puso de manifiesto la necesidad de llevar a cabo una estrategia de conservación a largo plazo mediante la instalación de un sistema de climatización que, adaptando paulatinamente los parámetros internos del hipogeo, garantizara una adaptación gradual a las condiciones óptimas de conservación preventiva.

El nuevo aparato de climatización está posicionado en un compartimento subterráneo perfectamente integrado en el paisaje y equipado con un sistema de diagnóstico y control a distancia (Figura 13).



Figura 13. Dispositivo de climatización en compartimento subterráneo. Fotografía: Mario Cotrino.

Los sensores climáticos situados en la cripta permiten ajustar los valores de temperatura y humedad según programas predefinidos o en función de necesidades particulares (de temporada o que se consideren más adecuadas en función del estado de las pinturas o de las visitas programadas).

El dimensionamiento térmico de la maquinaria se relacionó, además de las características de transmitancia térmica de los muros de roca, con la necesidad de corrección termo/higrométrica y finalmente con las cargas térmicas derivadas del sistema de iluminación. Los datos recogidos se procesan de forma automática, con el fin de emitir señales de alarma vía SMS a los encargados de mantenimiento cuando se superan los umbrales preestablecidos.

Conclusiones

El conjunto pictórico de la Cripta de San Biagio, es un ejemplo excepcional de pintura medieval rupestre de la Italia meridional, cuya cronología y autoría viene constatada en la propia obra, dataada de 1196.

En referencia al estado de conservación del conjunto los estudios geofísicos han demostrado que la cubierta de la cripta tiene aproximadamente 1 m de espesor y se encontraba afectada por cuatro fisuras pasantes.

Los parámetros de temperatura y humedad relativa resultaban inadecuados para la conservación del conjunto, motivo por el cual ha sido instalado un equipo de climatización.

En lo que se refiere a la decoración pictórica se ha demostrado la existencia de tres fases superpuestas con rasgos característicos definidos que presentan similitudes por cuanto se usaron los mismos materiales con pequeñas variaciones en su preparación/aplicación. En todos los casos se trata de una pintura a la cal, conocida también como *mezzo fresco*. La paleta cromática es reducida y coincide con la utilizada por ejemplos de igual tipología y época de la misma zona, siendo los pigmentos de uso tradicional tales como las tierras naturales y el negro vegetal.



Figura. 14. Pinturas murales de la *naos* después de la restauración. Fotografía: Giuseppe Tritto.

Uno de los principales factores de alteración era la presencia de yeso que bajo la superficie pictórica formaba subflorescencias blanquecinas mientras que por encima originaba velos, incrustaciones y concreciones. La calcita secundaria también formaba velos que alteraban la legibilidad de las representaciones. Además ha puesto en evidencia un tratamiento consolidante previo a base de silicato. El estudio de diagnóstico ha sido fundamental para la optimización de la intervención que ha devuelto al público la cripta y sus pinturas (Figura 14). Este proyecto de conservación y restauración es un ejemplo de sinergia entre profesionales de organismos públicos y privados, caracterizado desde su fase de diseño por un enfoque interdisciplinario indispensable para la protección del monumento.

Bibliografía

- BEVLACQUA N.; BORGIOLO L.; y ADROVER GRACIA, I. (2010): *I pigmenti nell'arte. Dalla preistoria alla rivoluzione industriale*. Collana I Talenti, Il Prato ED., Saonara, PD.
- CALIA, A. (2007): «Le pitture murali della Cripta di Santa Vigilia (Fasano): materiali costituenti e stato di conservazione». En: *Puglia tra grotte e borghi. Atti del II Convegno Nazionale sulla Civiltà Rupestre*. 24-26 de noviembre de 2005. Spoleto: Fondazione Centro Italiano di Studi sull'Alto Medioevo, pp. 339-359;
- CALIA, A., MATERA, L., SILEO, M. (2010): «Le finiture pittoriche della chiesa di Madonna delle Croci (Matera)». En: *Il Dialogo dei Saperi. Metodologie integrate per i Beni Culturali*, Tomo 2, pp. 717-728.
- CALIA, A., MELICA, D., QUARTA, G. (2011): «I dipinti murali del Tempietto: materiali costituenti e tecniche esecutive». En: Bertelli G., Lepore G. (eds.): *Masseria Seppannibale Grande in Agro di Fasano* (BR). Mario Adda Editore.

- CAPITANIO, D., LAVIANO, R., MENGA, A. *et al.* (2005): «Intonaci e pitture murali di San Mateo all'Arena, Monopoli (BA)». En: *Atti del Convegno di Studi sulle Pitture Murali*, 12-15 de julio de 2005. Bressanone: Ed. Arcadia Ricerche, pp. 1137-1146,
- CAVALLO, G., VAN DER WERF, I. D. (2001): «Indagine diagnostica minero-petrografica e chimica del corredo pittorico». En: *Dalla "defensa" di San Giorgio alla "lama" della Madonna delle Grazie. Il santuario rupestre di San Marzano (TA), a cura di C.D. Fonseca*, Galatina, pp. 105-114;
- CHERUBINI C., REINA A., BRUNO D. (2007): «Le rocce tenere del Salento: proposta di classificazione con l'uso delle caratteristiche tecniche e meccaniche». *Geologi e Territorio*, (2), pp. 37-47.
- CHIONNA, A. (2000): «La lunga storia della cripta di San Biagio». *Alétes*, 7-8 (1), pp. 149-164.
- MENESTÒ, E. *et al.* (2003): «Quando abitavamo in grotta». *Atti del 1° Convegno internazionale sulla civiltà rupestre*, 27-29 de noviembre de 2003. Spoleto, (2004); in riferimento agli insediamenti dell'alto Lazio, cfr. i saggi a cura di E. De Micicis, *Insediamenti rupestri medievali della Tuscia (I, Le abitazioni)*, Roma.
- ELTER, P., MARRONI, M., PANDOLFI, L. (1969): *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.00. Fogli 203, 213, 214 Brindisi-Lecce-Maruggio*. Servizio Geologico d'Italia. Poligrafica e Cartevalori, Ercolano (NA).
- GIOVAGNOLI, A., ARTIOLI, D., PARADISI, A., POLIDORO C. (2005): «Crypt of the Original Sin (Matera): analytical tests to support the restoration activities». En: *Proceedings of 8th International Conference on Non Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage*. Roma, pp. 1-14.
- LAVERMICOCCA, N. (2001): *I sentieri delle grotte dipinte*,. Roma-Bari: Editori Laterza.
- LEUCCI, G. (2015): *Geofisica Applicata all'Archeologia e ai Beni Monumentali*. Dario Flaccovio Editore Palermo, pp. 368.
- PIAZZA, S. (2006): «La cavità rupestre come luogo di culto: immaginario e realtà». En: *Pittura rupestre medievale. Lazio e Campania settentrionale (secoli VI-XIII)*. Disponible en: <http://books.openedition.org/efr/1656> [Consultado el 04 de noviembre 2021].
- QUARTA, G., GIANNOTTA, M. T., MELICA, D. (2007): *The Abbey of Santa Maria di Cerrate (Lecce). Analytical methodologies for the knowledge and highlighting of Byzantine Heritage: study of constituent materials of the wall paintings and of the portal*. Rapporto tecnico IBAM-CNR.
- QUARTA G., GIANNOTTA M. T., MELICA D. (2007): *The San Mauro church in Sannicola (LE). Analytical methodologies for the knowledge and highlighting of Byzantine Heritage: study of constituent materials of painted plasters*. Rapporto tecnico IBAM-CNR.
- QUARTA, G., GIANNOTTA, M. T., MELICA, D. (2007): *La Chiesa di Santa Maria della Croce di Casaranello in Casarano (LE). Analytical methodologies for the knowledge and highlighting of Byzantine Heritage: study of constituent materials of the wall paintings*. Rapporto tecnico IBAM-CNR.
- QUARTA, G., MELICA, D. (2012): «I dipinti murali: la diagnostica per la conoscenza e la conservazione». En: S. Ortese (a cura di) «*Sannicola, Abbazia di San Mauro: gli affreschi sulla Serra dell'Altolido presso Gallipoli*». Collana «De là da mar». Lupo Editore.
- QUARTA, G., MELICA, D., MASIERI, M. (2015): «I dipinti murali. Indagini mediante fluorescenza di Raggi X (XRF) per la caratterizzazione dei pigmenti». En: *La Chiesa di Santo Stefano a Soletto: indagini e approfondimenti*. Progetto In.Cul.Tu.Re. / MIUR, Editrice Salentina, Galatina (LE).
- QUARTA, G., MELICA, D. (2013): «La conservazione dei dipinti murali delle cripte del Salento: una review su alcuni interventi di restauro eseguiti negli ultimi 15 anni». En: *Scienza e Beni Culturali, Atti del XXIX Convegno Internazionale "Conservazione e valorizzazione dei siti archeologici: approcci scientifici e problemi di metodo"*, Bressanone, 9-12 julio de 2013.

- QUARTA, G., CALIA, A., GIANNOTTA, M. T. *et al.* (2016): «Tecniche microscopiche ed approccio multianalitico per lo studio della pittura parietale in Puglia». En: *Atti del XVI Convegno Nazionale della Divisione di Chimica dell'Ambiente e dei Beni Culturali*, Lecce, 26-29 junio de 2016.
- SEMERANO, M. L. (1982): *Il Santuario rupestre di San Biagio a San Vito dei Normanni*. Fasano: Graphischena editore.

Riesgos microbiológicos tras verter geles rígidos sobre materiales pétreos

Microbiological risks after pouring rigid gels on stone materials

Alicia de Lera Santín*

Doctora e investigadora en Conservación de bienes culturales
alilera10@gmail.com

Véronique Vergès-Belmin

LRMH, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques
veronique.verges-belmin@culture.gouv.fr

Faisl Boust

LRMH, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques
faisl.bousta@culture.gouv.fr

Resumen: Este artículo recoge el estudio del riesgo microbiológico realizado tras la utilización del gel de agar-agar vertido en caliente sobre superficies de materiales porosos inorgánicos de escayola, piedra *Migné* y ladrillo.

Para ello, se realizó un test microbiológico y se utilizó un microscopio óptico binocular y luz ultravioleta. Los resultados fueron comparados con los de otros hidrocoloides empleados en restauración de obras de arte, como son el klucel, HEC, Carbogel, Goma Xantana y Goma Gellan. De esta manera, se evaluó el riesgo biológico real de los posibles residuos que permanecen sobre las superficies de las probetas. Los resultados demostraron que, a pesar de no observar residuo alguno sobre las probetas, tras el test microbiológico todas las zonas tratadas con geles fueron en menor o mayor medida, contaminadas por hongos. La goma Xantana y Gellan, fueron las que mostraron mayor contaminación fúngica y los derivados celulósicos, los que menos.

Palabras clave: Hidrocoloides; agar; limpiezas; materiales pétreos; microorganismos.

Abstract: In this article, the microbiological risk has been studied after the use of hot-poured agar-agar gel on surfaces on inorganic porous materials of plaster, Migné stone and brick. For this, the techniques used in this research are a microbiological test, a binocular microscopy and an ultraviolet light. The results were compared with those of other hydrocolloids used in the restoration of works of art, such as klucel, HEC, Carbogel, Xanthan Gum and Gellan Gum. In this way, the real biological risk of the possible residues that remain on the surfaces of the specimens was evaluated. The results show that after the microbiological test, all the treated areas were contaminated by fungi. Xanthan and Gellan gum were those with the highest fungal contamination and cellulosic derivatives the least.

Keywords: Hydrocolloids; agar; cleanings; stone materials; microorganisms.

Introducción

Un gel es un sistema coloidal, una estructura tridimensional que contiene líquido. La fase continua del gel es sólida y la fase dispersa es líquida, ya que su estructura está basada en fuerzas físicas y uniones químicas. En restauración de obras de arte como esculturas, óleos o pinturas murales, los geles se utilizan habitualmente porque poseen propiedades que los hacen útiles para las limpiezas u otros tratamientos. Los más utilizados son el carbopol, el culminal, los éteres de celulosa y los geles denominados rígidos (Matteini y Moles, 2001: 243). Las ventajas que poseen los geles son múltiples: posibilitan prolongar el tiempo de acción de un tratamiento, mejorando el contacto con la superficie de la obra y reduciendo el aporte de agua o de disolvente a la obra (Valentín, Cortés y Sánchez, 1994: 5-15). Su uso permite acotar o localizar la difusión de los disolventes en las zonas que se desea y al ser transparentes, se puede observar qué sucede a través de ellos. Suelen ser bastante económicos y fáciles de encontrar y su durabilidad es buena ya que se pueden utilizar durante días. No obstante, los geles tienen un inconveniente. Al no ser volátiles, una vez deshidratados pueden permanecer sobre la obra en forma de residuos, siendo necesario realizar un post-tratamiento como un aclarado acuoso o un lavado con disolventes adecuados. Por lo tanto, pueden ser incompatibles con algunas obras de arte sensibles al agua. Además, si se usan disolventes, la polaridad de éstos tiene que estar calibrada con exactitud para disolver los residuos sólidos sin tener un efecto disolvente sobre el material tratado. Por este motivo, siempre se deberá evaluar las ventajas e inconvenientes de su aplicación sobre una superficie. No obstante, como se ha mencionado con anterioridad, existen varios tipos de geles, con diferentes características que permiten escoger el más adecuado en función del trabajo que se debe realizar y en función del soporte. Por ejemplo, los geles rígidos son capaces de formar capas uniformes no adherentes y aparentemente, no dejan residuos sobre elementos de escayola, frescos o piedra.

Los geles denominados rígidos poseen una consistencia suficiente para permitir su manipulación y corte, ya que son capaces de gelificar formando estructuras más o menos sólidas y retener disoluciones, evitando su difusión rápida sobre la superficie de la obra de arte. Su estructura rígida es debida a sus largas cadenas poliméricas de naturaleza hidrofílica.

Los geles rígidos polisacáridos fueron introducidos en la conservación de obras de arte a principios del siglo XXI, sobre todo para limpiezas de papel, pero también para otro tipo de materiales orgánicos e inorgánicos como yeso, frescos y superficies policromas en general.

En conservación y restauración de obras de arte, se utilizan normalmente el agar y la goma gellan. No son solubles en agua a temperatura ambiente pero sí forman geles físicos o rígidos, calentándolos al baño maría o en un microondas hasta los 85 - 100 °C y dejándolos posteriormente enfriar. Son reversibles si se vuelven a calentar. Se preparan en general con agua, sin embargo, se pueden añadir pequeñas cantidades de otros productos químicos e incluso disolventes (De Lera *et al.*, 2009: 177-188). Normalmente, se utilizan en bloques rígidos paralelepípedos de espesor variable y tienen como ventaja que prácticamente no dejan residuos y si se desea evitar cualquier riesgo siempre se podrá separar el gel del soporte mediante una interfaz (Reemay, Hollytex...). No obstante, al ser rígidos no se adaptan bien a los volúmenes y formas de las obras y por este motivo, investigadores italianos aplicaron geles de agar a una temperatura caliente (+/- 45°C), cuando el gel aún estaba en estado líquido, dejándolos enfriar sobre las obras en escayola y eliminándolos una vez gelificados (Anzani, 2008).

Esta investigación estudia el protocolo más adecuado para aplicar los geles rígidos en caliente sobre probetas de piedra, intentar no dejar residuos y verificar que en las zonas tratadas no exista ningún riesgo microbiológico. El primer gel escogido fue el agar que posteriormente fue comparado con otros geles usados en restauración de obras de arte como el Klucel, el HEC, el Carbogel, la goma xantano y la goma gellan.

Materiales y métodos

Materiales

Para esta investigación se utilizaron diferentes soportes inorgánicos porosos. En primer lugar, se escogió la piedra caliza «pierre de Migné» para realizar parte de las pruebas ya que posee una porosidad cerrada y sus poros son de talla pequeña. Por lo tanto, constituye un buen material para averiguar si el gel agar deja residuos sobre la superficie. La piedra de Migné posee una distribución de poros monomodal y una porosidad accesible al agua bastante elevada (31%). Sus características son las siguientes (Dochez, 2011: 8):

Tabla 1. Características de la piedra de Migné utilizada

Nombre	Migné
Dimensión (L x l x h) (cm ³)	10 x 5 x 10
Origen	Francia
Tipo	Caliza
Porosidad (%):	31
B (Velocidad unidireccional de progresión de la franja húmeda) cm/h ^{0,5}	6,5
W (coeficiente de absorción capilar) (kg/m ² .h ^{0,5})	10,6
Diámetro medio de los poros (µm)	0,6

En segundo lugar, se escogió el ladrillo holandés del programa EC-FP6 DESALINATION. Fue elegido porque tiene una alta porosidad y sus poros son grandes. Por consiguiente, es un buen material para averiguar si el gel dejar residuos una vez eliminado. Estos ladrillos tienen una distribución de poros monomodal y una porosidad bastante alta y accesible al agua en vacío (35,5%). Sus características se muestran a continuación (Dochez, 2011: 8):

Tabla 2. Características de los ladrillos holandeses

Nombre	«Fired clay Brick»
Dimensión (L x l x h) (cm ³)	10 x 5 x 10
N48 porosidad 48h (%):	33,5
Nt (MIP) porosidad (%):	29,3
B (velocidad unidireccional de progresión en la franja de humedad) cm/h ^{0,5}	8
W (Coeficiente de absorción capilar) (kg/m ² .h ^{0,5})	20
Diámetro medio de los poros (µm)	7

Por último, se fabricaron unas probetas en yeso Molda 3 Normal de la marca Formula (Saint Gobain). La composición química del yeso es sulfato cálcico dihidratado CaSO_{4-1/2}H₂O. La relación de la mezcla de yeso en agua/peso fue 100/65.

Para esta investigación se utilizó el agar bacteriológico de Fisher Scientific (Fisherbrand). El agar o agar-agar es un polisacárido compuesto por agarosa y agarpectina. Este fitocoloide es extraído de algas rojas. La agarosa es un polímero lineal compuesto por una secuencia alterna

llamada agarobiosa (D-galactosa y 3,6- α -anhidro-L-anhidrogalactopiranososa) con uniones de hidrogeno entre las moléculas de los polímeros. La agarpectina por su lado está compuesta por la misma estructura que la agarosa, pero con más grupos ácidos (sulfato, piruvato, glucuronato), lo que le confiere peores propiedades gelificantes. El proceso de gelificación del agar empieza con la formación de simples hélices unidas por uniones de hidrógeno que producen dobles hélices simétricas y asimétricas. Ambas uniones forman posteriormente una macro redícula con cavidades y capilares por donde circulan libremente los líquidos o moléculas de agua. Los geles se forman a partir del 1 % (peso/volumen) aproximadamente, así que pueden contener una gran cantidad de moléculas de agua u otras disoluciones moviéndose libremente por la macro-redícula.

El agar se preparó al baño maría en un *Memmert basic* modelo Bain-marie WNB 7-45 a una temperatura de 90°C. Este proceso se realizó dos veces para dejar menos residuos. El gel se aplicaba sobre la superficie de las probetas a 38°C mediante una jeringuilla, se esperaba a que el gel enfriara y gelificara, y por último, se eliminaba arrancándolo con la mano. Para observar si existían residuos sobre la piedra, se utilizaron diferentes lupas binoculares, con las que podíamos fotografiar la superficie de las probetas de piedra antes y después de la aplicación del gel rígido de agar. Fueron usados los microscopios estereoscópicos Leica MZ16 con luz SCHOTT KL 1500 LCD y Leica Wild M10 con luz Schott KL 2500 Led.

Posteriormente, para los test microbiológicos, se utilizó una estufa incubadora Binder BD 115 que mantiene una temperatura constante para el crecimiento de microorganismos.

Aparte del gel agar, se fabricaron también geles polisacáridos con diferentes proporciones (% peso/volumen) según la densidad que se deseaba de Klucel G (3 %) comprada en Stouls, Hydroxyl-cellulose (HEC al 2,5 %) de FLUKA, Carbogel (0,5 %) de CTS, goma Xantana (1 %) proveniente de Xanthomonas Campestris comprada en SIGMA-ALDRICH y goma gellan o también llamada Kelcogel (2,5 %) de CTS.

Métodos

Optimización de las condiciones de aplicación del gel sobre piedra: temperatura y porcentaje de gelificación del gel agar.

En primer lugar, se estudió el comportamiento del gel en función de su concentración y temperatura. Porque cada gel, dependiendo de la marca y procedencia, tiene una temperatura de gelificación diferente. El objetivo era, por tanto, conocer la temperatura óptima de aplicación del gel sobre una superficie de piedra porosa para dejar la menor cantidad de residuos de gel. Para ello, se estudió que el gel estuviera ligeramente fluido o líquido para aplicarlo con facilidad, pero a la vez denso para no dejar residuos una vez se eliminara. Se realizaron diferentes pruebas para averiguar la temperatura de gelificación del gel agar de Fisher. Se prepararon diferentes concentraciones de gel agar en agua destilada del 2%, 2,5% al 5% (peso/volumen), para saber si la concentración influía en la temperatura de gelificación. Posteriormente, se vertió una gota (50 μ l) de gel con ayuda de una micro pipeta (Eppendorf), a diferentes temperaturas (de 45 a 34°C) medidas con un termómetro electrónico (Testo 925) sobre una hoja transparente (Figura 1) y se midió el área de cada gota con ayuda del programa Archimed que está asociado a una cámara de video del microscopio Leica MZ16 con luz SCHOTT KL 1500 LCD. Posteriormente, se hizo lo mismo con el resto de geles que se deseaba estudiar: hidroxipropilcelulosa (Klucel), hidroxietilcelulosa (HEC), Carbogel, goma xantana y goma gellan (Figura 1).

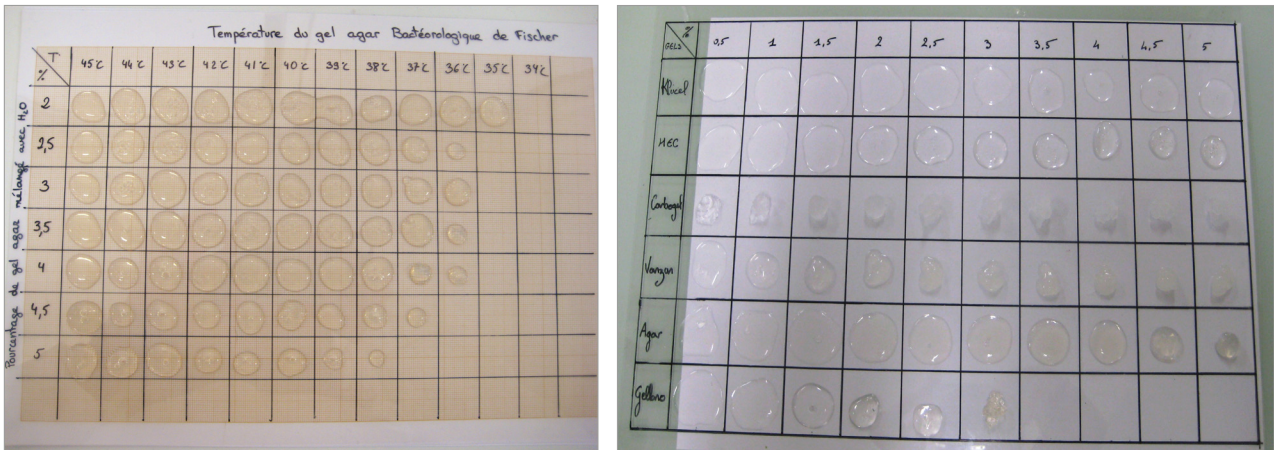
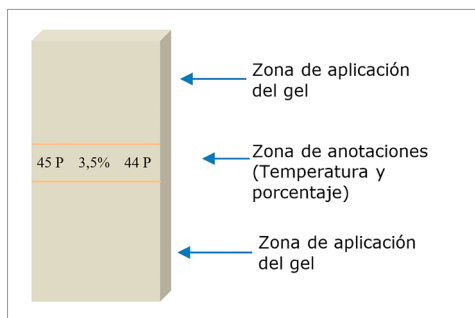


Figura 1. A la izquierda, fotografía del conjunto de gotas de gel agar a diferentes temperaturas y concentraciones; a la derecha, una comparativa de diferentes geles con diferentes concentraciones. Fotografía: Alicia de Lera.

Preparación de probetas

En segundo lugar, se prepararon las probetas pétreas (piedra caliza de *Migné* y ladrillo holandés) cortándolas en paralelepípedos de 4,5 x 10 x 1 cm cada una, dejándolas secar dentro de una estufa Memmert 100-800 a 50°C y posteriormente, sacándolas de ésta para que adquiriesen la temperatura ambiente antes de ser utilizadas. A continuación, se referenciaron y se depositaron dos geles con la misma concentración, pero a diferente temperatura, aplicados con pincel o jeringuilla (Figuras 2 y 3). El gel, se dejó enfriar sobre la piedra y se retiró tras 15-20 minutos. Cada probeta fue observada con lupa binocular y con luz reflejada para observar los posibles restos de gel.

Posteriormente, se prepararon unas probetas de yeso. En el centro se manchó con ayuda de un aerógrafo, un cuadrado con polvo de la catedral de Chartres. La mitad de la mancha fue limpiada con láser. Para esto, se usó un prototipo láser de B.M. Industrie. La frecuencia utilizada fue de 6 Hz, la energía de salida 900 mJ y la densidad de energía 318 mJ/cm². A continuación, se compararon



◀ **Figura 2.** Esquema de la separación realizada sobre la probeta para separar un mismo gel a diferentes temperaturas. Las anotaciones hacen referencia al porcentaje del gel y a la temperatura y modo de aplicación (45 P = 45°C y P de pincel).

▼ **Figura 3.** Conjunto de probetas sobre las cuales se ha depositado el gel agar al 3,5 % a diferentes temperaturas (de 45 a 34°C). Fotografía: Alicia de Lera.





Figura 4. Probeta de yeso con tres tipos de limpieza. La mitad superior fue limpiada con láser, a la izquierda se observa el gel de agar y a la derecha la atapulgita. Ambos se dejaron secar. Fotografía: Alicia de Lera.

el agar aplicado en caliente (38°C, 3,5%) y la atapulgita/agua (20:40). Se dejaron secar y de esta manera se pudo comparar estos métodos de limpieza (Figura 4).

Por último, se prepararon unas probetas de piedra caliza *Migné* y yeso sobre las cuales, se compararon diferentes tipos de geles. Las probetas tenían las mismas dimensiones que las utilizadas con anterioridad. En las de *Migné*, se dibujaron tres cuadrados para poder depositar un gel y tener tres puntos de referencia a la hora del estudio fotográfico con la lupa binocular, antes y después de la aplicación del gel. En cada probeta se vertía el mismo gel durante 20 minutos y luego se retiraba (Figura 5 a). Para las probetas de yeso, se dividieron en tres zonas y en cada una tenía un gel diferente (Figura 5 b). Los geles comparados fueron klucel al 3%, HEC al 2,5%, Carbogel al 0,5%, goma Xantana al 1%, agar-agar al 3,5% y goma gelano al 2,5%.

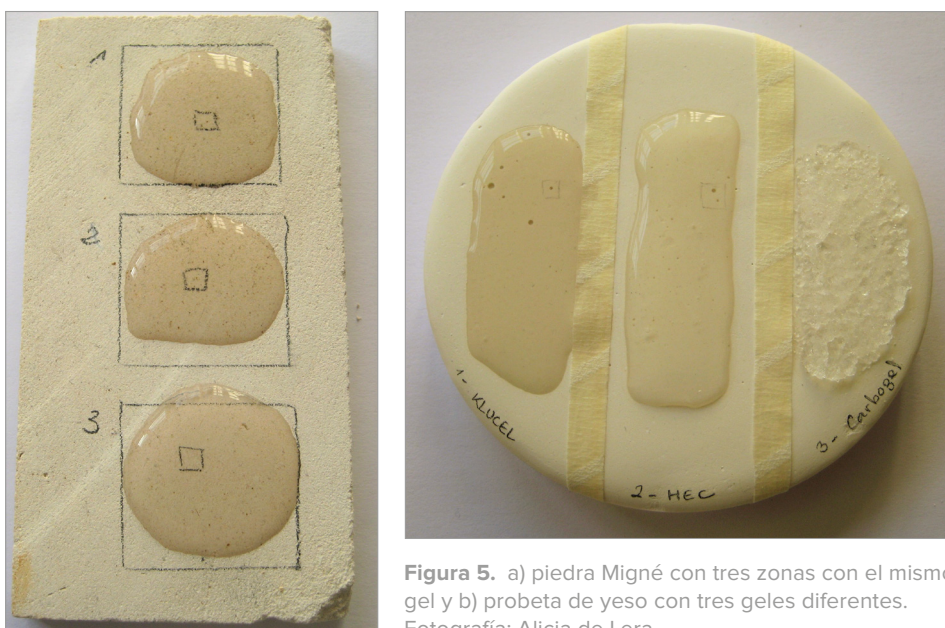


Figura 5. a) piedra Migné con tres zonas con el mismo gel y b) probeta de yeso con tres geles diferentes. Fotografía: Alicia de Lera.

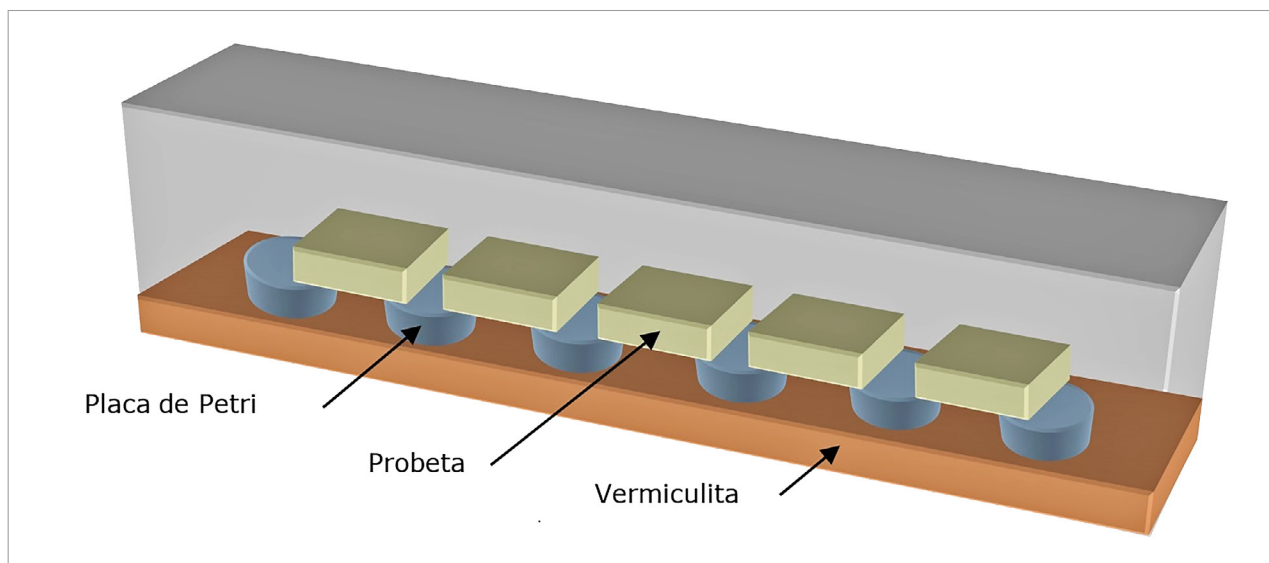


Figura 6. Esquema del montaje para la prueba microbiológica. En marrón, la capa de vermiculita, en azul las cajas de plástico para separar las muestras de la vermiculita y en beige, las muestras ya tratadas con el gel de agar.

Test microbiológico

En estos últimos años, es frecuente utilizar los geles polisacáridos rígidos en el mundo de la restauración de obras de arte en piedra, frescos, etc. La mayoría de los profesionales de este campo se hacen la misma pregunta de si existe o no, un riesgo de desarrollo microbiológico después del uso del agar; ya que este gel polisacárido se utiliza en alimentación y en cultivos microbiológicos, pudiendo causar degradaciones en la obra restaurada. No obstante, por el momento no se han realizado muchos test microbiológicos para evaluar el riesgo de este método de limpieza y, por esta razón, se puso en marcha un protocolo para verificar que no existía ningún residuo de gel, ni ningún riesgo de desarrollo fúngico.

La prueba microbiológica consistió en primer lugar en preparar una caja de plástico con una capa de vermiculita humedecida con 50 ml de agua destilada para crear posteriormente el 100% de humedad relativa. Posteriormente, se introdujeron 5 probetas de cada material tratado y una sin tratar, sobre unas placas de Petri que evitaban el contacto directo de éstas con la vermiculita (Figura 6). Por último, la caja se cerró y se introdujo cerrada en un horno-incubadora a 24°C durante tres o cuatro semanas. La muestra de control servía para observar la diferencia en el crecimiento de los microorganismos entre una muestra no tratada y una tratada con agar-agar. No se añadieron microorganismos en las cajas. Las probetas una vez fueron sacadas de la incubadora se observaron con la lupa binocular y un microscopio óptico para evaluar e identificar los posibles microorganismos que pudieran crecer sobre la superficie de las probetas.

Protocolo para las observaciones microbiológicas

Para la identificación de los microorganismos que crecen en la superficie de las muestras se siguió el siguiente protocolo:

En primer lugar, la manipulación de las probetas se realizó en una campana de flujo laminar para reducir al máximo la contaminación exógena. La zona de trabajo se limpió y se esterilizó con alcohol, manteniendo el área estéril con ayuda de una llama de gas propano. Las pinzas y las tijeras también se esterilizaron con etanol.



Figura 7. Dos probetas de piedra caliza Migné. A la izquierda está la probeta sin tratar y a la derecha la probeta tratada con agar. El color más oscuro corresponde a la presencia de microorganismos. Fotografía: Alicia de Lera.

En segundo lugar, sobre un portaobjetos de vidrio, se colocó una gota de un tinte compuesto por lactofenol y azul C4B. Éste tiene la propiedad de teñir de azul las células fúngicas vivas y facilitar la identificación de los microorganismos. Posteriormente, se cortaron trozos de celo Scotch® Crystal que se pegaron sobre la superficie de las probetas y después se colocaron sobre la gota de lactofenol. Otra lámina de cristal se colocó sobre este conjunto teniendo cuidado de no dejar ninguna burbuja de aire.

Por último, se pusieron las láminas de cristal en un microscopio óptico para identificar los posibles microorganismos.

Resultados

Los resultados de las pruebas de incubación revelaron que tras dos días a 24°C y 100% de humedad relativa, algunos microorganismos empezaron a invadir pequeñas áreas en la superficie de algunas probetas. A partir de una semana, los microorganismos aparecieron sobre las zonas donde no se observaban residuos, y después de un mes, el crecimiento de hongos se apreció sobre toda la superficie donde se había aplicado el gel. Por lo tanto, esta prueba permitió demostrar que, a pesar de no ver residuos de gel a simple vista y con lupa binocular, el tratamiento con agar dejaba y deja material en la superficie de las muestras (Figura 7).

La observación de las probetas con el microscopio óptico, ayudó a identificar los diferentes microorganismos que crecen sobre los diferentes materiales (Tabla 3). Los hongos que aparecieron más habitualmente y en mayor cantidad sobre la piedra caliza, el ladrillo y el yeso son el *Penicillium sp.* y el *Cladosporium sp.* Asimismo, se constató que sobre la piedra Migné también apareció el *Aspergillus sp.* y sobre el ladrillo, el *Acremonium sp.* Por otra parte, sobre las probetas limpiadas con atapulgita, el crecimiento de microorganismos fue muy inferior a las tratadas con agar. Estos resultados prueban que el tratamiento con el gel de agar favorece el desarrollo de diferentes microorganismos. Además, los resultados obtenidos también demuestran que el tipo de microorganismos que se desarrollan depende de la naturaleza del soporte.

Tabla 3. Microorganismos encontrados en las superficies porosas inorgánicas, incubadas durante 4 semanas

	Piedra Migné Agar	Ladrillo Agar	Yeso Agar	Yeso Atapulgita
Probetas	<i>Penicillium sp.</i> +	<i>Penicillium sp.</i> ++	<i>Penicillium sp.</i> ++	<i>Penicillium sp.</i> –
	<i>Cladosporium sp.</i> ++		<i>Cladosporium sp.</i> ++	<i>Cladosporium sp.</i> –
	<i>Aspergillus sp.</i> ++	<i>Acremonium sp.</i> +/++	<i>Alternaria sp.</i> –	<i>Aspergillus sp.</i> +
		<i>Chaetomium sp.</i> –	Chlamydo-spore –	<i>Botrytis sp.</i> +
			<i>Ulocladium sp.</i> –	
Probeta no tratada	<i>Aspergillus sp.</i> –		<i>Aspergillus sp.</i> +	
	<i>Penicillium sp.</i> –		<i>Botrytis sp.</i> –	

Leyenda: – pocos residuos, + bastantes residuos, ++ muchos residuos.

Estos resultados evidencian el peligro de desarrollo microbiológico tras la aplicación del gel agar en estado semilíquido. Sin embargo, existen otro tipo de geles muy utilizados en restauración de obras de arte. Por lo tanto, se decidió realizar una comparativa del uso de otros geles sobre piedra caliza y posteriormente sobre yeso. Los geles seleccionados fueron el klucel (3%), el HEC (2,5%), el Carbogel (0,5%), la goma Xantana (1%), el Agar (3,5%) y la goma gellan (2,5%). Este estudio servía para averiguar si su aplicación favorecía el desarrollo de diferentes hongos o no. Se sacaron fotos antes, durante y después de la aplicación de los geles. Además, se realizaron fotografías con luz ultravioleta (365 nm) para detectar la presencia de posibles residuos de geles (Figura 8). Se observó que todas las zonas tratadas con geles parecían tener residuos, excepto en las del gel agar y de la goma gellan. Para el klucel y el HEC, la fluorescencia era grande y no sólo eso, tras 3 semanas de incubación, las probetas mostraron un oscurecimiento de la superficie muy difícil de eliminar. Los geles mancharon la piedra creando unas aureolas en las zonas donde se había aplicado el gel. No obstante, este oscurecimiento no parecía ser un ataque fúngico a simple vista. En las áreas donde se había aplicado la goma Xantana, el agar y la goma gellan, parecían limpias, sin embargo, tras una semana de incuba-

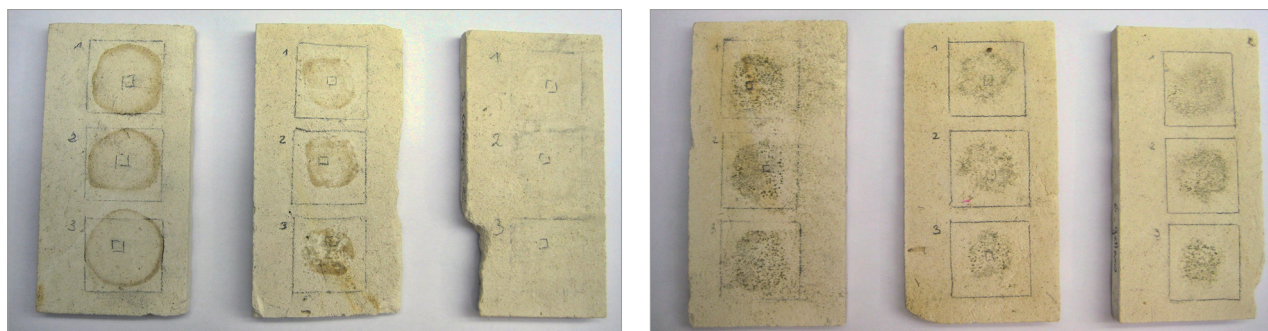


Figura 8. Probetas de piedra caliza *Migné*, tratados con diferentes geles e incubados de la misma manera durante 3 semanas. De derecha a izquierda: Klucel, HEC, Carbogel, Goma Xantana, agar y goma gelano. Los tres primeros de la izquierda presentan manchas y a la derecha, se observa una contaminación fúngica. Fotografía: Alicia de Lera.

ción, aparecieron los primeros microorganismos y después de un mes, exactamente en el mismo sitio donde se habían aplicado los geles, se apreció un desarrollo fúngico.

Con un microscopio óptico de transmisión se estudiaron los microorganismos que crecían sobre las superficies de estas probetas. Se constató que los geles que producen un menor desarrollo microbiológico eran el HEC y el carbogel. En las probetas tratadas con Goma Xantana, agar y goma gellan predominaban el *Aspergillus sp.* y el *Acremonium sp.* (Tabla 4). Por lo tanto, estos tres hidrocoloides tienen el mismo riesgo de provocar un ataque fúngico si las condiciones de temperatura y humedad relativa (HR) son idóneas para su desarrollo. Esto demuestra también que los residuos de agar y de goma gellan permanecen dentro de los poros de la piedra y no son visibles con luz ultravioleta.

Tabla 4. Contaminación biológica en probetas de piedra caliza de Migné incubadas 4 semanas

Klucel	HEC	Carbogel	Xantana	Agar	Gellan
<i>Aspergillus sp.</i>	<i>Aspergillus sp.</i>	<i>Aspergillus sp.</i>	<i>aspergillus sp.</i>	<i>Aspergillus sp.</i>	<i>Aspergillus sp.</i>
-	+	+	++	++	++
<i>Acremonium sp.</i>	<i>Acremonium sp.</i>	<i>Acremonium sp.</i>		<i>Acremonium sp.</i>	<i>Acremonium sp.</i>
+	+	+		+	+
<i>Penicillium sp.</i>	<i>Penicillium sp.</i>	<i>Penicillium sp.</i>	<i>Penicillium sp.</i>	<i>Sporothrix sp.</i>	<i>Sporothrix sp.</i>
-	-	-	-	+	+
<i>Cladosporium sp.</i>			<i>Cladosporium sp.</i>	<i>Cladosporium sp.</i>	
-			+	-	
<i>Geomyces sp.</i>		<i>Alternaria sp.</i>			
-		-			

Leyenda: - pocos residuos, + bastantes residuos, ++ muchos residuos.

Por último, se aplicaron los mismos geles sobre yeso. Las probetas, como se ha mencionado anteriormente, fueron divididas en tres partes sobre las que se vertieron los geles (Figura 5b). Posteriormente, se eliminaron y se constató que la goma Xantana y el HEC eran difíciles de quitar; por lo tanto, quedaron pequeños restos adheridos a la superficie. A continuación, las probetas fueron observadas con una lámpara ultravioleta que ponía en evidencia los restos de los geles (Figura 9).

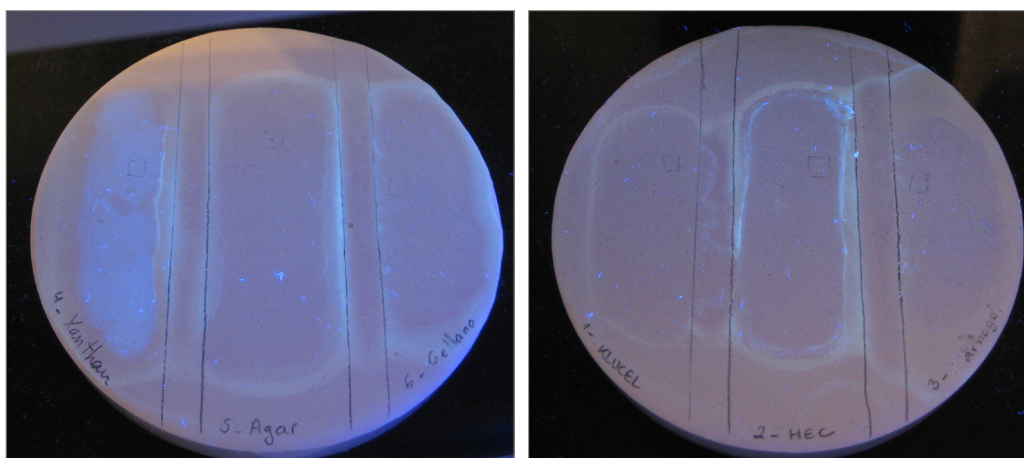


Figura 9. Fotografías con luz ultravioleta de las probetas de yeso, tras la aplicación de los geles. De izquierda a derecha: Klucel, HEC, Carbogel, Xantana, Agar y gellan. Fotografía: Alicia de Lera.

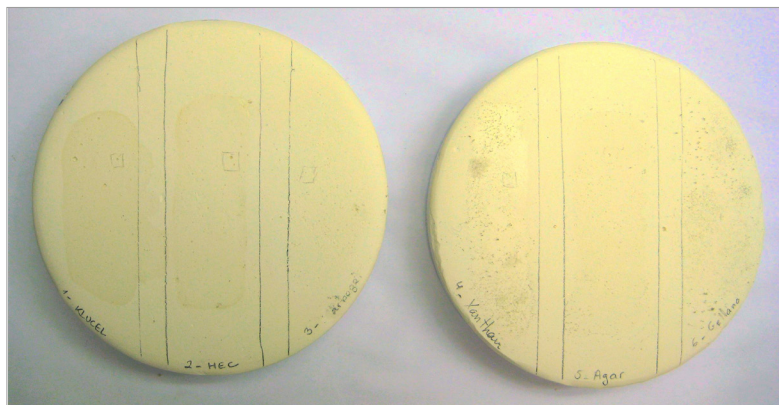


Figura 10. Probetas de yeso tratadas con diferentes geles e incubadas durante 4 semanas. Fotografía: Alicia de Lera.

No obstante, si bien con luz natural no se apreciaban residuos de Agar y goma gellan, con luz ultravioleta se veían aureolas. Pero, se desconocía si éstas podían ser producidas por la luminiscencia de las partículas constitutivas del yeso o debido a un posible gel residual. Posteriormente, estas probetas se introdujeron en la incubadora a 24°C y 100% HR durante 4 semanas. Transcurrido este tiempo, se procedió a observarlas con microscopio óptico.

Fueron detectadas varias zonas con un desarrollo microbiológico. Las áreas tratadas con Xantana y Gellan estaban claramente invadidas por *Aspergillus sp* y *Cladosporium sp* que pigmentan la superficie; mientras que las de Klucel y HEC tenían manchas sin un desarrollo microbiológico (Figura 10 y Tabla 10). La zona tratada con agar, aunque a simple vista pareciese que no tenía un desarrollo fúngico, bajo observación con el microscopio óptico mostró la presencia de *Aspergillus sp* y *Cladosporium sp.*, pero en menor cantidad que con Xantana y Gellan.

Tabla 5. Contaminación biológica de las probetas en yeso incubadas 4 semanas

Klucel	HEC	Carbogel	Xantana	Agar	Gellan
		<i>Aspergillus sp.</i>	<i>Aspergillus sp.</i>	<i>Aspergillus sp.</i>	<i>Aspergillus sp.</i>
		–	++	+	++
<i>Cladosporium sp.</i>	<i>Cladosporium sp.</i>	<i>Cladosporium sp.</i>	<i>Cladosporium sp.</i>	<i>Cladosporium sp.</i>	<i>Cladosporium sp.</i>
–	–	–	–	+	–
	<i>Penicillium sp.</i>		<i>Penicillium sp.</i>	<i>Penicillium sp.</i>	
	–		–	+	
<i>Acremonium sp.</i>	<i>Acremonium sp.</i>			<i>Acremonium sp.</i>	<i>Acremonium sp.</i>
–	+			–	+

Leyenda: – pocos residuos, + bastantes residuos, ++ muchos residuos.

Conclusión

En primer lugar, esta investigación trató de conocer el protocolo más adecuado para verter el gel de agar en caliente sobre materiales pétreos de piedra caliza, ladrillo y yeso sin dejar residuos aparentes. Se llegó a la conclusión de que la mejor temperatura y concentración para esto era de 38°C al 3,5% en agua destilada. En segundo lugar, se realizó el mismo estudio, pero con diferentes geles usados en restauración de obras de arte, concluyendo que los mejores porcentajes de aplicación

para el klucel era el 3%, para el HEC el 2,5%, para el Carbogel el 0,5%, para la goma Xantana el 1% y para la goma gelano el 2,5%.

No obstante, esta investigación tenía como objetivo principal averiguar si la aplicación de estos geles dejaba residuos y si éstos podían provocar un ataque microbiológico. Tras varias semanas en la incubadora, los resultados demostraron que los restos de agar-agar, aunque sean ínfimos e inapreciables, provocan el crecimiento de microorganismos. La goma xantana y la goma gellan causan el mayor crecimiento fúngico de todos, mientras que el klucel, HEC y carbogel son los que menos microorganismos originan. Cabe señalar que los restos de gel de agar y goma gellan en la piedra *Migné* no son siempre visibles a simple vista, con microscopio o luz ultravioleta. Según las pruebas microbiológicas realizadas, existen residuos que provocan el crecimiento de algunos microorganismos como el *Aspergillus sp.* En esta piedra, el klucel, el HEC y el carbogel provocan un menor crecimiento fúngico que la goma xantana, el agar y la goma Gellan. No obstante, los derivados celulósicos manchan la superficie y, además, existe también un pequeño riesgo de crecimiento microbiológico. La goma Xantana es la que peor resultados obtiene en este estudio en ambos materiales. En la superficie de las probetas de yeso, el gel de Klucel, HEC y Carbogel, no provocan o muy poco, el desarrollo de los microorganismos. Sin embargo, los restos del gel agar, de la goma gellan y sobre todo de la goma xantana provocan el crecimiento de microorganismos que colorean la superficie de las probetas. Estos resultados también varían en función de la naturaleza del sustrato y de las sustancias presentes en la superficie de las obras. Por lo tanto, si se desea realizar una limpieza con hidrocoloides sobre materiales pétreos, hay que ser conscientes que existen residuos que permanecen sobre la superficie de la obra, que pueden causar un desarrollo microbiológico si no se conservan a una temperatura y humedad relativa óptimas.

Agradecimientos

Esta investigación no hubiera sido posible sin la financiación de la Beca postdoctoral DKR del Gobierno Vasco y la ayuda y material del laboratorio del LRMH de París. Quiero agradecer a todos mis compañeros, el apoyo y todos los buenos momentos que pasamos juntos en este laboratorio.

Bibliografía

- ANZANI, M. *et al.* (2008): *Gel rigidi di Agar per il trattamento di pulitura di manufatti in gesso*. Quaderni Cesmar 7. Padua: Il Prato.
- ARAKI, C. (1956): «Structure of the agarose constituent of agar-agar». *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 29, pp. 543-4.
- BOTTI *et al.* (2011): «Evaluation of cleaning and chemical stabilization of paper treated with a rigid hydrogel of gellan gum by means of chemical and physical analyses». Lisboa: ICOM CC.
- BOTTON, B. *et al.* (1990): *Moisissures utiles et nuisibles, importance industrielle*. Paris: MASSON (2ed).
- CAMPANI, E. *et al.* (2007): *L'uso di Agarosio e Agar per la preparazione di «Gel Rigidi»*, Quaderno n.º 4, Cesmar 7. Saonara (PD): Il prato.
- DE LERA, A. (2009): «Método experimental para consolidar fibras de papel (1ª parte)». *Ge-conservación*, (0), pp. 177-188. Disponible en: www.revista.ge-iic.com [Consulta: 01 de diciembre de 2021].
- DOCHEZ, S. (2011): *Influence d'un rétenteur d'eau et d'un agrégat léger sur le comportement rhéologique et l'efficacité de compresses de dessalement à base de cellulose*. Paris: LRMH, p. 8.

- FOORD, S. A. y ATKINS, E. D. T. (1989): «New X-ray diffraction result from agarose: extended single helix structure and Implications for gelation mechanism». *Biopolymers*, 28, pp. 1345-65.
- IANNUCELLI, S. y SOTGIU, S. (2010): «La pulitura superficiale di opere grafiche a stampa con gel rigidi polisaccaridici». En: *Materiali prodotti per il restauro librario. Nuove ricerche*. Roma: Gangeni, pp.73-94.
- MATTEINI, M. y MOLES, A. (2001): *La química en la restauración*. Hondarribia: Nerea, p. 243.
- ONIONS, A. H. S., ALLSOPP, D., EGGINS, H. O. W. (1986): *Smith's Introduction to Industrial Mycology*. Londres: Ed. Edward Arnold (7ed).
- PHILLIPS G. O. y WILLIAMS P. A. (Eds.) (2000): *Handbook of hydrocolloids*. CRC Press, Woodhead Publishing Limited.
- PRAJAPATI, V. D., JANI, G. K., ZALA, B. S., KHUTLIWALA, T. A. (2013): «An insight into the emerging exopolysaccharide gellan gum as a novel polymer». *Carbohydrate Polymers*, 93, pp. 670– 678.
- RINAUDO, M. (2007): «Seaweed polysaccharides». Kalmerling JP (ed.) *Comprehensive glycoscience from chemistry to systems biology*, 2, pp. 691-735.
- REES, D. A., WELSH, E. J. (1977): «Secondary and tertiary structure of polysaccharides in solution and gels». *Angew. Chem. Int. De. Engl.* 15, pp. 214-24.
- SWIDER, J. R., SMITH, M., FUNORI (2005): «Overview of a 300-Year-Old Consolidant». *The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works*, 44 (2), pp. 117-126. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/40025138> [Consulta: 01 de diciembre de 2021].
- VALENTÍN, N., CORTÉS, F., SÁNCHEZ, A. (1994): «La conservación de vidrieras históricas. Estudios preliminares sobre la aplicación de sistemas gelificados». *Conservación de vidrieras históricas*. Santander: Getty Conservation Institute, p. 5-15.
- WARDA, I., BRÜCKLE, A.; BEZUR, D., KUSHEL (2007): *Analysis of Agarose; Carbopol an Laponite Gel Poultices in Paper Conservation*. *Journal of the American Institute for Conservation*, 46 (3), pp. 263-279.
- WOLBERS, R. (2004): *Un approccio acquoso alla pulitura dei dipinti*. Quaderni Cesmar 7. Padua: Il prato. Disponible en: https://issuu.com/cesmar7/docs/qc7_04_agariosio_2007 [Consulta: 01 de diciembre de 2021].

Dirección científica de la publicación

Miriam Bueso Manzananas. Instituto del Patrimonio Cultural de España

Coordinación editorial y de textos

Isabel Arias Sánchez. Instituto del Patrimonio Cultural de España

Isabel Burgos Ávila. Instituto del Patrimonio Cultural de España

Alicia Rojas Osuna. Beca FormArte 2022 de Gestión Cultural en el Instituto del Patrimonio Cultural de España

Comité organizador del congreso

Miriam Bueso Manzananas. Instituto del Patrimonio Cultural de España

María Martín Gil. Instituto del Patrimonio Cultural de España

M^a José Suárez Martínez. Instituto del Patrimonio Cultural de España

Anna Vila Espuña. Fundación «la Caixa»

Comité científico

Marián del Egido Rodríguez. Física. Filmoteca Española (Madrid)

Laura Fuster López. Restauradora. Universidad Politécnica de Valencia

José Francisco García Martínez. Químico. Universidad de Barcelona

Elena Gómez Sánchez. Química. Deutsches Bergbau-Museum Bochum (Alemania)

M.^a Gertrudis Jaén Sánchez. Restauradora. Instituto Valenciano de Conservación, Restauración e Investigación (Valencia)

Alfonso Luján Díaz. Historiador del Arte. Museo del Ejército (Toledo)

Anna Lluveras Tenorio. Geóloga. Universidad de Pisa (Italia)

José Vicente Navarro Gascón. Geólogo. Instituto del Patrimonio Cultural de España (Madrid)

Núria Oriols Pladevall. Química y restauradora. Museo Nacional de Arte de Cataluña (Barcelona)

Blanca Ramírez Barat. Química y licenciada en Bellas Artes. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Madrid)

Valerio Rocco Lozano. Filósofo. Círculo de Bellas Artes (Madrid)

Marina Ruiz Molina. Restauradora. Metropolitan Museum de Nueva York (Estados Unidos)

Marta Sameño Puerto. Bióloga. Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico (Sevilla)



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CULTURA
Y DEPORTE



60
años

INSTITUTO DEL
PATRIMONIO
CULTURAL
DE ESPAÑA